Tampereen yliopisto

Vesa Surakka

RAKENNUSAUTOMAATIOJÄRJESTELMÄN JA PILVIJÄRJESTELMÄN VÄLINEN INTEGRAATIO

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Diplomityö
Helmikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Vesa Surakka: Rakennusautomaatiojärjestelmän ja pilvijärjestelmän välinen integraatio
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Automaatiotekniikka
Helmikuu 2021

Tässä työssä tutkitaan menetelmiä rakennusautomaatiojärjestelmän ja pilvijärjestelmän välisen integraation toteuttamiseen. Tutkimuksen päätavoitteena on löytää järjestelmäriippumaton ja skaalautuva menetelmä, jolla rakennusautomaatiojärjestelmän sisältämä informaatio voidaan siirtää pilvijärjestelmään jatkokäyttöä varten.

Rakennusautomaatiojärjestelmät sisältävät olennaista informaatiota kiinteistötekniikan tilasta ja prosessien toiminnasta. Pilvijärjestelmät mahdollistavat erilaisia toimintoja, kuten erilaisista tietolähteistä kerättävän tiedon käsittelyä ja analysointia. Suurten kiinteistömassojen seurantaan ja optimointiin pilvijärjestelmät tarjoavat keskitetyn alustan. Rakennusautomaatiojärjestelmissä on perinteisesti käytetty ja käytetään osittain edelleen järjestelmäkohtaisia etähallintajärjestelmiä, joiden käyttö on tehotonta keskitettyyn järjestelmään verrattuna. Pilvijärjestelmien mahdollistama kiinteistöjen keskitetty seuranta ja ohjaus lisäävät toiminnan tehokkuutta huomattavasti.

Työ toteutetaan tutkimalla aiheeseen liittyvää teoriaa sekä nykypäivän tekniikoita ja toteutuksia internetin ja kirjallisuuden avulla. Merkittävänä osana tutkimusta tässä työssä haastatellaan järjestelmäintegraatioon teknologioita tarjoavia organisaatioita sekä käytännön toteutuksia tehneitä palveluntarjoajia.

Tutkimusten perusteella nykypäivänä integraatiomenetelmien keskeisimpiä ratkaisuja ovat yhdyskäytävälaitteet, etäyhteyslaitteet sekä ohjelmatason ratkaisut. Integraatiomenetelmien teknisen käytettävyyden ja kustannusten vertailun perusteella kustannustehokkain menetelmä on ohjelmatason ratkaisu. Integroitavien järjestelmien erilaiset lähtökohdat asettavat vaatimuksia integraatiomenetelmän käytölle, joten menetelmän käyttö tulee tarkastella tapauskohtaisesti. Ohjelmatason ratkaisu mahdollistaa järjestelmäintegraation toteuttamisen ilman fyysisiä yhteyslaitteita. Useimmissa rakennusautomaatiojärjestelmissä ohjelmatason ratkaisu ei ole vielä nykypäivänä mahdollista, ratkaisun mahdollistamien hyötyjen vuoksi automaatiojärjestelmien voidaan kuitenkin ennustaa kehittyvän siihen suuntaan, että tämän tyyppiset ratkaisut ovat mahdollisia lähitulevaisuudessa.

Tämän työn johtopäätöksenä suositellaan ensisijaisesti käyttämään järjestelmäintegraation toteuttamiseksi rakennusautomaatiojärjestelmiä, joissa ohjelmatason ratkaisu on integroituna laitteeseen. Mikäli ohjelmatason ratkaisun käyttäminen ei ole mahdollista, suositellaan käytettävän menetelmän valitsemista tapauskohtaisesti, sekä suunnittelemaan toteutus lähtökohdat huomioon ottaen.

Avainsanat: rakennusautomaatiojärjestelmä, pilvijärjestelmä, integraatio, protokolla

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-ohjelmalla.

ABSTRACT

Vesa Surakka: Integration of a building automation system and a cloud system
Master of Science Thesis
Tampere University
Automation Engineering
February 2021

In this thesis, methods for implementing the integration of a building automation system and a cloud system are investigated. The main goal of the study is to find a system-independent and scalable method by which the information contained in a building automation system can be transferred to a cloud system for further use.

Building automation systems contain essential information about the state of building technology and the operation of processes. Cloud systems enable a variety of functions, such as processing and analyzing data collected from a variety of data sources. Cloud systems provide a centralized platform for monitoring and optimizing large real estate masses. Building automation systems have traditionally used and continue to use, in part, system-specific remote management systems, the use of which is inefficient compared to a centralized system. Centralized monitoring and control of properties enabled by cloud systems will significantly increase operational efficiency.

The work is carried out by studying the related theory and modern techniques and implementations with the help of the Internet and literature. As a significant part of the research in this work, organizations providing technologies for system integration as well as service providers who have made practical implementations are interviewed.

Based on research, the most important solutions for integration methods today are gateway devices, remote connection devices and program-level solutions. Based on the technical usability and cost comparison of integration methods, the most cost-effective method is a program-level solution. The different starting points of the systems to be integrated set requirements for the use of the integration method, so the use of the method must be considered on a case-by-case basis. The program-level solution enables the implementation of system integration without physical connection devices. In most building automation systems, a program-level solution is not yet possible today, however, due to the benefits of the solution, automation systems can be predicted to evolve in the direction that this type of solution is possible soon.

As a conclusion of this work, it is recommended to primarily use building automation systems with a program-level solution integrated in the device to implement system integration. If it is not possible to use a program-level solution, it is recommended to choose the method to be used on a case-by-case basis, and to plan the implementation considering the starting points.

Keywords: building automation system, cloud system, integration, protocol

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämän diplomityön tarkoituksena oli tehdä työn toimeksiantajana toimivalle EcoReal Oy:lle tutkimustyötä kiinteistöjen keskitetyn hallintajärjestelmän toteuttamista varten.

Kiitän EcoReal Oy:tä ja etenkin teknologiajohtaja Antti Mäkeä mielenkiintoisesta työn aiheesta sekä ohjaavista kommenteista työn aikana.

Kiitän työn tarkastajina toimineita Tampereen yliopiston professori (emeritus) Hannu Koivistoa ja professori Matti Vilkkoa erinomaisista työn rakenteeseen sekä yleisesti kirjalliseen osuuteen liittyvistä kommenteista.

Erityisesti kiitän perhettäni kaikesta työn tekemiseen saadusta ajasta ja tuesta.

Tampereella, 6.2.2021

Vesa Surakka

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO ... 1
1.1 Työn tausta ... 1
1.2 Työn tavoitteet ja rajaus ... 2
1.3 Työn rakenne ... 3
2. TUTKIMUSMENETELMÄT ... 5
2.1 Tutkimushaastattelu ... 5
2.2 Asiantuntijahaastattelu ... 5
3. RAKENNUSAUTOMAATIOJÄRJESTELMÄ ... 7
3.1 Järjestelmän rakenne ... 8
3.1.1 Hallintotaso ... 9
3.1.2 Automaatiotaso ... 9
3.1.3 Kenttätaso ... 10
3.2 Protokollat ... 10
3.2.1 Modbus ... 10
3.2.2 BACnet ... 12
3.2.3 KNX ... 13
3.2.4 M-bus ... 14
3.2.5 OPC UA ... 15
3.3 Rakennusautomaation kehitys ... 17
3.4 IoT-tekniikat rakennusautomaatiossa ... 19
3.4.1 Nykypäivän arkkitehtuurit ... 20
3.4.2 Konttipohjainen arkkitehtuuri ... 22
3.5 IoT protokollat ... 24
3.5.1 MQTT ... 24
3.5.2 AMQP ... 24
3.6 Pilvipalvelut ... 25
3.7 Tietoturva ... 26
3.8 Järjestelmän valvonta ja etäkäyttö ... 27
4. JÄRJESTELMÄINTEGRAATIO ... 30
4.1 Integraation periaatteet ... 30
4.2 Toteutuksen lähtökohdat ... 31
4.3 Yhdyskäytävämalli ... 32
4.3.1 Azure IoT Edge gateway ... 33
4.3.2 WRM 247+ ... 33
4.4 Etäyhteyslaite ... 34
4.4.1 Tosibox ... 35
4.5 Ohjelmatason ratkaisu ... 36
4.5.1 Tosibox Lock for Container ... 37
4.5.2 Tosibox Readiness ... 37
4.5.3 Azure IoT Edge runtime ... 38
4.5.4 Beckhoff IoT ... 39

5. TOTEUTETUT JÄRJESTELMÄT 41
5.1 Asiantuntijoiden haastattelut 41
5.2 Haastattelujen tulokset 42
5.3 Palveluntarjoaja A 43
5.4 Menetelmien arviointi 44
5.4.1 Kustannukset 44
5.4.2 Käytännön soveltuvuus 46
5.4.3 Kehitysnäkymät 47
5.4.4 Automaatiojärjestelmien rajaus 48
6. JOHTOPÄÄTÖKSET 50
6.1 Suunnittelu 50
6.2 Toteutus 51
7. YHTEENVETO 53
LÄHTEET 55

1. JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Automaatio on nykypäivänä läsnä lähes kaikkialla. Automaatio on jo merkittävästi korvannut ihmisten tekemää työtä eri aloilla. Myös kiinteistöt ja niiden talotekniset järjestelmät toimivat nykypäivänä automaation ohjaamana. Rakennusautomaatiojärjestelmät ovat vapauttaneet kiinteistönhoitajat ja tilojen käyttäjät useilta toimenpiteiltä.

Vaikka talotekniikan perustoiminnot on täysin automatisoitu, suoritetaan taloteknisten järjestelmien valvonta ja optimointi usein ihmistyöhön perustuvien erilaisten havaintojen ja rutiininomaisten työvaiheiden kautta, jolloin inhimillisten virheiden mahdollisuus on olemassa. Automatisoimalla myös nämä työvaiheet, voidaan toiminnan luotettavuutta ja tehokkuutta parantaa huomattavasti. Automaatio ei tee ihmisille tyypillisiä inhimillisiä virheitä eikä se väsy prosessien seuraamiseen tai analyysien tekemiseen.

Erilaiset toiminnot, kuten tiettyjen ehtojen mukainen taloteknisten järjestelmien automaattinen optimointi tai kerätystä datasta tehtävät analyysit ja niihin perustuvat ohjaukset on mahdollista toteuttaa kohteen rakennusautomaatiojärjestelmään tai rakennusautomaatiojärjestelmän etähallintasovellukseen, kuten pilvijärjestelmään. Rakennusautomaatiojärjestelmissä ei tyypillisesti ole koneoppimiseen tai data-analytiikkaan liittyviä toimintoja valmiina, vaan ne tulee ohjelmoida erikseen jokaiseen järjestelmään, sen sijaan pilvijärjestelmissä tämän tyyppisiä työkaluja on tyypillisesti valmiina käytettävissä.

Mikäli valvotaan yksittäistä kiinteistöä, on valvontaan ja optimointiin liittyvät toiminnot edullista toteuttaa kiinteistön rakennusautomaatiojärjestelmään. Isommissa kokonaisuuksissa, joissa kiinteistöjä on paljon ja kiinteistöjen rakennusautomaatiojärjestelmät eivät ole yhteensopivia keskenään, on kokonaisuuden hallitseminen ja erilaiset toiminnot kustannustehokkaampaa toteuttaa käyttäen keskitettyä pilvijärjestelmää.

Tämä opinnäytetyö tehdään yritykselle, joka toimii kiinteistöalalla ja tuottaa kiinteistöjen energiatehokkuuteen liittyviä palveluja. Talotekniikan valvontapalvelut ja kiinteistöjen energiankäytön optimointipalvelut ovat yleistyneet kiinteistöalan palveluntarjoajien keskuudessa. Valvonta- ja optimointipalvelujen tarkoitus on varmistaa kiinteistöjen talotek-

nisten järjestelmien energiatehokas toiminta ja vaaditut sisäolosuhteet. Valvonnan ja optimoinnin toimenpiteet keskittyvät pääosin kiinteistöjen ilmanvaihto-, lämmitys-, ja jäähdytysjärjestelmiin.

Kohdeyrityksessä kiinteistöjen valvonta on toteutettu nykytilanteessa siten, että erillinen työntekijä tarkistaa järjestelmien toiminnan sekä energiankulutukset tietyin väliajoin. Taloteknisiä järjestelmiä seurataan kiinteistön rakennusautomaatiojärjestelmän etäyhteyden kautta, energiankulutuksia seurataan pääosin erillisen kulutusseurantajärjestelmän kautta. Nykyinen valvontamenettely on ongelmallinen ja mahdollistaa järjestelmien havaitsemattomat toimintavirheet ja suunnitelmista poikkeavan toiminnan, sekä niiden epäsuotuisat vaikutukset energiankulutukseen.

Kohdeyrityksen tavoitteena on automatisoida valvontamenettely siten, että järjestelmien suunniteltu toiminta varmistuu ja energiankulutusten poikkeamat havaitaan reaaliaikaisesti, jolloin niihin voidaan reagoida riittävän nopeasti. Samalla myös nykytilanteessa valvonta- ja optimointityön vaatimista manuaalisista työvaiheista suuri osa voidaan automatisoida.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Kohdeyrityksen tavoitteiden mukainen automatisoitu seuranta- ja optimointijärjestelmä muodostuu useista erilaisista vaiheista ja erilaisten toimintojen yhteensovittamisesta. Järjestelmän päävaiheisiin kuuluu datan lukeminen, -tallentaminen ja -analysointi sekä tarvittavien ohjaus- ja säätömuutosten toteuttaminen kiinteistöjen rakennusautomaatiojärjestelmiin. Lisäksi seuranta- ja optimointijärjestelmän tulee kyetä tuottamaan prosessien toimintaa ja poikkeamia sisältävää informaatiota käyttäjille. Valvonnassa olevia kiinteistöjä voi olla suuria määriä ja kiinteistöissä olevia rakennusautomaatiojärjestelmiä useita erilaisia. Seuranta- ja optimointijärjestelmän tulee soveltua käsittelemään keskitetysti erilaisia järjestelmiä.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia mitkä ovat parhaiten soveltuvia tekniikoita rakennusautomaatiojärjestelmän ja pilvijärjestelmän integraation toteuttamiseen erilaisissa käytännön järjestelmissä, erityisesti järjestelmäriippumattomuuden, skaalautuvuuden ja kustannustehokkuuden näkökulmasta. Tässä työssä keskityttiin tarkemmin rakennusautomaatiojärjestelmän datapisteiden lukemiseen, tässä työssä ei käsitelty luetun datan tallentamista ja jatkokäsittelyä pilvijärjestelmässä.

Tämän työn päätutkimuskysymys voidaan esittää seuraavasti:

- Mikä on kustannustehokkain, järjestelmäriippumaton ja skaalautuva menetelmä datapisteiden lukemiseen rakennusautomaatiojärjestelmästä pilvijärjestelmään?

Päätutkimuskysymykseen pyritään saamaan vastaus tutkimalla aihetta seuraavien apukysymysten avulla:

1. Löytyykö yleisimmistä rakennusautomaatiojärjestelmistä väyläprotokolla, joka mahdollistaa datan lukemisen pilvijärjestelmään?
2. Mikä on kustannustehokkain tapa muuttaa rakennusautomaatiojärjestelmän väyläprotokolla IoT-protokollaksi?
3. Onko olemassa valmiita ratkaisuja rakennusautomaatiojärjestelmän ja pilvijärjestelmän välisen integraation toteuttamiseen?

Integraatiolla tarkoitetaan tässä työssä erilaisten järjestelmien yhteensovittamista, tarkemmin automaatiojärjestelmän ja pilvijärjestelmän välistä tiedonsiirtoa. Tässä työssä järjestelmien yhteensovittamisesta käytetään myös nimitystä järjestelmäintegraatio.

1.3 Työn rakenne

Työn alussa kuvattiin tutkimusmenetelmät, joita olivat asiantuntijahaastattelut sekä erilaiset valmiiden aineistojen hankintamenetelmät.

Kolmannessa kappaleessa käsiteltiin rakennusautomaatiojärjestelmää yleisellä tasolla, järjestelmän rakenne sekä rakennusautomaation keskeisiä tiedonsiirtoprotokollia. Lisäksi tässä kappaleessa käsiteltiin IoT-tekniikan yhteyttä kiinteistötekniikkaan ja rakennusautomaatiojärjestelmään sekä teollisen internetin keskeisiä tiedonsiirtoprotokollia ja automaation tietoturvaa. IoT ja teollinen internet on keskeinen käsite kenttätason laitteiden ja pilvijärjestelmien välisessä integraatiossa, IoT on yhä enemmän esillä myös rakennusautomaatioympäristössä. Tämän kappaleen lopussa kuvattiin rakennusautomaatiojärjestelmien keskitetyn etähallinnan nykytilanne sekä rakennusautomaatiojärjestelmän ja pilvijärjestelmän integraation kehittymiseen vaikuttavia tekijöitä.

Neljännessä kappaleessa käsiteltiin järjestelmäintegraatiota yleisellä tasolla sekä kuvattiin erilaiset käytännön lähtötilanteet integraation toteuttamiselle. Lisäksi tässä kappaleessa selvitettiin erilaisia menetelmiä integraation toteuttamiseen, sekä niihin liittyviä tuotteita. Selvitysten avulla pyrittiin muodostamaan käsitys siitä, miten vastaavanlaiset ongelmat on nykypäivänä ratkaistu sekä onko tarjolla kaupallisia ratkaisuja, joita pystytään hyödyntämään integraation toteuttamiseen tässä työssä esitettyjen vaatimusten mukaisesti

Viidennessä kappaleessa esiteltiin asiantuntijahaastattelun toteutusta ja tuloksia sekä kuvattiin tyypillinen käytännön toteutus ja siinä käytetyt tiedonkeruun toteutusperiaatteet.

Tämän kappaleen lopussa vertailtiin erilaisten integraatiomenetelmien ominaisuuksia ja kustannuksia ja analysoitiin vertailun pohjalta menetelmien käytettävyyttä.

Kuudennessa kappaleessa muodostettiin tutkimusten ja vertailujen pohjalta johtopäätökset siitä, mikä on suositeltavin integraatiomenetelmä erilaisiin toteutuksiin. Lisäksi tuotiin esille suunnittelutekijöitä, joilla voidaan vaikuttaa integraation toteutuskustannuksiin. Yhteenveto tästä työstä kirjattiin erikseen viimeiseen kappaleeseen.

2. TUTKIMUSMENETELMÄT

Tässä työssä asetettuihin tutkimuskysymyksiin pyrittiin löytämään vastauksia aiheeseen liittyvän kirjallisuuden ja julkaisujen perusteella sekä tutkimalla olemassa olevia toteutuksia ja niiden käytettävyyttä esitetyn ongelman ratkaisemiseen. Käytännön toteutuksiin liittyvää, tutkimuksen kannalta olennaista tietoa pyrittiin löytämään haastattelemalla eri toteutusten ja palveluntarjoajien vastuuorganisaatioita.

2.1 Tutkimushaastattelu

Haastattelu valikoitui yhdeksi tiedonkeruumenetelmäksi, koska haastattelun avulla voidaan kerätä sellaista tutkimustietoa, jota ei ole julkisesti saatavilla. Tämän tyyppinen tieto voi olla kokemusperäistä tietoa, jota ei ole fyysisesti tallennettu tai painettu mihinkään, vaan se on saatavissa ainoastaan haastattelemalla tietyn kokemuksen omaavia henkilöitä [24, s. 12]. Tämän työn aihealue sisälsi osittain varhaisessa vaiheessa olevia teknologioita ja liiketoimintaa, joihin liittyvää tutkimusta ja julkaisuja ei ollut kattavasti saatavilla.

Haastattelu on kahden tai useamman ihmisen välistä vuorovaikutusta, vuorovaikutteisuuden takia haastattelu voi sisältää yllätyksiä tai ennalta määritettyjä keskusteluita. Yleisesti haastattelut ovat hyvä tapa tutkimustiedon keräämiseen. Toisaalta on muistettava, että haastattelun kautta saatu tieto ei aina ole totta, vaikka näin voidaan tyypillisesti olettaa. [24, s. 42, 11]

Tutkimushaastattelu on haastattelutyyli, joka on myös muunlaisen keskustelun tavoin vuorovaikutusta, lisäksi tutkimushaastattelu pohjautuu tutkimukselliseen tavoitteeseen. Arkisen keskustelun ja tutkimushaastattelun merkittävä ero on siinä, että tutkimushaastattelulla on ennalta määritetty aihe, sekä haastatteluun osallistujat on tarkoin valittu, lisäksi tutkimushaastattelussa asiantuntemus käsiteltävästä aiheesta on ennen kaikkea haastateltavalla [24, s.40-42, 46-47]. Haastattelutyyppejä on useita, erilaisiin käyttötarkoituksiin soveltuvia. Tässä työssä käytettiin asiantuntijahaastattelua.

2.2 Asiantuntijahaastattelu

Asiantuntijuus on monimutkainen ilmiö, eikä sille ole yksiselitteistä määritelmää. Asiantuntijuutta voidaan perustella eri tavoilla, kuten tieteellä, ammatilla tai instituutioilla. Yksinkertaisesti asiantuntijaksi voidaan määritellä henkilö, joka omistaa sellaista tietoa, jota on vain hyvin harvoilla, tai ei kenelläkään muulla. Oli sitten asiantuntijan valinta tehty

millä tavalla tahansa, tulee tutkijan muodostaa oma käsityksensä asiantuntijan valinnan vaikutuksesta tutkimukseen ja lopputulokseen [24, s. 214-216]. Asiantuntijahaastattelussa voidaan käyttää monia eri haastattelutyyppejä tutkimuskysymyksen ja asetelman mukaan. Tähän tutkimukseen liittyvä asiantuntijahaastattelu toteutettiin niin sanottuna avoimena haastatteluna, jossa haastattelu eteni ennalta päätetyn aihepiirin mukaisesti. [24, s. 220-221].

Erityisen tärkeää asiantuntijahaastattelussa on haastattelijan tekemä pohjatyö. Se on tärkeää ensisijaisesti siksi, että haastattelutilanteeseen voi olla vaikea päästä ja haastattelun uudelleen järjestäminen ei välttämättä ole mahdollista. Toisaalta, vaikka haastattelutilanteet ovat ainutkertaisia, haastattelijan on kuitenkin usein mahdollista palata aiheeseen myöhemmin ja esittää mahdollisia lisäkysymyksiä asiantuntijalle. Haastattelun onnistumisen kannalta hyvän vaikutuksen tekeminen haastateltavaan on tärkeää, koska hyvä vaikutus voi avata uusia kontakteja, joiden avulla tutkija löytää enemmän tietoa tutkittavasta aiheesta. Haastattelututkimukselle on tyypillistä, että ennakkoon suunniteltua haastattelusisältöä joutuu muokkaamaan haastattelun edetessä, koska vuorovaikutustilanne ei aina etene suunnitelman mukaisesti. [24, s. 221-223, 228-229].

Haastateltavien asiantuntijoiden suhtautuminen haastatteluun vaihtelee. Tutkimushaastattelujen aikana osa asiantuntijoista voi osoittaa kiinnostusta tutkimusta kohtaan, mutta toisaalta osa mahdollisesti kokee tutkimuksen uhkana heidän omalle liiketoiminnalleen. Asiantuntijahaastattelussa haastattelijan kannattaa varautua erilaisiin asiantuntijan esittämiin kysymyksiin haastattelun aikana. [24, s. 225-227]

Haastattelun kulkuun ja lopputulokseen vaikuttaa myös kokeeko haastateltava haastattelijan asiantuntijana vai täysin aiheesta tietämättömänä. Toisinaan tiedonhankinta voi olla tuottavampaa, jos haastateltava ei tulkitse haastattelijaa asiantuntijaksi. Siinä mielessä asiantuntijana esiintyminen on haastattelijalle tärkeää, että hän osaa esittää haastateltavalta tarvittaessa tarkentavia kysymyksiä, joiden avulla haastattelu tuottaa tutkimuksen kannalta enemmän informaatiota. Kuten erilaisissa vuorovaikutustilanteissa muutenkin, myös asiantuntijahaastattelussa on olennaista osata tulkita haastattelutilannetta ja mukautua siihen siten että haastattelu tuottaa parhaan mahdollisen tuloksen. [24, s. 229-230]

3. RAKENNUSAUTOMAATIOJÄRJESTELMÄ

Rakennusautomaatiojärjestelmän keskeisin tehtävä on ohjata ja valvoa rakennuksen taloteknisiä järjestelmiä siten, että vaaditut toiminnallisuudet ja sisäolosuhteet varmistuvat. Rakennusautomaatiojärjestelmästä on käytetty aiemmin nimitystä säätö- ja valvontajärjestelmä [29, s. 21 – 23]

Rakennusautomaatiojärjestelmän toiminta perustuu tietoihin olosuhteista ja prosessien tilasta. Tiedot olosuhteista ja prosesseista välitetään kenttälaitteilta ala-asemaan, jonka toiminnallisuudet perustuvat kuhunkin kohteeseen sovitettuun ohjelmistoon. Ala-aseman itsenäisen toiminnan ja valvonnan lisäksi järjestelmän käyttäjien tehtävänä on omalta osaltaan varmistaa toiminnan ylläpito. [29, s. 21 – 23]

Rakennusautomaatiojärjestelmä toteutetaan tyypillisesti keskitettynä järjestelmänä, jolla hallitaan monenlaisia taloteknisiä toimintoja, kuten ilmanvaihtoa, lämpötilan säätöä sekä valo- ja oviohjauksia. Heikosti hallitut toiminnot kuluttavat huomattavasti energiaa, tästä syystä rakennusautomaatiojärjestelmän rooli myös rakennusten energiatehokkuuden ja käyttökustannusten hallinnassa on kasvanut merkittävästi. [47][48][51]

Maailmanlaajuisesti erilaisia rakennusautomaatiojärjestelmiä on tarjolla kymmeniä, joista tunnetuimpia ovat Honeywell, Siemens, Schneider Electric ja Johnson Controls. [57]. Suomessa tunnetuimpia järjestelmiä ovat Fidelix, Schneider Electric, Siemens, Honeywell ja Ouman.

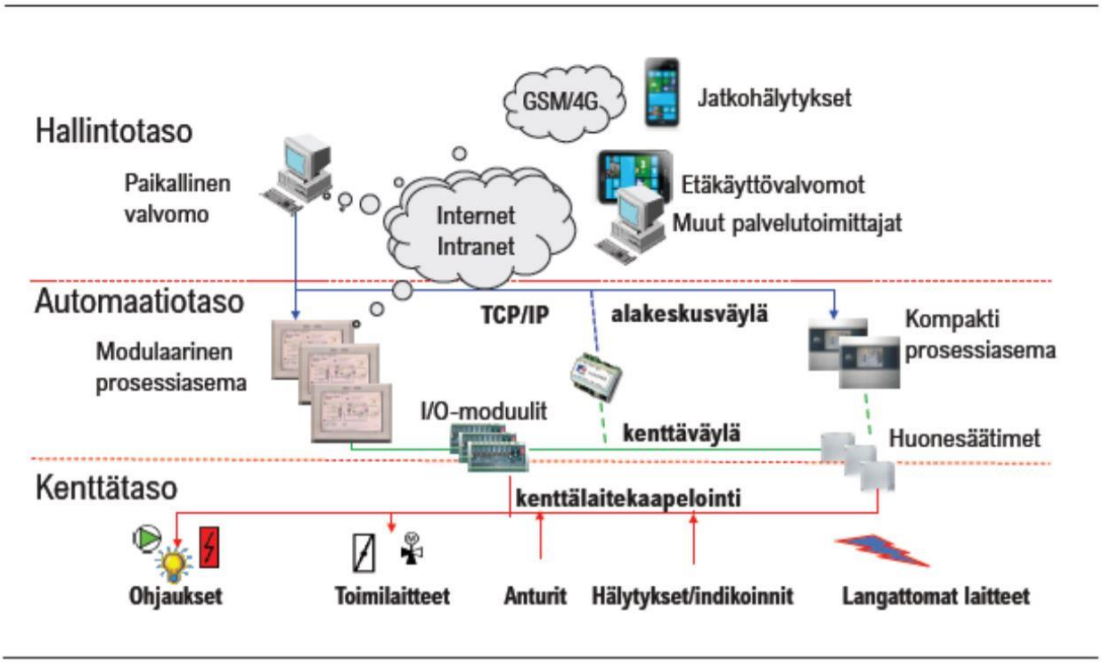
Rakennusautomaatiojärjestelmän osuus rakennushankkeen kokonaiskustannuksista on vähäinen, järjestelmän merkitys koko rakennuksen elinkaaren aikaisiin kustannuksiin ja rakennuksen toimintaan on kuitenkin ratkaiseva. Rakennusautomaation avulla voidaan myös tuottaa lisäpalveluita, kuten integroimalla järjestelmään muita taloteknisiä järjestelmiä, hälytyslaitteita tai tilanvarausjärjestelmiä [29, s. 21 – 23]

Rakennusautomaatio rinnastetaan toisinaan kotiautomaatioon. Rakennusautomaation käyttökohteita ovat tyypillisesti suuremmat kiinteistöt kuten tehtaat, liikekiinteistöt tai isommat asuinkiinteistöt. Kotiautomaatio on tarkoitettu pienempiin kohteisiin, kuten omakotitalojen lämmityksen tai valaistuksen ohjaukseen. Kotiautomaatiossa käytetyt ohjauslogiikat ja kenttälaitteet vastaavat osittain rakennusautomaatiolaitteita, mutta ne ovat tyypillisesti toiminnoiltaan yksinkertaisempia ja suorituskyvyltään rajatumpia. [12]

3.1 Järjestelmän rakenne

IT-teknologian yleinen kehitys heijastuu suoraan myös rakennusautomaatiojärjestelmien kehitykseen, minkä taustalla vaikuttavat internetin, tietotekniikan ja elektroniikan komponenttien sekä akkuteknologian kehitys. Kehitykseen vaikuttaa myös kiinteistöalan uudet liiketoimintamahdollisuudet mikä on lisännyt alalle erilaisia palveluntarjoajia, kuten energiankäytön optimointiin tai kiinteistönhoidon tehostamiseen liittyen. Uusien palvelujen avulla järjestelmien kehitys jatkuu ja nopeutuu uusien ominaisuuksien tarpeen ilmetessä. Vaikka järjestelmien ominaisuudet lisääntyvät ja suorituskyky parantuu, komponenttien hinnat ovat silti pysyneet edullisina, mikä johtuu pääosin IT-teknologian käytön kasvusta [29, s. 21 – 23]

Kuvassa 1 on esitetty rakennusautomaatiojärjestelmän perinteinen hierarkia. Hierarkian tasot ovat perinteisesti olleet hyvin selkeät, mutta nykypäivänä IoT-tekniikan vaikutuksesta hierarkian rajat ovat jonkin verran hämärtyneet. [29, s. 21 – 23]



Kuva 1 Perinteinen rakennusautomaation hierarkia [29].

Hierarkiassa on kolme tasoa, ylimpänä toimii hallintotaso, keskellä automaatiotaso ja alhaalla kenttätaso. Hallintotasoon kuuluu kohteessa olevat paikalliset valvomot sekä erilaiset etävalvomot. Automaatiotaso kattaa valvonta-alakeskukset, alakeskuksiin sisältyvät I/O-moduulit sekä tarvittavat alakeskuksen oheislaitteet. Kenttätaso tarkoittaa prosesseissa olevia antureita ja toimilaitteita sekä kentällä sijaitsevia itsenäisiä säätimiä, kuten huonesäätimet tai itsenäisesti toimivan ilmanvaihtokoneen paikallinen säätölaite. [29, s. 21 – 23][26]

3.1.1 Hallintotaso

Hallintotaso tarkoittaa kiinteistön sisällä olevaa PC-valvomoa tai etävalvomoa, joka voi koostua usean eri kiinteistön järjestelmistä. Hallintotasoon kuuluu prosessien graafiset kaaviot, hälytyslistaukset, asetusarvojen ja aikaohjelmien muuttamiseen liittyvät toiminnot sekä erilaiset toimintoihin ja olosuhteisiin liittyvät raportoinnit. [29, s. 21 – 23]

Kommunikaatio perustuu hallintotasolla tyypillisesti Ethernet-väylään, etävalvontayhteyden muodostus toteutetaan laajakaistatekniikalla tai langattomilla yhteysratkaisuilla. Kohteen sisäisen LAN (Local Area Network) -verkon sekä internetyhteyden toteutuksessa käytetään tavallisesti TCP/IP-protokollaa. Avoimella tiensiirtoratkaisulla toteutettu rakennusautomaatiojärjestelmän etähallinta on käytettävyydeltään joustava, mutta se on usein heikosti suojattu ja voi aiheuttaa tietoturvahaasteita. Rakennusautomaatiojärjestelmän hallintotasolla tiedonsiirron toiminta on tyypillisesti luotettavaa, hallintotason tiedonsiirto toimii myös eri tasolla kuin alakeskusten sisäinen tiedonsiirto, joten hallintotason ongelmat eivät tavallisesti vaikuta prosessien toimintaan. [29, s. 21 – 23]

3.1.2 Automaatiotaso

Rakennusautomaatiojärjestelmät ovat tavallisesti keskitettyjä järjestelmiä, jossa kenttälaitteita ohjaavat itsenäiset, I/O-moduuleista sekä prosessiasemasta koostuvat alakeskukset. Alakeskus voi olla myös kompakti, kiinteän I/O-pistemäärän sisältävä kokonaisuus, joka on tarkoitettu pienempiin toteutuksiin. Alakeskuksen prosessiasema sisältää säätöohjelmat, jotka ohjaavat I/O-pisteisiin liitettyjen kenttälaitteiden välityksellä itse prosesseja, prosessiasemasta käytetään usein kirjainlyhennettä PLC (Programmable logic controller) tai DDC (Direct Digital Controller). [9, s. 21 – 23][40]

Automaatiotasolla alakeskusten välinen kommunikaatio tapahtuu tavallisesti LAN-verkkoa ja TCP/IP-protokollia käyttäen, tyypillinen protokolla rakennusautomaatiojärjestelmissä on BACnet. Paikallinen, kiinteistön sisäinen LAN-verkko rakennetaan tavallisesti Ethernet-tekniikalla, käyttäen CAT 6 -standardin mukaista kaapelointia. Kiinteistöjen välisissä verkkokaapeloinneissa käytetään usein optisia kuituja. Nykypäivän toteutuksissa voidaan käyttää LAN-verkon sijasta myös langatonta WLAN (Wireless Local Area Network) -tekniikkaa. [29, s. 21 – 23][40]

Alakeskusten I/O-moduulit kytketään prosessiasemaan alakeskuksen sisäisen tiedonsiirtoväylän avulla. Tiedonsiirtoväylänä käytetään usein sarjamuotoista RS-485- tai Modbus-väylää. [29, s. 21 – 23]

Nykypäivänä rakennusautomaatiojärjestelmä voi olla myös niin sanottu hajautettu järjestelmä, jossa kaikkea tietoa ja ohjausta ei keskitetä yhteen ala-asemaan, vaan järjestelmä voi koostua älykkäistä kenttälaitteista, jotka itse säätävät prosessien, tai osaprosessien

toimintaa. Etuna hajautetussa järjestelmässä keskitettyyn järjestelmään verrattuna on se, että mahdollisissa häiriötilanteissa tai ala-aseman vikaantuessa kaikkien prosessien toiminta ei lakkaa, vaan toiminta voi jatkua ainakin osittain normaalisti.

3.1.3 Kenttätaso

Kenttätasolla sijaitsevat erilaisiin prosesseihin kytketyt toimilaitteet, kuten anturit, venttiilimoottorit sekä erilaiset itsenäiset säätimet. Kenttälaitteet välittävät reaaliaikaisia tietoja alakeskukseen, kuten prosessien lämpötila tai puhaltimien käyntiteho. Alakeskuksen säätöohjelmat ohjaavat prosessien toimilaitteita antureiden mittausten tai muiden indikaattoreiden perusteella suunniteltujen tavoitteiden saavuttamiseksi. Kenttätason ja automaatiotason välillä voi olla myös niin sanottuja moduulikoteloita, jotka sisältävät alakeskuksen kanssa kommunikoivia I/O-moduuleita. Kentällä voi olla myös itsenäisiä, vaikka IV-koneisiin tai lämmönvaihtimiin integroituja säätimiä [29, s. 21 – 23]. Moduulikoteloita käytetään tavallisesti niissä tapauksissa, kun halutaan minimoida kustannuksia ja toteutetaan järjestelmä yhdellä alakeskuksella, johon kaikki järjestelmän I/O-moduulit kommunikoivat. Osa itsenäisistä kenttälaitteista kommunikoivat alakeskukseen kanssa kenttäväylän kautta, tällaisia laitteita voivat olla puhaltimia tai pumppuja ohjaavat taajuusmuuttajat, joissa on myös itsenäinen ohjauslogiikka ja kenttäväyläliitäntä. Tunnetuimpia kenttäväylästandardeja ovat ModBus, BACnet, KNX ja M-bus [29, s. 59 – 61]. Järjestelmän etähallintaa varten usein käytetty rajapinta on OPC UA, jota tarjoavat useat valmistajat, kuten Fidelix ja Schneider Electric.

3.2 Protokollat

3.2.1 Modbus

Modbus on vuonna 1979 Modicon (nykyään Schneider Electric) esittelemä kenttäväylä. Modbus on avoin tietoliikennestandardi, jota tukevat nykypäivän markkinoiden monet tuotteet ja toimittajat. Modbus on nykyisin de facto -standardi, sillä on toteutettu pelkästään Pohjois-Amerikassa yli 7 miljoonaa solmua. [49]

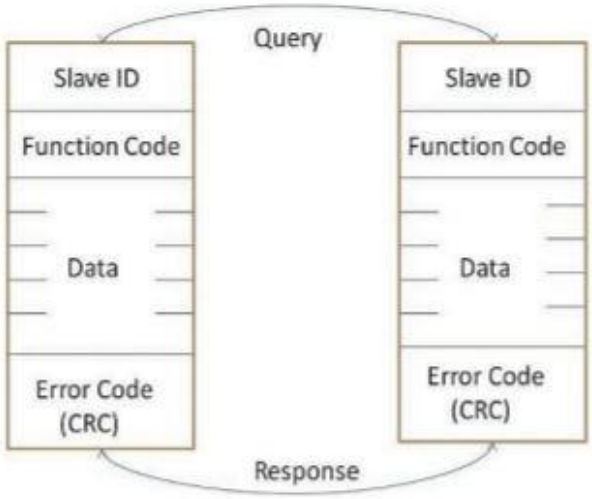
Modbus-protokollan tärkein etu on, että se toimii kaikentyyppisillä viestintävälineillä, kuten parikaapelit, langaton tiedonsiirto, kuituoptiikka ja Ethernet. Modbus-laitteiden tietoja käsitellään neljällä niin sanotulla rekisterillä. Input Register lukee analogisia sisääntuloja (Analog inputs), Holding Register lukee analogisia ulostuloja (Analog outputs), Discrete Input lukee digitaalisia sisääntuloja (Digital inputs) ja Coils lukee digitaalisia ulostuloja (Digital outputs). Modbus-rekistereiden toiminnot on esitetty kuvassa 2. Modbus-protokollan yhteyskäytännöt ovat Modbus RTU ja Modbus TCP. [55]

Function Code	*Action*
01	Read discrete output coils
02	Read discrete input contacts
03	Read analog output holding registers
04	Read analog input registers
05	Write single discrete output coils
06	Write single analog output holding registers
15	Write multiple discrete output coils
16	Write multiple analog output holding registers

Kuva 2 Modbus toimintokoodeja [55].

Modbus on sanomapohjainen protokolla, joka tukee sarjamuotoisia RS-232-, RS-422- ja RS-485-sarjaliikenneväyliä sekä Ethernet-tiedonsiirtoa. Sarjaporttimuotoinen Modbus RTU voi käyttää viestinnässä joko ASCII-tilaa tai RTU-tilaa. [45]

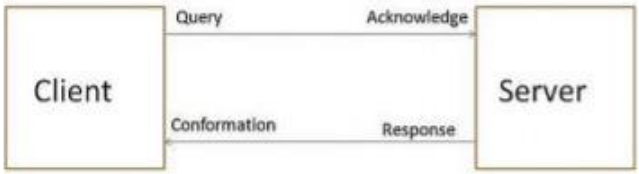
Protokolla perustuu isäntä / orja (Master/Slave) -menetelmään, jossa isäntälaite lähettää komentoja orjalaitteille, jotka lähettävät vastauksen takaisin isäntälaitteelle. Kuvassa 3 on esitetty Modbus RTU:n viestisykli, joka koostuu orjatunnuksesta (Slave ID), toimintokoodista (Function code), sekä tietokentästä (Data), lisäksi RTU-tiedonsiirrossa on virheentarkistus, joka suoritetaan CRC (longitudinal redundancy check) ja LRC (cyclic redundancy check) -menetelmillä. Modbus-verkossa voi olla yhteensä 256 laitetta, joista jokaisella laitteella on oma ID. ID 0 on varattu isäntälaitteelle ja lähetysviesteille, ID:t 1-221 orjalaitteille ja ID:t 248-255 yhdyskäytäville. [45]



Kuva 3 Modbus RTU:n viestisykli [55].

Modbus TCP vastaava kuin Modbus RTU, mutta se toimii Ethernet-liitännän kautta. Modbus TCP:n viestisykli koostuu kuvan 4 mukaisesti yhteyspyynnöstä palvelimelle, palveli-

men kuittauksesta, palvelimen vastauksesta ja asiakkaan palvelimelle lähettämästä konformaatiosignaalista. Modbus TCP-protokolla on luotettava yhteyshakuinen protokolla, joten siinä ei ole ylimääräistä sanoman tarkistusta. [55]



Kuva 4 Modbus TCPn viestisykli [55].

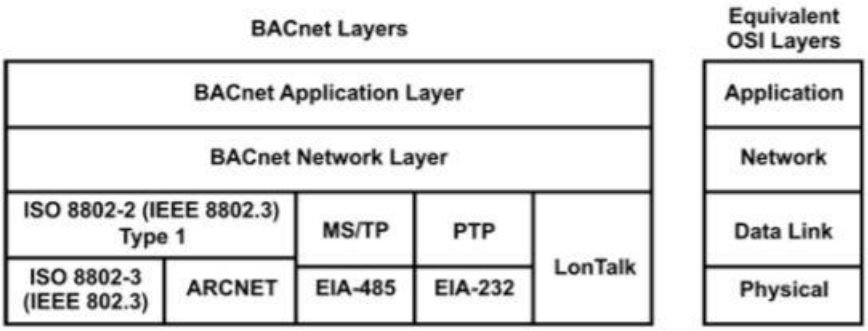
Modbus-protokollan etuna on viestinnän tilattomuus mikä tekee siitä erittäin häiriösietoista. Modbus-protokolla ei itsessään sisällä minkäänlaista tietoturvaa, tietoliikenteen voi kuitenkin suojata monilla tavoin, kuten VPN (Virtual Private Network) -tunnelin avulla. Vaikka Modbus ei sellaisenaan vastaa kaikkia nykypäivän vaatimuksia, on se edelleen laajasti käytössä automaatiojärjestelmissä. [9]

3.2.2 BACnet

BACnet (Building Automation and Control Networks) on rakennusautomaation ohjausjärjestelmien käyttöön suunniteltu, standardoitu tiedonsiirtoprotokolla, jonka on kehittänyt amerikkalainen lämmitys-, jäähdytys ja ilmastointisuunnittelijoiden seura ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). Suunnittelun päätavoitteena oli luoda protokolla, joka mahdollistaa eri valmistajien laitteiden yhtenäisen tiedonsiirron rakennusautomaation hallinta-, automaatio-, ja kenttätasolle. [2]

BACnet International on organisaatio, joka edustaa BACnet-ohjelmistojen ja -laitteiden valmistajia. Lisäksi BACnet International tarjoaa BACnet Testing Laboratoriesin kautta vaatimustenmukaisuuden ja yhteensopivuuden tukemiseen liittyvän palvelun. Sertifioituja laitteita tai ohjelmistoja on useita satoja, näitä tuotteita valmistavat useat toimijat, kuten Siemens, Mitsubishi Electric ja Honeywell. [65]

BACnet-protokollan tiedonsiirto perustuu kuvan 5 mukaiseen yksinkertaistettuun OSI-malliin (Open Systems Interconnection Reference Model), jossa määritellään vain BACnet-protokollan toiminnan vaatimat kerrokset. BACnet tukemat tiedonsiirtotekniikat ovat Ethernet (IEEE 802.3 ja IP), EIA-485, Arcnet, LON ja RS232 sekä Zigbee (IEEE 802.15.4). [65]



Kuva 5 BACnet-kerrokset ja vastaavat OSI-kerrokset [65].

BACnet-protokollassa keskeisiä ovat objektit, ominaisuudet sekä palvelut ja BACnet-laitteet. Standardoituja BACnet-objekteja on 54 kappaletta. Objekti sisältää joukon ominaisuuksia, jotka kuvaavat laitetta. Objektin tyyppejä on useita, kuten analoginen, binaarinen, teksti tai numero [65]. Jokaisella ominaisuudella on yksilöity tunniste, nimetty ominaisuustyyppi ja vaatimustenmukaisuuskoodi. Vaatimustenmukaisuuskoodilla määritellään ominaisuuden käyttöoikeudet sekä, onko ominaisuus käytettävissä. Jokaiselle BACnet-laitteelle tulee määritellä objektin tyyppi, objektin nimi ja kohteen tyyppi. Objektin nimi ja kohteen tyyppi tulee olla jokaisella laitteella yksilöllisiä. BACnet-laitteen laiteobjekti määrittelee laitteen perustiedot, kuten laiteohjelmiston ja protokollaversion. BACnet-standardi määrittelee lisäksi viestintäpalvelut, joista tärkeimpiä ovat arvon lukemiseen ja asettamiseen tarkoitetut ReadProperty- ja WriteProperty- ominaisuudet. [16]

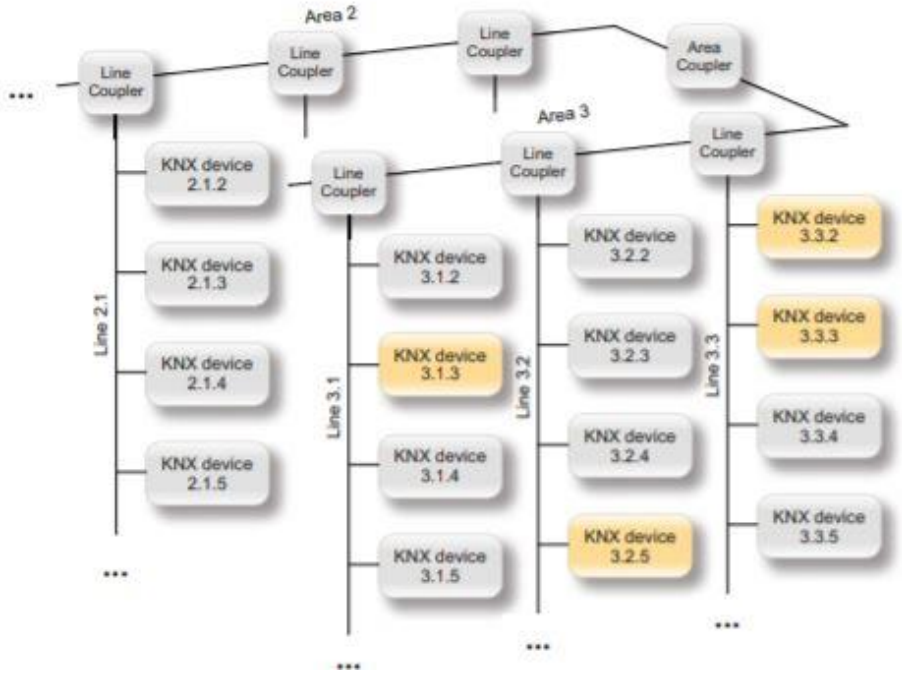
Laitteiden väliseen yhteyden muodostamiseen käytetään asiakas-palvelin-mallia, joka on samanlainen kuin TCP / IP-verkoissa. Jokainen BACnet-laite vaatii laiteobjektin sekä yksilöllisen laiteosoitteen, jotta kommunikaatio toimii. [65]

3.2.3 KNX

KNX on KNX- yhdistyksen määrittelemä standardi koti- ja rakennusautomaatioon. KNX-standardi on kehitetty EIB- (European Installations Bus), EHS- (European Home Systems) ja BatiBus-standardeista. KNX: n päätarkoitus on varmistaa tuotteiden, sovellusten ja järjestelmien yhteen toimivuus, minkä avulla eri toimijoiden anturit, toimilaitteet ja ohjaimet voivat muodostaa yhtenäisen automaatioverkon. [25]

KNX-verkko voidaan toteuttaa erilaisilla väylätekniikoilla. Tavallisimmin KNX-verkko toteutetaan kierretyllä parikaapelilla, muita vaihtoehtoja ovat sähkökaapeli (230v), radiotaajuus, infrapuna, ja Ethernet. KNX-järjestelmässä jokaisella laitteella on yksilöllinen osoite. Tiedonsiirto perustuu KNX-laitteiden lähettämiin yksittäisiin, osoitteellisiin sanomiin. KNX-väylän topologia kostuu päälinjasta, runkolinjasta ja linjasta. Linjoja voidaan

jakaa segmentteihin toistimien (Coupler) avulla, linjat voivat sisältää enintään 256 laitetta [25]. Kuvassa 6 on esitetty tyypillinen KNX-verkko.



Kuva 6 KNX-verkko [41].

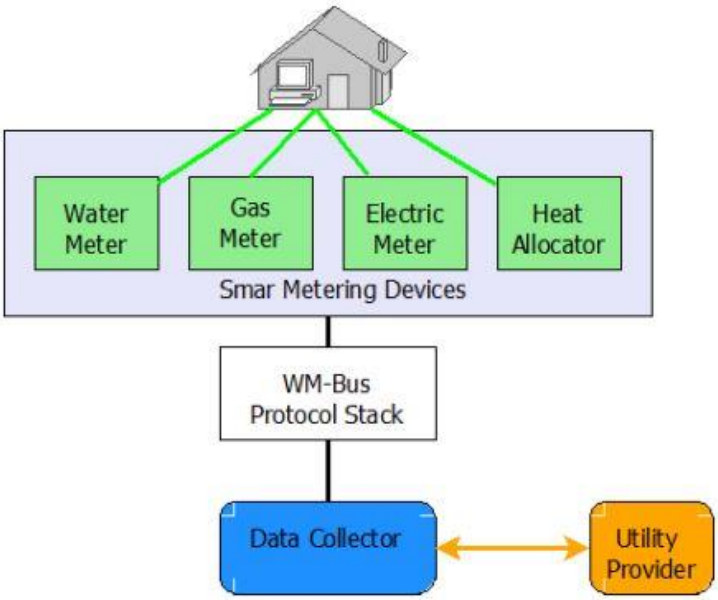
Tyypillisiä KNX:n käyttökohteita ovat valaistuksen hallinta, lämmitys, ilmanvaihto sekä erilaiset mittalaitteet kuten sähkö- ja vesimittarit. KNX:n etuina tyypillisillä johdotuksilla toteutettuihin järjestelmiin ovat pienempi johtimien määrä, mahdollisuus erilaisiin toimintoihin, helpompi järjestelmän laajennettavuus ja paremmat suojausmahdollisuudet. [71]

3.2.4 M-bus

M-Bus (Meter-Bus) on eurooppalainen standardi, jota käytetään pääosin erilaisten kulutusmittareiden, kuten vesi-, kaasu- tai sähkömittareiden etäluentaan. Perinteinen M-Bus-väylän tiedonsiirto toteutetaan kaksijohdin kaapelilla, mutta se voidaan toteuttaa myös langattomana versiona. Langallinen M-Bus kehitettiin 1990-luvun alussa ja langaton versio vuonna 2005. M-Bus-väylän standardointi mahdollistaa eri valmistajien laitteiden käyttämisen samassa väylässä. [33][34]

M-Bus-väylän kommunikaatio perustuu isäntälaitteena toimivan keskuslaitteen ja orjalaitteena toimivien päätelaitteiden väliseen tiedonsiirtoon, tiedot voidaan välittää keskusyksiköltä tietokoneelle tai rakennusautomaatiojärjestelmään. Orjalaite tunnistaa isäntälaitteen lähettämät viestit väylän muuttuneena jännitetasona. Verkon topologia voi olla tähti-, rengas-, tai väylämuotoinen, rengasverkon heikkoutena on, että yhden laitteen rikkoutuminen estää koko verkon toiminnan. [15][31]

Langaton M-Bus (Wireless M-Bus) toimii 858, 169 ja 433 MHz taajuuksilla, joista kaksi jälkimmäistä mahdollistavat pidemmän kantaman ratkaisuja. Langaton M-Bus Protokolla koostuu kuvan 7 mukaisesti fyysisestä kerroksesta, datalinkkikerroksesta sekä sovelluskerroksesta. Protokolla tukee kaksisuuntaista viestintää, jossa tiedonsiirtonopeudet ovat taajuuden mukaan 2,4-100 kb/s. 858 MHz taajuudella kantama on noin 500 metriä ja 169 MHz taajuudella noin 2000 metriä. [1]



Kuva 7 Wireless M-Bus arkkitehtuuri [1].

M-Bus-protokollan langatonta versiota käytetään laajalti erilaisissa mittaussovelluksissa, kuten kulutusmittareiden etäluennassa. Langaton toteutuksen etuja ovat joustava verkon laajentamismahdollisuus, vikasietoisuus sekä kustannustehokkuus [23]. Protokollan heikkoutena rajoitetut turvaominaisuudet, jotka sisältävä vain viestien salauksen, mutta ei muita ominaisuuksia, kuten laitteen todennusta. [1]

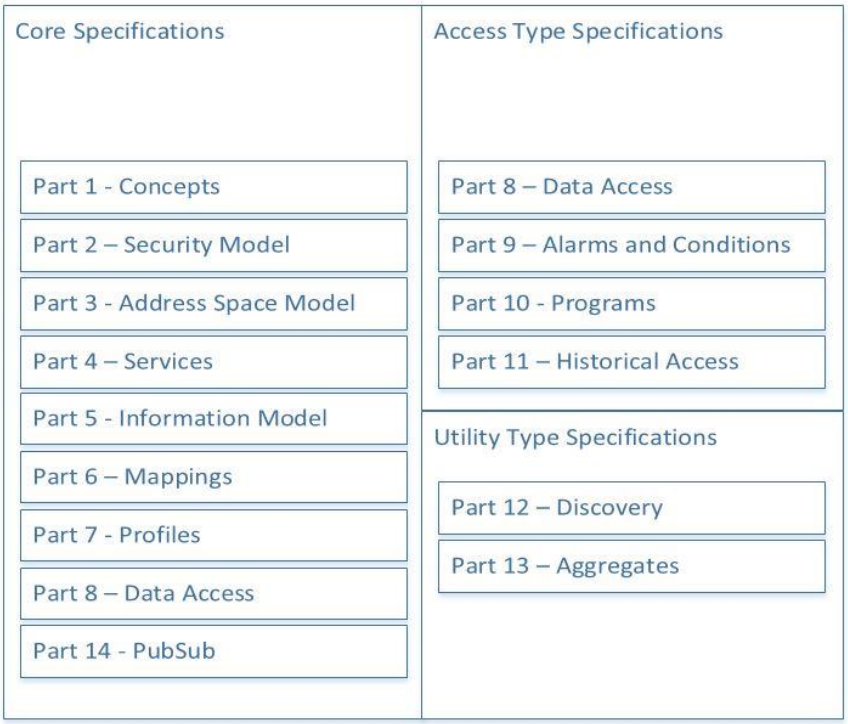
3.2.5 OPC UA

OPC UA (OLE for Process Control, Unified Architecture) on palvelin/asiakas (server/client) pohjainen rajapinta. OPU UA on kehittyneempi versio OPC:stä (OLE for Process Control) joka on kehitetty vuonna 1995 Microsoftin ja useiden automaatioalan toimijoiden yhteistyöllä. OPC UAn ja Classic OPC:n merkittävin ero on se, että OPC UA:ta voidaan käyttää muillakin kuin Microsoft-alustoilla. [43]

OPC UA perustuu palvelukeskeiseen arkkitehtuuriin, joka mahdollistaa kommunikoinnin eri valmistajien laitteiden välillä. OPC UA:n alustariippumattomuus mahdollistaa lisäksi mukautettujen sovellusten rakentamisen OPC UA:n päälle. OPC UA-protokolla sisältää

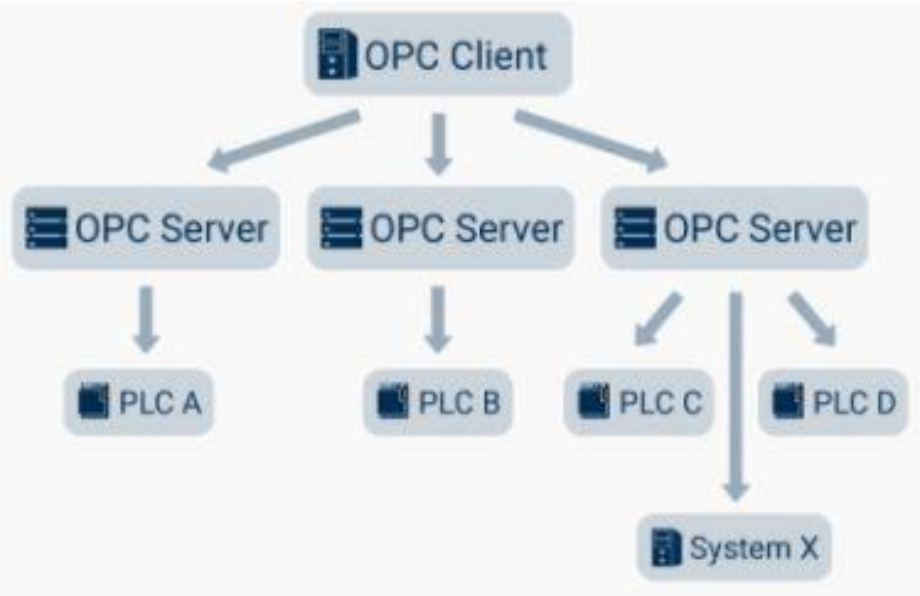
useita standardoituja kuljetusprotokollia, kuten OPC TCP ja HTTP (S). Tietojen koodaukseen on kolme erilaista tapaa, ne ovat OPC Binary, OPC XML ja OPC JSON. OPC UA-protokolla sisältää myös turvamekanismit, kuten viestien todennuksen ja salauksen. OPC UA: n uusimmassa julkaisussa on myös julkaisija/tilaaja -malli, joka mahdollistaa pilviliitännän erilaisilla protokollilla, kuten AMQP tai MQTT. [4]

OPC UA standardi koostuu erilaisia toimintoja kuvaavista määrityksistä, joita palvelin- ja asiakasrajapintojen (Server/Client) on tuettava, jotta tarvittavat toiminnot saadaan toteutettua. Tuettavat määritykset vaihtelevat käytettävän sovelluksen mukaan, mahdollisia määrityksiä on yhteensä 14 ja ne on esitelty kuvassa 8. [44]



Kuva 8 OPC UA:n määritykset. Muokattu lähteestä [44].

OPC-palvelin on ohjelmisto, joka toteuttaa OPC-standardin ja tarjoaa standardoidut OPC-liitännät erilaisten sovellusten käyttöön. OPC-palvelimen toimittamat tiedot voidaan lukea palvelimeen yhdistetyn OPC-asiakasohjelman avulla. OPC-palvelimen toteuttamat ennalta määritetyt rajapinnat mahdollistavat sen, että kaikki OPC-asiakkaat voivat käyttää kuvan 9 mukaisesti tietojen välitykseen samalla tavalla mitä tahansa OPC-palvelinta. Jotta laitteeseen pääsy OPC-rajapinnan kautta mahdollistuu, tulee laitevalmistajan tarjota järjestelmälleen OPC-palvelin, joka voidaan toteuttaa erillisenä ohjelmistona tai sulautettuna laitteisiin, kuten PLC-prosessiasemaan [44].



Kuva 9 OPC palvelin-asiakas-viestintä [44].

OPC UA käyttää 128- tai 256 bitin salauksia tietojen suojaamiseen lähetyksen aikana, samoin kuin viestien allekirjoittamiseen, pakettien sekvensointiin ja käyttäjän todennukseen. Lisäksi OPC UA käyttää varmennevaihtoa turvallisuuden lisäämiseksi, joten jokaisen asiakkaan on todennettava varmenne. Tällä tavalla voidaan hallita, mikä asiakas saa muodostaa yhteyden palvelimeen. [44]

OPC UA on laajasti käytössä etenkin teollisissa ohjausjärjestelmissä sekä toiminnanohjausjärjestelmissä, kuten MES Manufacturing Execution System) ja ERP (Enterprise Resource Planning). [22]

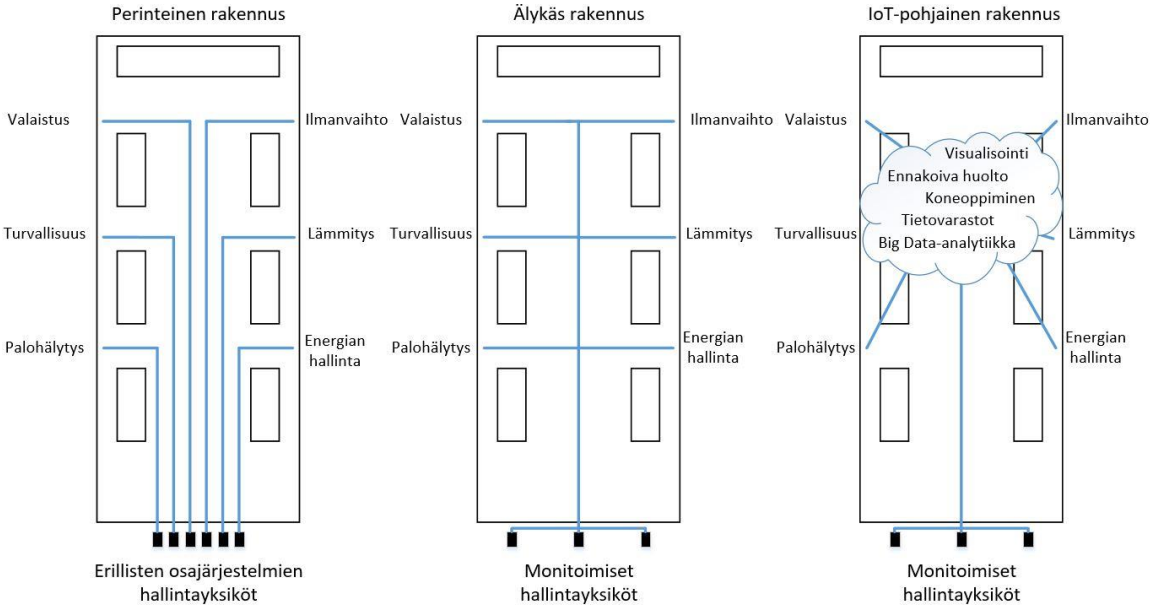
3.3 Rakennusautomaation kehitys

Rakennusautomaatiolaitteilla on pitkä historia. Ensimmäinen automaattinen ilmastointijärjestelmä otettiin käyttöön tiettävästi Yhdysvalloissa jo vuonna 1907. Rakennusautomaatiojärjestelmissä käytetyt logiikat ja toimilaitteet olivat 1970-luvulle saakka pääosin pneumaattisia. Myöhemmin 1950-luvun sähköisen vallankumouksen jälkeen siirryttiin pääosin sähkökäyttöisiin toimilaitteisiin, jolloin myös edulliset ja helposti ohjelmoitavat logiikkaohjaimet (PLC) yleistyivät. PLC-pohjaiset ala-asemat toimivat myös nykypäivän rakennusautomaatiojärjestelmän perustana, lisäksi ne mahdollistavat laajasti erilaisten tiedonsiirtoverkkojen rakentamisen vakiintuneiden protokollien avulla. [32]

Ensimmäiset rakennusautomaatiojärjestelmät olivat tyypillisesti suljettuja järjestelmiä, joiden prosessointiteho oli vähäinen ja ne oli tarkoitettu vain viestintään eikä isompien tietomäärien keräämiseen. Nykypäivänä avoimen lähdekoodin protokollat kuten BACnet, ovat standardoineet ja yksinkertaistaneet rakennusautomaatioympäristöä. Standardit

väyläprotokollat, rakennusautomaatiolaitteiden prosessointitehon kasvu, internetin ja TCP / IP-protokollan kehittyminen ovat mahdollistaneet sen, että automaatiojärjestelmät pystyvät nykypäivänä hallitsemaan laajasti erilaisia laitteita ja välittämään tietoja maailmanlaajuisesti [42].

Perinteisesti rakennukset ovat sisältäneet hyvin monenlaisia, toisistaan erillisiä järjestelmiä, kuten valaistus-, ilmanvaihto- sekä turvallisuusjärjestelmät. Nykyaikaisiin rakennusautomaatiojärjestelmiin on mahdollista liittää myös erillisiä järjestelmiä, jolloin rakennusautomaatiojärjestelmä toimii koko rakennuksen ydinjärjestelmänä. Tämän tyyppisiä rakennuksia voidaan kutsua älykkäiksi rakennuksiksi, jossa erilaiset osajärjestelmät voivat jakaa tietoa koko rakennuksen toiminnan optimoimiseksi. Rakennusten toimintoja voidaan kehittää IoT (Internet of Things) -tekniikan avulla, jolloin laitteet voivat olla suoraan yhteydessä toistensa tai pilvijärjestelmien kanssa [3]. IoT-pohjainen rakennus mahdollistaa automatisoitujen ja älykkäiden ohjausjärjestelmien toteuttamisen järjestelmistä kerättyjen ja analysoitujen tietojen avulla. Kerättyjen tietojen avulla voidaan luoda niin sanottua metadataa ja tehdä sen perusteella erilaisia analyyseja, kuten laitteiden toimintakuntoon tai muihin prosessien toiminnallisiin poikkeamiin liittyen [42]. Kuva 10 esittää rakennusten teknisten järjestelmien kehittymistä.



Kuva 10 Rakennusautomaation kehitys. Muokattu lähteestä [3].

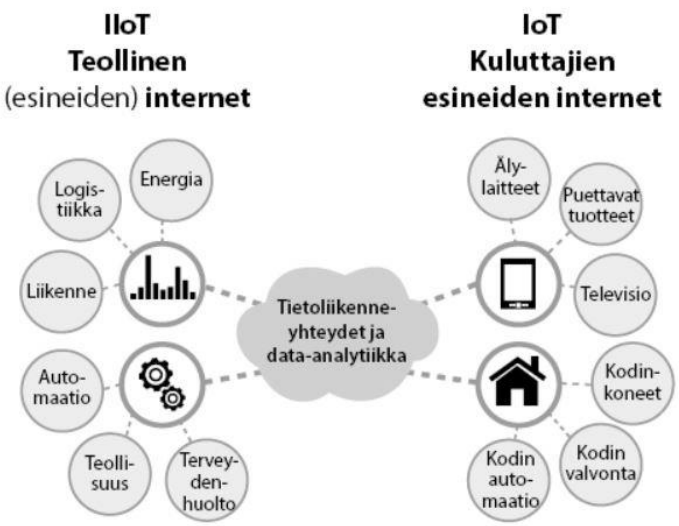
Rakennusautomaatiojärjestelmien nykyiset tiedonsiirtoprotokollat mahdollistavat tiedonsiirron laitetasolla mutta eivät suoraan ylemmän tason järjestelmiin, kuten pilvialustoihin. Tulevaisuuden kehitysaskeleena voidaan nähdä rakennusautomaatiojärjestelmien paremmat IoT-valmiudet, jolloin tuettuna ovat myös ylemmän tason tiedonsiirtoprotokollat,

kuten MQTT (Message Queue Telemetry Transport), jota tukevat nykypäivänä useat pilvialustat. [27][3]

3.4 IoT-tekniikat rakennusautomaatiossa

IoT eli esineiden internet tarkoittaa laajaa toisiinsa kytkettyjen digitaalisten ja mekaanisten laitteiden verkkoa, laitteiden välinen yhteys toimii Internetin kautta. Jokaisella laitteella on yksilölliset tunnisteet ja ne on suunniteltu siten, että viestinsä niiden välillä toimii ilman manuaalisia toimenpiteitä. Internetiin liitettyjen laitteiden määrä kasvaa jatkuvasti, myös kotiautomaatio- ja rakennusautomaatioympäristössä. IoT mahdollistaa erilaisten laitteiden liittämisen automaatiojärjestelmän kanssa samaan verkkoon ja mahdollistaen tietojen keräämisen ja analysoinnin avulla hyödyllisten ohjaustoimintojen toteuttamisen. [10][9]

IoT:n lisäksi teollisuudelle on olemassa käsite IIoT (Industrial Internet of Things) eli teollinen esineiden internet. IIoT tarkoittaa teollisuuden järjestelmien, eli tietotekniikan ja kentällä sijaitsevien fyysisten laitteiden, kuten erilaisten tuotantokoneiden ja niissä olevien antureiden yhdistymistä. Teollinen internet käsitteenä viittaa teollisuuteen, mutta sitä voidaan soveltaa toimialasta riippumatta. Teollisen internetin digitalisaatioon kuuluu myös tuotteisiin liittyviä perinteisiä palveluja, kuten suunnittelu-, asennus- ja huoltopalvelut. Kerättävä data voidaan siirtää pilvijärjestelmiin edelleen analysoitavaksi tai erilaisiin palveluihin hyödynnettäväksi. IIoT:n avulla voidaan muun muassa parantaa tuotannon tehokkuutta, tuotteiden laatua ja vähentää tuotannon kustannuksia ja resurssien kulutusta [9][50]. Kuvassa 11 on esitetty eri järjestelmien jakautuminen IoT:n ja IIoT:n välillä.



Kuva 11 Esineiden internetin jakautuminen [9].

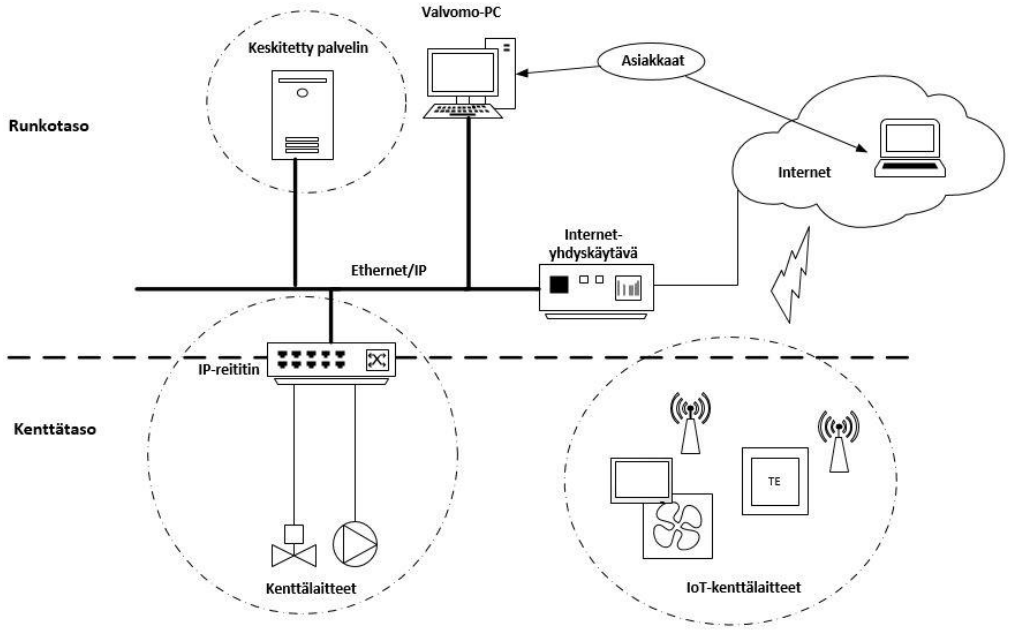
Kiinteistöjen LVIAS-tekniikassa on suuri teolliseen internetiin liittyvä potentiaali. Lämmitys-, ilmanvaihto-, automaatio- ja sähköjärjestelmien etävalvonta ja etähallinta yhdessä IoT-ratkaisujen kanssa tuo uusia mahdollisuuksia järjestelmien tehokkaampaan käyttöön. IoT:n avulla rakennusautomaation hierarkian tasoja voidaan ylittää, mikä mahdollistaa suoran vuorovaikutuksen erilaisten asioiden ja palvelujen, kuten liiketoimintaprosessien kanssa. Teollinen internetin ominaisuuksia voidaan hyödyntää kiinteistötekniikan ohjauksen lisäksi myös kiinteistönhoidon työtehtäviä, reaaliaikainen tiedonkeruu kiinteistöistä vähentää tarvetta fyysisille käynneille kohteissa. Etenkin suurten kiinteistömassojen keskitetyllä ja älykkäällä ohjauksella on mahdollista saavuttaa huomattavia hyötyjä energiakustannusten, olosuhteiden ja turvallisuuden kannalta. [9][26]

IoT-tekniikoita on jo hyödynnetty teollisuusautomaatiossa, mutta ei vielä täysin muilla alueilla, kuten rakennusautomaatiossa. Rakennusautomaatiojärjestelmät on usein suunniteltu kustannustehokkuus edellä ja optimoitu tiettyihin tarkoituksiin ja vaatimuksiin sopivaksi, tämän takia IoT-ratkaisujen toteuttaminen näihin järjestelmiin voi olla haastavaa. Lisähaasteita asettaa myös rakennusautomaatioympäristön heterogeenisyys [10][26].

Nykypäivänä käytettävissä olevat protokollat tai tekniikat eivät täytä kaikkia teollisen internetin käyttötapauksia koskevia vaatimuksia, tästä syystä niin teollisuusautomaation kuin rakennusautomaation IoT-projekteissa joudutaan käyttämään erilaisia protokollia ja tekniikoita, mikä tekee järjestelmien integroinnista monimutkaista. Vasta protokollien ja sovellusten saattaminen jonkin yhteisen standardin alle tuo merkittävää helpotusta nykytilanteeseen. [21]

3.4.1 Nykypäivän arkkitehtuurit

Rakennusautomaation integrointi esineiden internetiin on mahdollista toteuttaa rakennusautomaatiojärjestelmän hierarkian eri tasoilla. Liitettävyyden näkökulmasta rakennusautomaatiojärjestelmä voidaan jakaa runkotasoon ja kenttätasoon. Runkotaso kattaa automaatiotason ja hallintotason välillä toimivan Ethernet-tiedonsiirtoverkon, kenttätaso kattaa parikaapelilla ja perinteisillä sähkökaapeleilla toteutetun kenttäväylän. Kuvassa 12 on esitetty kolme tyypillistä toteutusta perinteisen rakennusautomaatiojärjestelmän yhdistämiseksi internetiin. [26]



Kuva 12 Rakennusautomaation IoT-integraatio. Muokattu lähteestä [26].

Yksi vaihtoehto on käyttää keskitettyä palvelinta, joka toimii IoT: n linkityselementtinä huolehtien yhteyden muodostamiseen tarvittavista tehtävistä, kuten yhdyskäytävätoiminnoista rakennusautomaation protokollien ja IP-verkon välillä. Toinen toteutusvaihtoehto on kytkeä kenttäväylään IP-reititin, jolla määritellään oma IP-osoite jokaiselle väylään kytketylle laitteelle. Kolmantena vaihtoehtona on käyttää kenttälaitteita, jotka kykenevät muodostamaan suoraan yhteyden internetiin käyttäen korkeamman tason protokollia. Kahdessa ensimmäisessä toteutuksessa vaaditaan usein lisäksi internet-yhdyskäytävä toteuttamaan korkeamman tason protokollamuunnokset, kolmannessa toteutusvaihtoehdossa ei vaadita yhdyskäytävälaitetta, mutta siinä jokaiselle laitteelle tulee tehdä käyttöönotto erikseen [26].

Edellä mainitut toteutustavat havainnollistavat mahdollisuuksia yhteysongelman ratkaisemiseen rakennusautomaation ja esineiden internetin välillä. Suurempi haaste on kuitenkin saada rakennusautomaatiojärjestelmä yhteen toimivaksi esineiden internetin kanssa erilaisten ylemmän tason protokollien kautta. On olemassa erilaisia keskitetyn palvelimen tyyppisiä ratkaisuja, kuten BACnet/WS (Web services) ja OPC UA, jotka tarjoavat alustariippumattomia rajapintoja rakennusautomaatiojärjestelmille ja tukevat useita rakennusautomaation rajapintoja, kuten KNX ja BACnet. BACnet/WS tai OPC UA on kuitenkin tarkoitettu ensisijaisesti sovellustason yhdyskäytäviksi automaatiojärjestelmiin, eikä toteuttamaan täysimääräisesti erilaisia IoT-mahdollisuuksia. [26]

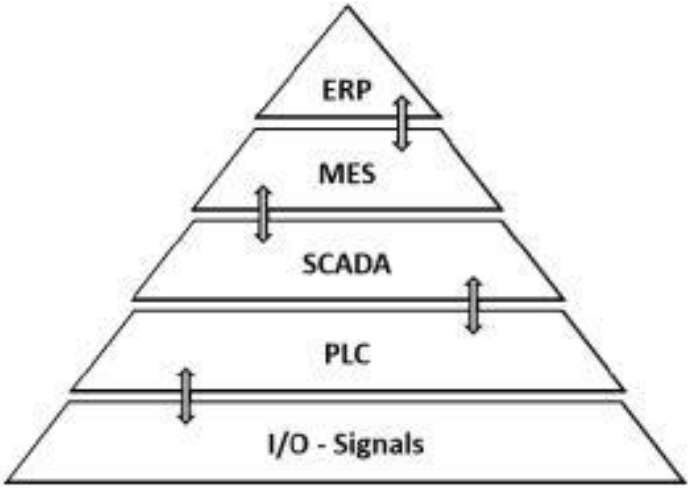
IoT-ominaisuuksien hyödynnettävyyden kannalta lupaavimpana vaihtoehtona voidaan nähdä toteutus, jossa jokaisella laitteella on oma IP-osoite. Tämä toteutus voi aiheuttaa

kuitenkin erilaisia haasteita, kuten tietoturva, skaalautuvuus tai nykyisen IPv4-osoiteavaruuden riittämättömyys. Haasteita voidaan mahdollisesti vähentää tulevaisuudessa IPv6-protokollan myötä, joka tarjoaa nykyistä paremman tietoturvan laitteiden välille, sekä laajemman osoiteavaruuden. [26]

3.4.2 Konttipohjainen arkkitehtuuri

Käynnissä olevan neljännen teollisen vallankumouksen ominaispiirteitä ovat laitteiden, tietoliikenteen ja kyberfyysisten järjestelmien välinen laaja verkostoituminen. Kyberfyysinen järjestelmä tarkoittaa fyysisten laitteiden ja ohjelmistokomponenttien muodostamaa kokonaisuutta. [56]

Virtualisointitekniikat, eli fyysisten komponenttien muuttaminen virtuaaliseksi sekä erilaiset pilvilaskennat ovat jo tunnettuja automaatiopyramidin korkeammilla tasoilla, kuten ERP (Enterprise Resource Planning) -ja MES (Manufacturing Execution System) -järjestelmissä. Pilvipalvelujen voidaan olettaa tulevan myös lähemmäs automaatiopyramidin alempia tasoja, mikäli automaatiojärjestelmät muuttuvat ketterämmiksi, tällöin kuvassa 13 esitetty klassinen automaatiopyramidi muuttuu yhä yhtenäisemmäksi. [56]



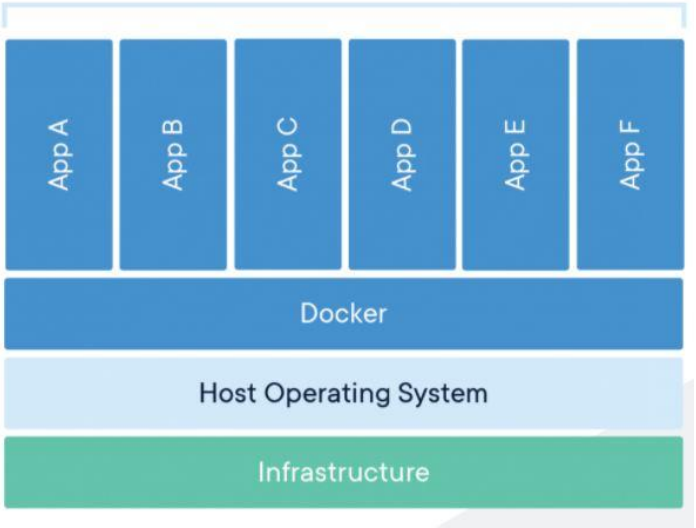
Kuva 13 Klassinen automaatiopyramidi [56].

Järjestelmien tai erilaisten toimintojen virtualisoinnissa voidaan käyttää tyypillisesti käytettävien virtuaalikoneiden sijaan myös niin sanottuja konttiratkaisuja (Container), kuten Docker. [56]

Kontti eli Container on tekniikka, jolla ohjelmistot voidaan pakata standardoituihin yksiköihin eli kontteihin niiden kehittämistä, lähetystä ja käyttöönottoa varten. Containerin avulla ohjelmisto toimii nopeasti ja luotettavasti eri tietojenkäsittely-ympäristöjen välillä. Konteilla voidaan ratkaista sama ongelma, minkä merikontit aikanaan ratkaisivat. Ennen konttien käyttöä tavara piti pakata aina uudelleen, kun se siirretiin rekasta laivaan, mikä

teki tavaran kuljettamisesta kallista ja työlästä. Nykyään laivoihin voidaan lastata kokonaisia rekka-auton kuormia tavaraa, purkamatta niitä välillä. Konttien käytön kuljetustarkoitukseen keksi 1950-luvulla yhdysvaltalainen rekkakuski Malcolm McLean. Tällä tavoin tavaroiden kuljetuksesta tuli paljon edullisempaa, koska samaa konttia voitiin käyttää maalla sekä merellä, kontti myös liikkuu niin rekan kyydissä kuin laivassa. Satamissa kontteja voidaan siirrellä nostureilla paikasta toiseen. [67]

Docker on konttiteknologia-alan tuoteperhe. Dockerin avulla sovelluksia voi laittaa konteihin sekä ajaa kontteja. Docker tarjoaa tehokkaan ajoympäristön kontteihin sijoitetuille sovelluksille. Docker on erillinen, suoritettava ohjelmistopaketti, joka sisältää kaikki sovelluksen suorittamiseen tarvittavat järjestelmät ja komponentit. Docker toimii sekä Linux- että Windows-pohjaisissa sovelluksissa. Kuten kuvassa 14 on havainnollistettu, Docker eristää ohjelmiston ympäristöstään ja varmistaa molempien luotettavan toiminnan. Useista pilvijärjestelmissä, kuten Microsoft Azuressa on Docker- työkaluja ohjelmistojen hallintaan. [13]



Kuva 14 Docker-ohjelmisto toimintaympäristössään [13].

Konttiteknologiasta voi olla monenlaisia hyötyjä myös automaatiossa, kuten joustavampi infrastruktuuri, joka mahdollistaa uusien palvelujen lisäämisen ilman laitteiston muuttamista. Viime vuosina markkinoille on tullut useita teollisuuden automaatiotuotteita, kuten Wago ja Reliste, joiden laitteissa Docker on tuettu, tämä helpottaa loppukäyttäjien omien sovellusten integrointia näihin tuotteisiin. [19][61]

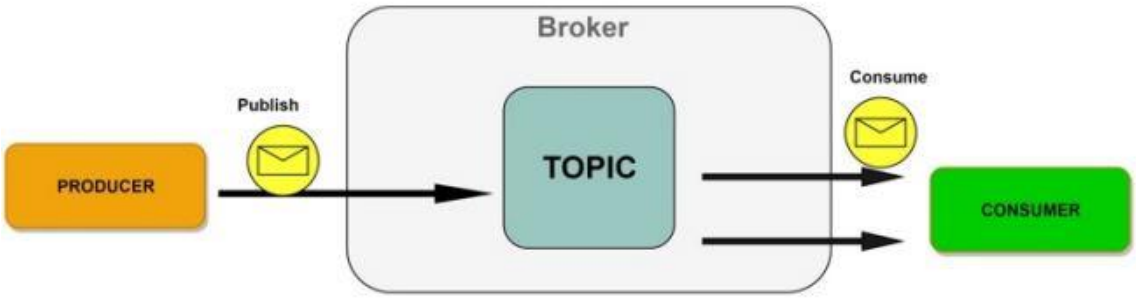
Useissa automaatiojärjestelmien prosessiasemissa on käytössä vanhempi Windows-käyttöjärjestelmä, kuten Windows CE, joka ei tue konttiteknologiaa. Windows CE käyttöjärjestelmä on käytössä muun muassa Fidelixin laitteissa sekä useissa Beckhoffin lait-

teissa [17][5]. Näissä tapauksissa konttityökalujen käyttäminen on lähtökohtaisesti mahdollista asentamalla Linux-käyttöjärjestelmä laitteeseen Windowsin rinnalle. Tämän tyyppinen toteutus on tehty Fidelix FX3000-C-laitteeseen. [28]

3.5 IoT protokollat

3.5.1 MQTT

MQTT on standardi viestintäprotokolla, jota käytetään usein tiedon siirtämisessä IoT-laitteen ja palvelimen välillä. MQTT: stä on tullut IoT-standardi kaikenlaisten IoT-laitteiden liittämiseen. Nykyään kaikki suurimmat esineiden internet -alustat, IoT-pilvipalvelujen tarjoajat sekä monet IoT-reittiyhdyskäytävät ja -laitteet tukevat MQTT-yhteyttä. MQTT on julkaisu- / tilausprotokolla (publish/subscribe), joka on kevyt ja vaatii minimaalisen kaistanleveyden IoT-laitteen liittämiseen. MQTT on tapahtumavetoinen ja mahdollistaa viestien lähettämisen asiakkaille, protokollan ydin on välittäjä (broker) joka vastaa viestien välittämisestä, kuvan 15 mukaisesti. Tämän tyyppinen arkkitehtuuri erottaa asiakkaat toisistaan mahdollistaen erittäin skaalautuvan ratkaisun ilman riippuvuuksia tietojen tuottajien ja kuluttajien välillä. [14]



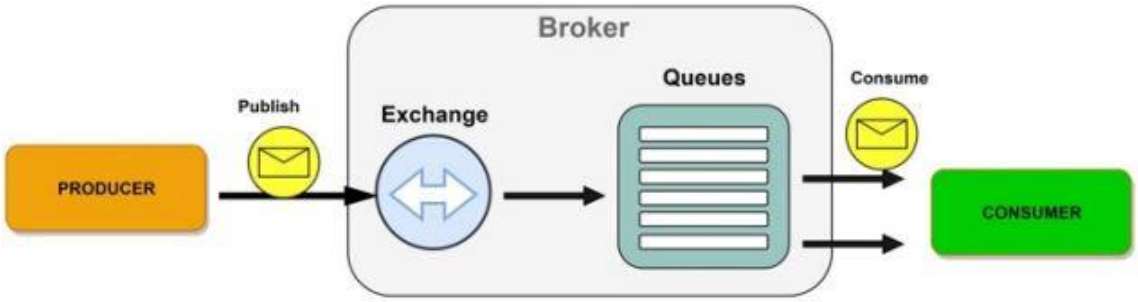
Kuva 15 MQTT, broker toimii tiedonvälittäjänä [46].

MQTT on yksinkertainen protokolla ja sen käyttöönotto on suhteellisen helppoa. MQTT-protokolla soveltuu erityisen hyvin sovelluksiin, jossa datan lähetys ei ole jatkuvaa, eikä datan siirrolta edellytetä täydellistä luotettavuutta [45]. MQTT ei sovellu kenttälaitteiden keskinäiseen viestintään eikä suoraan tiedonsiirtoon usealle eri vastaanottajalle. MQTT-protokollan perusversiosta puuttuu viestiliikenteen salaus, joten salaus on suositeltavaa toteuttaa erikseen, kuten käyttämällä VPN-tunnelia tai TCP-protokollan vahvaa TLS (Transport Layer Security) tai SSL (Secure Sockets Layer) -salausta. [9]

3.5.2 AMQP

Advanced Message Queuing Protocol (AMQP) on avoimen lähdekoodin standardi langattomalle asynkroniselle viestinnälle. AMQP mahdollistaa salatun viestinnän organisaa-

tioiden ja sovellusten välillä, sen arkkitehtuuri perustuu julkaisija-tilaaja-malliin sekä lisäksi viestijonoihin. AMPQ on tehokas, monikanavainen ja turvallinen ja tarjoaa todennuksen SASL (Simple Authentication and Security Layer) tai TLS salauksen tiedonsiirtoprotokolla TCP: n välityksellä. AMQP on nopea ja siinä on taattu toimitus ja vastaanotettujen viestien kuittaus. [53][69]



Kuva 16 AMQP- protokollan tiedonsiirto [46]

Koska AMQP on suoratoistettu binaarinen viestintäjärjestelmä, jolla on tarkoin määritetty viestintäkäyttäytyminen, eri toimittajien laitteiden yhteensopivuus ja tietoliikenteen toimintavarmuus on taattu [69]. Keskeinen ero MQTT-protokollaan verrattuna on viestien välittämisessä ja tallennuksessa. Kun viestejä saapuu välittäjälle, niitä ei ohjata suoraan vastaanottajalle kuten MQTT:ssä, vaan ne reititetään ensin viestijonoihin, kuvan 16 mukaisesti. AMQP-protokollassa viesti on siis tallennettuna viestijonoon siihen asti, kunnes se vastaanotetaan. [46]

3.6 Pilvipalvelut

Koneista tai laitteista luettu data tallennetaan tavallisesti jatkokäyttöä varten joko pilvipalveluun, itse hallitulle palvelimelle tai konesaliin. Pilvipalvelujen etuja ovat edullinen tallennustila ja lähes rajaton skaalautuminen. Pilvipalvelut tarjoavat erilaisia datan jatkokäyttöön liittyviä työkaluja, kuten laitehallinnan, analytiikan ja visualisoinnin. Datan käsittely- ja tallennuspaikkana pilvipalvelu ei aina ole yksinään järkevä valinta. Joissakin tapauksissa voi olla perusteltua, vaikka tietoturvasyistä varastoida data paikalliselle palvelimelle, tästä huolimatta datan analysointi voidaan tehdä pilvipalvelun sisällä. [9]

Pilvipalvelut voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin, joita ovat julkinen (public), yksityinen (private) ja hybridi (hybrid). Pilvipalvelun valinta tehdään käyttötarkoituksen mukaan. [38]

Yleisin pilvipalveluiden tyyppi on julkinen pilvi, jossa pilven resurssit, kuten palvelimet ja tallennustila ovat pilvipalvelujen tarjoajan omistamia ja ylläpitämiä, nämä palvelut toimitetaan Internetin kautta. Pilvipalvelun käyttäjän ei tarvitse ostaa ohjelmistoja, vaan aino-

astaan maksaa käyttämästään palvelusta. Microsoft Azure on esimerkki julkisesta pilvestä. Julkisia pilvipalveluja käytetään usein sähköpostin, tallennustilan sekä testaus- ja kehitysympäristöjen tarjoamiseen. Julkisen pilven etuja ovat pienet kustannukset, luotettavuus, ilmainen huolto ja lähes rajaton skaalautuminen. [38]

Yksityinen pilvi sijaitsee pilvipalvelun hallitsijan tai käyttäjän, kuten jonkin organisaation omassa palvelinkeskuksessa tai se voi olla kolmannen osapuolen hallinnoima. Yksityisessä pilvessä pilvipalvelun resurssit ovat pelkästään pilvipalvelun käyttäjän hallinnoimia. Yksityisiä pilviä käyttävät suuret ja keskisuuret organisaatiot, kuten valtion virastot tai rahoituslaitokset, joilla on ja muut keskisuuret ja suuret organisaatiot, joiden liiketoiminta sisältää kriittisiä toimintoja. Yksityisen pilven etuja ovat joustavuus erilaisissa tarpeissa mukauttaa palveluja ja parempi yksityisyys. [38]

Hybridi-pilvi on paikallisen infrastruktuurin tai yksityisen pilven ja julkisen pilven yhdistelmä. Hybridi-pilveä voidaan käyttää, mikäli nähdään hyötyä yhtäaikaisesta yksityisen ja julkisen pilven käytöstä, tämän tyyppinen tilanne voi olla vaikka, kun halutaan säilyttää kriittisiä toimintoja yksityisessä pilvessä ja toisaalta hyödyntää julkisen pilven tiettyjä palveluita. [38]

3.7 Tietoturva

Perinteisesti teollisuuden ohjausjärjestelmiä ei liitetty internetiin, joten niiden tietoturvaan tarvinnut kiinnittää huomiota. Myöskään järjestelmien etähallintaa ei otettu järjestelmien suunnittelussa huomioon. Nämä ovat keskeiset tekijät siihen, että teollisuuden perinteisten ohjaus- ja hallintajärjestelmien sekä automaatioratkaisujen tietoturvataso on vielä nykypäivänä pääosin heikko [9]. Teollisuuden automaatiojärjestelmien ohella samat puutteet voidaan nähdä myös rakennusautomaatiojärjestelmissä.

Vaikka teollisuusautomaation ohjausjärjestelmiä ei ole usein suoraan kytketty internetiin, voivat ne siitä huolimatta kuitenkin olla yhteydessä verkkoon epäsuorasti, vaikka paikallisen valvomojärjestelmän ja yrityksen toiminnanohjausjärjestelmän kautta. Yksi haaste automaatioratkaisujen tietoturvaan liittyen on myös se, että automaatiojärjestelmien toteuttajat eivät usein tee yhteistyötä yrityksen it-osaston kanssa, mikä voi johtaa siihen, että tietoturvaa ei oteta huomioon riittävällä tavalla. [9]

Teollisessa internetissä, kuten muussakin tietoturvassa tarvitaan erilaisia suojausmekanismeja, palomuureja ja päivitysten hallintaa. Teollisessa internetin verkossa voi olla valtavia määriä antureita ja yksittäisiä laitteita, mikä tekee tietoturvan toteuttamisesta haastavaa, tämän takia tarvitaan erilaisia automatisoituja ratkaisuja tai SSH-avainten (Secure Shell) hallintatyökaluja. Teollisuuden sekä kiinteistöjen automaatiolaitteiden tietoturvan

kannalta olennaisia ovat modernit standardit, protokollat ja arkkitehtuurit, kuten OPC UA, jotka on lähtökohtaisesti suunniteltu turvallisiksi. [9]

Vaikka nykypäivänä automaatiolaitteiden valmistajat huomioivat tietoturvan paremmin laitteiden suunnittelussa, tulee silti teollisuuden kriittisten automaatiojärjestelmien tapauksissa edelleen harkita, onko tietyt järjestelmät parempi jättää kokonaan ilman verkkoyhteyksiä. Rakennusautomaatiolaitteissa riski ei yhtä vakava, koska ohjattavat järjestelmät ei ole tavallisesti toiminnaltaan yhtä kriittisiä kuin teollisuudessa. Toisaalta myös rakennusautomaatiolaitteisiin kohdistuvilla tietomurroilla voidaan aiheuttaa huomattavia vahinkoja etenkin silloin, kun laitteiden käyttöjärjestelmätasolle päästään käsiksi.

Rakennusautomaatiojärjestelmään kohdistetuilla hyökkäyksillä voi olla monia eri motiiveja, kuten rakennuksen toimintakunnon tahallinen heikentäminen erilaisilla ohjausmuutoksilla, tai pelkästään sosiaaliset motiivit, kuten huomion hakeminen. [40]

Liikenne- ja viestintävirasto Traficomin Kyberturvallisuuskeskus on tehnyt vuodesta 2015 lähtien kartoituksia suomalaisissa julkisissa verkoissa toimiviin suojaamattomiin automaatiolaitteisiin liittyen. Kartoituksessa löytyneet laitteet ovat pääosin teollisuus- ja rakennusautomaatiokäytössä olevia näyttöpaneeleita (HMI, Human-Machine Interface), ja logiikoita (PLC). Tarkoituksena on luoda tilannekuvaa suojaamattomista laitteista, sekä tiedottaa ja opastaa laitteiden omistajia ja käyttäjiä. Kyberturvallisuuskeskus tulkitsee laitteen suomaamattomaksi, mikäli laitteen kirjautumissivulle tai jopa prosessitasolle on pääsy internetin kautta. [63]

Vuoden 2019 kartoituksessa löydettiin noin 1000 rakennusautomaatiolaitetta, joista useimmat ohjasivat kiinteistöjen ilmanvaihto- ja lämmitysjärjestelmiä, mutta useista laitteista oli pääsy myös kauppojen kylmäjärjestelmiin, osa laitteista mahdollisti sisäänkirjautumisen jopa ilman salasanaa. Kyberturvallisuuskeskuksen arvion mukaan uusien rakennusautomaatiolaitteiden osalta yhteydet on pääosin suojattu, sen sijaan vanhempien laitteiden osalta yhteyksien suojaaminen jälkeenpäin ei ole ollut kovin aktiivista. [63]

Kyberturvallisuuskeskus suosittelee tietoturvan parantamiseksi välttämään suoria langallisia tai langattomia yhteyksiä ja käyttämään erilaisia suojaustekniikoita, kuten VPN-tekniikkaa tai palomuuria yhteyden suojaamiseksi, lisäksi suositellaan kiinnittämään huomiota laitteelle asetetun salasanaan ja välttämään heikkoja salasanoja. [63]

3.8 Järjestelmän valvonta ja etäkäyttö

Nykypäivänä etenkin laajan kiinteistökannan omistajat pyrkivät keskittämään kiinteistöjen etävalvonnan yhteen paikkaan, joka tavallisesti tarkoittaa keskusvalvomoa. Kiinteis-

töjen keskitetty valvonta mahdollistaa tehokkaan kiinteistöjen valvonnan. Keskusvalvomo voidaan toteuttaa myös pelkästään virtuaalisena pilvipalveluna (SaaS, software as a service) ilman fyysistä valvomoa. Valvomopalveluiden tarjonta on lisääntynyt viime vuosina merkittävästi kiinteistöalalla. Pilvipalvelun käyttökustannukset sisältävät tavallisesti ohjelmatason ylläpidon palveluntarjoajan toimesta, mikä tekee palvelusta asiakkaan näkökulmasta huolettomamman. [29, s. 59 – 61]

Nykypäivänä rakennusautomaatiojärjestelmät mahdollistavat yhteys muodostamisen kiinteistön automaatiojärjestelmään internetselaimella, ilman järjestelmätoimittajan valvomo-ohjelmaa [29, s. 66 – 67]. Selainpohjainen toteutus perustuu tavallisesti PC-pohjaisiin alakeskuksiin, jotka toimivat lähiverkossa sekä internetissä omalla IP-osoitteella. Toteutus tekee yhteyden muodostamisesta käyttäjän kannalta kevyemmän, lisäksi langattoman yhteyden avulla järjestelmään voidaan usein yhdistää paikasta riippumatta myös mobiililaitteilla.

Vaikka rakennusautomaatiojärjestelmien valmistajat tarjoavat nykypäivänä järjestelmiin etävalvonnan, on se usein käytettävissä vain heidän omaan järjestelmäänsä, mikä aiheuttaa haasteita kiinteistöjen omistajien näkökulmasta, kun järjestelmätoimittajia on useita. [9]

Yhtenäisen käytännön puuttuessa yleinen tapa rakennusautomaatiojärjestelmien etähallinnan toteuttamiseen on muodostaa erillinen yhteys jokaiseen kiinteistön rakennusautomaation alakeskukseen tai kiinteistössä sijaitsevaan rakennusautomaation keskusvalvomoon. Fyysisiä keskusvalvomoita asennetaan yhä harvemmin ja ne on korvautuneet pilvivalvomolla, joka mahdollistaa järjestelmien etähallinnan keskitetysti internetin kautta. Pilvivalvomo tarkoittaa käyttöliittymää, joka toimii internetin yli ilman käyttäjälle asennettavia erillisiä ohjelmistoja, pilvivalvomo voi olla järjestelmätoimittajien tarjoama tai kiinteistöalan palveluntarjoajien kehittämä. Järjestelmätoimittajien pilvivalvomot on usein rakennettu vain kyseisen järjestelmätoimittajan omalle laitemerkille yhteensopivaksi, mikä lähtökohtaisesti poissulkee toisen järjestelmätoimittajan laitteiden liittämisen samaan pilvivalvomoon. Erilaisille rakennusautomaatiojärjestelmille yhteensopivia pilvivalvomoita on myös toteutettu, ne ovat kuitenkin vielä melko harvinaisia, vaikka niiden toteuttamiseen on erilaisia ratkaisuja olemassa.

Tavallisesti kiinteistöjen omistajilla tai kiinteistöjä hallinoivilla organisaatioilla on heidän kiinteistökannassaan useita erilaisia rakennusautomaatiojärjestelmiä, tavallisesti heillä on myös useita erilaisia järjestelmäkohtaisia etähallintaa varten rakennettuja käyttöliittymiä.

Keskitettyjen, järjestelmäriippumattomien rakennusautomaation pilvijärjestelmien hitaaseen kehittymiseen vaikuttaa pääosin kaksi tekijää. Suurin yksittäinen tekijä on rakennusautomaatiojärjestelmien heikko hyödyntämisaste kiinteistöjen energianhallinnassa ja ylläpidossa. Toisena merkittävänä tekijänä on rakennusautomaatiojärjestelmien heterogeenisyys, mikä edellyttää erilaisten järjestelmien yhteensovittamista keskitetyn järjestelmän rakentamiseksi. Myös kiinteistötekniikan verrattain matala kriittisyysaste ohjaa toteuttamaan kiinteistöihin lähtökohtaisesti kustannuksiltaan edullisia ratkaisuja, mikä tarkoittaa vain välttämättömien toimintojen rakentamista kiinteistötekniikan valvontaan ja ylläpitoon.

Rakennusautomaatiojärjestelmien kehittäjien keskeisimpänä tavoitteena ei ole kehittää järjestelmistä sellaisia, että ne ovat heidän kilpailijoiden järjestelmiin tai pilvijärjestelmiin helposti integroitavissa. Tästä syystä kiinteistöjen erilaisten rakennusautomaatiojärjestelmien keskitettyä hallintaa varten tarvitaan avuksi rakennusautomaatiojärjestelmien ulkopuolista teknologiaa.

4. JÄRJESTELMÄINTEGRAATIO

Järjestelmäintegraatio tarkoittaa eri tekniikoilla toteutettujen järjestelmien ja ohjelmistojen liittämistä toisiinsa siten, että haluttu kommunikaatio niiden välillä toimii. Järjestelmäintegraatiolla voidaan saavuttaa huomattavia hyötyjä, kuten, vapauttaa resursseja ja kasvattaa kilpailukykyä [54]. Järjestelmäintegraatiolla voidaan tarkoittaa pelkästään ohjelmatason integraatiota tai myös fyysisten laitteiden ja ohjelmistojen välistä integraatiota.

Järjestelmäintegraatiossa erityyppisten järjestelmien, kuten tietojärjestelmien kommunikointi automatisoidaan ja sitä kautta saavutetaan jotakin konkreettista hyötyä. Informaatiota tuottavat ja sitä kuluttavat osapuolet verkottuvat toisiinsa, verkostossa olevien kahden osapuolen välinen kommunikaatio voi olla yksi- tai kaksisuuntaista. Järjestelmäintegraation suunnittelussa kannattaa huomioida, että verkostoa voidaan tulevaisuudessa laajentaa ilman merkittäviä rakenteellisia muutoksia ja niistä aiheutuvia kustannuksia. [64, s. 22 – 23]

Tyypillinen syy järjestelmäintegraation käyttöönottoon on liiketoimintaprosessien tehostaminen. Integraatiolla voidaan vähentää prosessin manuaalisia välivaiheita, mikä nopeuttaa prosesseja ja vähentää virheitä, tällä tavoin voidaan saavuttaa huomattavia kustannussäästöjä. [64, s. 23 – 25]

4.1 Integraation periaatteet

Eri järjestelmien välillä tapahtuva tiedonsiirto mahdollistuu vain silloin, kun integroitavat järjestelmät tarjoavat yhteisen rajapinnan, jonka kautta informaatiota voidaan siirtää osapuolten välillä, lisäksi rajapintojen välillä tulee olla jokin fyysinen tietoverkko. Kun tietoa siirretään julkisen verkon yli, tulee tietoturva ottaa erityisesti huomioon. Yksi vaihtoehto on toteuttaa suojaus käyttämällä erilaisia VPN-ratkaisuja. [64, s. 49 – 52]

Järjestelmäintegraation toteuttaminen on perinteisesti vaatinut erilaista IT-osaamista toteutuksen eri vaiheissa. Nykypäivänä järjestelmäintegraatio kehitystä ohjaa vahvasti liiketoimintalähtöiset tarpeet ja integraation toteutuksiin on tarjolla niin sanottuja ”plug and go” -tyyppisiä ratkaisuja, jotka eivät vaadi syvällistä IT-osaamista. Myös järjestelmätoimittajat tarjoavat nykyään huomattavan määrän erilaisia rajapintoja, jotka helpottavat järjestelmien integrointia toisiinsa.

Rakennusautomaatiojärjestelmän ja pilvijärjestelmän välinen integraatio perustuu ensisijaisesti erilaisten tiedonsiirtoprotokollien yhteensovittamiseen, jonka avulla järjestelmien välinen tiedonsiirto mahdollistuu. Rakennusautomaatiojärjestelmän tyypistä riippumatta niissä käytettävät väyläprotokollat eivät suoraan mahdollista datan lukemista pilvijärjestelmään, vaan luettava data on muunnettava pilvijärjestelmälle sopivaan muotoon. Nykyaikaisten rakennusautomaatiojärjestelmien tapauksissa tämä tarkoittaa lähes poikkeuksetta kolmannen osapuolen tarjoamien ratkaisujen käyttämistä integraation toteuttamiseen.

4.2 Toteutuksen lähtökohdat

Valmiudet rakennusautomaatiojärjestelmän ja pilvijärjestelmän integraation toteuttamiseen vaihtelevat kiinteistön rakennusautomaatiojärjestelmän ominaisuuksien mukaan. Useimmat nykyaikaiset rakennusautomaatiojärjestelmät ovat kehittyneitä siten, että ne kykenevät itsenäisesti muodostamaan yhteyden IP-verkkoon, tämä tapahtuu prosessiasemiin sisäänrakennettujen väyläliityntöjen kautta. Ethernet on yleinen rakennusautomaatiojärjestelmien väyläprotokolla, jota voidaan hyödyntää integraation toteuttamisessa. Osa rakennusautomaatiojärjestelmistä on periaatteeltaan kompakteja yksikkösäätimiä, joka eivät ole suoraan liitettävissä IP-verkkoon. Ulkoisilta liitynnöiltä suljettujen yksikkösäätimien tapauksissa integraatio toiseen järjestelmään on mahdollista toteuttaa lukemalla datapisteet järjestelmän sisäisestä tiedonsiirtoväylästä.

Rakennusautomaatiojärjestelmän ja pilvijärjestelmän käyttämien protokollien yhteensovittamiseen on olemassa erilaisia toteutustapoja. Lähtötilanteen ja tavoitteiden mukaan integraatio voidaan toteuttaa käyttämällä täysin valmiita kaupallisia etäyhteyslaitteita tai jokaiseen rakennusautomaatiojärjestelmään erikseen räätälöityjen ratkaisujen avulla.

Integraation toteutustavan valinnassa tulee ottaa huomioon, halutaanko kaikkea automaatiojärjestelmän sisältämää dataa viedä pilvijärjestelmään. Toisinaan voidaan katsoa tarpeelliseksi lukea tietystä prosessista vain muutama datapiste, tällöin käytettävän menetelmän tulee mahdollistaa datapisteiden suodatus, jolloin pilvijärjestelmään viedään vain valitut datapisteet. Datapisteiden suodatus on mahdollista, kun käytetään toteutukseen niin sanottuja yhdyskäytävälaitteita.

Rakennusautomaatiojärjestelmien kenttälaiteliitännöistä suurin osa on prosessien toiminnan kannalta merkityksellisiä ja näiden datapisteiden siirtäminen pilvijärjestelmään on etenkin järjestelmien valvonnan kannalta olennaista. Rakennusautomaatiojärjestelmiin liitetään tavallisesti myös huomattava määrä informatiivisia mittaus- tai hälytystietoja, jotka eivät vaikuta prosessien toimintaan. Kun tavoitteena on seurata keskitetysti

kiinteistöjen talotekniikkaa ja hyödyntää pilvijärjestelmää prosessien optimoinnin lisäksi myös muuhun toimintaan, kuten hälytysten jälkikäsittelyyn, ei datapisteiden suodatus ole tarpeellista. Tällöin integraatio on mahdollista toteuttaa käyttämällä pilvijärjestelmiä tukevia suoran yhteyden muodostavia etäyhteyslaitteita.

Rakennusautomaatiojärjestelmän ja pilvijärjestelmän välinen integraatio on myös mahdollista toteuttaa ilman kentälle asennettavia yhdyskäytävä- tai etäyhteyslaitteita, tämän tyyppisestä toteutuksesta voidaan käyttää nimitystä ohjelmatason ratkaisu.

4.3 Yhdyskäytävämalli

IoT-yhdyskäytävä eli IoT-gateway yhdistää kentällä sijaitsevat IoT-laitteet, anturit ja erilaiset järjestelmät pilvipalveluun. Yhdyskäytävä muuntaa järjestelmien väyläprotokollat sopiviksi, niin sanotuiksi IoT-protokolliksi sekä mahdollistaa datan paikallisen tallentamisen ja käsittelyn. Yhdyskäytävä toimii verkkoyhteyden yhteyspisteenä sisäverkon ja ulkoisen internetin välillä. [11]

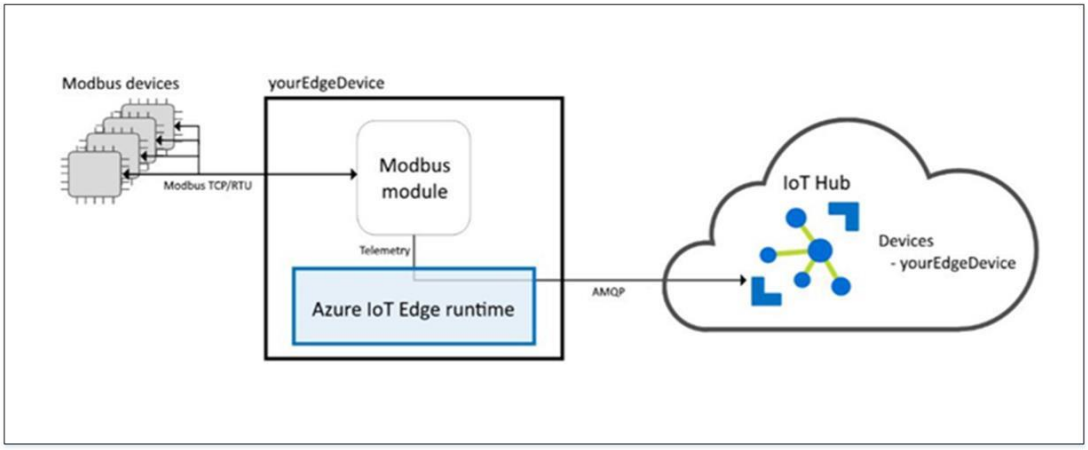
Tavallisesti yhdyskäytävälaitteena toimii tietokone, joka voi suorittaa yksinkertaista reitityslogiikkaa tai raakadatan keräilyn ja suodatuksen ohjelmistoa tai hyvin raskasta ja vaativaa automaation tai analytiikan ohjelmistoa. Yhdyskäytävälaitteita on Saatavissa erilaisiin tarpeisiin, joko valmiiksi suunniteltuina tiettyihin kokonaisuuksiin, tai räätälöitävissä erilaisiin käyttöympäristöihin. [9]

Yhdyskäytävä-arkkitehtuurissa etuna on mahdollisuus raakadatan suodatukseen mikä vähentää tietoliikenteen määrää sekä ulospäin suuntautuvan verkkoliikenteen määrä ja laskee mahdollisesti kustannuksia. Yhdyskäytävälaitteet mahdollistavat datan keräämisen omaan tietokantaansa myös silloin, kun yhteys pilveen on poikki, kun yhteys palaa, laite lähettää datan pilveen. Koska yhdyskäytävälaite mahdollistaa protokollien yhtenäistämisen, voidaan sen avulla integroida erilaisia järjestelmiä toisiinsa. Myös väyläprotokollien ja tietoturva-asetusten päivittäminen on mahdollista laitteen avulla. [9]

Edellä esitellyistä integraation lähtötilanteista riippumatta, datan lukeminen rakennusautomaatiojärjestelmästä pilvijärjestelmään on mahdollista yhdyskäytävälaitteen avulla, toteutus on mahdollista useilla pilvijärjestelmillä, kuten Microsoft Azure:ssa. Yhdyskäytävälaitteet, kuten WRM247+, Neousys IGT-20 ja FATBOX G3 mahdollistavat useiden kenttälaiteprotokollien lukemisen laitteeseen, tarvittaessa voidaan käyttää protokollamuuntimia automaatiojärjestelmän ja yhdyskäytävälaitteen välillä.

4.3.1 Azure IoT Edge gateway

Azure IoT Edge gateway on Microsoftin yhdyskäytäväratkaisu Azure-pilvipalvelun ja kenttälaitteiden välisen integraation toteuttamiseen. Azure IoT Edge koostuu Azure palveluja käyttävistä IoT Edge-moduuleista, käyttöönotettujen moduulien ajo-ohjelmisto IoT Edge runtime:sta sekä käyttöliittymästä, jolla voidaan seurata ja hallita IoT Edge-laitteita etänä. Azure IoT Edge-laite voidaan määrittää tukemaan useita väyläprotokollia, kuten Modbus RTU- tai Modbus TCP-protokollaa. IoT Hub on palvelu, joka toteuttaa tietoturvallisen kaksisuuntaisen kommunikaation IoT-laitteiden ja pilveen rakennettavan IoT-sovelluksen välillä. Edge-laitteen ja pilvipalvelun välinen AMQP-tiedonsiirto salataan Transport Layer Securityn (TLS) -menetelmän avulla [39]. Azure IoT Edge gateway- yhdyskäytäväratkaisun periaate on esitetty kuvassa 17.

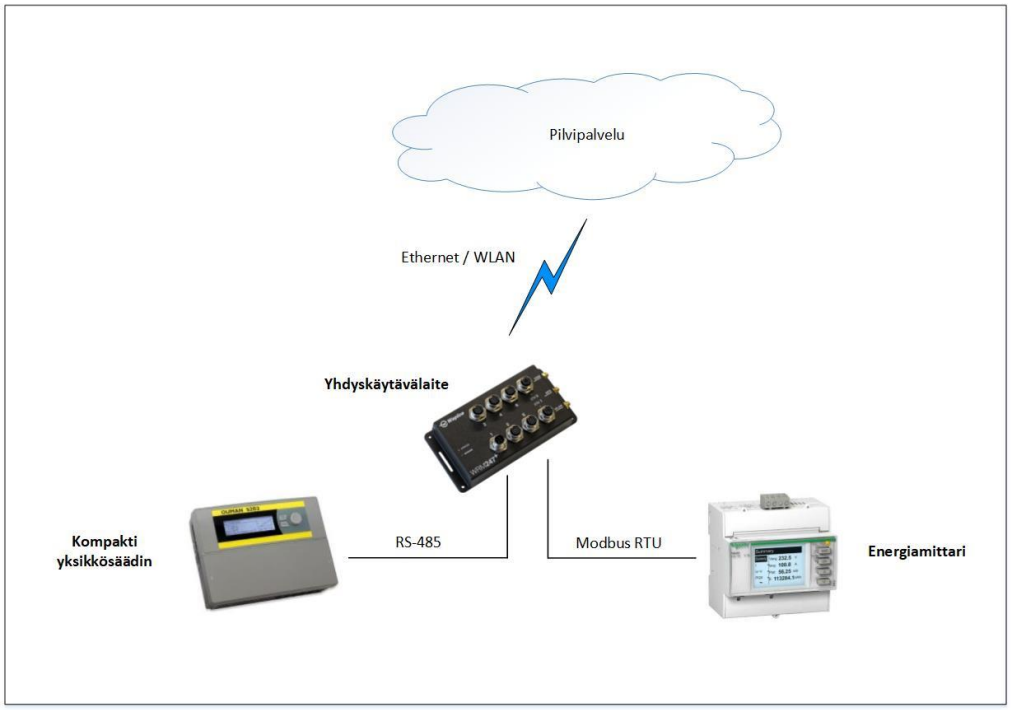


Kuva 17 Microsoft Azure IoT edge gateway [36].

Azure IoT Edge-laitteena voidaan käyttää lähes mitä tahansa Linux- tai Windows- laitetta, myös Microsoftin sertifioimia Edge-laitteita on runsaasti tarjolla eri valmistajilla, näitä ovat esimerkiksi Teltonika TRB255 ja Advantech-EIS-D210.

4.3.2 WRM 247+

WRM 247+ on suomalaisen teknologiayritys Wapicen kehittämä etähallintaan, -mittaukseen ja -ohjaukseen tarkoitettu yhdyskäytävälaite. WRM247+ soveltuu käytettäväksi joko itsenäisesti tai osana laajempaa IoT-järjestelmää. WRM 247+ tukee laajasti erilaisia väyläprotokollia, tuettuna on myös useita rakennusautomaatiojärjestelmissä käytettäviä väyläprotokollia, kuten Modbus RTU, Modbus TCP, BACnet ja RS-484. Laite voi toimia rajapintana rakennusautomaatiojärjestelmän ja pilvijärjestelmän välillä, käyttäen MQTT-protokollaa. Laitteen ja pilvijärjestelmän välinen tietoliikenne on salattu SSL (Secure Sockets Layer) menetelmällä. [68]



Kuva 18 WRM247+ sovellusesimerkki [1].

WRM 247+ on myös käyttökelpoinen ratkaisu etenkin sellaiseen tapaukseen, jossa rakennusautomaatiojärjestelmän dataa luetaan järjestelmän sisäisestä tiedonsiirtoväylästä, esimerkki tämän tyyppisestä sovelluksesta on esitetty kuvassa 18. Laite mahdollistaa kaksisuuntaisen tiedonsiirron, joka tarjoaa mahdollisuuden ohjata kenttälaitteita tai muuttaa prosessien asetusarvoja pilvijärjestelmästä erikseen määriteltyjen ehtojen mukaisesti. Laite mahdollistaa luettavien datapisteiden suodattamisen, mikäli kaikkea dataa ei haluta automaatiojärjestelmästä välittää eteenpäin.

4.4 Etäyhteyslaite

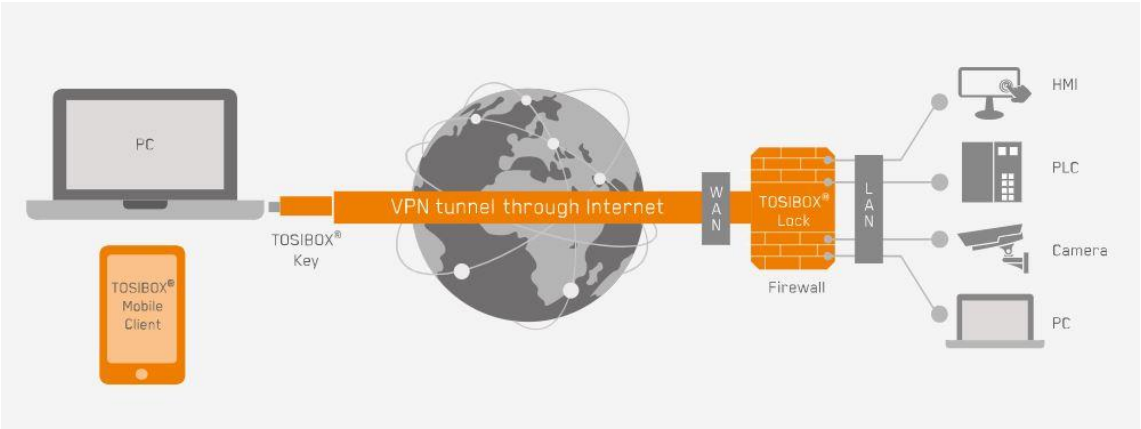
Erilaiset etäyhteyslaitteet ovat yleinen ratkaisu rakennusautomaatiojärjestelmän ja etähallintajärjestelmän välille muodostettavan suojatun yhteyden toteuttamiseen. Etäyhteyslaitteet ovat yksinkertainen ja toimiva ratkaisu internetiin liitettyjen, suojaamattomien automaatiolaitteiden tietoturvan parantamiseen. Etäyhteyslaitteet mahdollistavat usein nopean käyttöönoton sekä korkean tietoturvatason, yleinen tapa yhteyden suojaamiseksi on käyttää VPN-yhteyttä. Etäyhteyslaitteet ovat tyypillisesti tarkoitettu käytettäväksi IP-osoitteellisille laitteille, joiden kommunikaatio tapahtuu Ethernet-lähiverkkotekniikalla. Etäyhteyslaitteiden avulla ei voi lukea tietoja suoraan rakennusautomaatioväylästä, eikä ne voi toimia protokollamuuntimina, kuten useat yhdyskäytävälaitteet.

[1] Kuvassa näkyvät laitteet ovat Wapicen, Oumanin ja Schneider Electricin tuotteita

VPN (Virtual Private Network) tarkoittaa virtuaalista erillisverkkoa, jonka käyttötarkoitus on suojata erilasten tietojen yksityisyyttä internetissä. VPN-verkkoa käytettäessä yhteys ei mene suoraan internetiin, vaan kulkee ensin VPN-palvelimen kautta, tällöin verkkopalvelut näkevät, että tietoliikenne tulee VPN-palvelimen IP-osoitteesta eikä käyttäjän laitteesta, tällä tavoin käyttäjän todellinen sijainti pysyy salassa. VPN mahdollistaa myös verkkoliikenteen salauksen, jonka ansiosta tiedot näkyvät vain niille, joiden on tarkoituskin nähdä ne, mutta ulko-puoliset eivät voi tarkastella käyttäjän verkkoliikennettä. [20]

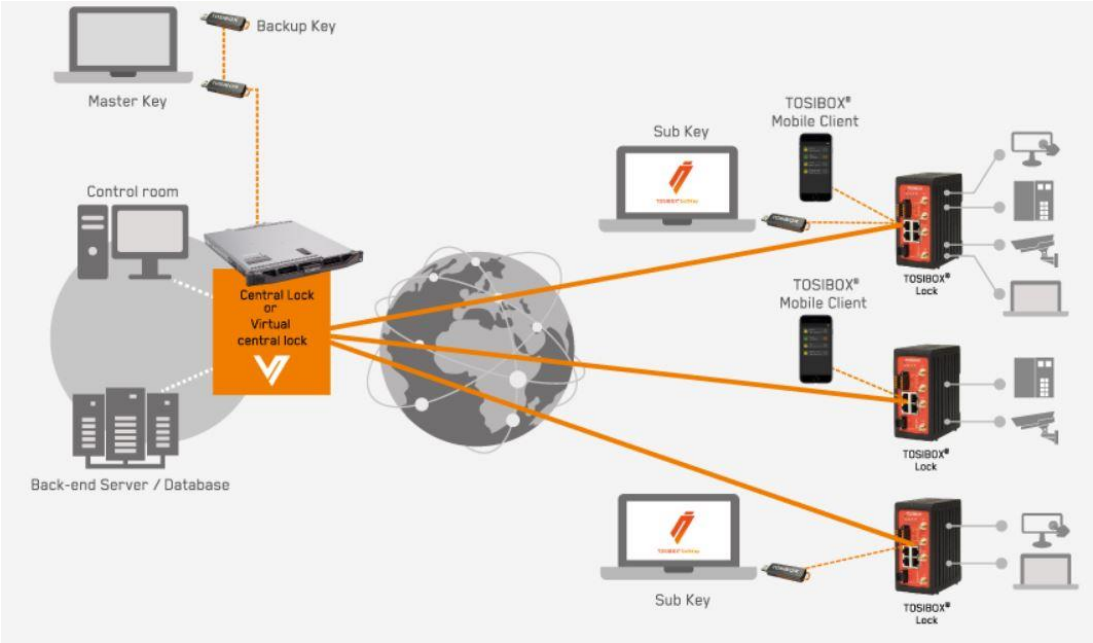
4.4.1 Tosibox

Tosibox on etäyhteysratkaisu, joka luo VPN-tunnelin kentällä olevan laitteen ja käyttöliittymän välille. Etäyhteys voidaan luoda käyttämällä fyysisiä komponentteja tai käyttämällä osittain virtuaalisia ohjelmistoja. Toteutuksen peruskomponentteina toimivat kuvan 19 mukaisesti kentällä sijaitsevaan päätelaitteeseen kytkettävä reititin (Tosibox Lock) sekä asiakkaan valvomopäätteelle asennettava USB (Universal Serial Bus) -avain, josta käytetään nimitystä Tosibox Key. Tosibox-ratkaisua voidaan laajentaa rajattomasti ja niitä voidaan käyttää sekä sisäisissä että ulkoisissa verkoissa. Tosiboxia on mahdollista käyttää eri sukupolvien järjestelmiin. [58]



Kuva 19 Tosibox fyysinen lukko/avain -toteutus [58].

Mikäli halutaan hallita suurempia kiinteistömassoja yhdestä paikasta, voidaan kaikki yhteydet keskittää kuvan 20 mukaisesti niin sanottuun Tosibox-keskuslukkoon (Tosibox Central Lock). Keskuslukko on saatavilla fyysisenä laitteena sekä ohjelmistona (Tosibox Virtual Central Lock). Virtuaalinen keskuslukko voidaan asentaa yksityisille palvelimille tai AWS- ja Azure-pilvipalveluihin [58]. Tosibox soveltuu myös tarpeen mukaan käytettäväksi erilaisten protokollamuuntimien kanssa, kuten sarjaväylään tarkoitettu Moxa-NPort 5110 tai Ethernet-laitteisiin NETLink PROFIBUS Ethernet-Gateway. [59]



Kuva 20 Tosibox, Central Lock [58].

Tosiboxin ratkaisut perustuvat Ethernet-tekniikkaan. Tekniikka ei suodata tai valikoi luettavaa informaatiota, vaan luo päätelaitteeseen tietoturvallisen etähallinnan, joka mahdollistaa samat säätö- ja ohjaustoiminnot etäyhteyden kautta kuin paikallisestikin. Tämä tarkoittaa sitä, että kaikki järjestelmän sisältämä data on luettavissa myös etäkäyttöliittymästä tai pilvijärjestelmästä. Kaksisuuntainen yhteys mahdollistaa pilvijärjestelmän sisältämien työkalujen hyödyntämisen prosessien ohjaamisessa.

4.5 Ohjelmatason ratkaisu

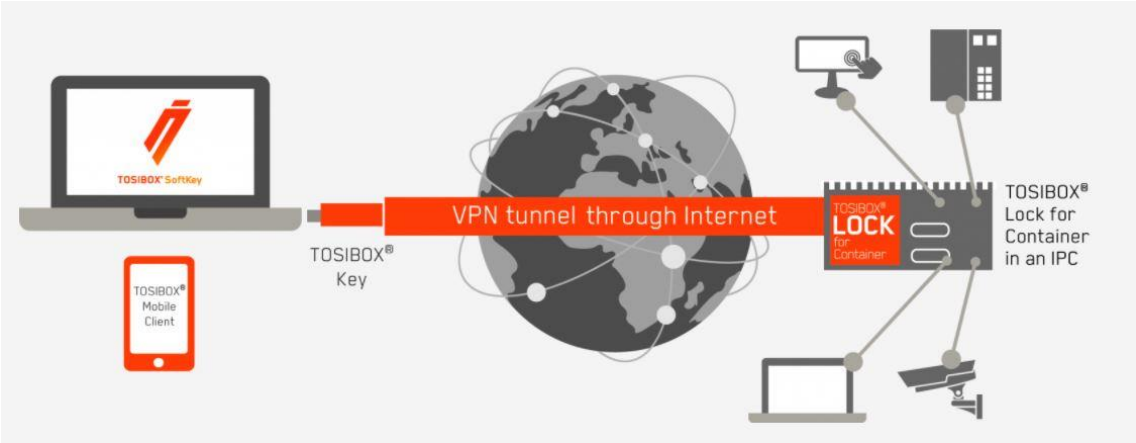
Rakennusautomaatioalalla kehittyneimpänä ratkaisuna integraation toteuttamisessa voidaan nykypäivänä pitää niin sanottua ohjelmatason ratkaisua, joka tekee tarpeettomaksi rakennusautomaatiojärjestelmän ulkopuolisten fyysisten komponenttien käyttämisen. Ohjelmatason ratkaisussa aiemmin protokollien yhteensovittamisen ja suojatun etäyhteyden hoitanut fyysinen laite korvautuu ohjelmatason ratkaisulla, joka sulautetaan osaksi rakennusautomaatiojärjestelmää.

Ohjelmatason ratkaisu perustuu konttiteknologiaan, jossa rakennusautomaatiojärjestelmien prosessiaseman perustoiminnot erotetaan muusta ohjelmistosta ja tällä tavoin ylläpidetään sovellusten normaalit toiminnot. Ohjelmatason ratkaisu toteutetaan niin sanotulla ajonaikaisella (runtime) ohjelmistolla, joka asennetaan automaatiolaitteen käyttöjärjestelmään. Ajonaikaisia konttiteknologiaan perustuvia etäyhteysohjelmistoja on joillakin kaupallisilla laitevalmistajilla ja ohjelmistoyrityksillä tarjolla, yksi näistä on Tosiboxin kehittämä Lock for Container -ohjelmisto, myös Microsoftin Azure IoT Edge-ratkaisussa

käytetty runtime -ohjelmisto voidaan asentaa ohjelmiston suoritusvaatimukset täyttävään Windows -tai Linux- käyttöjärjestelmään.

4.5.1 Tosibox Lock for Container

Tosibox Lock for Container on ohjelmisto, jolla voidaan muodostaa VPN-yhteys kentällä olevien ohjainlaitteiden, kuten rakennusautomaatiojärjestelmän prosessiasemaan (PLC) tai muiden IoT-laitteiden ja TOSIBOX-verkon välille. Lock for Container voidaan asentaa mihin tahansa 64-bittiseen, Docker-alustaa tukevaan Linux-käyttöjärjestelmään Lock for Container voidaan asentaa myös uudempiin Windows-käyttöjärjestelmään pohjautuviin järjestelmiin, jotka tukevat konttiteknologiaa. [60][30]. Toteutuksen periaate on esitetty kuvassa 21, jossa fyysinen kenttälaite on korvattu ohjelmistolla.



Kuva 21 Tosibox, Lock for Container [60].

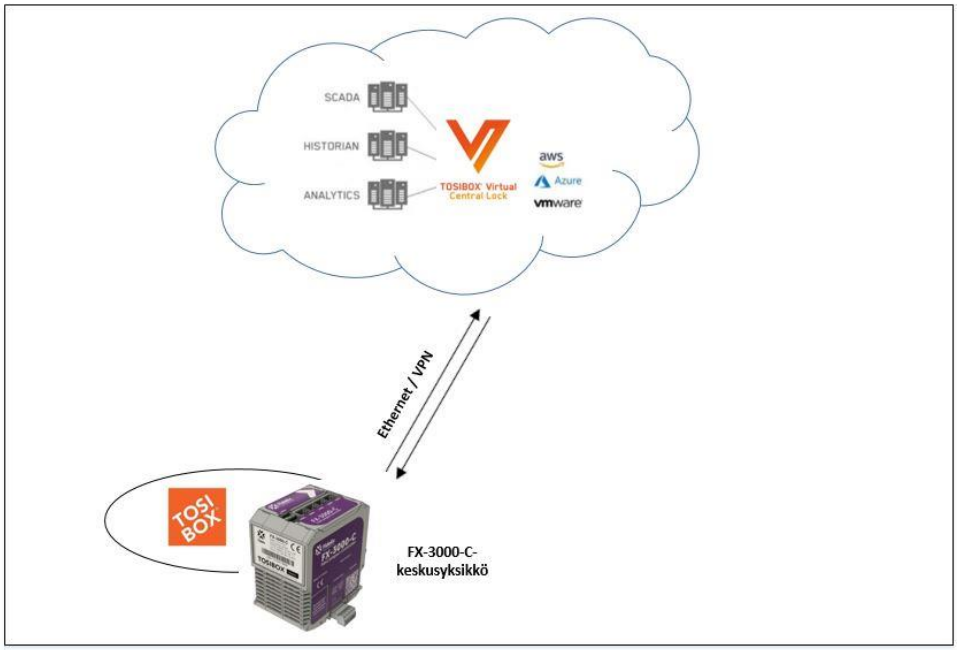
Rakennusautomaatiojärjestelmissä käytettynä Docker mahdollistaa Container-ohjelmiston erottamisen PLC-järjestelmäohjelmistosta ja takaa turvallisen käytön ja asennuksen. Lock for Container-ominaisuus on toteutettu tällä hetkellä rakennusautomaatiojärjestelmistä vain Fidelixin tuotteisiin, teollisuusautomaatiojärjestelmissä toteutuksia ovat tehneet useat valmistajat, kuten Wago ja Reliste. [60][30]

Wago on toteuttanut Lock For Container-ratkaisun erilaisiin automaatiosovelluksiin soveltuvaan PFC200- ohjainlaitteeseensa. Ohjain käyttää Linux-pohjaista Docker-tekniikkaa, mikä tekee siitä yhteensopivan Tosibox Lock for Containerin kanssa. Lock for Container on yksi Wagon käyttämistä yhteysvariaatioista, jonka he ovat toteuttaneet yhteistyössä Tosiboxin kanssa. [66]

4.5.2 Tosibox Readiness

Fidelix on pohjoismainen rakennusautomaatiojärjestelmien valmistaja, Fidelix on myös johtava laitevalmistaja suomen rakennusautomaatiomarkkinoilla. Fidelix on toteuttanut

suomessa tuhansia kohteita, joista tyypillisiä ovat kauppakeskukset ja toimistotalot. Fidelix ja Tosibox ovat yhteistyössä kehittäneet Tosibox Readiness-ominaisuuden, joka tarkoittaa Fidelixin rakennusautomaatiojärjestelmään integroitua tietoturvallista etäyhteysominaisuutta. Ominaisuus on sisäänrakennettu Fidelixin FX-3000-C- ja FX-Spider-40/10-keskusyksiköihin, ominaisuus vaatii aktivoinnin laitteeseen [62][18]. Suoraan Fidelix-laitteelta luotu yhteys pilvijärjestelmään havainnollistettu kuvassa 22.



Kuva 22 Tosibox Readiness-ominaisuus Fidelix-järjestelmässä [2].

Fidelixin keskusyksiköt pohjautuvat tällä hetkellä Windows CE-käyttöjärjestelmään ja Tosibox Readiness sovellus on integroituna laitteessa sisäänrakennettuun reitittimeen. [28]

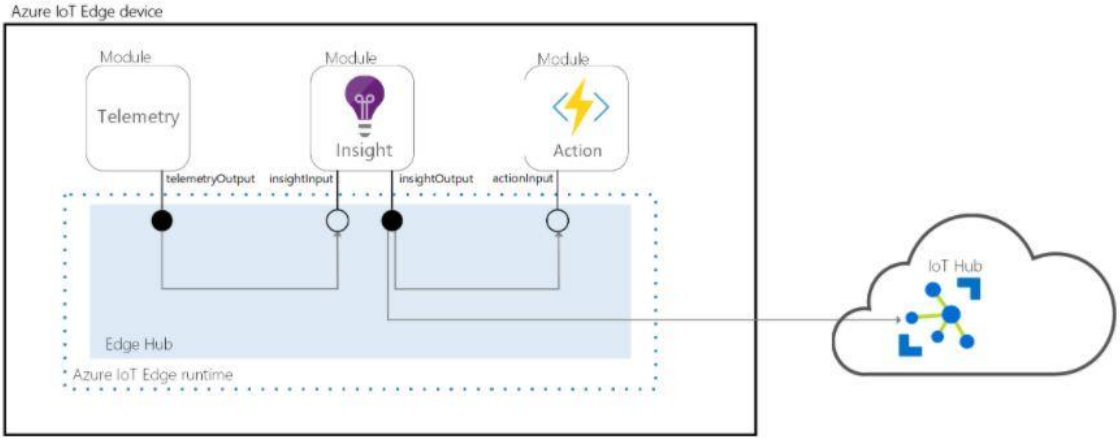
4.5.3 Azure IoT Edge runtime

Azure IoT Edge runtime on kokoelma ohjelmia millä päätelaite voidaan muuttaa IoT Edge-laitteeksi. IoT Edgen ajonaikaiset komponentit antavat IoT Edge-laitteille mahdollisuuden vastaanottaa ja välittää informaatiota. IoT Edge Runtimen pääkomponentit ovat IoT Edge Hub sekä IoT Edge Agent. IoT Edge Hub vastaa kommunikoinnista, eli se toimii välityspalvelimena IoT Hubille, jonka avulla laitteet liitetään pilvijärjestelmään. IoT Edge-agentti on vastuussa moduulien hallinnasta ja monitoroinnista [35]. Runtime-ratkaisun kokoonpano esitetty kuvassa 23.

IoT Edge-laitteelle voidaan asentaa Dockerin kehittämä Moby-konttikehitystyökalu sekä Azure Container Registry (ACR) -palvelu, joiden avulla sovelluksia tai taustajärjestelmiä

[2] Kuvassa näkyvät laitteet ja ratkaisut ovat Fidelixin ja Tosiboxin tuotteita

voidaan ajaa konteissa ja niiden avulla Edge-laite voi tehdä haluttuja toimintoja, kuten kerätä tietoja järjestelmästä tai erilliseltä kenttälaitteelta ja välittää IoT Hubille. [37]



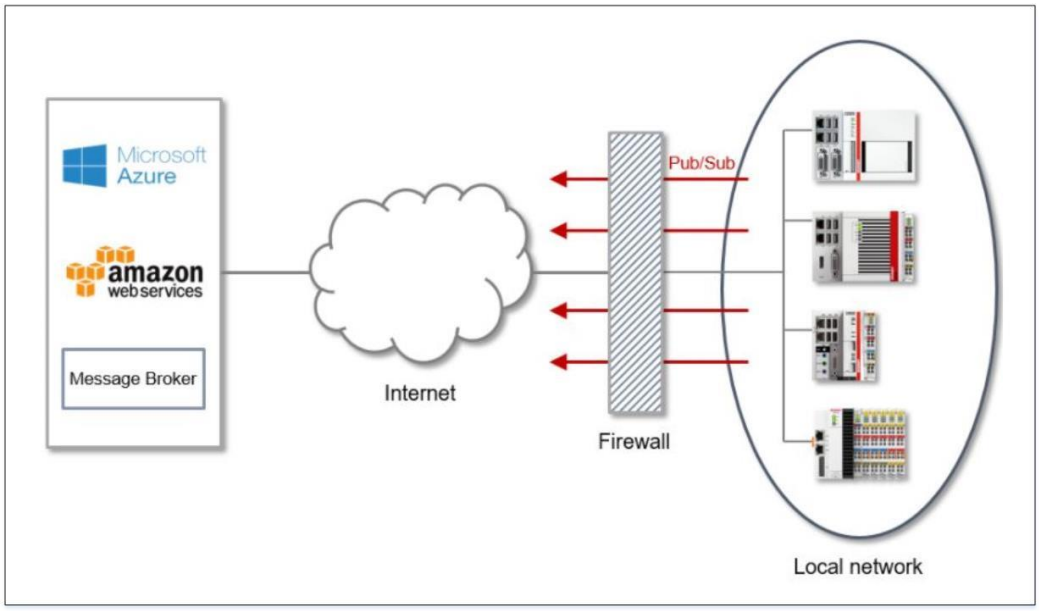
Kuva 23 IoT Edge runtime, moduulit ja tiedonsiirto IoT hubille [35].

IoT Edge runtime voidaan ottaa käyttöön pienissä laitteissa kuten Raspberry Pi tai suurissa teollisuuspalvelimissa. Runtime voidaan asentaa Linux- tai Windows-laitteille, käytettävä Windows-versio tulee olla riittävän uusi, tuettu versio. [35]

4.5.4 Beckhoff IoT

Beckhoff on avoimien PC-pohjaiseen ohjaustekniikkaan perustuvien automaatiojärjestelmien toimittaja. Beckhoffin laitevalikoimassa on teollisuus-PC:itä, kenttäväyläkomponentteja, automaatiosovelluksien ohjelmistoja sekä muita automaatiojärjestelmiin liittyviä tuotteita. Beckhoffin järjestelmiä on käytössä maailmanlaajuisesti erilaisissa teollisuuden sovelluksissa sekä rakennusautomaatiossa. [7]

Beckhoffin PC-ohjelmistojen kehitysympäristönä toimii TwinCAT 3, jonka IoT-työkalujen avulla tiedonsiirto ala-asemasta pilvijärjestelmään voidaan toteuttaa ilman erillisiä yhteys- tai yhdyskäytävälaitteita. Datan välittäminen pilvipalveluun tapahtuu kaksisuuntaiseen kommunikointiin kykenevällä TC3 IoT Data Agent-sovelluksella, joka mahdollistaa erilaisten IoT-toimintojen toteuttamisen. Tiedonsiirrossa käytetään standardoitua MQTT-tiedonvälitysprotokollaa. MQTT on julkaisija (pub) - / tilaajapohjainen (sub) tietoliikenneprotokolla, joka mahdollistaa viestipohjaisen siirron sovellusten välillä. Tämän siirtotyypin keskeinen komponentti on niin sanottu sanomanvälittäjä (Message Broker), joka jakaa viestit yksittäisten sovellusten tai viestin lähettäjän ja vastaanottajan välillä. Kaikkien viestintälaitteiden lähettämisen ja vastaanottamisen aikana otetaan yhteyttä sanomanvälittäjään, joka hoitaa viestin jakelun. Pilvipalveluna voi toimia useat pilvialustat, kuten Microsoft Azure tai Amazon Web Services [8]. Kommunikaation periaate esitetty kuvassa 24.



Kuva 24 Beckhoff IoT-kommunikaatio [6].

Beckhoffin laitteet on valmistettu teollisuuden vaatimukset huomioiden, ja ne ovat korkealaatuisia useimpiin rakennusautomaatiojärjestelmiin verrattuna. Beckhoffin laitevalikoimassa on rakennusautomaatiosovelluksiin sopivia prosessiasemia, jotka mahdollistavat ohjelmatason ratkaisun toteuttamisen. Beckhoffin järjestelmät ovat rakennusautomaatiosovelluksissa kuitenkin vähemmän käytettyjä.

5. TOTEUTETUT JÄRJESTELMÄT

5.1 Asiantuntijoiden haastattelut

Asiantuntijahaastattelujen tavoitteena oli kartoittaa nykypäivän rakennusautomaatioon ja pilvijärjestelmiin liittyviä integraatiomenetelmiä, sekä niihin liittyviä haasteita. Haastateltavat asiantuntijat valittiin internetin avulla tehdyn tiedonhankinnan sekä aiemman aiheesta kertyneen kokemusperäisen tiedon perusteella. Valintojen perusteena oli se, että asiantuntijan edustama yritys tarjoaa rakennusautomaatiojärjestelmien integraatioon liittyviä tuotteita tai palveluita. Valittuihin organisaatioihin tutustuttiin ennen haastattelua ja perehdyttiin heidän tarjoamiin tuotteisiin ja palveluihin mahdollisuuksien mukaan ennen haastattelua.

Haastateltavat asiantuntijat olivat laitevalmistajien-, ohjelmistoyrityksien- sekä rakennusautomaatioalan urakoitsijoiden edustajia. Haastatellut organisaatiot edustavat toimialojensa tyypillisiä toimijoita. Haastateltujen organisaatioiden määrät toimialoittain on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1 Haastatellut organisaatiot.

Toimiala	Organisaatioiden lukumäärä
Laitevalmistaja (etähallinta ja tiedonsiirto)	3
Ohjelmistoyritys (etähallinta, integraatio)	4
Rakennusautomaatiourakoitsija	2

Haastattelut toteutettiin puhelimen välityksellä sekä Teams-videoneuvottelulla. Haastatteluita varten laadittiin haastattelukysymykset, jotka vaihtelivat haastateltavan henkilön edustaman toimialan mukaan. Haastatteluilla pyrittiin etsimään vastauksia seuraaviin kysymyksiin:

- Onko olemassa yhtenäistä tapaa, jolla rakennusautomaatiojärjestelmiä voidaan järjestelmäriippumattomasti liittää pilvijärjestelmään?
- Millä eri tekniikoilla järjestelmien integraatioita on toteutettu?
- Mitä eri protokollia käytetyt tekniikat tukevat?
- Mitä kaupallisia tuotteita on käytettävissä?

Ensimmäinen yhteydenotto haastatteluihin liittyen tehtiin puhelimitse. Osa haastatteluista oli mahdollista tehdä jo ensimmäisen puhelinkeskustelun aikana, osa tehtiin myö-

hemmin sovittavana ajankohtana ja näistä osa tehtiin sähköpostin välityksellä. Mahdollisia lisäkysymyksiä oli jokaisen haastattelun kohdalla mahdollista kysyä uudelleen joko soittamalla tai sähköpostilla, useimmissa tapauksissa asiaan palattiin uudelleen sähköpostin välityksellä. Yhtä lukuun ottamatta kaikki sovitut haastattelut saatiin tehtyä sopimuksen mukaisesti, yksi haastateltava ei enää myöhemmin vastannut yhteydenottoihin.

5.2 Haastattelujen tulokset

Haastattelujen kautta saatu tietomäärä vaihteli huomattavasti eri organisaatioiden välillä, tämä johtui osittain myös heidän erilaisesta roolistaan toimialalla. Laitevalmistajien edustajat pyrkivät edistämään tuotteidensa markkinointia ja myyntiä, joten heiltä saatu tietomäärä oli kattavaa, toisaalta he toivat mielellään esille näkökulmia, jotka suosivat heidän omia tuotteitaan. Rakennusautomaatiourakoitsijoiden päätoimiala ei ole järjestelmäintegraatioiden toteuttaminen, heiltä löytyi kuitenkin kokemusperäistä tietoa erilaisten tuotteiden käytöstä. Etähallintaa ja integraatiopalveluja päätoimenaan tarjoavien ohjelmistoyritysten edustajilta saatu tietomäärä oli huomattavan vähäistä. Heidän suhtautumisensa tutkimukseen ei ollut myöskään yhtä avointa kuin muilla haastateltavilla.

Haastattelukysymyksiin vastaamisessa ja vastausten tarkkuudessa oli vaihtelua. Laitevalmistajien ja urakoitsijoiden osalta kaikkiin haastattelukysymyksiin vastattiin ja vastaukset olivat riittävän tarkkoja, ohjelmistoyritysten osalta kaikkiin kysymyksiin ei vastattu tai vastaukset olivat epäselviä. Vastauksia voidaan kuitenkin pitää pääosin luotettavina kaikkien haastateltujen osalta.

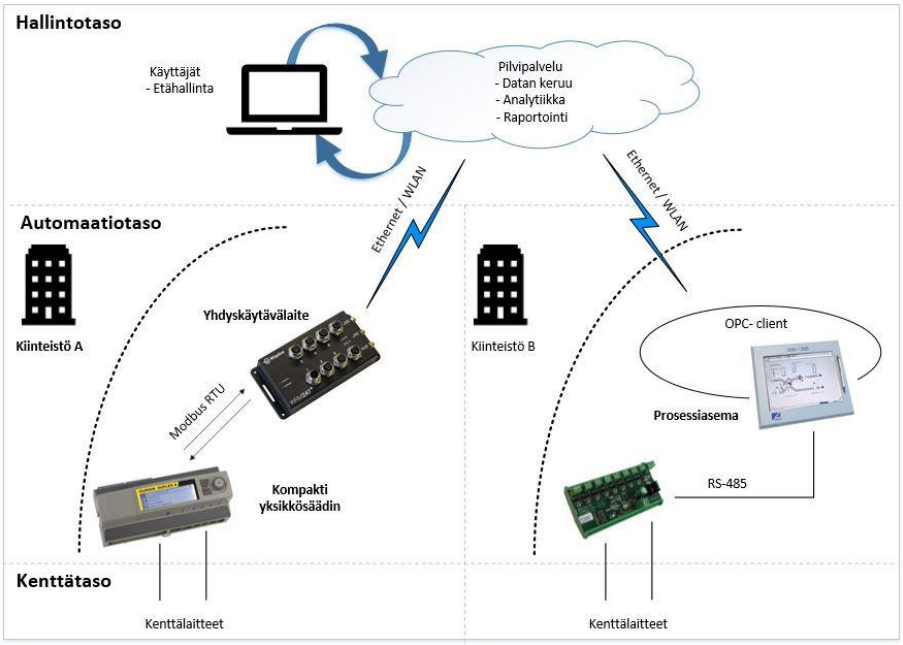
Kaiken kaikkiaan haastattelututkimusta voidaan pitää tämän työn tutkimuksen kannalta hyödyllisenä. Haastattelujen avulla saatiin olennaista tietoa nykypäivänä käytetyistä rakennusautomaation ja pilvijärjestelmien integraatiotekniikoista sekä erilaisista toteutuksista. Haastattelujen tuloksena voidaan todeta, että käytännössä toteutettuja rakennusautomaatiojärjestelmien ja pilvijärjestelmän integraatioita, kuten keskitettyjä ja järjestelmäriippumattomia kiinteistöjen hallintajärjestelmiä ovat nykypäivänä toteuttaneet useat eri palveluntarjoajat. Palveluntarjoajina toimivat talotekniikka-alan urakointi- ja ylläpitopalveluja tarjoavat yritykset sekä kiinteistötekniikan ja energiankulutuksen ylläpitoon sekä seurantaan räätälöityjä palveluja tarjoavat yritykset. Yhteistä kaikille toteutuksille on se, että niissä on useita eri laitemerkkejä ja protokollia liitetty samaan pilvijärjestelmään. Järjestelmäriippumaton kokonaisuus on kaikissa tapauksissa vaatinut eri lähtötilanteiden mukaan useita erilaisia toteutustapoja. Seuraavassa kappaleessa on esitetty tyypillinen esimerkkiratkaisu keskitetystä etähallintajärjestelmästä.

5.3 Palveluntarjoaja A

Palveluntarjoaja A:n yhtenä liiketoiminnan osa-alueena on kiinteistötekniikan sekä kiinteistöjen energiankulutusten seuranta- ja hälytyspalvelut. Kiinteistön lämmön, sähkön ja veden kulutuksia on mahdollista seurata jopa tunnin tarkkuudella, mikä mahdollistaa nopean reagoinnin mahdollisiin muutoksiin. Kiinteistöjen sisäolosuhteiden tai prosessien mittausten perusteella pyritään tuottamaan lisäarvoa kiinteistön toimintaan liittyen sekä varmistamaan tavoitellut olosuhteet ja energiankäyttö. Kiinteistöjen seuranta tapahtuu pilvipohjaisesta käyttöliittymästä, joka mahdollistaa erilaisia automaattisia toimintoja, kuten kulutuspoikkeamien havainnointia. Järjestelmästä on mahdollista luoda laajasti kulutusraportteja, joiden avulla kulutusten tai olosuhteiden käyttäytymistä voidaan havainnollistaa.

Kulutusseurannan lisäpalveluna tarjotaan hälytyspalvelua, jonka tarkoituksena on havaita ja raportoida selvitystä vaativat kulutuspoikkeamat. Palveluun sisältyy lisäksi kulutuskäyttäytymisen analysointi ja tulosten raportointi asiakkaalle.

Pilvijärjestelmään luettava data tulee erilaisista lähteistä, kuten rakennusautomaatiojärjestelmistä tai kulutusseurantajärjestelmistä. Datan lukemiseen käytettävät menetelmät vaihtelevat datan lähteen mukaan. Usein käytettyjä menetelmiä datan lukemiseen PLC-pohjaisissa rakennusautomaatiojärjestelmissä ovat OPC-rajapinta sekä kompaktien yksikkösäätimien tapauksissa WRM247+ laite.



Kuva 25 Palveluntarjoaja A, järjestelmän rakenne [3].

[3] Kuvassa näkyvät laitteet ovat Fidelixin, Wapicen ja Oumanin tuotteita

Kuvassa 25 esitetty palveluntarjoaja A:n toteuttamaa järjestelmää voidaan verrata aiemmin esiteltyyn rakennusautomaatiojärjestelmän yleiseen hierarkiaan. Hierarkian kaksi alinta tasoa, kenttätaso sekä automaatiotaso ovat säilyneet pääosin ennallaan. Älykkäiden kenttälaitteiden osuus on nykypäivänä kasvanut, mutta rakennusautomaatiojärjestelmän kenttätason sekä alakeskustason tietoliikenne on pääosin perinteisen hierarkian mukainen. Keskeisin muutos nähdään hierarkian hallintotasolla, jossa paikalliset valvomot ovat korvautuneet pilvipohjaisella ratkaisulla. [52]

5.4 Menetelmien arviointi

Riippumatta integraatiota hyödyntävän palveluntarjoajan tarjoamista palveluista tai liiketoiminnasta, käytännön toteutetut järjestelmät ovat niissä käytettyjen ratkaisujen osalta hyvin lähellä toisiaan. Vaikka toteutetuissa järjestelmäkokonaisuuksissa ei suuria poikkeamia olekaan, edellä käsitellyt yksittäiset integraatiomenetelmät poikkeavat kuitenkin toisistaan monella eri tavalla, joista keskeisimpänä ovat kustannukset ja käytettävyys. Järjestelmäintegraation toteutuksessa olennaista on valita menetelmä, joka vastaa todellista käyttötarvetta ja mahdollistaa tarvittavat muutokset pidemmällä aikajaksolla. Edellisen kappaleen esimerkkiratkaisussa kuvatulla toteutuksella viitataan seuraavan kappaleen taulukon 2 ylimmäiseen laitteeseen.

5.4.1 Kustannukset

Integraation eri menetelmien kustannuksien vertailussa tulee huomioida ensisijaisesti toteutuksen käyttötarkoitus ja mittaluokka. Menetelmien erilaisen hinnoittelun takia yksi menetelmä soveltuu tiettyyn käyttötarpeeseen paremmin kuin toinen, vaikka teknisesti molemmissa olisi samat ominaisuudet.

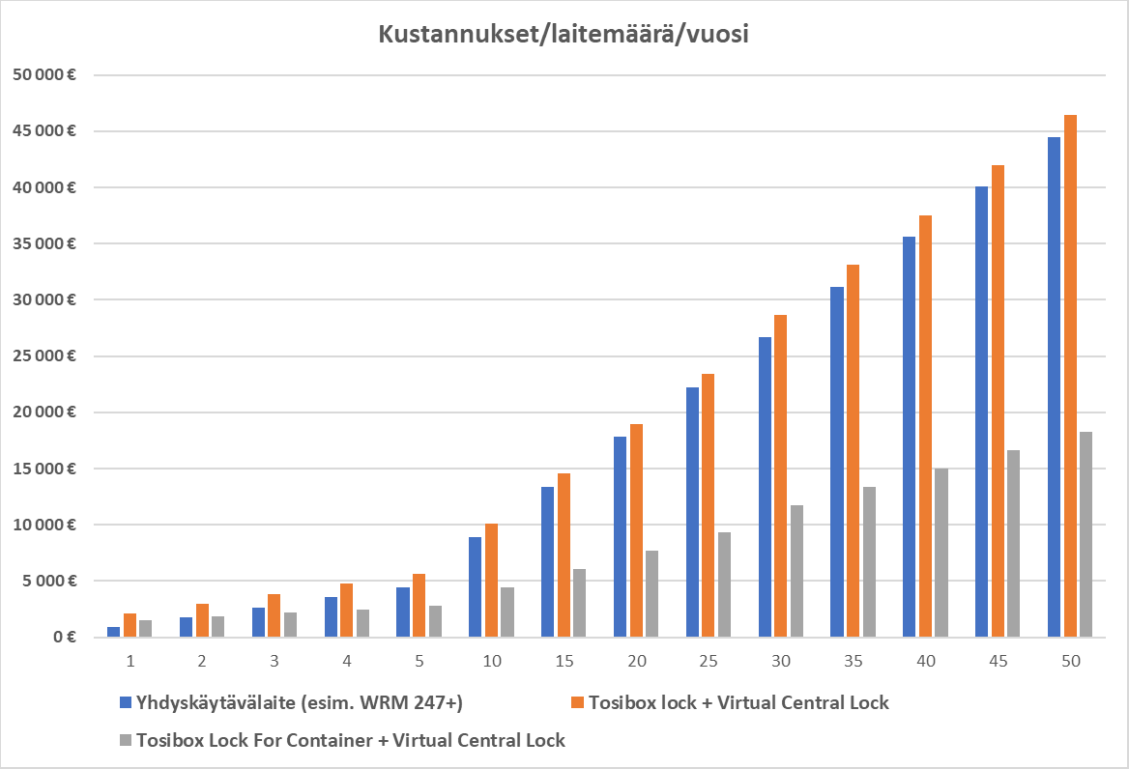
Tässä kappaleessa vertailtiin kolmea toteutustavaltaan erilaista menetelmää, jotka esiteltiin edellisissä kappaleissa. Toteutusten kustannukset koostuvat perustamiskustannuksista, kuten laitteet ja käyttöönotto sekä kiinteistä kustannuksista, kuten lisenssimaksut ja internet-liittymät. Taulukossa 2 on esitetty vertailtujen menetelmien kustannuskomponentit, jotka esitetään kertainvestointeina ja kiinteinä kuluina. Vertailtavien menetelmien kustannukset perustuvat laitevalmistajilta saatuihin tämänhetkisiin yksikköhintoihin sekä käyttöönoton osalta aiheen tutkimisen aikana muodostuneisiin arvioihin.

Taulukko 2 Kustannuskomponentit menetelmittäin.

Laitteistokokoonpano	Kertainvestointi		Kiinteät kulut	
	Laite	Käyttöönotto	Lisenssi	Internet-liittymä
Yhdyskäytävälaite (esim. WRM 247+)	×	×	-	×
Tosibox lock + Virtual Central Lock	×	×	×	×
Tosibox LFC + Virtual Central Lock	-	×	×	×

Taulukossa 3 on esitetty vertailtujen menetelmien yhden vuoden kustannukset laitemäärittäin. Kustannuksiin ei ole sisällytetty internet-liittymämaksua, pilvijärjestelmään liittyviä kustannuksia eikä mahdollisia tietoturvapäivityksiin liittyviä kustannuksia. Käyttöönottokustannukset on arvioitu olevan samansuuruiset kaikissa menetelmissä.

Taulukko 3 Menetelmien kustannukset laitemäärittäin, 50 laitetta.

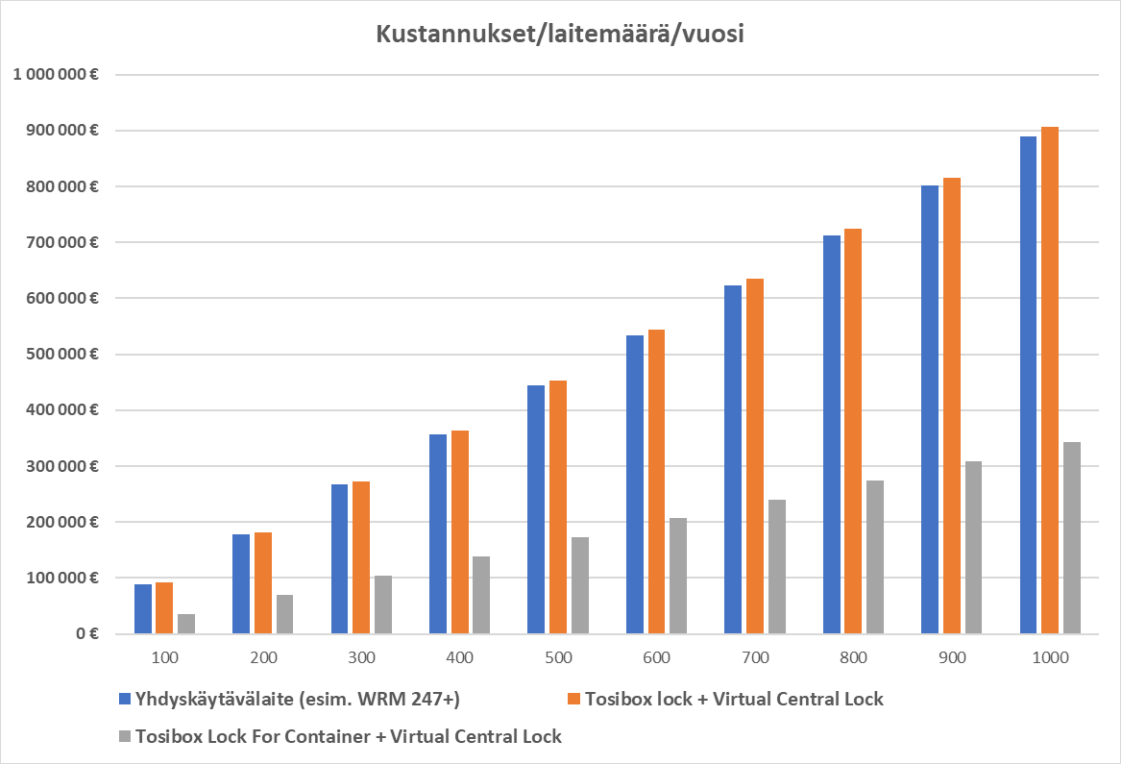


Yksittäistapauksissa kustannuksiltaan edullisin menetelmä on käyttää yhdyskäytävälaitteita, jolloin kustannukset koostuvat laitekustannuksista, käyttöönotosta sekä internet-liittymämaksusta. Integroitavien laitemäärien kasvaessa, myös fyysisten yhdyskäytävä- tai etäyhteyslaitteiden osuus kokonaiskustannuksesta kasvaa merkittäväksi, tällöin ohjelmatason ratkaisu (Tosibox LFC, Lock For Container+Virtual Central Lock) on huomattavasti muita vaihtoehtoja edullisempi. Tosiboxin fyysisillä kohteisiin asennettavilla lukoilla sekä virtuaalisella keskuslukolla (Tosibox Lock+Virtual Central Lock) toteutettuna kustannukset ovat kiinteiden lisenssimaksujen takia hieman korkeammat kuin yhdyskäytävälaitteilla toteutettuna. Lisäksi on huomioitava, että Virtual Central Lockin lisenssimaksu lähtökohtaisesti nousee 25 laitteen jälkeen noin 62,50 €/kk, tämä lisämaksu kattaa seuraavat 25 laitetta.

Taulukossa 4 on esitetty kustannusten eroavaisuudet suuremman mittaluokan toteutuksissa. Kustannuksissa on käytetty Virtual Central Lockin lisenssimaksun osalta 25 laitteen välein skaalautuvaa hinnan korotusta. Todellisuudessa suuremmissa laitemäärissä

lisenssimaksun määrä voi olla vertailussa käytettyjä kustannuksia matalampi, mikä vaikuttaa hieman menetelmien välisiin kustannuksiin. Lisäksi on huomioitava, että fyysisten laitteiden hankintamäärät vaikuttavat todennäköisesti laskevasti niiden yksikköhintoihin, tätä ei ole huomioitu vertailun kustannuksissa.

Taulukko 4 Menetelmien kustannukset laitemäärittäin, 1000 laitetta.



Edellä esitetyt kustannusvertailut voidaan ajatella integraation avulla palveluita tarjoavan yrityksen näkökulmasta, jolloin palveluntarjoaja itse omistaa laitteet ja lisenssit sekä oikeuden etähallintajärjestelmään ja mahdollisesti jakaa käyttöoikeuksia järjestelmään muille osapuolille. Kustannukset voivat vaihdella käytännön eri lähtökohtien mukaan ja voivat vaikuttaa tietyn menetelmän kannattavuuteen, kuten silloin jos samaa yhteyttä käyttävät useat osapuolet ja laite- tai perustamiskustannukset on jaettu osapuolten välillä.

5.4.2 Käytännön soveltuvuus

Kaikilla vertailussa olevilla menetelmillä on mahdollista toteuttaa tietoturvallinen ja lähes rajattomasti skaalautuva järjestelmä. Yhdyskäytävälaite sekä Tosiboxin fyysinen lukkolaite mahdollistavat integraation järjestelmäriippumattomasti, koska näiden yhteydessä voidaan käyttää tarvittaessa protokollamuuntimia. Tosiboxin ohjelmatason ratkaisussa järjestelmäriippumattomuus ei toteudu, koska ohjelmiston asettamat järjestelmävaati-

mukset eivät täyty nykypäivänä vielä sellaisenaan missään yleisimmin käytetyssä rakennusautomaatiojärjestelmässä, myös Microsoft asettaa Azure Edge runtimen käytölle vastaavanlaiset vaatimukset.

Jos tarkastellaan pelkästään nykyhetkeä ja kriteerinä on järjestelmäriippumattomuus niin automaatiojärjestelmän kuin pilvijärjestelmän suhteen, on toteutukseen käytettävä ratkaisu valittava yhdyskäytävälaitteiden ja erilaisten valmiiden etäyhteysratkaisujen väliltä. Yhdyskäytävälaitteiden etuna on laaja tarjonta ja edullinen hankintahinta sekä lisenssivapaa käyttö, yhdyskäytävälaitteiden heikkoutena on laiteohjelmiston päivitykset ja ylläpito, joka tulee pääsääntöisesti hoitaa asiakkaan itse. Lisäksi yhdyskäytävälaitteen käyttöönotto voi olla työläämpää, jos datapisteiden suodatusta joudutaan tekemään.

Tosiboxin Virtual Central Lockin käytöstä peritään lisenssimaksu, mutta se sisältää laitteen ohjelmatason ylläpidon ja tietoturvapäivitykset. Tosiboxin fyysisen lukkolaitteen hinta kalliimpi, kuin yhdyskäytävälaitteet keskimäärin. Kustannusvertailussa ollut WRM247+-laite on Tosiboxin fyysisen lukkolaitteen kanssa samaa hintaluokkaa.

Tosiboxin lukkolaitteet ovat niin sanottuja Plug and Go-laitteita, joiden käyttöönotto on hyvin helppoa. Yhdyskäytävälaitteiden vaihtelevien ominaisuuksien takia, laitteiden käyttöönottoon vaadittava aika voi myös vaihdella. WRM247+ edustaa yhdyskäytävälaitteiden kategoriassa monipuolisuuksiltaan ja laatutekijöiltään joukon parhaimmistoa.

5.4.3 Kehitysnäkymät

Vaikka nykypäivänä rakennusautomaatiolaitteiden valmiudet ohjelmatason ratkaisuun ovat heikot eikä tämän tyyppiset ratkaisut ole vielä rakennusautomaatioalalla yleisesti käytössä on kuitenkin nähtävissä, että ohjelmatason ratkaisut tulevat yleistymään rakennusautomaatiolaitteissa jo lähivuosina siten, että ne tulevat pääosin korvaamaan nykypäivänä käytetyt ratkaisut.

Erilaisista integraatiomenetelmistä ohjelmatason ratkaisun etuja muihin verrattuna ovat kustannustehokkuus, yksinkertainen käyttö ja ylläpito sekä ylläpidettävien ja huollettavien laitteiden vähentyminen kiinteistöissä erillisten yhteyslaitteiden puuttuessa. Yhtenä merkittävänä etuna ohjelmatason ratkaisulla voidaan saavuttaa järjestelmäintegraatioon liittyvä järjestelmäriippumattomuus. Järjestelmäriippumattomuus edellyttää sitä, että kaikki järjestelmätoimittajat toteuttavat vastaavan ominaisuuden kokonaisuudessaan laitteisiinsa tai ainakin tekevät mahdolliseksi kolmannen osapuolen toteuttamien ohjelmistojen, kuten Tosibox Lock for Container- tai Microsoftin Azure IoT Edge runtime-ohjelmistojen käyttämisen laitteissa. Laitevalmistajat, joiden järjestelmissä ohjelmatason ratkaisu on mahdollista, ovat joko itse kehittäneet pelkästään omiin laitteisiinsa sopivan

ratkaisun, kuten Beckhoff tai ovat Fidelixin tai Wagon tapaan kehittäneet ratkaisun yhteistyössä toisen palveluntarjoajan kanssa.

Vaikka nykypäivänä useat rakennusautomaatiojärjestelmät pohjautuvat vanhempaan Windows-käyttöjärjestelmään, on ohjelmatason ratkaisu kuitenkin mahdollista siitä huolimatta toteuttaa, kuten Fidelixin ja Tosiboxin yhteistyössä toteuttama Readiness-ominaisuus osoittaa. Näin ollen myös useissa muissa rakennusautomaatiojärjestelmissä on jonkinasteinen valmius tämän tyyppisen ominaisuuden toteuttamiseen. Toteutuksen aikaansaaminen vaati kuitenkin laitevalmistajilta ohjelmistokehitystyötä ja mahdollisesti tuotannossa oleviin laitteisiin laajempia päivityksiä. Toisaalta uuden ominaisuuden avulla laitevalmistajat voivat laajentaa liiketoimintaansa ja kehittää etäyhteysmahdollisuuksia, kuten tekemällä yhteistyötä pilvipalvelutoimittajien kanssa.

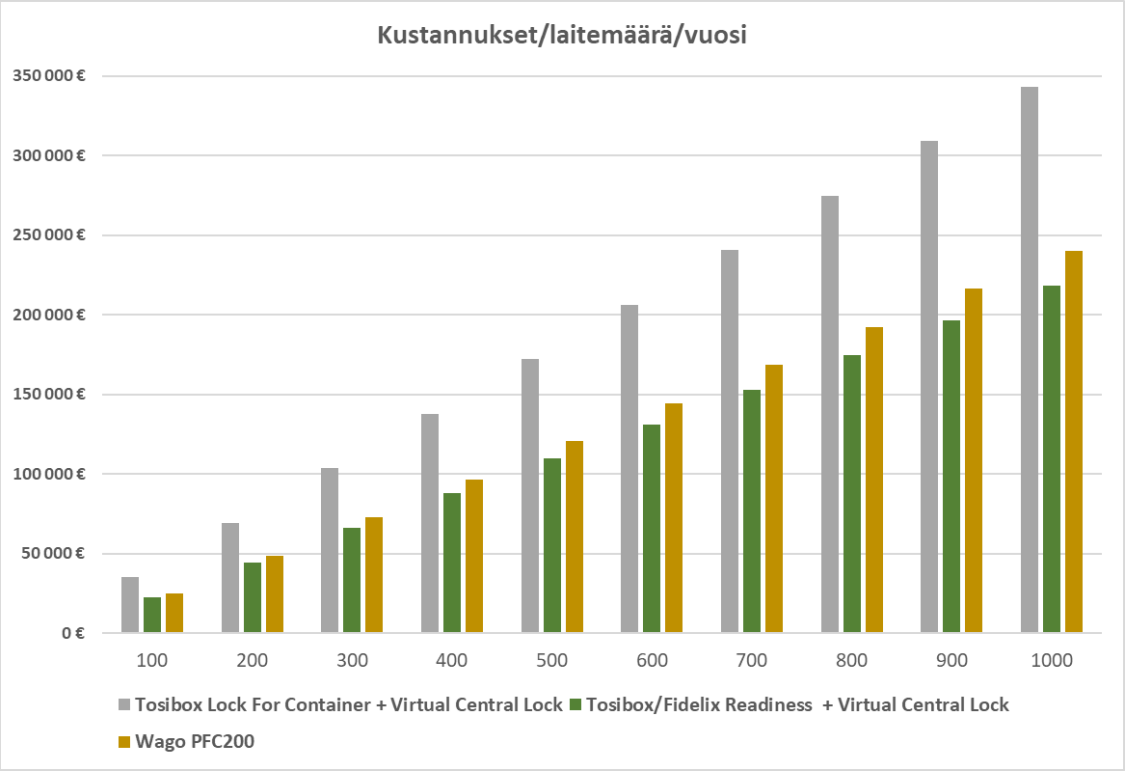
Erilaiset pilvijärjestelmät ovat syrjäyttämässä perinteiset kiinteistöjen valvomoratkaisut ja laitemerkkikohtaiset valvomot. Kiinteistöistä halutaan yhä älykkäämpiä ja tämän myötä erilaisten analytiikkatyökalujen käyttö lisääntyy, tämä suuntaus edellyttää vähitellen rakennusautomaatiojärjestelmiä kehittymään integraation kannalta joustavampaan suuntaan, jolloin integraatiosta tulee nykyistä helpompaa. Myös tähän tarpeeseen voidaan parhaiten vastata ohjelmatason integraatioratkaisulla.

5.4.4 Automaatiojärjestelmien rajaus

Nykypäivän tarjonnan mukaan kustannuksiltaan edullisin vaihtoehto on toteuttaa kiinteistöjen seurantajärjestelmä siten, että siihen integroidaan pelkästään sellaisia automaatiojärjestelmiä, joissa ohjelmatason ratkaisu on sisäänrakennettuna toimintona, kuten Fidelixin tai Wagon järjestelmät. Tällöin automaatiojärjestelmän osalta järjestelmäriippumattomuus ei toteudu, mutta toteutuksella on muita etuja. Jos käytetään vain yhtä tai kahta automaatiojärjestelmää, myös integraation käyttöönotto sekä järjestelmien hallinta on tehokkaampaa erilaisten variaatioiden vähentyessä.

Taulukossa 5 on esitetty kustannusvertailu Tosibox LFC:n ja Fidelix-järjestelmään kehitetyn Readiness-ominaisuuden ja Wagon PFC200-ohjaimen välillä. Kustannuksissa on oletettu, että Fidelixin Readiness-toiminnon ja Wagon PFC200-ohjaimen etäyhteyden käyttöönotto on nopeampaa kuin Lock for Containerin käyttöönotto keskimäärin. Tämä johtuu siitä, että laitemerkkikohtaisessa ratkaisussa käyttöönotto tehdään jokaisessa kohteessa samalla tavalla. Lock for Container voidaan asentaa erilaisiin järjestelmiin, ja jokaisella järjestelmällä on erilaiset ominaisuudet, jotka tulee huomioida käyttöönotossa ja niihin tulee varata enemmän aikaa.

Taulukko 5 Kustannusvertailu, ohjelmatason ratkaisut.



Tosibox Lock for Containerin korkeampien käyttöönottokustannusten takia se on toteutuksena etenkin laitemäärien kasvaessa huomattavasti kahta muuta toteutusta kalliimpi. Lisäksi Lock for Containerin kiinteä lisenssimaksu on vertailun kallein. Fidelixin ja Wagon välillä pieni ero kustannuksissa johtuu Wagon hieman korkeammasta lisenssimaksusta. Mahdollisia tietoturvapäivityksiä ei ole huomioitu kustannusvertailussa.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Rakennusautomaatiojärjestelmän ja pilvijärjestelmän välisen integraatiomenetelmän valinta tulee tehdä ensisijaisesti käyttötarkoituksen mukaan. Käyttötarkoitus voi olla vaikka lyhytaikainen olosuhdeseuranta tai jatkuva kiinteistön ylläpitoon liittyvä seurantajärjestelmä. Käyttötarkoitus määrittelee ominaisuudet, jotka järjestelmältä vaaditaan. Vaatimusten perusteella tehdään valinta käyttötarkoitukseen sopivasta menetelmästä. Menetelmän valintaan vaikuttaa lähtötilanne, eli kohteessa olevan automaatiojärjestelmän valmius. Integraatio voidaan toteuttaa olemassa olevaan järjestelmään tai olemassa olevan järjestelmän korvaavaan uuteen automaatiojärjestelmään. Toteutus olemassa olevaan järjestelmään voi rajata käytettäviä integraatiomenetelmiä, kun taas uusi automaatiojärjestelmä voidaan valita järjestelmän integraatiovalmiudet huomioiden.

6.1 Suunnittelu

Toteutuksen teknisten asioiden lisäksi kustannusten ja käytön kannalta merkittäviä asioita ovat erilaisten lähtötilanteiden vaikutukset. Järjestelmien integraatioita toteuttavat erilaisia palveluita tarjoavat yritykset. Pelkästään järjestelmien etähallinta- ja optimointipalveluita tarjoava yritys toteuttaa tavallisesti integraation kohteen olemassa olevaan automaatiojärjestelmään, ilman automaatiojärjestelmään tai taloteknisiin prosesseihin tehtäviä muutoksia. Yritys voi toteuttaa palveluaan kohteen mukaan myös järjestelmäkohtaisen etäkäyttöliittymän kautta, mutta yhä suositumpi tapa on liittää kohteet samaan pilvijärjestelmään. Tällaisissa tapauksissa integraatiomenetelmä tulee valita olemassa olevan automaatiojärjestelmän valmiuksien mukaan.

Järjestelmäintegraatioita toteuttavat myös yritykset, jotka tarjoavat etähallinta- ja optimointipalvelujen lisäksi taloteknisiin järjestelmiin toiminnallisia muutoksia, kuten energiankäyttöön liittyviä tehostustoimenpiteitä. Tällöin kohteeseen tehdään tavallisesti mittavampia muutoksia, joiden yhteydessä myös kohteen rakennusautomaatiojärjestelmä uusitaan. Tällöin automaatiojärjestelmän valinnassa voidaan ottaa huomioon järjestelmän integraatio-ominaisuudet.

Rakennusautomaatiojärjestelmien IoT-ominaisuudet poikkeavat vielä nykypäivänä merkittävästi toisistaan, mikä vaikuttaa käytettävään integraatiomenetelmään. Mikäli kohteen automaatiojärjestelmän valintaan voidaan vaikuttaa, voi se tuoda kustannussäästöjä integraation käyttöönotossa sekä mahdollisissa muutos- ja päivitystarpeissa. Nyky-

aikaiset rakennusautomaatiojärjestelmät ovat perusominaisuuksiltaan ja kustannuksiltaan hyvin lähellä toisiaan, mikä ei lähtökohtaisesti poissulje valitsemasta integraation kannalta edullista vaihtoehtoa.

Palveluntarjoajasta tai kohteen lähtötilanteesta riippumatta, toisinaan voidaan myös hyödyntää kohteeseen jo toteutettua etäyhteysratkaisua, kuten Tosibox-yhteyttä. Tyypillisesti yhteys toteutetaan kiinteistönhoitoa varten. Valmiin yhteyden hyödyntäminen voi olla kustannustehokkain vaihtoehto, koska silloin tavallisesti vältytään merkittäviltä laitehankinnoilta. Ylläpitokustannukset voivat jakautua tällöin usean eri osapuolen välille, jolloin käyttäjäkohtaiset kiinteät kustannukset laskevat.

Edellä mainittujen asioiden perusteella integraation toteutus- ja käyttökustannuksiin voidaan merkittävästi vaikuttaa suunnitelmallisilla asioilla, kuten huomioimalla kohteen automaatiojärjestelmän ja käytössä olevien tiedonsiirtoyhteyksien nykytilanne, sekä uusien automaatiojärjestelmien tapauksissa perehtymällä automaatiojärjestelmien ominaisuuksiin.

6.2 Toteutus

Integraatiomenetelmillä on selkeitä eroavaisuuksia mitkä vaikuttavat toteutuksen kustannuksiin, toiminnallisilta ominaisuuksiltaan menetelmät eivät merkittävästi poikkea toisistaan. Toteutuksen kokonaiskustannukset etenkin suuremmissa kokonaisuuksissa voivat vaihdella merkittävästi menetelmien välillä.

Kustannustehokkain ratkaisu on hyödyntää tapauskohtaisesti käyttötarkoitukseen parhaiten soveltuvaa menetelmää. Nykyaikaiset rakennusautomaatiojärjestelmät ovat väyläominaisuuksiltaan monipuolisia, eivätkä estä integraation toteuttamista. Yhdyskäytäväratkaisut mahdollistavat automaatiojärjestelmän väyläprotokollien muuttamisen pilvijärjestelmälle sopivaksi IoT-protokollaksi, ne mahdollistavat joustavan toteutuksen ja tarvittaessa luettavan informaation suodatuksen ennen sen lähettämistä pilvijärjestelmään. Käytettävissä olevilla ohjelmatason ratkaisuilla informaation paikallinen suodatus ei ole tavallisesti mahdollista. Suodatukselle ei ole kuitenkaan yleensä tarvetta, koska lähes kaikkea automaatiojärjestelmän dataa voidaan hyödyntää jollakin tavalla. Pilvijärjestelmän käytön hinnoittelu ei myöskään aina perustu siirrettävän datan määrään, jolloin sillä ei ole kustannusten kannalta merkitystä.

Mikäli ohjelmatason ratkaisun käyttäminen on mahdollista, on se yksittäisiä tapauksia luukun ottamatta integraation kokonaiskustannuksiltaan huomattavasti edullisin vaihtoehto. Koska nykypäivänä ohjelmatason ratkaisu toimii vain muutamassa automaatiojär-

jestelmässä, se ei mahdollista järjestelmäriippumatonta toteutusta. Rakennusautomaatiojärjestelmän osalta järjestelmäriippumattomuudella ei kuitenkaan saavuteta prosessien toiminnan tai optimoinnin kannalta merkittäviä etuja, koska nykyaikaisiin rakennusautomaatiojärjestelmiin on laitemerkistä riippumatta mahdollista toteuttaa kaikki tarpeelliset toiminnot. Niin ohjelmatason ratkaisut kuin yhdyskäytävälaitteetkin mahdollistavat järjestelmien integroinnin moniin kaupallisiin pilvijärjestelmiin sekä yksityisille palvelimille.

Suositeltavin ratkaisu rakennusautomaatiojärjestelmän ja pilvijärjestelmän integraation toteuttamiseen on käyttää ensisijaisesti ohjelmatason ratkaisua ja muulloin tapauskohtaisesti yhdyskäytävälaitteita tai muita etäyhteyslaitteita.

Järjestelmäsuosituksena ohjelmatason ratkaisun toteuttamiseksi on käyttää automaatiojärjestelmiä, joissa ominaisuus on integroituna laitteeseen. Jälkeenpäin asennettavien ajonaikaisten ohjelmien asentaminen nykyisiin rakennusautomaatiojärjestelmiin ei ole suositeltavaa ennen laitevalmistajilta saatua suositusta.

7. YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli löytää kustannustehokas, järjestelmäriippumaton ja skaalautuva menetelmä rakennusautomaatiojärjestelmien ja pilvijärjestelmän välisen integraation toteuttamiseen. Työn tavoitteeseen pyrittiin pääsemään tutkimalla olemassa olevia toteutuksia sekä kaupallisten ratkaisuja ja niiden käytettävyyttä.

Rakennusautomaatiojärjestelmien integroiminen pilvijärjestelmään tuo merkittäviä hyötyjä perinteisesti rakennusautomaatiojärjestelmissä käytettyihin paikallisiin valvomoratkaisuihin tai järjestelmäkohtaisiin etäyhteyksiin verrattuna. Integraatio mahdollistaa pilvijärjestelmän sisältämien monipuolisten toimintojen, kuten data-analytiikan hyödyntämisen kiinteistöjen prosessien ohjauksessa.

Järjestelmäintegraatiot rakennusautomaatiojärjestelmien ja pilvijärjestelmien välillä eivät vielä nykypäivänä ole kovin yleisiä. Tämä johtuu pääosin siitä, että useissa rakennusautomaatiojärjestelmissä ei ole sisäänrakennettuja valmiuksia integraation toteutukseen. Integraation toteuttaminen on mahdollista erilaisilla tekniikoilla, joista tavallisin on erilaiset IoT -yhdyskäytävälaitteet, jotka mahdollistavat rakennusautomaatiolaitteiden väyläprotokollien muuttamisen pilvijärjestelmälle sopivaksi. Yhdyskäytävälaitteet ovat yleisimmin käytetty ratkaisu erilaisia kiinteistöjen etähallintapalveluja toteuttaneiden palveluntarjoajien järjestelmissä. Yhdyskäytävälaitteella voidaan toteuttaa integraatio järjestelmäriippumattomasti ja se mahdollistaa lähes rajattomasti skaalautuvan järjestelmän, järjestelmäriippumattomuuden varmistaa erilaiset protokollamuuntimet, jotka ovat yhteensopivia yhdyskäytävälaitteiden kanssa.

Yhdyskäytävälaitteen vaihtoehtona ovat erilaiset VPN-etäyhteyslaitteet. Näiden laitteiden etuna on nopea käyttöönotto, mutta ne ovat kustannuksiltaan hieman yhdyskäytävälaitteita kalliimpia.

Integraatiomenetelmistä suurin potentiaali on ohjelmatason ratkaisulla, joka mahdollistaa täysin virtuaalisen toteutuksen. Ohjelmatason ratkaisu on erittäin kustannustehokas ratkaisu integraation toteuttamiseen. Ohjelmatason ratkaisut ovat niin sanottuja ajonaikaisia ohjelmia, jotka perustuvat konttiteknologiaan. Näitä ajonaikaisia ohjelmia voidaan asentaa rakennusautomaatiojärjestelmiin jälkeenpäin. Useimpien rakennusautomaatiojärjestelmien valmiudet eivät kuitenkaan ole vielä sillä tasolla, että ajonaikaisia ohjelmia voidaan järjestelmiin asentaa. Ohjelmatason ratkaisu on mahdollista muutamassa rakennusautomaatiokäyttöön soveltuvassa automaatiojärjestelmässä. Näihin järjestelmiin järjestelmätoimittaja on itse toteuttanut ominaisuuden ja testannut sen toiminnan.

Tutkimusten perusteella nykypäivän integraatiomenetelmistä ohjelmatason ratkaisu on kustannuksiltaan edullisin ratkaisu, lisäksi sillä on useita etuja muihin menetelmiin verrattuna, kuten kustannustehokkuus, yksinkertainen käyttö ja ylläpito sekä huollettavien ja päivitettävien laitteiden vähäisempi määrä. Vaikka ohjelmatason ratkaisu ei mahdollista rakennusautomaatiojärjestelmän valmistajasta riippumatonta toteutusta, on se siitä huolimatta suositeltavin toteutus niihin kohteisiin, jossa sitä on mahdollista käyttää. Vaikka järjestelmäriippumattomuus ei toteudu, se ei ole merkittävä ongelma, koska nykypäivän automaatiojärjestelmissä ei ole merkittäviä toiminnallisia eroavaisuuksia. Integraation toteutuksessa tulee painottaa suunnitelmallisuutta, mikä säästää kustannuksia pidemmällä aikavälillä.

LÄHTEET

[1] W. Anani, A. Ouda and A. Hamou, 2019. A Survey of Wireless Communications for IoT Echo-Systems.

[2] Bacnet.org, BACnet - The New Standard Protocol, Saatavissa: http://www.bacnet.org/Bibliography/EC-9-97/EC-9-97.html. (Viitattu 2.12.2020).

[3] M. Bajer, 2018. IoT for smart buildings - long awaited revolution or lean evolution.

[4] J. Bakakeu, M. Brossog, J. Zeitler and J. Franke, 2019. Automated Reasoning and Knowledge Inference on OPC UA Information Models.

[5] Beckhoff, CX9001, CX9010 | Basic CPU module with BACnet/IP, Saatavissa: https://download.beckhoff.com/download/document/catalog/main_catalog/english/separate-pages/TwinCAT/CX90xx_CX5000_BACnet_e.pdf. (Viitattu 10.12.2020).

[6] Beckhoff, Internet connectivity, Saatavissa: https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tf6720_tc3_iot_data_agent/4218072075.html&id=. (Viitattu 24.9.2020).

[7] Beckhoff, New automation technology, Saatavissa: https://www.beckhoff.com/fi-fi/. (Viitattu 24.9.2020).

[8] Beckhoff, TC3 IoT Data Agent, Saatavissa: https://download.beckhoff.com/download/document/automation/twincat3/TF6720_TC3_IoT_Data_Agent_EN.pdf. (Viitattu 24.9.2020).

[9] J. Collin, A. Saarelainen, Teollinen internet, Alma Talent Oy, 2016, Saatavissa: https://bisneskirjasto-almatalent-fi.libproxy.tuni.fi/teos/BAFBIXCTEB. (Viitattu 27.9.2020).

[10] J. De Las Morenas, C. Miller Da Silva, J. Barbosa and P. Leitao, 2019. Low Cost Integration of IoT Technologies for Building Automation.

[11] N. Desai, “What is an IoT Gateway and How Do I Keep it Secure?”, Saatavissa: https://www.globalsign.com/en/blog/what-is-an-iot-gateway-device. (Viitattu 22.8.2020).

[12] H. Dibowski, J. Vass, O. Holub and J. Rojicek, 2016. Automatic Setup of Fault Detection Algorithms in Building and Home Automation.

[13] Docker, “What is a Container?”, Saatavissa: https: www.docker.com/resources/what-container. (Viitattu 20.9.2020).

[14] S. Domingo, “The Mighty MQTT! What You Should Know About It”, Saatavissa: https://news.rakwireless.com/the-mighty-mqtt-what-you-should-know-about-it/. (Viitattu 31.10.2020).

[15] A. Fernbach and W. Kastner, 2014. Integration of Smart Meters into Management Systems in Automation.

[16] A. Fernbach, W. Granzer and W. Kastner, 2011. Interoperability at the Management Level of Building Automation Systems: A Case Study for BACnet and OPC UA.

[17] Fidelix Oy, FDX Compact FX-3000-C, Saatavissa: https://www.fidelix.fi/wp-content/uploads/FX-3000-C_FI.pdf. (Viitattu 10.12.2020).

[18] Fidelix, Rakennusautomaatiojärjestelmien pohjoismainen edelläkävijä, Saatavissa: https://www.fidelix.fi/referenssit. (Viitattu 28.12.2020).

[19] H. Forbes, The End of Industrial Automation (As We Know It), Saatavissa: https://www.arcweb.com/blog/end-industrial-automation-we-know-it. (Viitattu 10.122020).

[20] F-Secure, “MIKÄ ON VPN?”, Saatavissa: https://www.f-secure.com/fi/home/articles/what-is-a-vpn. (Viitattu 28.9.2020).

[21] A. Gilchrist, Industry 4.0: The Industrial Internet of Things, 2016. Saatavissa: https://learning.oreilly.com/library/view/industry-40-the/9781484220474/. (Viitattu 15.11.2020).

[22] Y. Hongli and L. Feng, 2011. Enterprise Resource Planning). [Research on OPC UA based on FDT/DTM and EDDL.

[23] Z. Huq and S. Islam, 2010. HOME AREA NETWORK TECHNOLOGY ASSESSMENT FOR DEMAND RESPONSE IN SMART GRID ENVIRONMENT.

[24] M. Hyvärinen, P. Nikander ja J. Ruusuvuori, Tutkimushaastattelun käsikirja, Vastapaino, Tampere 2017, 460 s.

[25] A. Judmayer, L. Krammer and W. Kastner, 2014. On the security of security extensions for IP-based KNX networks.

[26] M. Jung C. Reinisch and W. Kastner, 2012.Integrating Building Automation Systems and IPv6 in the Internet of Things.

[27] D. Kelsey, C. Lane and D. Petersen, 2017, Today’s Leading Building Automation Systems (BAS), Saatavissa: http://facilitymanagement.com/leading-building-automation-systems-bas. (Viitattu 10.12.2020).

[28] P. Lantto, Tuotekehityspäällikkö, Fidelix Oy, Vantaa. Haastattelu 1.12.2020.

[29] R. Liedes, Sähköinfo Oy, Rakennusautomaatiojärjestelmät, Sähköinfo Oy 2018, 311 s.

[30] T. Liias, Head of European Sales, Tosibox Oy, Oulu. Haastattelu 11.6.2020.

[31] Z. Li-Li, L. Hong-Yu, W. Quan and L. Wei-Guang, 2011.Design of A Sensor Network based on M-Bus.

[32] L. Martirano and M. Mitolo, 2020. Building Automation and Control Systems (BACS): a Review.

[33] P. Masek, M. Stusek, K.Zeman, R. Mozny, A. Ometov and J. Hosek, 2019. A Perspective on Wireless M-Bus for Smart Electricity Grids.

[34] M-Bus.com, The Standard for Remote Reading of Smart Meters, Saatavissa: https://m-bus.com/.(Viitattu 10.12.2020).

[35] Microsoft, “Azure IoT Edge runtime and its architecture”, Saatavissa: https://docs.microsoft.com/en-us/azure/iot-edge/iot-edge-runtime. (Viitattu 31.10.2020).

[36] Microsoft, Connect Modbus TCP devices through an IoT Edge device gateway, Saatavissa: https://docs.microsoft.com/en-us/azure/iot-edge/deploy-modbus-gateway?view=iotedge-2018-06. (Viitattu 31.10.2020).

[37] Microsoft, Introduction to private Docker container registries in Azure, Saatavissa: https://docs.microsoft.com/en-us/azure/container-registry/container-registry-intro. (Viitattu 31.10.2020).

[38] Microsoft, “What are public, private, and hybrid clouds?”, Saatavissa: https://azure.microsoft.com/en-us/overview/what-are-private-public-hybrid-clouds/. (Viitattu 10.12.2020).

[39] Microsoft, ”What is Azure IoT Edge?”, Saatavissa: https://docs.microsoft.com/en-us/azure/iot-edge/about-iot-edge. (Viitattu 6.9.2020).

[40] T. Mundt and P. Wickboldt, 2016. Security in building automation systems - A first analysis.

[41] T. Mundt, F. Krüger, T. Wollenberg, 2012. Who refuses to wash hands? Privacy issues in modern house installation networks.

[42] T. Nesztler, D. Kasper, M. Georgescu, S. LOIRE and I. MEZIC, 2016. A close look at the Building Automation System (BAS) sector.

[43] Novotek, OPC ja OPC UA, Saatavissa: https://www.novotek.com/fi/ratkaisut/kepware-kommunikointialusta/opc-ja-opc-ua/. (Viitattu 29.9.2020).

[44] OPC Router, ”What is OPC U? a practical introduction”, Saatavissa: https://www.opc-router.com/what-is-opc-ua/. (Viitattu 1.11.2020).

[45] D. Peng, H. Zhang, J. Weng, H. Li and F. Xia, 2009. Development of Modbus/RTU Master Monitoring System Based on Embedded PowerPC Platform.

[46] N. Quouc Uy and V. Hoai Nam, 2019. A comparison of AMQP and MQTT protocols for Internet of Things.

[47] M. Ramgir, Internet of Things, Saatavissa: https://learning.oreilly.com/library/view/internet-of-things/9789353941529/ (Viitattu 15.11.2020).

[48] S. Runde, A. Heidemann, A. Fay and P. Schmidt, 2010. Engineering of Building Automation Systems – State-of-the-Art, Deficits, Approaches.

[49] Schneider electric, Modbus, Saatavissa: https://www.se.com/fi/fi/product-range-presentation/574-modbus. (Viitattu 27.9.2020).

[50] L. Shimei, Z. Jianhong, L. Enfeng and H. Gang, 2020. Design of Industrial Internet of Things Gateway with Multi-source data Processing.

[51] S. Sidid and S. Gaur, 2017. Smart Grid Building Automation Based on Internet of Things.

[52] L. Silvonen, Kehityspäällikkö, Vahanen Monitoring Services Oy, Espoo. Haastattelu 9.9.2020.

[53] Smartbear, About AMQP, Saatavissa: https://support.smartbear.com/readyapi/docs/testing/amqp.html (Viitattu 31.10.2020).

[54] Talentree, Järjestelmä-integraatiot, Saatavissa: https://talentree.fi/palvelut/jarjestelmaintegraatiot/. (Viitattu 27.9 2020).

[55] S. Tamboli, M. Rawale, R. Thoraiet and S. Agashe, 2015. Implementation of Modbus RTU and Modbus TCP Communication using Siemens S7-1200 PLC for Batch Process.

[56] T. Tasci, J. Melcher and A. Verl, 2018. A Container-based Architecture for Real-Time Control Applications.

[57] technavio blog, Top 10 Building Management System Companies in the World 2019, Saatavissa: https://blog.technavio.com/blog/top-10-building-management-system-companies-worldwide. (Viitattu 10.12.2020).

[58] Tosibox, Central Lock, Saatavissa: https://www.tosibox.com/fi/tuote/central-lock/. (Viitattu 20.9.2020).

[59] Tosibox, Lisätarvikkeet, Saatavissa: https://www.tosibox.com/fi/tuote/lisatarvikkeet/. (Viitattu 28.12.2020).

[60] Tosibox, Lock for Container, Saatavissa: https://www.tosibox.com/fi/tuote/lock-for-container. (Viitattu 6.9.2020).

[61] Tosibox, Lock for Container meets Reliste-IPC, Saatavissa: https://www.tosibox.com/tosibox-lock-for-container-meets-reliste-ipc/, (Viitattu 10.12.2020).

[62] Tosibox, Readiness, Saatavissa: https://www.tosibox.com/fi/etayhteys-rakennusautomaatioon-fidelixin-ja-tosiboxin-avulla. (Viitattu 26.10.2020).

[63] Traficom, Suojaamattomia automaatiojärjestelmiä suomalaisissa verkoissa 2019, Saatavissa: https://www.kyberturvallisuuskeskus.fi/sites/default/files/media/file/Suojaamattomia_automaatiojärjestelmiä_suomalaisissa_verkoissa_2019.pdf. (Viitattu 28.12.2020).

[64] S. Tähtinen, Järjestelmäintegraatio, Talentum, Helsinki 2005, 217 s.

[65] C. Valli, M. Johnstone, M. Peacock and A. Jones, 2017. Bridging the Cyber Physical Divide One HVAC at a Time.

[66] Wago, Turvallisia yhteyksiä mereltä mantereelle, Saatavissa: www.wago.com/fi/tosibox-wago-yhteistyoe. (Viitattu 31.10.2020).

[67] N. Wallenius, “Mikä on Docker ja mitä hyötyä siitä on?”, Saatavissa: https://niklaswallenius.fi/mika-on-docker. (Viitattu 20.9.2020).

[68] Wapice, Älykäs IoT Edge laite, Saatavissa: https://www.wapice.com/fi/tuotteet/wrm247. (Viitattu 16.6.2020).

[69] WhatIs.com, Advanced Message Queuing Protocol (AMQP), Saatavissa: https://whatis.techtarget.com/definition/Advanced-Message-Queuing-Protocol-AMQP. (Viitattu 28.9.2020).

[70] Z. Hug and S. Islam, 2010. HOME AREA NETWORK TECHNOLOGY ASSESSMENT FOR DEMAND RESPONSE IN SMART GRID ENVIRONMENT.

[71] J. Zidek, J. Besina, P. Bilik, 2011. Testing Laboratory for Verification of Energy Saving using Light Control.