

Stefanus Valtonen

# Toimisto- ja liikerakennusten PoE-valaistusjärjestelmät

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkövoimatekniikka

Insinöörityö

16.12.2016

Tekijä Otsikko	Stefanus Valtonen Toimisto- ja liikerakennusten PoE-valaistusjärjestelmät
Sivumäärä Aika	58 sivua + 4 liitettä 16.12.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Lehtori Tapio Kallasjoki Ryhmäpäällikkö Topi Volama
<p>Insinööri työ on tehty Granlund Oy:n toimeksiantona. Työn tarkoitus oli selvittää markkinoille tulleiden PoE-valaistusjärjestelmien toimintaperiaatteet ja vertailla niitä perinteisiin vaihtovirralla toimiviin LED-valaistusjärjestelmiin. Työssä tutkittiin myös yleisesti toimisto- ja liikerakennusten DC-sähkönjakelujärjestelmän etuja ja kannattavuutta valaistuksen näkökulmasta.</p> <p>PoE-valaistuksen toiminta perustuu tehon ja ohjaustiedon siirtoon samaa parikaapelia pitkin. Järjestelmää ohjaavat päivänvalo- ja läsnäolotunnistimet sekä tilannekytkimet Ethernet-verkon kautta. Käyttöliittymä on selainpohjainen ja Ethernet-verkon käyttäminen mahdollistaa myös langattoman ohjauksen esimerkiksi mobiililaitteilla.</p> <p>Insinööri työ tehtiin lähinnä kirjallisuuden pohjalta. Lähdemateriaaleina käytettiin valaistusalan käsikirjoja, aiheita käsitteleviä Internet-sivuja, tuote-esitteitä, seminaariesityksiä ja asiantuntijahaastattelua esimerkkikohteesta. Työn lopussa esitetään muutamia valaistusteknisiä mittauksia ja valokuvia Sähkökuva Oy:n Kotkan toimitiloista, jonne asennettiin ensimmäisenä Suomessa Redwood ILNS, PoE-valaistusjärjestelmä ja joka otettiin käyttöön syyskuussa 2015.</p> <p>Työssä todettiin, että PoE-valaistuksen hyötysuhde on parempi kuin perinteisessä AC-sähkönkäytöllä toteutetussa LED-valaistuksessa, jos yksittäisen valaisimen teho on pieni ja valaisimien syöttökaapelit eivät ole pitkiä. PoE-valaistusjärjestelmät ovat älykkäitä IoT-ympäristössä toimivia valaistuksenohjausjärjestelmiä, jotka soveltuvat tällä hetkellä PoE-valaisimien suhteellisen pienien tehojen vuoksi parhaiten matalien julkisten tilojen, kuten toimistojen ja liikerakennusten sisävalaistukseen. Työn perusteella PoE-valaistus osoittautui taloudelliseksi ja erittäin muuntojoustavaksi järjestelmäksi. Sitä voidaan siis suositella käytettäväksi myös tiloihin, joissa valaistukselta vaaditaan hyvää ja monipuolista ohjattavuutta ja muunneltavuutta.</p>	
Avainsanat	PoE-valaistus, DC-valaistus, älykäs valaistuksenohjaus, IoT

Author Title	Stefanus Valtonen PoE-lighting Systems of Commercial and Office Buildings
Number of Pages Date	58 pages + 4 appendices 16 December 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Tapio Kallasjoki, Senior Lecturer Topi Volama, Group Manager
<p>This study was commissioned by Granlund Oy. The purpose of the study was to clarify the principles of the middle market PoE-lighting systems and compare them to other traditional AC lighting control systems. The study also examined benefits and profitability of DC power distribution system use in commercial and office buildings' lighting systems.</p> <p>PoE-lighting system is based on the transfer of power and control data along the same twisted-pair cable. The system is controlled by daylight and presence sensors and situation switches via an Ethernet network. The user interface is browser-based and using the Ethernet network also allows for a wireless control by mobile devices.</p> <p>The study was made mainly on the basis of literature. As source material, lighting handbooks, Internet sites, PoE lighting system brochures, expert interview and seminar presentations were used. At the end, a few lighting measurements and photographs from the office spaces of Sähkökuva Ltd in Kotka, Finland, are presented. The first Redwood Intelligent Lighting Network Solution in Finland, which was introduced in September 2015, was installed there.</p> <p>It was established that the efficiencies of PoE lighting systems are better than conventional AC LED lighting systems, if a single luminaire power is low and the power cables are not long. PoE lighting systems are intelligent lighting control systems that operate in Internet of Things environment. They are best suited for low public space interior lighting, such as offices and commercial buildings, because of the small power of luminaires. On the basis of this study, PoE lighting seems to be an economic and highly adaptable and flexible system. It is therefore recommended in premises where good and versatile maneuverability and versatility are required for lighting.</p>	
Keywords	PoE-lighting, DC-lighting, smart lighting control, Internet of Things

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Valaistustekniikan perussuureet ja -lait	3
2.1	Valaistusvoimakkuus E	3
2.2	Luminanssi L	4
2.3	Valovirta $\Phi$	5
2.4	Valovoima Iv	6
3	Valaistuksen laskentamenetelmät	7
3.1	Pistemenetelmä	7
3.2	Hyötysuhdemenetelmä	8
4	Hyvä valaistus	10
4.1	Valaistus, värit ja näkeminen	11
4.2	Valaistuksen miellyttävyys	14
4.3	Valaistuksen psykologiset ja biologiset vaikutukset	15
4.4	Valaistuksen eri tehtävien jakautuminen	16
4.5	Ihmiskeskeinen valaistus	17
5	Tasasähköpiirit LED-valaistuksessa	18
5.1	Vaihtovirta vs. tasavirta	18
5.2	Rakennusten DC-jakelujärjestelmien edut	19
5.3	AC- ja DC-valaistusratkaisuiden vuosittaiskustannusten vertailu	20
5.3.1	Vertailun lähtökohdat	20
5.3.2	DC LED-valaistusjärjestelmä	22
5.3.3	PV+DC LED -valaistusjärjestelmä	25
5.3.4	PV+B+DC LED-valaistusjärjestelmä	28
6	LED-tekniikka	30
7	PoE-järjestelmät valaistuksessa	35
7.1	IoT -toimintaympäristö	36

7.2	Rakenne ja toimintaperiaate	37
7.3	Etuja perinteiseen AC-valaistukseen verrattuna	41
7.4	PoE-valaistuksen tehohäviöt	42
7.4.1	Kaapelipituuksien vaikutus	43
7.4.2	AC/DC-muuntamisen vaikutus	45
7.4.3	AC-järjestelmä vs. PoE-järjestelmä	45
7.5	PoE-valaistuksen turvallisuuskohdat ja häiriönsietokyky	46
8	Redwood ILNS-valaistusjärjestelmä	47
9	Yhteenveto	52
	Lähteet	55
	Liitteet	
	Liite 1. Valaistuspisteiden sijainnit Sähkökuva Oy:n tiloissa	
	Liite 2. Mittaustulokset	
	Liite 3. Sähkökuva Oy:n tilojen PoE-valaisimet	
	Liite 4. Valokuvia Sähkökuva Oy:n PoE-valaistusasennuksista	

## Lyhenteitä ja käsitteitä

AC	<i>Alternating Current.</i> Vaihtovirta.
BREEAM	<i>Building Research Establishment Environmental Assessment Method.</i> Iso-Britanniassa kehitetty ympäristöluokitusjärjestelmä.
CAP	<i>Capital costs.</i> Pääomakustannukset.
CIE	<i>International Commission on Illumination.</i> Vuonna 1913 perustettu valaistuksen kansainvälinen komitea.
DC	<i>Direct Current.</i> Tasavirta.
FL	<i>Fluorescent lamp.</i> Loistelamppu.
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning.</i> Tarkoittaa lämmitystä, ilmanvaihtoa ja ilmastointia.
HVDC	<i>High-Voltage Direct Current.</i> Suurjännitetasavirta.
IoT	<i>Internet of Things.</i> Esineiden Internet, laitteiden ja koneiden muodostama verkko, jota voidaan hallinnoida Ethernet-verkon kautta.
ILNS	<i>Intelligent Lighting Network Solutions.</i> Redwood Systems Inc. tarjoama PoE-valaistusratkaisu sisätilojen valaistukseen.
LAC	<i>Levelized Annual Costs.</i> Vuosittaiskustannukset.
LAN	<i>Local Area Network.</i> Lähiverkko on tietoliikenneverkko, joka toimii rajoitetulla maantieteellisellä alueella. Yleisimmät IEEE802 lähiverkkotekniikat ovat Ethernet ja WLAN.
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design.</i> Yhdysvalloissa kehitetty ympäristöluokitusjärjestelmä.

LENI	<i>Lighting Energy Numeric Indicator.</i> Kertoo rakennuksen vuotuisen valaistuksen energiankulutuksen tarkasteltavaa pinta-alaa kohden.
PD	<i>Powered Device.</i> PoE-järjestelmään liitetty päätelaite, esimerkiksi PoE-valaisin.
PoE	<i>Power over Ethernet.</i> Tekniikka, jossa laitteelle vietään sähkönsyöttö ja tiedonsiirto samaa parikaapelia pitkin. Uusimman standardin IEEE 802.3at mukaan yksittäisen laitteen suurin tehontarve saa olla 25.5 W jännitteellä 50 VDC...57 VDC.
PSE	<i>Power Sourcing Equipment.</i> Tehoa syöttävä laite PoE-järjestelmässä, esimerkiksi PoE-kytkin.
PV	<i>Photovoltaic system.</i> Aurinkopaneelijärjestelmä.
PV+B	<i>Photovoltaic system + Battery storage.</i> Aurinkopaneelijärjestelmä lyijyakuvarastoinnilla.
PWM	<i>Pulse-Width Modulation.</i> Pulssinleveysmodulaatio on tekniikka, jossa kuorman jännitettä säädetään muuttamalla pulssisuhdetta niin, että lähtösignaalin keskiarvo yhden värähtelyjakson ajalta laskettuna on sama kuin modulointisignaalin arvo.
THD	<i>Total Harmonic Distortion.</i> Harmoninen särö, joka muodostuu perusaallon kerrannaisista. Se määritellään särökomponenttien tehon suhteena koko signaalin tehoon.
UPOE	<i>Universal Power Over Ethernet.</i> Cisco Systems Inc. kehittämä järjestelmä, joka mahdollistaa 60 W syöttötehon päätelaitteelle.
WLAN	<i>Wireless Local Area Network.</i> Langaton lähiverkko.

## 1 Johdanto

Kotitaloudessa valaistuksen energiankulutuksessa on päästy alle kymmeneen prosenttiin kodin sähköenergiankulutuksesta [1]. Tähän ovat vaikuttaneet uudet LED-valonlähteet ja valaistusohjaustapojen kehittyminen ja automatisoituminen. Erilaisia komponentteja, kuten liike- ja läsnäolotunnistimia, kelloajastimia ja valoisuusantureita/hämäräkytkimiä on lisätty valaistusjärjestelmiin. Tästä huolimatta valaistukselta vaaditaan nykyään enemmän ja kasvavien tarpeiden vuoksi on kehitetty monia erilaisia valaistuksenohjausjärjestelmiä. Lisäksi tiukentuneet energiavaatimukset asettavat valaisimille ja niiden ohjausjärjestelmille uusia vaatimuksia. Tämä on johtanut siihen, että valonlähteiden ja valaisimien energiatehokkuuksia ja hyötysuhteita pyritään parantamaan jatkuvasti. Nykyään ei myöskään riitä, että valaistus mahdollistaa vain hyvät olosuhteet näkemisen kannalta ja että valaisimet sopivat esteettisesti ympäristöönsä.

Nykyajan trendi on suuntautumassa niin sanottuun ihmiskeskeiseen valaistukseen, jossa valaistukselta halutaan yhä enemmän muuntojoustavuutta ja käyttäjäkohtaista eli käyttäjän, tilan ja tarkoituksen mukaista valaistusta. Näihin tarpeisiin pyrkivät vastaamaan muun muassa uudet markkinoille tulleet PoE-valaistusjärjestelmät, joiden toiminta perustuu sähkön ja ohjaustiedon siirtämiseen yhtä samaa kaapelia pitkin valaisimelle.

Valaistuksen lisäksi myös muita järjestelmäsovelluksia voidaan liittää PoE-järjestelmiin. Tällaisia sovelluksia ovat muun muassa IP-kameravalvontajärjestelmät, hoitajakutsujärjestelmät, rakennusautomaatiojärjestelmät ja moottorihjausjärjestelmät. [2.]

Tällä hetkellä voimassa oleva standardi IEEE802.3at (PoE+) estää monien potentiaalisten järjestelmien integroinnin PoE-järjestelmien kanssa johtuen standardin asettamista tehorajoituksista. Tästä syystä markkinoille on ilmaantunut valmistajien itse kehittämiä järjestelmäkohtaisia PoE-sovelluksia, kuten UPOE (Cisco systems Inc.) valaistukselle ja NPD 6001-A (Bosch security systems) IP-kameravalvonnalle, jotka mahdollistavat suuremman sähkötehon syötön päätelaitteille, kuin mitä voimassa oleva standardi sallii. [3.]

Vaikka LED-valaistuksen energiatehokkuus on hyvin dokumentoitua ja tutkittua, niin edelleen tehokkain valaistustapa on jatkuva keskustelun aihe. Eräs uusimmista ilmiöistä valaistusalalla onkin DC LED-valaistuksen tuleminen markkinoille. [3.]



Insinööriyön alussa keskitytään valaistustekniikan perussuureisiin, lakeihin ja laskentamenetelmiin, jotka luovat pohjan liitteissä esitettyjen valaistusteknisten mittaustulosten tarkasteluun. Näiden jälkeen seuraa luvut hyvästä valaistuksesta, joissa on pyritty kertomaan muun muassa valaistusvaatimuksista näkemisen kannalta ja valaistuksen vaikutuksesta ihmiseen. Tätä seuraa Yhdysvaltalaisen yliopiston tekemän tutkimusraportin esittely tasavirtapiirien ja vaihtovirtapiirien vuosittaiskustannusten vertailusta rakennusten valaistuksessa. Tämän jälkeen kerrotaan PoE-järjestelmistä valaistuksessa ja lopuksi esitellään markkinoilla oleva Redwood ILNS-valaistusjärjestelmä. Liitteissä esitellään valaistusteknisiä mittaustuloksia Sähkökuva Oy:n Kotkassa sijaitsevasta toimistosta, jonne asennettiin ensimmäisenä Suomessa Redwood ILNS-valaistusjärjestelmä.

### Yritysesittely

Granlund Oy on suomalainen suunnittelu- ja konsultointialan asiantuntijakonserni, jossa työskentelee yli 700 asiantuntijaa yhteensä 19 toimistossa. Yritys on perustettu vuonna 1960, ja pääkonttori sijaitsee Helsingin Malmilla.

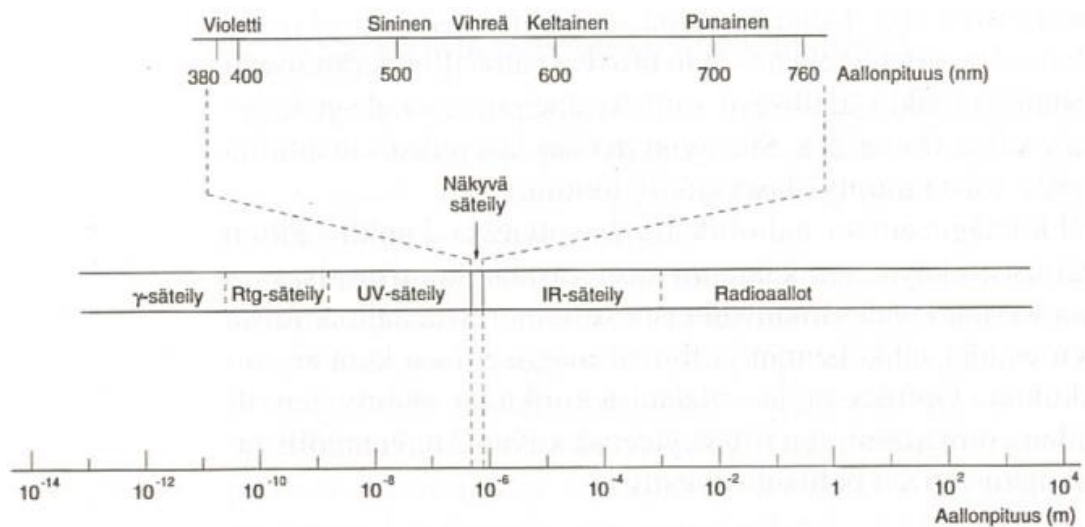
Palvelualueisiin ja tarjontaan kuuluvat talotekniikkasuunnittelu, kiinteistö-, energia- ja ympäristöasioiden konsultointi ja ohjelmistot, kuten ylläpidon hallintajärjestelmä sekä erilaiset suunnitteluun liittyvät tietokanta- ja laskentasovellukset ja energianlaskennan ohjelmistot.

Yrityksellä on ollut sertifioitu laatuja järjestelmä (RAKLI-SKOL-ATL) vuodesta 1998 lähtien (tytäryhtiöt 1999). RALA-sertifiointi (vuoden 2011 loppuun asti nimeltään RAKLI-SKOL-ATL-arviointimenettely) varmistaa osaltaan, että yrityksen toimintajärjestelmä täyttää arviointiperusteiden vaatimukset, sovittuja menettelyjä sovelletaan käytännössä ja yrityksen toimintaa kehitetään.

Granlund Oy on myös asettanut itselleen ”Granlund 2020”-strategian, jonka tavoitteena on hakea vahvaa kasvua niin kotimaassa kuin kansainvälisillä markkinoilla. Strategian keskiössä ovat hyvinvointi ja kansainvälisyys. Granlundin visio on myös kehittää koko suunnittelu- ja konsultointialaa eteenpäin.

## 2 Valaistustekniikan perussuureet ja -lait

Valo on sähkömagneettista säteilyä, jota kuvataan aalto- ja kvanttiteorioiden avulla. Sähkömagneettisen säteilyn aallonpituusalue ulottuu lähes nolosta äärettömään, mutta näkyvän valon alue on vain 400...760 nm, eli kyse on varsin pienestä alueesta (kuva 1). Kaikki fotometriset suureet onkin painotettu silmän valoherkkyyden mukaan. Näkyvän valon lisäksi ihminen voi aistia infrapunasäteilyä lämpönä, mutta kaikki muut sähkömagneettiset säteilyt ovat ihmisen aistimusalueen ulkopuolella. [4, s.13–14.]



Kuva 1. Sähkömagneettisen säteilyn spektri ja sen näkyvä osa [4, s.13.].

### 2.1 Valaistusvoimakkuus E

”Valaistusvoimakkuudella ja sen jakaumalla työalueella ja sitä ympäröivällä alueella on suuri merkitys sille, kuinka nopeasti, turvallisesti ja miellyttävästi henkilö hahmottaa näkötehtävän ja suoriutuu siitä.” [5, s.16.]

Keskimääräinen valaistusvoimakkuus tietyllä alueella määritetään kaikista suunnista tulevien valovirtojen  $\Phi$  ja valaistavan pinta-alan avulla.

Valaistusvoimakkuuksia voidaan laskea horisontaalisesti (vaakapinnat) tai vertikaalisesti (pystypinnat); yleisempää on laskea horisontaalinen valaistusvoimakkuus. Pistemäisen

valonlähteen synnyttämä valaistusvoimakkuus pienenee valovirran tulokulman  $\theta$  kasvaessa lähemmäksi 90:ää astetta. Matemaattisesti tämä esitetään Lambertin kosinilain avulla. Valaistusvoimakkuuden yksikkö on luks eli lumen per neliömetri ( $\text{lm}/\text{m}^2$ ).

Valaistusvoimakkuuden laskentaan ja mittaamiseen määritetään arviointiruudukko standardin SFS-EN 12464-1 kohdassa 4.4. [5, s.22]:

Työalueelle (-alueille), välittömään lähiympäristöön (välittömille lähiympäristöille) ja tausta-alueelle (-alueille) on laadittava arviointiruudukko osoittamaan pisteet, joissa valaistusvoimakkuusarvot lasketaan ja varmennetaan. Ruudukon ruutujen suositeltava muoto on suunnilleen neliö, ruudukon ruudun pituuden suhde leveyteen tulee olla välillä 0,5...2 (katso myös EN 12193 ja EN 12464-2). Ruudukon koko saa olla enintään:

$$p = 0,2 \times 5^{\log_{10}(d)}$$

missä

$$p \leq 10 \text{ m}$$

$d$  laskenta-alueen suurempi mitta (m), kuitenkin, jos pidemmän sivun suhde lyhyempään on 2 tai enemmän  $d$  muuttuu alueen lyhyemmäksi sivuksi, ja

$p$  on ruudukon arviointipisteiden suurin etäisyys (m).

Mittaa vastaava pisteiden lukumäärä on suhteesta  $d/p$  saatava lähin kokonaisluku.

HUOM. 1 Ruudukon pisteiden etäisyydet eivät saisi olla samat kuin valaisinvälit.

## 2.2 Luminanssi L

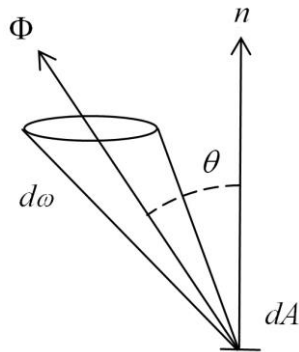
Luminanssi kuvaa kuinka kirkkaana jokin kohde näkyy eli se ilmaisee kohdekappaleen pinnan valotiheyden. Se on ainoa valaistustekninen suure, jonka ihmissilmä näkee, sillä näkeminen perustuu pääasiassa luminanssikontrastiin. Luminanssin yksikkö on kandela per neliömetri ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ).

Lamppujen pintaluminanssi voi olla suuri ja aiheuttaa häikäisyä. Häikäisyä pyritään pienentämään valaisimien häikäisysojilla esimerkiksi matalaluminanssiritilällä tai opaalimuovisuojalla. [6.]

Äärellisen pinnan  $A$  keskimääräinen luminanssi pinnan normaalista kulman  $\theta$  verran eroavaan suuntaan on kaavan 1 mukainen (kuva 2).

$$L = \frac{I}{A \cos \theta} \quad (1)$$

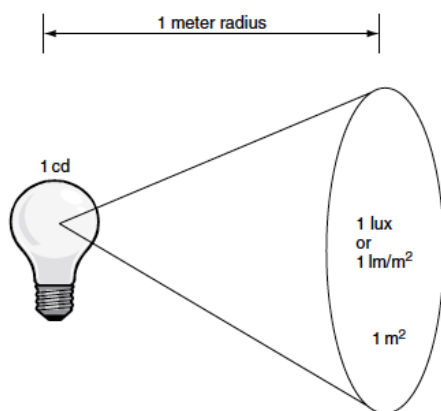
$I$  on äärellisen pinnan  $A$  valovoima tähän suuntaan.



Kuva 2. Tasopinnan  $A$  luminanssin laskentaan liittyvä piirros [7].

### 2.3 Valovirta $\Phi$

Valovirran yksikkö on luumen (lm) ja se kuuluu SI-järjestelmään. Se kuvaa valon määrää, jonka valovoimaltaan 1 kandelan valonlähde säteilee steradianin avaruuskulmaan. Tämä valon määrä osuu metrin päähän muodostuneen ympyräkartion pohjalle, jonka pinta-ala on neliömetri (kuva 3). [8.]

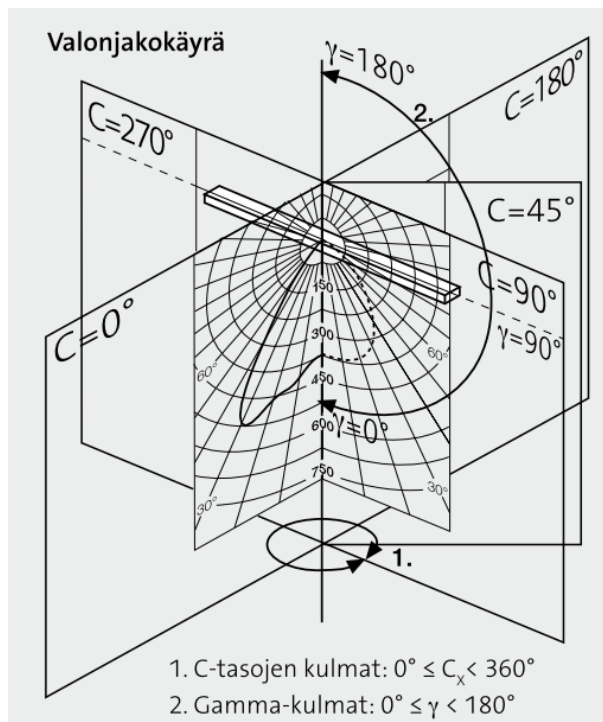


Kuva 3. Valonlähteen muodostama ympyräkartio steradianin kulmaan [9].

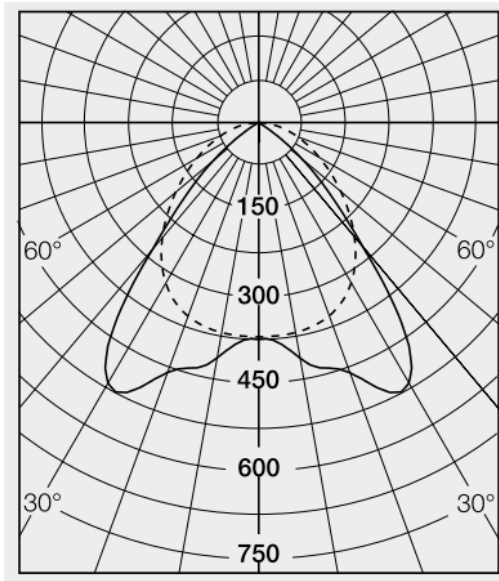
## 2.4 Valovoima Iv

Valovoima on fotometrinen perussuure ja sen yksikkö on kandela (cd). Kandelalla tarkoitetaan sellaisen säteilijän valovoimaa, joka säteilee 555 nm aallonpituutta ilmassa säteilylähteen intensiteetillä  $I = 1/683 \text{ W/steradiaani (sr)}$ . Laskettaessa valovoimaa radio-metrisestä säteilylähteen intensiteetistä huomioidaan vain ne aallonpituudet, jotka ihmis-silmä näkee. [8, s.16.]

Valaisimen valonjaolla on vaikutusta valaisinsijoitukseen ja- määrään. Se vaikuttaa myös häikäisyyn. Valonjakokäyrällä kuvataan lamppujen ja valaisimien tuottamaa valovoimaa eri suuntiin napa- eli polaarikoordinaatistossa. Ehjällä viivalla kuvataan valonlähteen pi-tuusakseliin nähden poikittaista tasoa (C on  $0^\circ$  tai  $180^\circ$ ) ja katkoviivalla pituusakselin suuntaista (C on  $90^\circ$  tai  $270^\circ$ ) valoa (kuva 4). Valaisimen valonjako koordinaatistossa olevat arvot skaalataan vastaamaan 1000 lumenin valolähdettä (kuva 5). [10, s.462.]



Kuva 4. Valaisimen valonjakokäyrä, jossa näkyy C-tasot sekä Gamma-kulmat. Jos valonjakokäyrä ylittää 90 asteen gamma-kulman, niin valaisin antaa epäsuoraa valoa, mikä tarkoittaa, että valaisin antaa valoa ylöspäin. [10, s.462.]



Kuva 5. Symmetrisen 28 W T5-loisteputkivalaisimen (2600 lm) valonjakokäyrä. Suoraan valaisimen alla, kulmassa 0 astetta on 375 cd/klm eli valaisin antaa suoraan alas noin 975 kandelaa. [10, s.462.]

### 3 Valaistuksen laskentamenetelmät

#### 3.1 Pistemenetelmä

Pistemenetelmä, joka tunnetaan myös nimellä kosini- ja neliölaki, on valaistusvoimakkuuden laskentaan yhdessä tietyssä pisteessä tarkoitettu menetelmä (kuva 6). Menetelmää käytetään ulkovalaistuksen laskennassa, mutta sitä voidaan käyttää myös sisävalaistuksen laskennassa, jos huonepinoista heijastuva valo otetaan huomioon laskennassa. [4, s.33,162.]

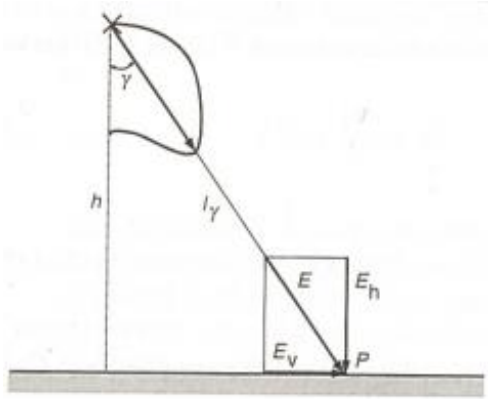
Yksittäisen valaisimen tuottama valaistusvoimakkuus vaakasuoran tason mielivaltaisessa pisteessä lasketaan kaavan 2 mukaan [4, s.161].

$$E_h = \frac{I_\gamma}{h^2} \cos^3 \gamma \times (sr) = \frac{I_\gamma \times \cos \gamma}{h^2} \times (sr) \quad (2)$$

$I_\gamma$  on valaisimen valovoima pisteen P suuntaan [cd]

$h$  on valaisimen etäisyys laskentapisteestä [m]

$\gamma$  on valaisimesta pisteeseen P suuntautuvan suoran ja valaisimen kautta kulkevan pinnan normaalin välinen kulma [°]  
 $E_h$  on vaakasuoran tason valaistusvoimakkuus pisteessä P [lx]  
 $sr$  on steradiaani (avaruuskulmayksikkö)



Kuva 6. Pistemenetelmä yhtälöön liittyvä piirros [4, s.162].

### 3.2 Hyötysuhdemenetelmä

Sisävalaistuksen laskennassa käytetty hyötysuhdemenetelmä ottaa huomioon suoraan työtasolle saapuneen valon ja huonepinnoista heijastuneen valon. Menetelmä edellyttää, että huone on suorakaiteen muotoinen ja valaisimet on sijoitettu symmetrisesti. Laskentaa varten tarvitaan huoneen mitat, katon ja seinien heijastussuhteet, valaisimen valonjakokäyrä, valaisimen hyötysuhde ja valaisimessa olevien lampujen valovirta.

Laskentaa varten täytyy ensin määrittää huoneindeksi, jonka avulla voidaan määrittää valaistushyötysuhde laskettavan huoneen valaistukselle. Huoneen muodot ja mitat vaikuttavat valaistushyötysuhteeseen, joka huomioidaan huoneindeksillä. Huoneindeksi lasketaan kaavan 3 mukaan. [4, s.168–172.]

$$k = \frac{lw}{(l+w)h_m} \quad (3)$$

$l$  on huoneen pituus [m]

$w$  on huoneen leveys [m]

$h_m$  on laskettavan tason ja valaisimen välinen etäisyys [m]

$k$  on huoneindeksi

Lattian ja työtason heijastussuhde oletetaan aina olevan 20 % eli 0,2. Valkoisella pinnalla on suurin heijastussuhde, kun taas täysin musta pinta ei heijasta valoa ollenkaan. Tästä johtuen valkoisilla seinä- ja kattopinnoilla päästään parhaimpaan valaistushyötysuhteeseen. Taulukosta 1 nähdään, että myös suurempi huoneindeksi parantaa valaistushyötysuhdetta. [4, s.168, 172.]

Taulukko 1. Esimerkki valaisimen luettelotiedoista.

Huone- pinta	Heijastussuhde								
	Katto(vyöhyke)	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3
Seinät	0,5	0,3	0,1	0,5	0,3	0,1	0,3	0,1	0,0
Työtaso ja lattia	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0
Huone- indeksi <i>k</i>	Valaistushyötysuhde (%)								
	0,60	30	25	22	29	25	22	25	22
0,80	37	33	29	36	32	29	32	29	28
1,00	43	38	35	42	38	35	37	34	33
1,25	47	43	40	46	43	40	42	39	38
1,50	51	47	44	49	46	43	45	43	41
2,00	55	52	49	53	51	48	49	47	45
2,50	58	55	53	56	54	51	52	50	48
3,00	60	57	55	58	56	54	54	52	50
4,00	62	60	58	60	58	57	56	55	52
5,00	64	62	61	61	60	59	58	57	54

Kun valaistushyötysuhde on määritetty, voidaan keskimääräinen valaistusvoimakkuus laskea kaavan 4 mukaan. [4, s.168–173.]

$$E_m = \beta \eta \frac{N\phi}{A} \quad (4)$$

$E_m$  on keskimääräinen valaistusvoimakkuus [lx]

$N$  on valaisimien lukumäärä

$\phi$  on yhdessä valaisimessa olevien lamppujen kokonaisvalovirta [lm]

$\eta$  on valaistushyötysuhde

$A$  on valaistavan alueen pinta-ala [m<sup>2</sup>]



$\beta$  on valaistuksen alenemakerroin, joka huomioi lamppujen vanhenemisesta aiheutuvan valovirran aleneman sekä lamppujen, valaisimien ja huonepintojen liikaantumisen aiheutuvan valaistusvoimakkuuden pienemisen. Yleensä tähän käytetään arvoa 0,7. Se tarkoittaa sitä, että kun valonlähteen alkuperäisestä valovirrasta on jäljellä 70 %, se tulisi vaihtaa uuteen.

#### 4 Hyvä valaistus

Hyvälle valaistukselle on tyypillistä, että valaistuksen kannalta laadulliset ja määrälliset tekijät otetaan huomioon vaaditun valaistusvoimakkuuden lisäksi. Valaistusvaatimusten kannalta oleellimmat tekijät ovat näkömukavuus, näkötehokkuus ja turvallisuus. Niitä pidetään perustarpeina ihmisen näkemisen kannalta. Näkömukavuus vaikuttaa positiivisesti hyvinvointiin ja siten se vaikuttaa myös epäsuorasti tuottavuuteen ja työn laatuun. Hyvä näkötehokkuus puolestaan mahdollistaa työntekijän suoriutumisen näkötehtävässään. [5, s.14]

Sisätyöalueiden valaistus-standardin SFS-EN 12464-1 mukaan tärkeimmät näköympäristön tekijät suhteessa keino- ja päivänvaloon ovat [5, s.14]:

- luminanssijakauma
- valaistusvoimakkuus
- valon suuntaus, sisätilan valaisu
- valon vaihtelevuus (valon tasot ja värit)
- valon väri ja sen värintoisto-ominaisuudet
- häikäisy
- välkyntä.

#### 4.1 Valaistus, värit ja näkeminen

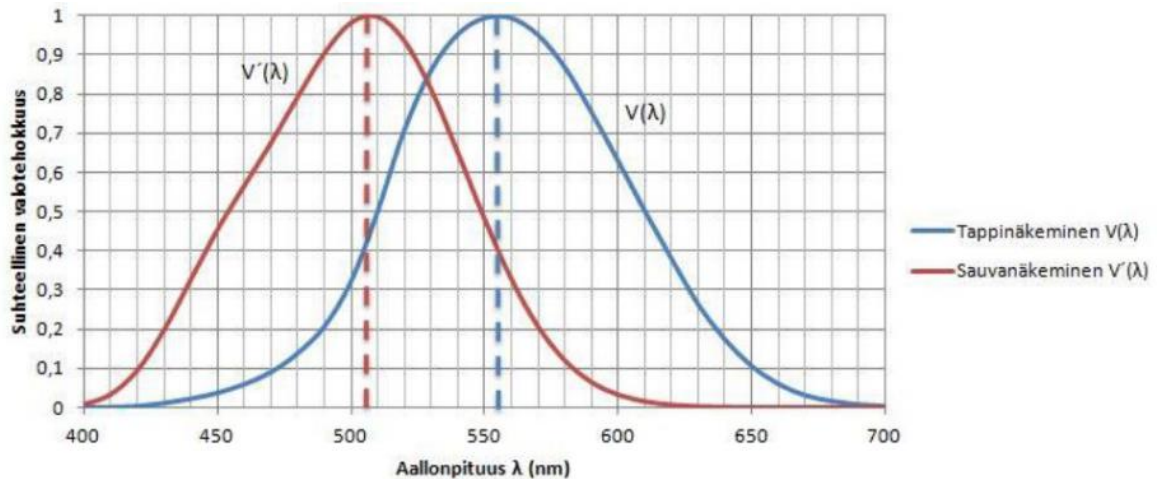
Sisätyöalueiden valaistus-standardi SFS-EN 12464-1 määrittelee kohdassaan 3.8 näkötehtävään liittyvät tekijät seuraavasti:

Merkittävimmät tehtävän näkyvyyteen vaikuttavat tekijät ovat kohteen koko, kohteen luminanssi, kohteen ja sen taustan välinen kontrasti sekä aika, jolloin kohde on näkyvissä. [5, s.12]

Näkemiseen ja valaistukseen liittyvät myös häikäisy, kiiltokuvastuminen, tasaisuus ja värintoisto, jota kuvaa värintoistoindeksi  $R_a$ . Värintoistoindeksin  $R_a$  avulla määritetään, kuinka hyvin valonlähde toistaa muita värejä eli kuinka hyvin ihminen näkee eri värit asianomaisen valonlähteen tuottamassa valossa. Värien näkemiseen vaikuttavat valon määrä, valonlähteen spektri ja ympäristö.

Värintoistoon tulisi kiinnittää huomiota, jos kyseessä on esimerkiksi historiallisesti arvokas kohde, kuten vaikkapa arvokas maalaus, jonka halutaan näyttävän mahdollisimman hyvältä. Toisaalta huonosta värintoistosta esimerkiksi katu- ja tievalaistuksessa ei ole haittaa, missä valaistuksen määrä ja pintaluminanssi ovat tärkeämpiä seikkoja. Hyvä esimerkki on tievalaistuksessa usein käytetty suurpainenatriumlamppu, joka on koettu valotehokkuudeltaan hyväksi, koska sen spektrijakauman piikki (keltainen/punainen) osuu silmän herkkyyskäyrään hyvin (päiväsaikaan), mutta samalla sen värintoisto on erittäin huono. Toisaalta tutkimusten mukaan ihmisen hämäränäkö on parhaimmillaan sinertävässä valossa (noin 507 nm) eli tämä tarkoittaisi sitä, että suurpainenatriumlamppu ei olisikaan paras vaihtoehto tievalaistukseen. [4, s.59; 11, s.62–63.]

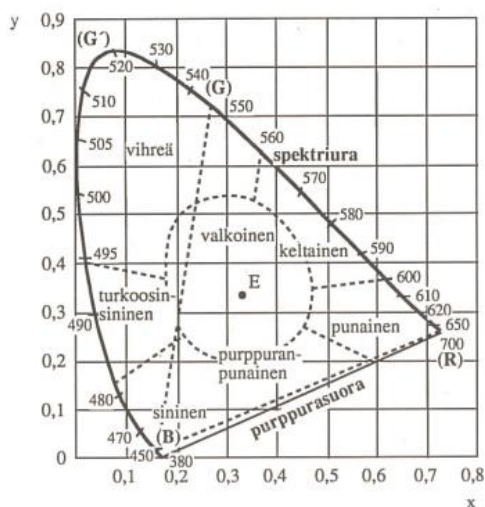
Myös ympäröivän alueen valoisuus vaikuttaa näkemiseen. Ihmisen silmä siirtyy käyttämään sauvasoluja tappisolujen sijaan, kun ilta alkaa hämärtyä. Tämä tarkoittaa sitä, että silmän herkkyys siirtyy lyhemmille aallonpituuksille. Päiväsaikaan taas ihmissilmä näkee parhaiten noin 555 nm:n aallonpituuden, mikä vastaa väriltään keltaista/vihreää (kuva 7). [4, s.58–59.]



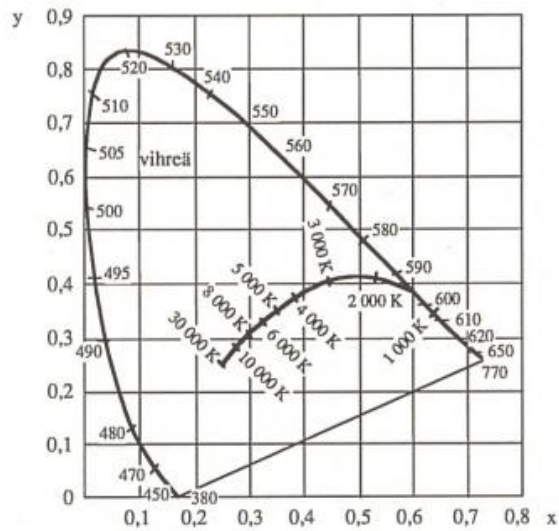
Kuva 7. Silmän suhteellinen herkkyys eri aallonpituuksilla kirkaassa (tappisolut) ja hämärässä (sauvasolut) [12].

Valonvärejä voidaan kuvata CIE:n vuonna 1931 kehittämällä väriavaruusdiagrammilla. Se on abstrakti matemaattinen malli, jonka avulla voidaan määrittää tai toistaa värejä tarkasti (kuva 8). Esimerkiksi tasaenergiaspectrisen valkoisen värin (piste E) koordinaatit ovat  $x=y=0,3333$ . Värikoordinaatit näkyvät x- ja y-akseleilla. Hehkusäteilijän eli Planckin säteilijän käyrä sijaitsee keskellä väriavaruusdiagrammia (kuva 9). [13, s.128.]

Valkoinen valo saadaan perusvalonvärien punainen (R), vihreä (G) ja sininen (B) sekoituksen avulla, johon RGB LED-tekniikka perustuu. Yleensä LED-valaistuksessa valkoinen valo tuotetaan kuitenkin sinisestä LEDistä, joka on päällystetty loisteaineella. [13, s.128.]

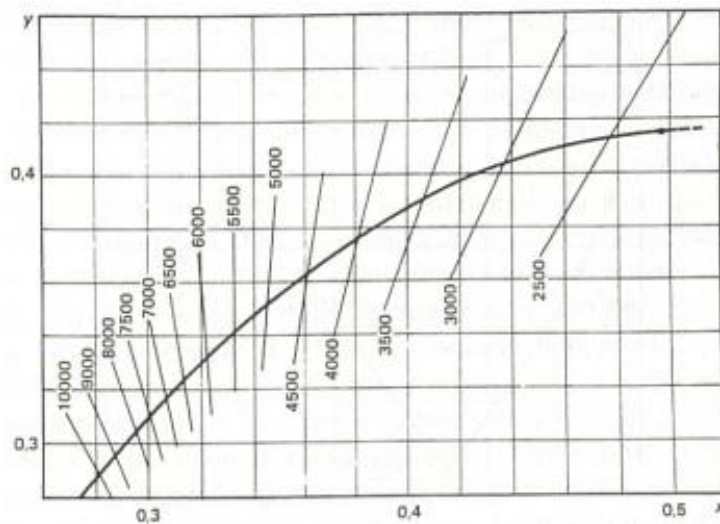


Kuva 8. Väriavaruuden kromaattisuusdiagrammi, CIE 1931 [13, s.128].



Kuva 9. Planckin säteilijän käyrän sijainti väriavaruusdiagrammissa [13, s.133].

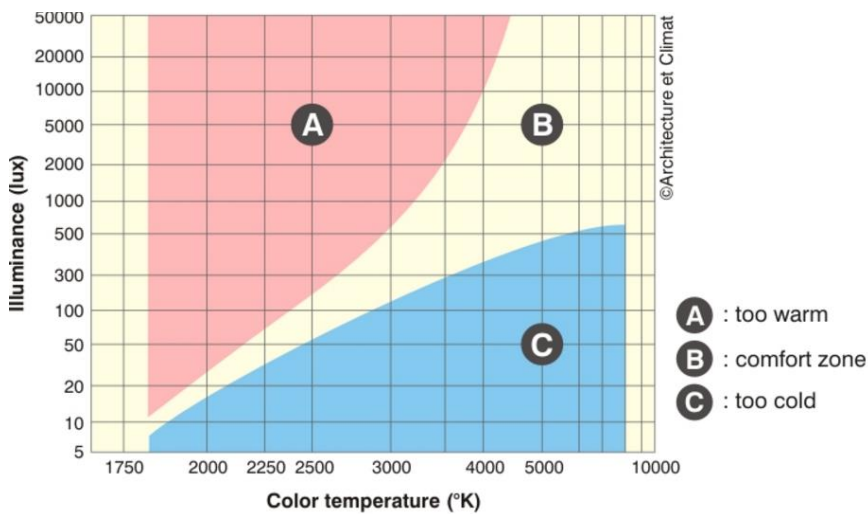
Planckin säteilijän käyrä soveltuu hehkuvalon väriämpötilan määrittämiseen, mutta esimerkiksi monille purkauslamputteille ei voida määrittää väriämpötilaa sen avulla. Osalle purkauslamputteista voidaan kuitenkin määrittää ekvivalentti väriämpötila kuvan 10 käyrästä avulla. [4, s.46.]



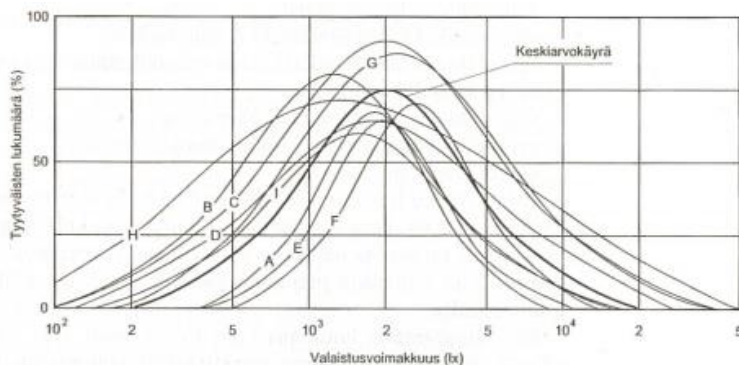
Kuva 10. Ekvivalentin väriämpötilan määrittäminen Planckin käyrän alueella 2500...10 000 K [4, s.47].

## 4.2 Valaistuksen miellyttävyys

Valaistuksen miellyttävyyydestä on tehty useita tutkimuksia. Tutkimuksissa on havaittu, että suuri valaistusvoimakkuus yhdessä alhaisen värilämpötilan kanssa ei ole koettu miellyttäväksi yhdistelmäksi. Vastaavasti korkea värilämpötila ja pieni valaistusvoimakkuus eivät myöskään luo miellyttävää vaikutelmaa. Tutkimustulosten mukaan jopa 75 % ihmisistä pitää noin 2000 luksin valaistusvoimakkuutta parhaimpana (kuva 12). Tällöin värilämpötilan tulisi olla Kruithoffin diagrammin mukaan enemmän kuin 3500 Kelviniä (kuva 11).



Kuva 11. Kruithoffin diagrammi kuvaa valaistusvoimakkuuden ja värilämpötilan suhteen miellyttävyttä. Alue A koetaan liian lämminsävyiseksi, alue B miellyttäväksi ja alue C liian kylmäsävyiseksi. Kuvaajasta nähdään, että tyypillisen toimistuhuoneen (työtasolla 500lx) värilämpötilan tulisi olla välillä 3000...5500K. [14.]



Kuva 12. Tyytyväisten henkilöiden lukumäärän riippuvuus yleisvalaistusvoimakkuudesta työtiloissa eri tutkijoiden mukaan [4, s.74].

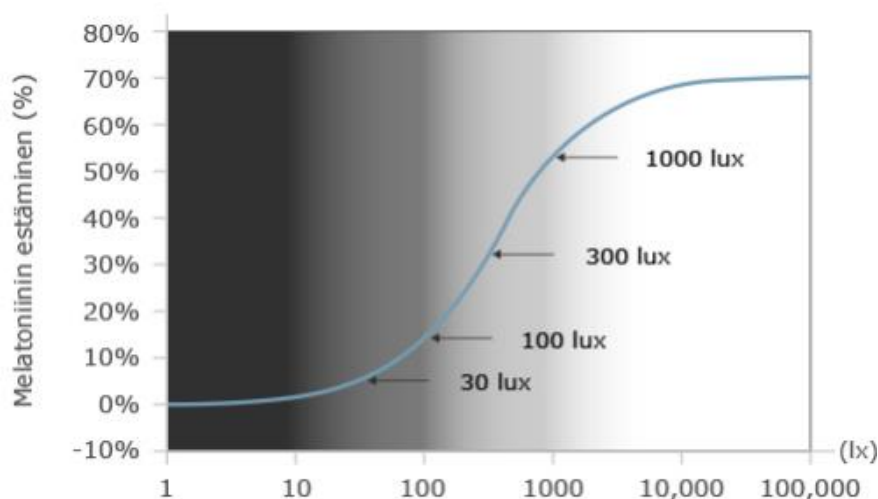
### 4.3 Valaistuksen psykologiset ja biologiset vaikutukset

Suurella valaistusvoimakkuudella ja valkoisella valolla on positiivisia vaikutuksia keskushermostoon, joka ylläpitää elimistöä aktiivisessa toiminnassa. Pieni valaistusvoimakkuus yhdessä keltaisen/punaisen valon kanssa puolestaan aiheuttavat elimistöön väsymyksen tunteen. Työtiloissa ja virkistyskäyttöön tarkoitetuissa tiloissa tulisi siis huomioida tilan valaistuksen tarkoituksenmukaisuus valaistusvoimakkuuden ja värilämpötilan osalta. [15, s.47–48.]

Valaistuksella on myös vaikutusta työtehokkuuteen, ja sillä voidaan parantaa tuottavuutta esimerkiksi teollisuudessa. Hyvä valaistus parantaa visuaalisia ja psykologisia vaikutuksia. Visuaalisia vaikutuksia ovat muun muassa näkötehokkuuden ja mukavuuden parantuminen, kun taas psykologisia vaikutuksia ovat muun muassa työtyytyväisyys ja ihmisten välisen kanssakäymisen parantaminen. [16.]

Valolla on myös onnistuttu vähentämään yötyöissä olevien vuorotyöläisten rasituksia [4, s.76–77].

Melatoniinin tuotanto alkaa noin 30 luksissa ja saturoituu (tasaantuu) noin 1000 luksin valaistusvoimakkuudessa (kuva 13). Melatoniini on niin sanottu yöhormoni, joka säätelee ihmisen vuorokausirytmää ja edistää unen saantia. Melatoniini vahvistaa myös elimistön puolustusjärjestelmää ja vaikuttaa vireystilaan. [17, 18.]



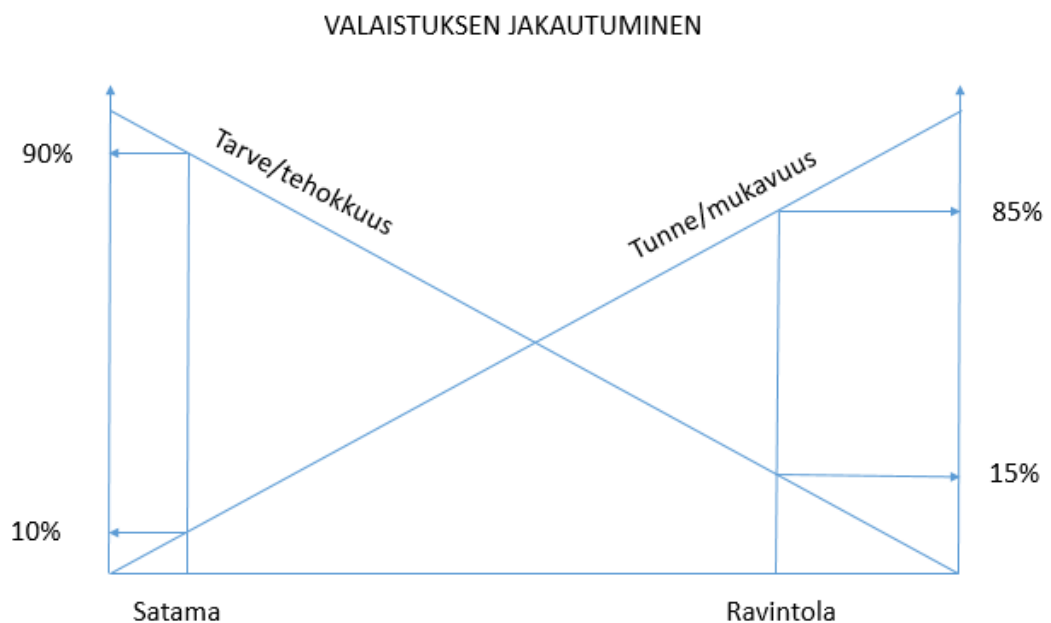
Kuva 13. Valaistusvoimakkuuden vaikutus melatoniinin tuotantoon.

#### 4.4 Valaistuksen eri tehtävien jakautuminen

Voidaan ajatella, että valaistus jakautuu karkeasti tehokkuutta ja mukavuutta palveleviin alueisiin. Valaistuksen tarpeita ja tehokkuutta määrittävät

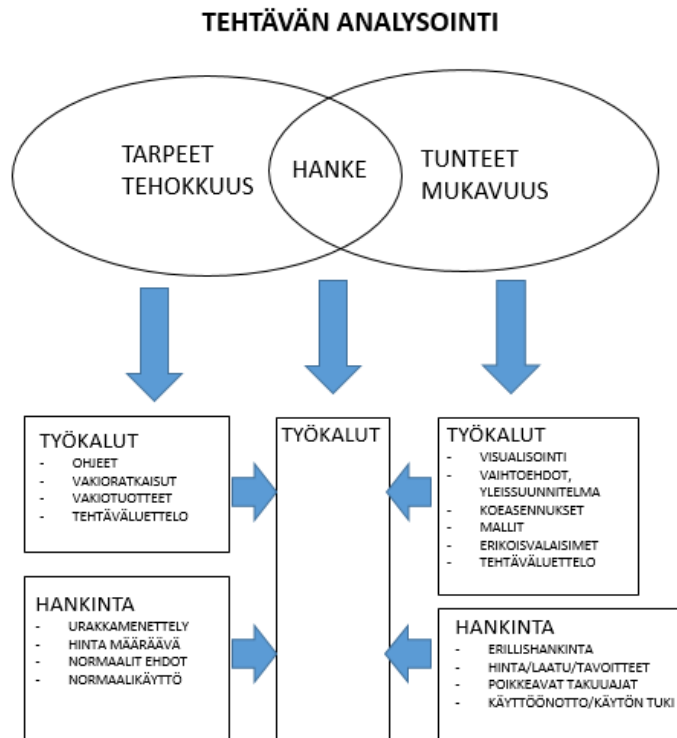
- standardit; sisätyötilojen valaistus (SFS 12464-1) ja ulkoyöalueiden valaistus (SFS-EN 12464-2)
- indeksit esimerkiksi värintoistoindeksi  $R_a$  ja kiusahäikäisyindeksi UGR
- ohjeet, suositukset
- ympäristöluokitukset (LEED, BREEAM).

Tunnelmavalaisukselle puolestaan ei ole olemassa jotain tiettyä määritelmää, sillä jokaisella voi olla oma mielipide siitä mitä hyvä tunnelmavalaisuus tarkoittaa. Hyvänä esimerkkinä voidaan pitää satama-alueen ja ravintolan valaistusta. Satama-alueella valaistukselta vaaditaan standardin mukaiset valaistustekniset minimiarvot, jotta työskentely olisi turvallista ja tehokasta. Ravintolassa puolestaan valaistuksen tunnevaikutuksella ja miellyttävyydellä on suurempi merkitys (kuva 14).



Kuva 14. Esimerkki valaistuksen tehokkuuden ja mukavuuden jakautumisesta [19].

Valaistussuunnittelussa hankkeen analysointiin ja toteuttamiseen voidaan käyttää erilaisia työkaluja. Tällaisia työkaluja ovat muun muassa visualisointi suunnitteluohjelmilla (esimerkiksi Dialux, Relux), malliasennukset, valaistussuunnittelun tehtävälueetelo (VAL12) sekä vakioratkaisut ja -tuotteet (kuva 15).



Kuva 15. Valaistussuunnittelun työkalut ja hankkeen analysointi [19].

#### 4.5 Ihmiskeskeinen valaistus

Ihmiskeskeisellä valaistuksella tarkoitetaan positiivista vaikuttamista ihmisen hyvinvointiin ja mielialaan valaistuksen avulla. Sen tavoitteena on myös parantaa keskittymistä, turvallisuutta ja työskentelyn tehokkuutta työ- tai opiskeluympäristöissä. LightingEurope määrittelee ihmiskeskeisen valaistuksen seuraavasti:

Human centric lighting is intended to promote a person's well-being, mood and health. It can improve concentration, safety and efficiency in workplaces or educational environments. It can support healing processes and prevention of chronic diseases among persons with irregular daily routines or in elder care. [20, s.2]



Ihmiskeskeisellä valaistuksella pyritään tavoittelemaan jotain, mitä normien minimejä noudattava suunnittelu ei ota huomioon. Tällaisia asioita voivat olla muun muassa erilaiset valotasot ja värilämpötilojen säätö. Ihmiskeskeisen valaistuksen suunnittelussa oleellisin on asiakkaan valaistustarpeiden ymmärtäminen. [21.]

## 5 Tasasähköpiirit LED-valaistuksessa

### 5.1 Vaihtovirta vs. tasavirta

Sähkötehojen siirrossa on perinteisesti totuttu käyttämään vaihtovirtaa sen tuomien etujen takia verrattuna tasavirtaan nähden. Nämä edut ovat ilmentyneet muun muassa sähkönsiirrossa pitkillä matkoilla, jolloin vaihtovirtasähkön helppo jännitteen muuntaminen on vähentänyt tehohäviöitä kaapeleissa.

Vuonna 1891 käytiin taistelu vaihtovirtasähkön ja tasavirtasähkön välillä. Thomas Edisonin ehdotus oli, että sähkönsiirrossa käytettäisiin 110 V:n tasavirtaa, kun taas George Westinghouse oli vaihtovirran ja Nikola Teslan kehittäemän AC-muuntajan kannalla. Kuten tänä päivänä tiedetään, tuon taistelun voitti vaihtovirta, koska resistiivinen tehohäviö kasvaa virran neliön mukaan ja tehon määrä on suoraan verrannollinen jännitteen ja virran suuruuteen. Tästä syystä tasavirralla toteutettu sähkönsiirto olisi aiheuttanut huomattavat tehohäviöt kaapeleissa, koska sen jännitettä ei pystytty muuntamaan tarpeeksi suureksi sähkönsiirron kannalta. Tämän seurauksena vaihtovirta voitti, koska sen jännitettä voitiin helposti muuntaa tarpeeksi suureksi.

Kaapeleiden ja liittimien resistiivinen tehohäviö tasajännitteellä voidaan laskea kaavan 5 mukaan.

$$P = UI = \frac{U^2}{R} = RI^2 \quad (5)$$

$P$  on resistiivinen tehohäviö [W]

$U$  on jännite [V]

$I$  on virta [A]

$R$  on resistanssi [ $\Omega$ ]

Vielä 2000-luvun alkupuolella ei ollut mahdollista toteuttaa sähkönsiirtoa tasavirralla, koska suurjännite DC-muuntajia ei ollut saatavilla. Vasta viime aikoina uudet puolijohdemateriaalit ja laitteet ovat mahdollistaneet tasavirtasähkön suurjännitteen (HVDC) käyttöönoton. Nykyään HVDC (200–800 kV) -tekniikalla toteutettu sähkönsiirtotapa tulee halvemmaksi kuin perinteisellä vaihtovirtatekniikalla toteutettu sähkönsiirtotapa. Tästä huolimatta vaihtovirtasähkö tulee pysymään normaalina sähkönsiirtotapana paikallisissa siirto- ja jakeluverkoissa, missä jännitteet eivät turvallisuussyistä voi olla kovin suuria. [22, s.1.]

## 5.2 Rakennusten DC-jakelujärjestelmien edut

Liike- ja asuinrakennusten sähkökuormasta muun muassa tietokoneet, kuluttajaelektronikka ja LED-valaistus toimivat tasavirralla. Nämä laitteet tarvitsevat toimiakseen tasavirtalähteitä, jotka muuntavat verkkovaihtovirran tasavirraksi kyseisille laitteille. Standardoidulla rakennusten DC-jakelujärjestelmällä voitaisiin vähentää näiden virtalähteiden määrää, parantaen samalla sähkönjakelujärjestelmän hyötysuhdetta. DC-jakelujärjestelmien soveltaminen myös muiden tasavirralla toimivien kotitalouslaitteiden käytössä on mahdollista nykyisillä virtalähteillä ja katkaisijoilla. Tämän lisäksi DC-jakelujärjestelmä helpottaisi luonnostaan tasasähköä tuottavan aurinkosähköjärjestelmän ja pientuulivoiman liittämistä rakennuksen sähköverkkoon.

DC-jakelujärjestelmän avulla aurinkosähköjärjestelmän pääomakustannuksissa voidaan säästää jopa 25 %, sähköntuotantoa pienentämättä. Tämä on mahdollista, koska vaihtosuuntaajaa ei tarvita.

DC-jakelujärjestelmien käyttö rakennuksissa aiheuttaisi suuria muutoksia muun muassa taloudellisuuteen, sähkösuunnitteluun ja turvallisuusstandardeihin.

Vaikka tasavirtapiirit ovat teknisesti mahdollisia toteuttaa ja ne voivat olla kustannustehokkaita tietyissä sovelluksissa kuten tietoliikennekeskuksissa, niin jää epäselväksi, milloin ne ovat halvempia ratkaisuja kuin vaihtovirtapiirit laajemmissa sovelluksissa kuten esimerkiksi toimistorakennuksen valaistuksessa.

### 5.3 AC- ja DC-valaistusratkaisuiden vuosittaiskustannusten vertailu

#### 5.3.1 Vertailun lähtökohdat

Tässä luvussa esitetään tutkimustuloksia AC- ja DC-valaistusratkaisuiden vuosittaiskustannusten vertailusta, jotka on tehty Yhdysvalloissa Pittsburghissa Carnegie Mellon yliopiston teknillisen ja julkisen politiikan osaston toimesta vuonna 2012. Tutkimuksessa keskitytään kuvitteellisen liikerakennuksen AC- ja DC-valaistuksen asennuksen ja käytön vuosittaiskustannusten (LAC) sekä valaisimien pääomakustannusten (CAP) vertailuun kuudessa eri tilanteessa käyttäen Monte Carlon simulaatiota. Vertailussa käytetään DC LED -valonlähteitä ja -loisteputkia sekä tavanomaisia AC LED -valonlähteitä ja -loisteputkia. Vertailtavat tilanteet ovat

- 1) DC-valaistus ilman aurinkopaneelijärjestelmää
- 2) DC-valaistus aurinkopaneelijärjestelmällä (PV+DC)
- 3) DC-valaistus aurinkopaneelijärjestelmällä ja lyijyakuvarastoinnilla (PV+B+DC)
- 4) AC-valaistus ilman aurinkopaneelijärjestelmää
- 5) AC-valaistus aurinkopaneelijärjestelmällä (PV+AC)
- 6) AC-valaistus aurinkopaneelijärjestelmällä ja lyijyakuvarastoinnilla (PV+B+AC).

Tutkimusta varten tehtiin malli toimistorakennuksesta, jossa määriteltiin rakennuksen geometriset tiedot, käyttöaste, valaistuksen tarveselvitys sekä tehon ja energian kulutuksen arvioiminen kolmella DC-valaistus- ja kolmella AC-valaistusvaihtoehdolla, joihin kuului sekä LEDejä ja loisteputkia. Tapaustutkimuksessa tutkittiin kuvitteellista 4-kerroksista, pinta-alaltaan 4400 m<sup>2</sup> uutta toimistorakennusta, jota käyttää 672 ihmistä ja jossa työpistealuetta ympäröivän alueen valaistuksen yhteenlaskettu valovirta on 1900 klm ja työvalaistuksen yhteenlaskettu valovirta on 330 klm. Valaistuksen valovirtojen määrä perustuu Illumination Engineering Society of North America (IESNA) asettamiin vaatimukseen toimistovalaistuksesta, Pittsburghissa, Pennsylvaniassa.

AC-valaistuksen skenaarioissa loisteputki- ja LED-valaisimien jännite on 277 V ja DC-valaistuksen skenaarioissa jännite on 249 V. Kaikissa vertailutilanteissa valaisimien lukumäärä ja valovirta on pidetty vakiona, ainoastaan tehoa on muutettu. Kaapeleiden johdinpoikkipinta-alat ja pituudet on määritetty valaistuksen kokonaiskuormituksen mukaan alueittain.

Tutkimuksessa ei ole otettu huomioon päivänvalon vaikutusta eikä valaistuksen ohjausta, vaikka niillä voi olla suurikin vaikutus valaistuksen kustannustehokkuuteen.

#### Vuosittaiskustannusten laskenta

Vuosittaiskustannukset on arvioitu vuodelle 2012. Niissä on otettu huomioon valaistusjärjestelmän asennus- ja pääomakustannukset, PV-järjestelmän kustannukset, kaapelointi ja virtapiirien katkaisijoiden kustannukset sekä vuosittaiset lampunvaihtojen työvoimakustannukset ja vuosittaiset sähköenergian kustannukset. Kaikissa skenaarioissa sähköenergian hinta on 0,10 \$/kWh ja diskonttokorko on 12 %. Vuosittaiskustannukset on laskettu kaavojen 6 ja 7 mukaan.

$$LAC = CapPV \times CRF_p + CapLED \times CRF_L + W \times CRF_w + M + E \quad (6)$$

*LAC* on Levelized Annual Costs, vuosittaiskustannukset yhteensä

*CapPV* on Capital costs of Photovoltaic, PV-järjestelmän pääoma- ja asennuskustannus

*CRF<sub>p</sub>* on Capital Recovery Factor of Photovoltaic

*CapLED* on Capital costs of LED, LED järjestelmän pääoma- ja asennuskustannus

*CRF<sub>L</sub>* on Capital Recovery Factor of LED

*W* on Wiring and circuit breakers, kaapeleiden ja virtapiirien katkaisijoiden pääoma- ja asennuskustannukset

*CRF<sub>w</sub>* on Capital Recovery Factor of Wires and circuit breakers

*M* on Maintenance, vuosittainen lamppujen vaihdon työvoimakustannus

*E* on Electricity costs, sähköenergian hinta [\$/kWh]

$$CRF_i = \frac{i}{1 - (1+i)^{-lifetime_i}} \quad (7)$$

*i* on Discount rate of 12 percent, diskonttokorko 12 %

Vuosittaiskustannusten laskennassa tulisi huomioida vaihtelevat DC- ja AC-komponenttien kustannukset ja hyötysuhteet. Lisäksi PV-järjestelmien vuosittaiskustannuksia lasettaessa tulisi ottaa huomioon paikkakohtaisesti vaihteleva auringonsäteilynmäärä. [22, s.2.]

### 5.3.2 DC LED-valaistusjärjestelmä

Tässä skenaariossa toimistorakennuksen jokaiseen kerrokseen on sijoitettu AC/DC- virtalähteitä, jotka muuntavat vaihtojännitteen tasajännitteeksi. Kyseessä on samantyyppinen keskitetty järjestelmä kuin esimerkiksi Redwood ILNS 48 V:n järjestelmä, jossa käytetään vähintään Cat5-parikaapeleita valaistuksen syöttöön.

Oleellisia tekijöitä rakennustason DC-sähkönjakelun taloudellisuudessa ovat keskitettyjen AC/DC-virtalähteiden ja valaisimissa olevien DC-virtalähteiden hyötysuhteet ja kustannukset. Skenaarioiden AC-loisteputkivalaisimissa on käytetty kuristimia ja AC LED-valaisimissa liitäntälaitteita. Jos rakennustason DC-sähkönjakelu tulisi laajaan käyttöön, DC-virtalähteiden käyttö olisi taloudellisempaa kuin AC-virtalähteiden käyttö, koska tasasuuntaajia ei tarvittaisi. Koska tasasähköllä ei esiinny harmonisia yliaaltoja eikä reaktiivista tehoa, yliaaltojen suodattamiselta ja loistehon kompensoinnilta säästyttäisiin.

Vaihtovirtalaitteet puolestaan tarvitsevat usein tehokertoimen korjauksen, johtuen kuormituksen induktiivisesta- tai kapasitiivisesta reaktanssista. Vaihtovirralla usein esiintyy myös harmonisia yliaaltoja, jotka ovat haitallisia sähkönlaadun kannalta. Näiden yliaaltojen poistaminen sähköverkosta vaatii suodatinlaitteita. Myös radiotaajuushäiriöiden ja sähkömagneettisten häiriöiden vaimentaminen on tarpeellista vaihtovirtapiirejä käytettäessä, koska vaihtovirralla toimivat sähkölaitteet tuottavat sähkömagneettista säteilyä ja niistä voi syntyä häiriöitä muihin laitteisiin esimerkiksi kaapeleita pitkin, jos nämä eivät ole suojattuja. Sen sijaan keskitetty AC/DC-virtalähde korjaa nämä ongelmat.

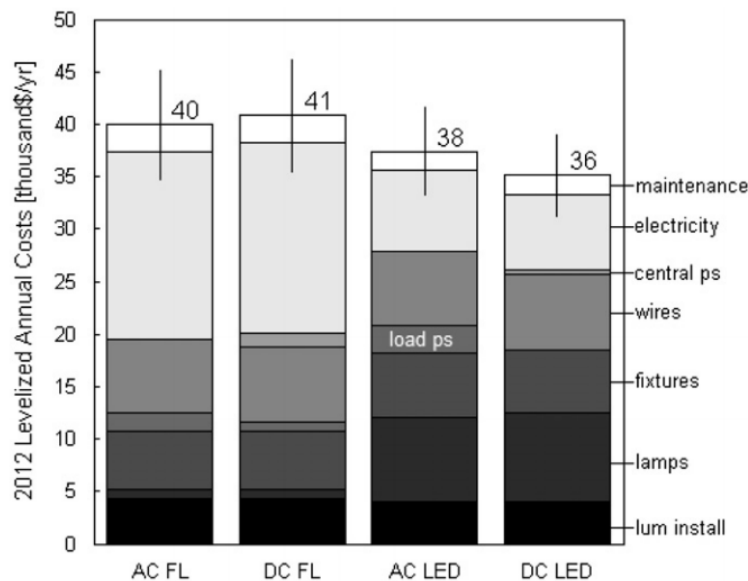
Nykyisen AC siirto- ja jakeluverkon takia AC/DC-muuntaja, tehokertoimen korjaus ja radiotaajuushäiriöiden suodatus vaaditaan jokaiselle LED-valaisimelle.

Tutkimuksessa esitetään paras tilanne DC-valaistuksen kannalta. AC-loisteputkikuristimien kustannukset on oletettu kaksinkertaisiksi DC-loisteputkikuristimiin nähden. Tämän

lisäksi on oletettu, että rakennustason DC-jännitestandardi olisi perustettu ja LED-liitäntälaitteita ei tarvita valaisimissa. [22, s.3.]

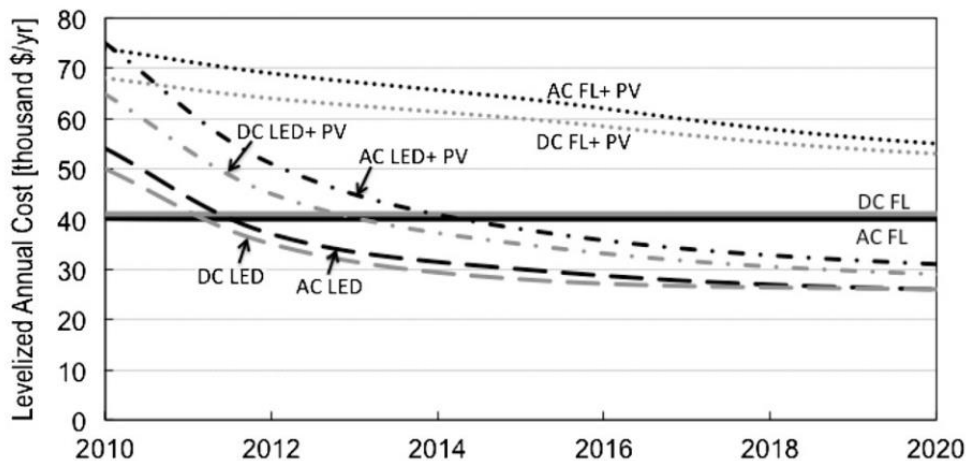
Vuonna 2012 LED-lamput (AC tai DC) olivat vuosittaiskustannuksiltaan pienimmät liikerakennusten valaistuksessa. Poistamalla liitäntälaitteet ja lisäämällä keskitetty AC/DC-virtalähde (DC LED -valaistusjärjestelmä) voidaan vuosittaiskustannuksissa säästää noin 5 % verrattuna AC LED -valaistusjärjestelmään (kuva 16). Tämä pätee vuoden 2012 halvimman ja tehokkaimman DC- ja AC LED-valaistusjärjestelmien vertailussa.

Vuosittaiskustannuksia laskettaessa tulisi myös huomioida, että LED-komponenteilla on erilaisia kustannuksia ja hyötysuhteita. Tästä johtuen AC-sähkönjakelun vaihtaminen DC-sähkönjakeluun voi muuttaa LED-valaistusjärjestelmän vuosittaiskustannuksia + 5 % ... - 15 %. Lisäksi pääomakustannukset voivat muuttua +2 % ... -14 %. Tämä pätee myös AC ja DC-loisteputkivalaistukseen, joilla on saman tyyppiset pääoma- ja vuosittaiskustannukset.



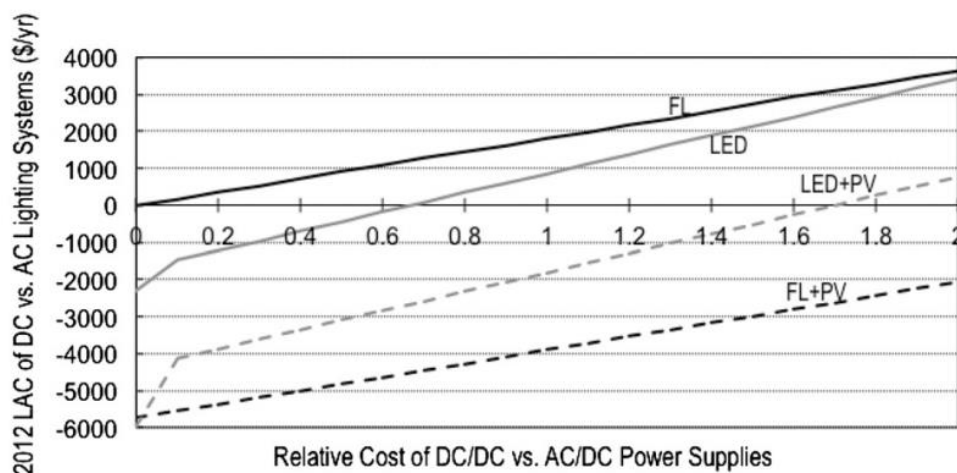
Kuva 16. AC vs. DC loisteputki- ja LED-valaistuksen vuosittaiskustannukset. Näissä tuloksissa on oletettu, että LED-valaisimissa ei tarvita liitäntälaitteita käytettäessä DC-sähkönjakelua. AC FL= vaihtovirtaloisteputki 277 V, DC FL= tasavirtaloisteputki 249 V, AC LED= 277 V, DC LED= 249 V. Lum install= valaisimen asennuskustannus, lamps + fixtures= lampun ja valaisimen kustannus, ps= virtalähde (power supply). [22, s.5.]

Kuvaajasta 1 nähdään, että DC sekä AC LED-valaistus ohittivat AC-loisteputkivalaistuksen pienemmissä vuosittaiskustannuksissa vuonna 2012. Samasta kuvaajasta huomataan myös, että DC- ja AC LED -valaistuksen vuosittaiskustannusten erotus pienenee ajan myötä. DC LED -valaistuksen vuosittaiskustannukset ovat kuvaajan mukaan alle 2 % pienemmät kuin AC LED -valaistuksen vuosittaiskustannukset vuoteen 2020 mennessä.



Kuvaaja 1. Ennusteet vuosittaiskustannuksille 2010–2020. Ennusteet eivät alene merkittävästi vuosien 2020–2030 välillä, joten ne on jätetty pois kuvaajasta. Näissä ennusteissa on oletettu, että LED-valaisimissa ei tarvita liitäntälaitteita käytettäessä DC-sähköjakausta. [22, s.5.]

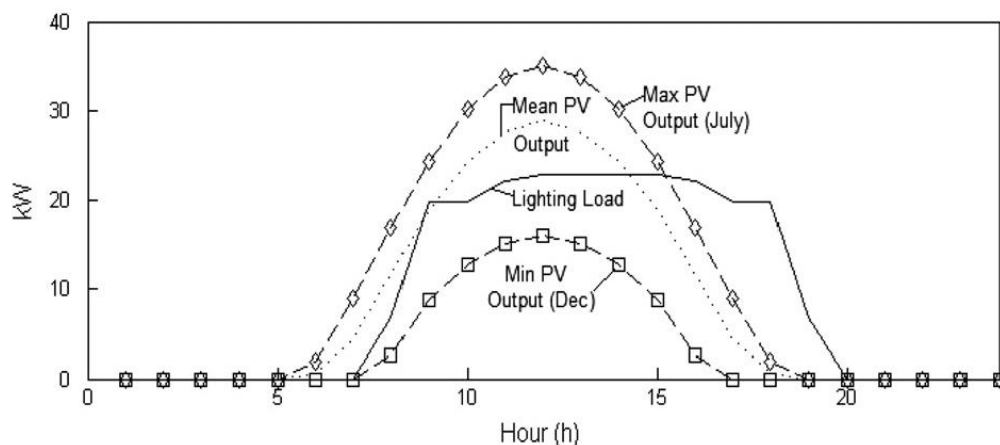
Kuvaajasta 2 nähdään, että kun DC-virtalähteen kustannukset ovat alle 70 % AC-virtalähteen kustannuksista, on DC LED-valaistus taloudellisempi ratkaisu kuin AC LED-valaistus. PV-järjestelmillä DC LED-valaistus on taloudellisempi ratkaisu kuin AC LED-valaistus, kun DC-liitäntälaitteiden kustannukset ovat enintään 170 % AC-liitäntälaitteiden kustannuksista.



Kuvaaja 2. DC-valaistuksen taloudellisuus riippuu DC- ja AC-virtalähteiden suhteellisista kustannuksista. Näissä tuloksissa on oletettu, että jokaisessa DC-valaisimessa on liitäntälaitteet, jotta niiden virran säätö olisi mahdollista. [22, s.5.]

### 5.3.3 PV+DC LED -valaistusjärjestelmä

Seuraavassa skenaariossa on mallinnettu sähköverkkoon kytketty sama liikerakennus kuin edellisessä skenaariossa, johon on lisäksi asennettu aurinkopaneelit kiinteällä kallistuskulmalla. Aurinkopaneelit on mallinnettu leveysasteella, jossa ilmasto vastaa Pittsburghin ilmastoa, (kuvaaja 3). Tässä skenaariossa ei käytetä lyijyakuvarastointia.



Kuvaaja 3. Valaistuksen kuormitustyyppi ja aurinkopaneelien tuottamat tehot eri vuodenaikoina Pittsburghissa, Pennsylvaniassa. Valaistuksen kuormitustyyppistä nähdään, että päivänvaloa ei hyödynnetä tässä skenaariossa.



Mallinnuksessa käytetyt aurinkopaneelit on valmistettu monikiteisestä piistä (polypii), koska sitä on helposti saatavilla markkinoilta ja se on tutkimus- ja kehitystyön kannalta yksi tulevaisuuden aiheista.

Tuntien ja kuukausien keskimääräinen auringonsäteilyn data on saatu National Renewable Energy Laboratoryn (NREL) kansainvälisen auringonsäteilyn tietokannasta. Auringonsäteily määrän vaihtelut alueittain vaikuttavat aurinkopaneelin kokoon ja siten pääomakustannuksiin, mikä muodostaa huomattavan osan vuosittaiskustannuksista. Koska Pittsburgh on suhteellisen pilvinen alue, tutkimuksessa on arvioitu, että integroidun DC-sähkönjakelun ja aurinkopaneelien käyttäminen siellä on vuosittaiskustannuksiltaan korkein koko Yhdysvalloissa.

PV-järjestelmän mitoitus on tärkeä osa suunnittelua ja vaikuttaa DC-virtapiirien vuosittaiskustannuksiin. Ylimoitettu PV-järjestelmä tuottaa enemmän sähköä kuin päivittäinen kulutus vaatii. Silloin se voi vaatia vaihtosuuntaajan, jotta ylimääräinen sähkö saadaan myytyä jakeluverkkoon päin tai akuston DC-sähkön varastointia varten.

Aurinkopaneelin mitoitus on järkevä lähestymistapa vuosittaiskustannusten minimoimiseen, mutta tämä ei mahdollista aurinkopaneelien ja ilman aurinkopaneelita olevien tilanteiden vertailua, kun aurinkoenergian kustannukset ovat suuremmat kuin verkkosähkön kustannukset. Tällöin optimaalinen aurinkopaneelin koko olisi nolla wattia.

Tutkimuksessa on myös valittu skenaario, jossa aurinkopaneeliryhmä on mitoitettu syöttämään ympäröivän alueen perusvalaistusta vuoden aurinkoisempana kuukautena. Mallinnuksessa aurinkopaneelit tuottavat yhtä suuren energian lumen tunteina kaikilla neljällä valaistus skenaarioilla ilman energian varastointia. Aurinkopaneelit on mitoitettu kaavan 8 mukaan.

$$PV(kW) = \frac{L}{\eta_{PV} \times I \times inv} \quad (8)$$

$PV$  on aurinkopaneelin huipputeho [kW<sub>p</sub>]

$L$  on rakennuksen valaistusjärjestelmän energiankulutus per päivä, vuoden aurinkoisempana kuukautena, heinäkuussa, Pittsburghissa. [kWh/päivä]

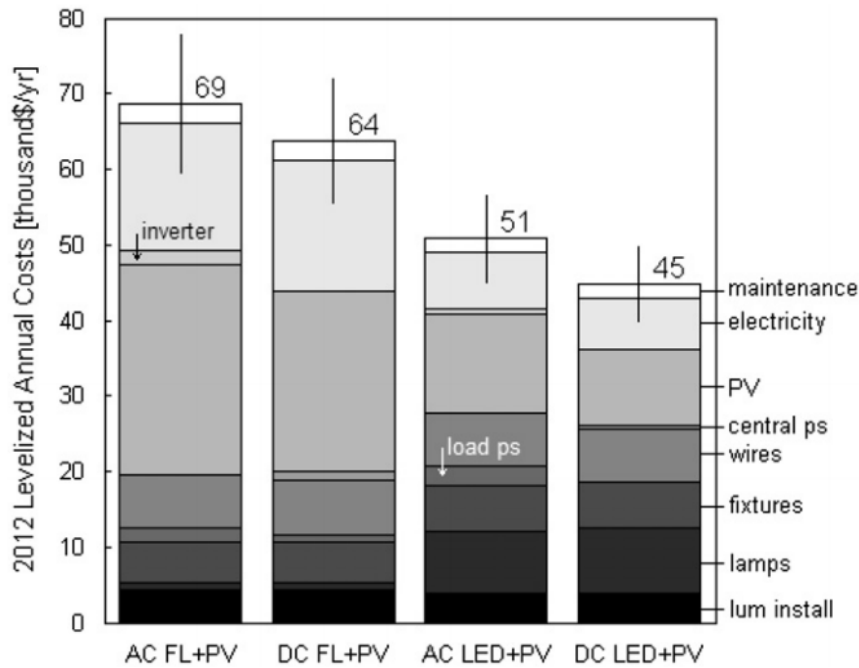
$\eta_{PV}$  on aurinkopaneelin hyötysuhde (12...18 %)

$I$  on päivittäinen auringonsäteily eli insolaatio Pittsburghissa heinäkuussa. [tuntia per päivä auringon huipputehosta = 1 kW/m<sup>2</sup>]  
 $inv$  on vaihtosuuntaajan hyötysuhde (87...94 %) AC-skenaarioissa. DC-skenaarioissa laskennallinen hyötysuhde on 100 %, koska vaihtosuuntaajaa ei tarvita.

Kuukausina jolloin auringonsäteily on vähäisempää, jakeluverkko syöttää sähköä osiin joihin aurinkosähkö ei riitä. Aurinkopaneelien mitoituksen seurauksena jokaisessa skenaariossa on erilainen aurinkosähkön tuotanto ja aurinkopaneelien koko. Mallinnuksen aurinkosähkön tuotanto vaihtelee välillä 16...42 kW<sub>p</sub> ja aurinkopaneelien yhteenlaskettu koko välillä 111...306 m<sup>2</sup>. Liikerakennuksen katon pinta-ala on 1114 m<sup>2</sup> ja aurinkopaneelit tuottavat jatkuvan energian valaistukselle (luumen tuntia/m<sup>2</sup>). [22, s.4.]

Käytettäessä samaa jännitettä valaistuksessa ja PV-järjestelmässä voidaan DC/AC -vaihtosuuntaaja eliminoida. Eliminoimalla vaihtosuuntaajan DC-loisteputkien kuristimet ja LED-liitäntälaitteet voidaan aurinkopaneelien kokoa tai määrää supistaa DC-loisteputkilla 14 % ja LEDeillä 22 %, koska järjestelmän hyötysuhde paranee. Tuotettu valonmäärä ei vähene. Kuvasta 17 nähdään, että paras PV+DC LED-järjestelmä vähentää vuosittaiskustannuksia 12 % (noin 6000 \$/vuosi) ja pääomakustannuksia 13 % (noin 39 000 \$) verrattuna parhaaseen PV+AC LED-järjestelmään.

Ottaen huomioon kustannusten ja hyötysuhteiden vaihtelevuuden PV-järjestelmissä ja LED-komponenteissa DC- sähköjakelujärjestelmä voi pienentää vuosittaiskustannuksia 2...21 % (2000 \$/vuosi...10 000 \$/vuosi) ja pääomakustannuksia 4...21 % (16 000 \$...62 000 \$) verrattuna AC-sähköjakelujärjestelmään. Sähköverkkoon integroitujen PV LED -järjestelmien pääkustannustekijät ovat aurinkopaneelit ja LEDit. Ennusteiden mukaan vuoteen 2020 mennessä sähköverkkoon integroitujen PV LED -järjestelmien vuosittaiskustannukset ovat 12 % suuremmat kuin AC- tai DC LED -järjestelmillä ilman PV-järjestelmää (kuvaaja 1).



Kuva 17. PV+AC- ja PV+DC-valaistusjärjestelmien vuosittaiskustannukset (1000 \$/vuosi). Näissä tuloksissa on oletettu, että LED-valaisimissa ei tarvita liitännälaitteita käytettäessä DC-sähkönjakelua. AC FL+PV=277 V AC-loisteputkivalaistus + aurinkosähköjärjestelmä 47 kW, DC FL+PV = 249V DC-loisteputkivalaistus + aurinkosähköjärjestelmä 37 kW, AC LED+PV = 277 V AC LED-valaistus + aurinkosähköjärjestelmä 23 kW, DC LED+PV = 249V DC LED-valaistus + aurinkosähköjärjestelmä 18 kW. Lum install = valaisimen asennuskustannus, lamps + fixtures = lamppujen ja laitteiden kustannukset, ps = virtalähde.

#### 5.3.4 PV+B+DC LED-valaistusjärjestelmä

Skenaariossa aurinkopaneelien tuottamaa energiaa varastoidaan lyijyakuihin. Aurinkopaneeliryhmä on mitoitettu kuorman  $bL$  mukaan, missä  $b$  on yhtä suuri tai pienempi kuin 1.0 ja vastaa murto-osaa valaistuskuormasta, jota syötetään integroidulla PV-akkujärjestelmällä. Lyijyakuston koko on laskettu kaavan 9 mukaan.

$$B = \max t \left[ \frac{PV \times I_t - bL_t}{V \eta_d} \right] \quad (9)$$

$B$  on lyijyakun koko ampeeritunteina [Ah]

$PV$  on aurinkopaneelin huipputeho [ $kW_p$ ]

$I_t$  on päivittäinen auringonsäteilyn aika [h/päivä]

$L_t$  on rakennuksen valaistusjärjestelmän energiankulutus per päivä, vuoden aurinkoisempana kuukautena, heinäkuussa, Pittsburghissa. [kWh/päivä]

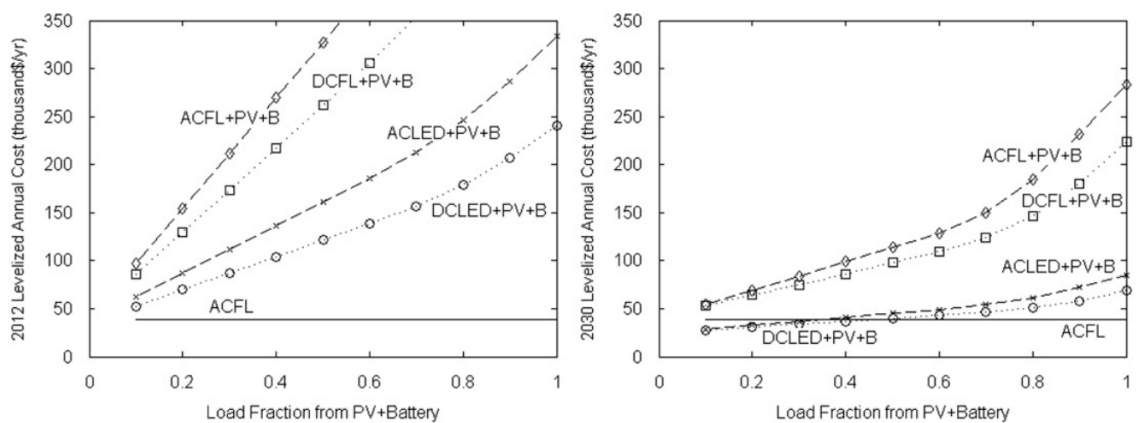
$V$  on aurinkosähkö- ja valaistusjärjestelmän jännite [V]

$\eta_d$  on lyijyakun purkauksen hyötösuhde

Mallissa ei huomioida ylimääräisen energian varastointia ja lisäksi oletetaan, että valaistusjärjestelmän ja aurinkosähköjärjestelmän jännitteet ovat yhtä suuret. Tutkimuksessa vaihdellaan PV-lyijyaku-järjestelmän tuottamaa sähkön osuutta AC- ja DC-loisteputkille ja LED-valaistusjärjestelmille. Näiden vuosittaiskustannuksia verrataan perustapaukseen, jossa on AC-loisteputkivalaistus ilman PV-järjestelmää. [22, s.4.]

Käytettäessä PV-järjestelmää ja lyijyakuvarastointia sekä DC-sähkönjakelua (PV+B+DC) voidaan eliminoida useita tehonmuuntamisen vaiheita. Pilvisenä hetkenä tai illalla akusto syöttää tehoa valaistukselle niin, että sähköverkosta ei tarvitse ottaa sähköä.

Vuonna 2012 polypii-aurinkopaneelit, lyijyakut ja LEDit olivat liian kalliita kilpaillakseen sähköverkkoon kytketyn AC-loisteputkivalaistuksen kanssa. Kuvasta 18 nähdään, että sähköverkkoon integroidut PV+B LED -järjestelmät ovat kustannustehokkaampia kuin AC-loisteputkijärjestelmät vuonna 2030, jos niiden osuus valaistuksen kokonaisuormituksesta on alle 40 %. Tutkimuksessa on myös arvioitu, että vuoteen 2020 mennessä sähköverkkoon integroidut PV+B LED-järjestelmät ohittavat AC-loisteputkijärjestelmät pienemmissä vuosittaiskustannuksissa, jos niiden osuus on alle 15 % valaistuksen kokonaisuormituksesta.



Kuva 18. Kuvaajissa on esitetty vuosien 2012 ja 2030 valaistusjärjestelmien vuosittaiskustannusten ennusteet. Vaaka-akselilla on esitetty PV+B-järjestelmällä syötettävän valaistuksen osuus valaistuksen kokonaisuormituksesta. Pysty-akselilla on esitetty vuosittaiskustannusten määrä [1000 \$/vuosi]. [22, s.6.]

## 6 LED-tekniikka

Nykyään LED-tekniikka hallitsee valaistusmarkkinoita ja siitä on tullut käytetyin tekniikka uusissa valaistusratkaisuissa. LEDit ovat lähes korvanneet hehku-, halogeeni- ja loistelamput niin toimisto- ja teollisuusrakennuksissa kuin asuinrakennuksissa. [3, s.1.]

LEDien hyviä puolia ovat

- hyvä valotehokkuus
- pitkä elinikä
- täysi valovirta heti syttyessä (myös kylmällä)
- monipuoliset himmennys- ja ohjausmahdollisuudet (hyötysuhde paranee himmennettäessä)
- hyvä valonlaatu (valkoinen valo)
- pienikokoisten kalusteiden valaistus.

LEDien huonoja puolia ovat

- lämmönhallinta, ei sovellu kuumiin olosuhteisiin
- valonlähdeosan vaihtaminen
- kirjava tuotteiden laatu, vertailu vaikeaa. [23.]

LED-valaisimien eliniät ja merkinnät

LED-valaisimen käyttöikä ilmoitetaan käyttötuntien avulla ja se perustuu valovirran alenemaan. Yleensä ilmoitetun käyttötuntimäärän jälkeen alkuperäisestä valovirrasta on jäljellä 70 %. Tämä tarkoittaa sitä, että LED on kulunut loppuun vaikka sillä onkin jäljellä nimellisesti 70 % valovirrastaan. Laadukkailla valkoista valoa antavilla LED-valaisimilla käyttöikä on 30 000...50 000 tuntia tai jopa enemmän. Vertailun vuoksi hehkulampun käyttöikä on noin 1000 tuntia, kompaktin loistelampun (energiansäästölamppu) käyttöikä on 8000...10 000 tuntia, ja parhaimmilla kaksikantaisilla loistelampuilla käyttöikä voi olla yli 30 000 tuntia. [24.]

Esimerkiksi 50 000h L<sub>70</sub>B<sub>10</sub> merkintä LED-valaisimessa kertoo, että 50 000 tunnin käytön jälkeen 10 % (B<sub>10</sub>) toiminnasta olevista LED-moduuleista ei enää tuota 70 % (L<sub>70</sub>) alkuperäisestä valomäärästään [23].

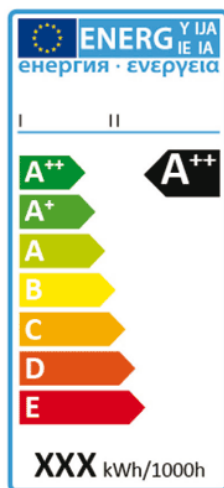
C<sub>10</sub> merkintä tarkoittaa aikaa, jonka kuluessa 10 % LED-moduuleista on lopettanut valontuottonsa [23].

L<sub>70</sub>F<sub>10</sub> merkintä tarkoittaa aikaa, jonka kuluessa 10 % LED-lampuista on rikkoutunut ja ei tuota ollenkaan valoa tai tuottaa valoa alle 70 % alkuperäisestä valovirrastaan [23].

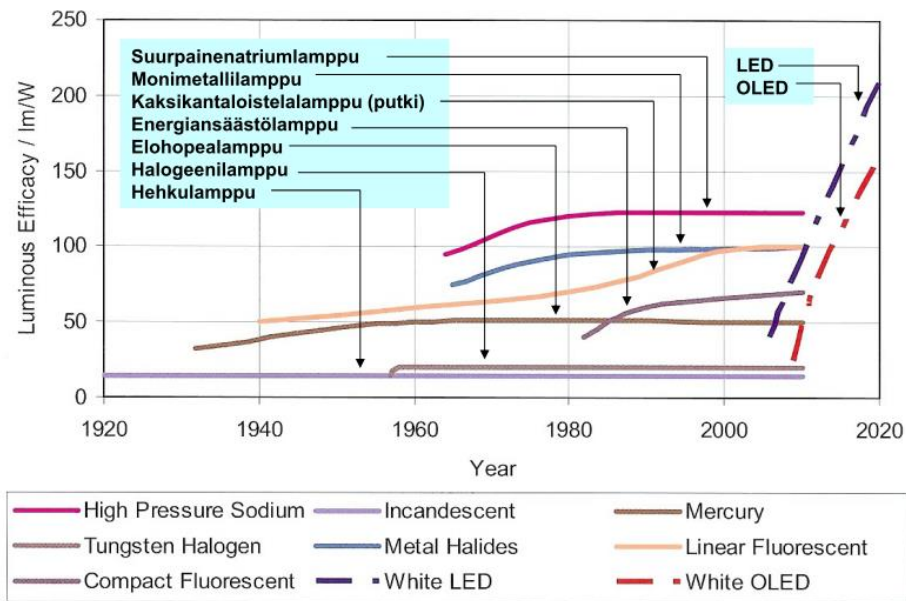
### Energiatehokkuus

LEDien valotehokkuudet ovat parantuneet jatkuvasti, ja kehitys on ollut nopeaa (kuva 20). Esimerkiksi loisteputkien tilalle kehitettyjen LED-putkien valotehokkuus voi olla jopa 150 lm/W. LEDien valotehokkuudesta kertoo sekin, että hehkulampuilla valotehokkuus oli vain noin 12 lm/W. [23.]

Kotitaloudessa käytetyt niin sanotut retrofit LED-lamput ovat myös yleistyneet. Ne ovat tarkoitettu asennettavaksi hehkulampun tilalle kierrettävällä kannalla. Kotitalouslamppujen uudistettu energiamerkintä astui voimaan EU-asetuksen mukaan 1.9.2013 (kuva 19) [25].



Kuva 19. Kotitalouslamppujen energiamerkintä. 1.9.2013 uudistuneessa energiamerkinnässä kerrotaan lampun merkki, malli, energiatehokkuusluokka (A++...E) ja energiankulutus [kWh/1000 h]. Tehokkaimmat kotitaloudessa käytetyt LED-lamput yltyvät A++-luokkaan. [25.]



Kuva 20. Eri valonlähteiden valotehokkuuksien [lm/W] kehittyminen [26].

LED-tekniikalla päästään myös pienempiin LENI-arvoihin kuin vanhoilla valonlähteillä kuten halogeeni- ja loisteputkilampuilla. LENI-arvo (Lighting Energy Numeric Indicator) kuvaa rakennuksen valaistuksen energiatehokkuutta. Se kertoo rakennuksen vuotuisen valaistuksen energiankulutuksen tarkasteltavaa pinta-alaa kohden. Myös vakiovalon säätö ja valaistuksen automaattinen ohjaus läsnäolon ja päivänvalon mukaan pienentävät LENI-arvoa käsin ohjattuun perinteiseen valaistukseen verrattuna. LENI-arvo laskeaan kaavan 10 mukaan. [27, s.27.]

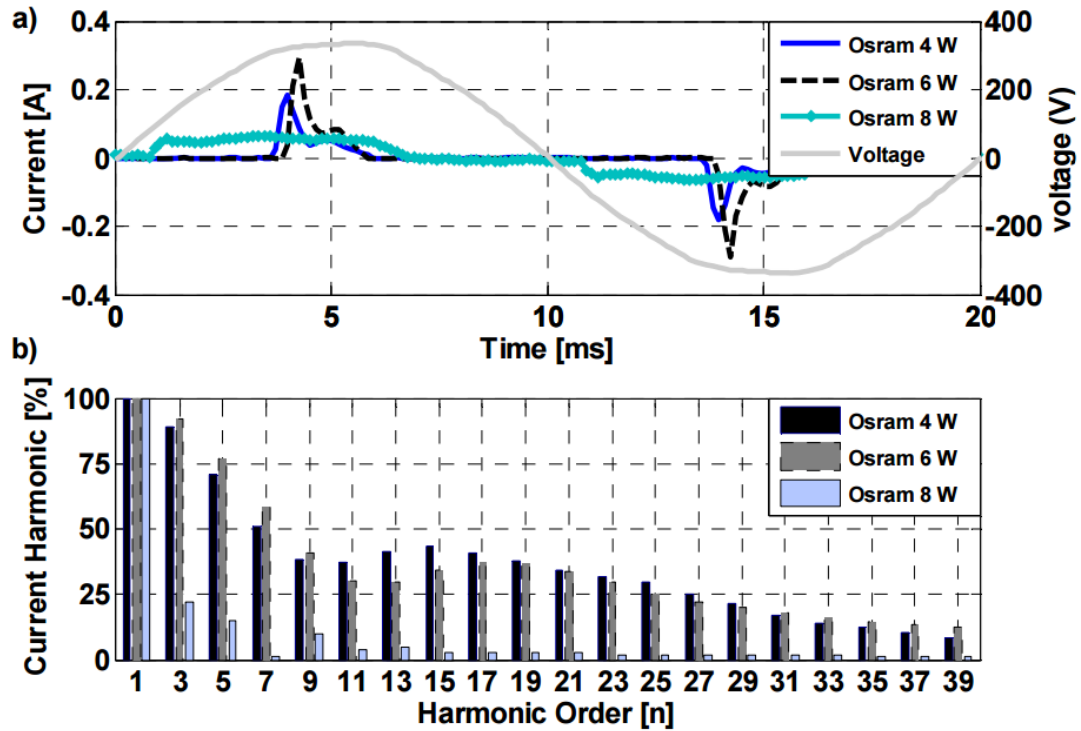
$$LENI = \frac{W}{A} [kWh/(m^2 * vuosi)] \quad (10)$$

$W$  on valaistuksen vuotuinen kokonaisenergia [kWh/vuosi]  
 $A$  on valaistettu pinta-ala [ $m^2$ ]

#### AC LEDien harmoniset yliaallot ja loisteho

Vain muutama artikkeli on keskittynyt LEDien aiheuttamiin harmonisiin yliaaltoihin (vuoteen 2012 mennessä). Tutkimuksissa on havaittu, että pienitehoisilla (<25W) LEDeillä tehokerroin on korkeintaan 0,6 ja virran THD särö on luokkaa 100...140 %. Pienitehoisilla

LED-lampuilla voi esiintyä harmonisia yliaaltoja (kuva 21). Spektrijakaumasta nähdään, että virran kolmas yliaalto on suurin kaikilla testatuilla Osram LED-lampuilla (kuva 21). Vaikka yksittäisen LEDin vaikutus verkkoon päin on pieni, suurella joukolla voi olla merkittäviä vaikutuksia sähkön laatuun ja harmonisten yliaaltojen esiintymiseen sähköverkossa. [28, s.1.]



Kuva 21. Pienitehoisten Osram LED-lamppujen aiheuttamat harmoniset yliaallot. (a) LED-lamppujen virta ja jännite kuvaajat. (b) Harmonisten yliaaltojen spektrijakauma. [28, s.3.]

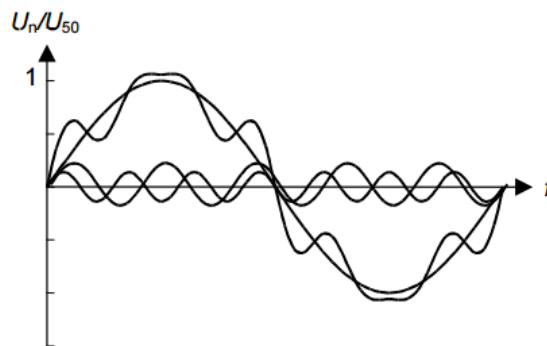
Yliaaltovirrat aiheuttavat sähköverkkoon jännitesäröä (THD). Tämä tarkoittaa sitä, että jännitekäyrä ei ole ideaali eli sinimuotoinen (kuva 22). Kolmivaiheiset kuormitukset aiheuttavat parittomia yliaaltotaajuuksia, 5., 7., 11. ja 13. jne., ja yksivaiheiset kuormitukset aiheuttavat lisäksi kolmatta yliaaltoa ja sen kerrannaisia. [29, s.7.]

Yleisesti ottaen kolmella jaolliset yliaallot ovat haitallisimpia, koska ne summautuvat nol-lajohtoon. Nollajohdin ei välttämättä kestä tätä, ja pahimmassa tapauksessa johtimen eriste voi sulaa aiheuttaen hengenvaaran. Yliaaltojen poistamiseen tarvitaan suodatin-laitteita, jotka lisäävät kustannuksia entisestään.



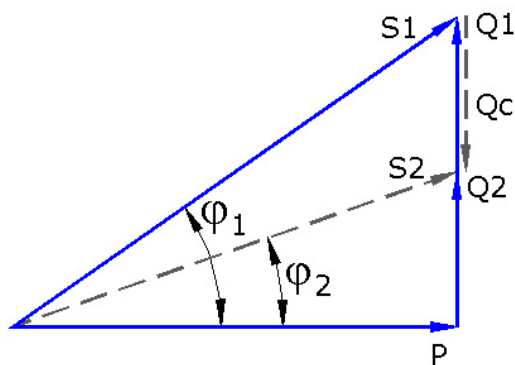
Myös loisteho on haitallista kuluttajan kannalta. Sähköverkkoyhtiöt laskuttavat loistehosta, mikä lisää puolestaan sähkölaskun määrää. Loisteho kannattaa kompensoida verkosta. Loisteho voi olla kapasitiivista tai induktiivista, joista jälkimmäinen on yleisin tapaus. Induktiivinen loisteho voidaan kompensoida kompensointikondensaattoreiden avulla.

Taajuus / Hz	Virta / %
50	100
250	25
350	12
550	6
650	5



Kuva 22. Esimerkki yliaaltojen summautumisesta perustaajuuteen [29, s.7].

Kuvasta 23 nähdään, että loistehon  $Q_1$  kompensoinnilla arvoon  $Q_2$  vaihesiirtokulma  $\varphi_1$  pienenee myös arvoon  $\varphi_2$ . Vastaavasti näennäisteho  $S_1$  pienenee arvoon  $S_2$ . Kompensointikondensaattorin tuottama kapasitiivinen loisteho  $Q_c$  on päinvastainen kuin kuorman induktiivinen loisteho  $Q_1$ , joten ne kumoavat toisiaan.

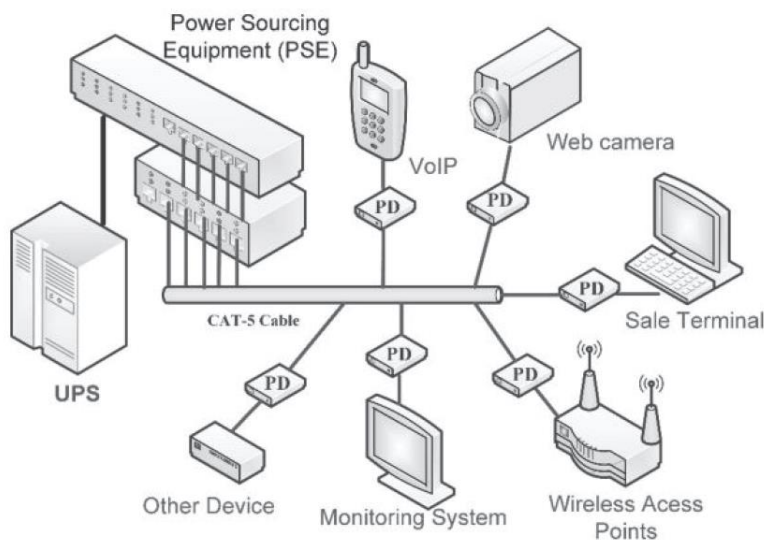


Kuva 23. Loistehon kompensoinnin vaikutus tehokolmioon [30].

## 7 PoE-järjestelmät valaistuksessa

Nykyään LED-valaisimille voidaan tarjota DC-sähkösyöttö ja ohjaus PoE-tekniikan avulla. Tällä hetkellä PoE-valaistusjärjestelmiä löytyy markkinoilta muutamia: CommScope Redwood ILNS, Cisco Digital Ceiling, Cree Smartcast PoE ja Philips Envision. Lisäksi PoE-valaisimia löytyy esimerkiksi Philipsiltä (LuxSpace PoE ja PowerBalance PoE).

PoE-tekniikka on säännelty standardissa IEEE 802.3, joka on alun perin julkaistu 2003 ja päivitetty 2009. Standardin mukaan teho ja tiedonsiirto kulkevat yhtä ja samaa parikaapelia pitkin suoraan kytkettäville laitteille. Laitteita ei voida ketjuttaa, koska järjestelmä sallii vain tähtimäisen topologian (kuva 24). Tehoa syöttävä laite (PSE) on PoE-kytkin, joka on tyypillisesti sijoitettu ATK-ristikytkentätelineeseen.



Kuva 24. Tyypillinen PoE-järjestelmän rakenne [31, s.2].

Alkuperäinen PoE-standardi IEEE 802.3af määrittä, että tehoa syöttävä laite voi syöttää maksimissaan 15,4 W:n tehon jännitteellä 44 VDC...57 VDC käyttäen Cat3:a tai sitä parempaa kaapelointia. Tässä tapauksessa päätelaitteen teho oli maksimissaan 13 W jännitteellä 37 VDC...57 VDC. Myöhemmin standardi IEEE 802.3at laajensi syöttävän laitteen tehoa maksimiin 30 W per lähtö jännitteellä 50 VDC...57 VDC, käyttäen Cat5:tä tai sitä parempaa kaapelointia. Tässä tapauksessa päätelaitteen teho sai olla maksimis-

saan 25,5 W jännitteellä 50 VDC...57 VDC. Standardia IEEE 802.3bt odotetaan julkistettavaksi lähiaikoina. Se tulee sallimaan syöttävän laitteen yhden lähdön maksimi tehoksi 90 W.

PoE-järjestelmiä voitaisiin soveltaa myös muiden järjestelmien sähkön- ja tiedonsiirtoon, jos loppukäyttäjän laitteelle voitaisiin syöttää 60 W. Tällaisia laajentamisen kannalta potentiaalisia järjestelmiä ovat muun muassa hoitajakutsu-, IP-kameravalvonta-, rakennusautomaatio- ja moottoriohjausjärjestelmät (Taulukko 2).

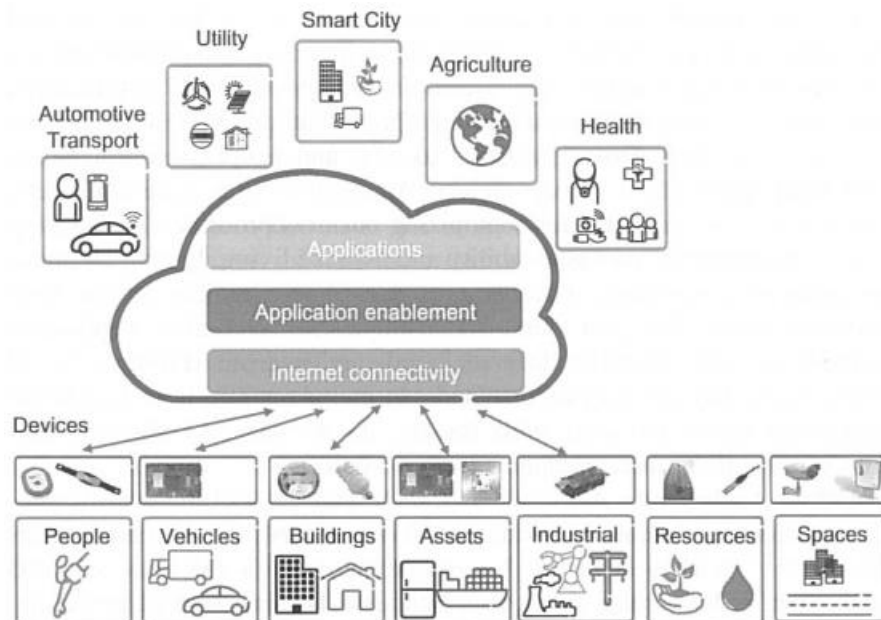
Taulukko 2. Potentiaaliset PoE-markkinat [32].

Markets	Typical power consumption
Nurse call systems/healthcare	80% market needs >30 W (typically 50 W)
Point of sale/retail (credit card readers and printers)	40% to 50% in 30- to 60-W range
IP turrets (banking, financial trade floor phone systems)	Typically 45 W
Building management (lighting fixtures and controllers, access controllers, etc.)	40 to 50 W
Thin clients, virtual desktop infrastructure (VDI) terminals (high-end configuration)	~50 W
Video conferencing, hospitality (PoE powered switches)	Typically 45 to 60 W
IP security cameras (pan, tilt, zoom cameras)	30- to 60-W range
Industrial (brushless and stepper drives, motor control units)	>30 W

## 7.1 IoT -toimintaympäristö

PoE-valaistusjärjestelmät ovat älykkäitä ja verkottuneita valaistuksenohjausjärjestelmiä, jotka toimivat IoT-ympäristössä. IoT tarkoittaa laitteiden yhdistämistä samaan Ethernet-verkkoon, jota voidaan hallinnoida monella eri tavalla (kuva 25). Määritelmän mukaan IoT on "fyysisten laitteiden verkko, joka saavuttaa suuremman arvon ja hyödyllisyyden jakamalla informaatiota valmistajan, käyttäjän ja/tai laitteiden välillä." [33]. Muita IoT-sovelluksia ovat muun muassa muut etäohjattavat ja älykkäät valaistusratkaisut (esimerkiksi langaton Osram Lightify Pro) sekä kiinteistöjen talotekniikan mittausjärjestelmät.

On arvioitu, että vuoteen 2020 mennessä Internet of Things -toimintaympäristö sisältää 26...30 miljardia laitetta. Tämän seurauksena langallisten verkkojen määrä, kaapelointien tilantarve ja jakamoiden vaatimukset tulevat kasvamaan. [33.]

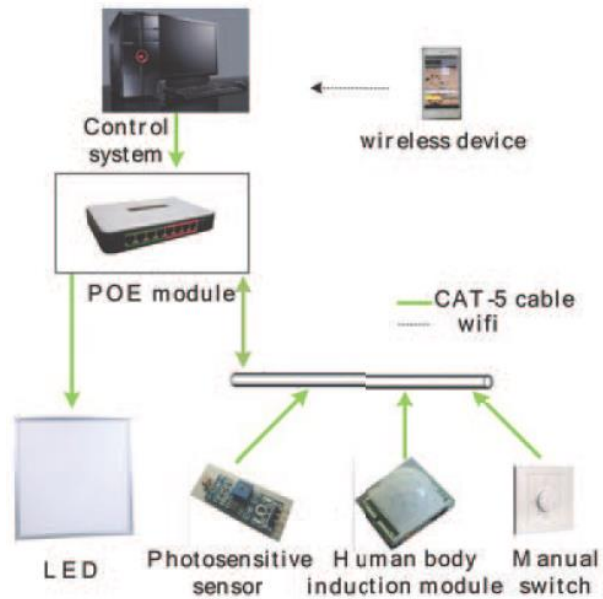


Kuva 25. Internet of Things -toimintaympäristö [34, s.15].

## 7.2 Rakenne ja toimintaperiaate

PoE-valaistusjärjestelmä koostuu minimissään ohjausyksiköstä (tietokone, jossa on järjestelmäkohtainen käyttö/ohjelmointiohjelma), PoE-kytkimestä, PoE-yhteensopivasta LED-valaisimesta, tunnistimesta ja mahdollisesta tilannekytkimestä (kuva 26). Järjestelmä voi toimia täysin automaattisesti [31, s. 2].

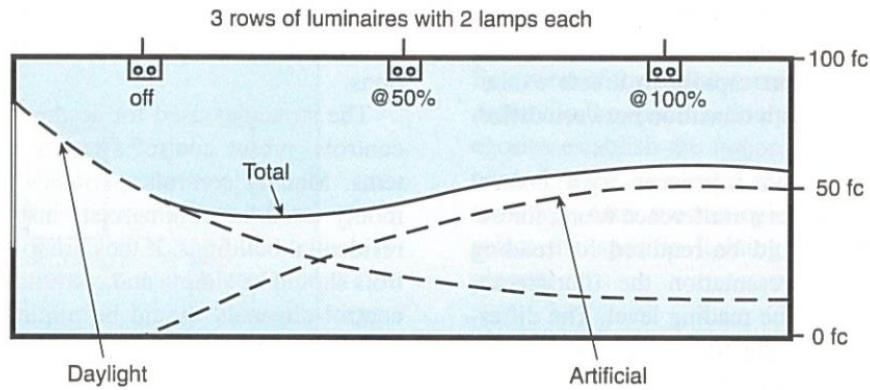
Markkinoilla olevien PoE-valaistusjärjestelmien kaapelointi toteutetaan vähintään Cat5-tyyppin kaapeleilla. Valaisimien syöttökaapeleiden maksimipituus on 100 m standardin IEEE802.3at mukaan. Esimerkiksi Redwood ILNS-järjestelmän nimellisjännite on 48 VDC ja yksittäisen valaisimen teho saa olla maksimissaan 34 W. Valaisimia ei voi ketjuttaa, koska järjestelmä sallii vain tähtimäisen kaapeloinnin PoE-kytkimeltä valaisimille.



Kuva 26. PoE-valaistusjärjestelmien topologia. Langattomien laitteiden kuten älypuhelimien liittäminen järjestelmään on mahdollista WLAN-verkon kautta. [31, s.4.]

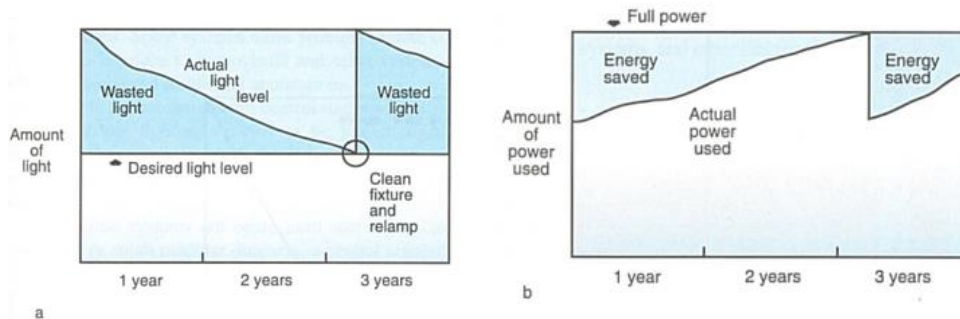
Sähkönsyöttönsä PoE-järjestelmältä saava LED-valaisin voidaan kytkeä helposti standardin mukaisilla RJ45-liittimillä. Valaisimelle annetaan oma IP-osoite. Lisäksi LED-valaisimista voidaan tehdä älykkäitä valaisimia lisäämällä tunnistimia niihin. Tällä kokoonpanolla jokainen älykäs LED-valaisin voi kerätä tietoa ympäröivästä valosta, lämpötilasta, ilmankosteudesta ja huoneen tai tilan käyttöasteesta, jotka sitten kommunikoivat ohjaimen kanssa. Esimerkiksi käyttöasteen tunnistuksella voidaan varmistaa, että valaistus syttyy, kun joku tulee huoneeseen, ja sammuu, kun huone on tyhjä.

Ympäröivän valon tunnistimet mahdollistavat päivänvalon hyödyntämisen ja säätelevät LED-valaistusta tarpeen mukaan niin, että valaistustaso pysyy vakiona sille määritetyn arvon mukaan myös silloin, kun auringon valo ei pääse kohteeseen (kuva 27). Tunnistimet välittävät tiedon järjestelmälle, joka antaa käskyn PoE-kytkimelle. LED-valaisimien tuottamaa valonmäärää säädetään PWM-moduloinnin avulla. [31, s.4.]



Kuva 27. Valaistusvoimakkuus voidaan pitää vakiona ja samalla saadaan energiasäästöjä. Kuvasta nähdään, että mentäessä kauemmaksi ikkunasta, päivänvalon määrä vähenee ja keinovaistuksen tarve kasvaa. [35, kohta 27-3]

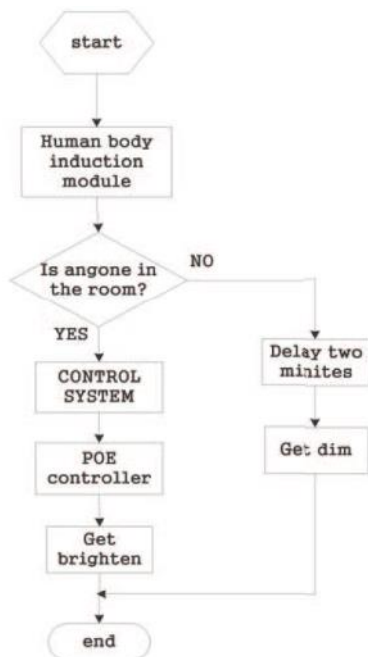
Valaistusvoimakkuus vähenee ajan myötä perinteisissä valaistusjärjestelmissä, joita ei voida säätää (kuva 28a). Tällöin tehon kulutus pysyy vakiona. Älykkäissä valaistusjärjestelmissä puolestaan nostetaan tehoa ajan myötä, jotta valaistusvoimakkuus pysyisi valovirran alenemasta huolimatta vakiona (kuva 28b). Tällä menetelmällä säästetään energiaa.



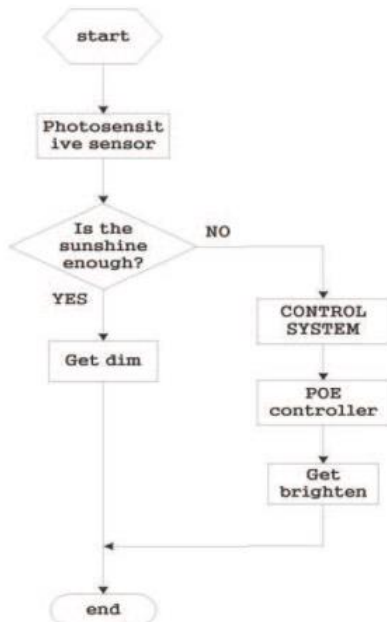
Kuva 28. Älykkään ja energiaa säästävän valaistushjauksen avulla voidaan valovirta pitää vakiona. [35, kohta 27-3]

PoE-valaistusjärjestelmä saa tiedon läsnäolotunnistimelta, jos joku tulee tai on huoneessa. Valojen sytyttämiskäskey välitetään PoE-kytkimelle, joka ohjaa valaisimen päälle. Vastaavasti, jos läsnäolotunnistin ei havaitse liikettä esimerkiksi 2 minuuttiin, niin valot himmennetään määritettyyn arvoon (kuva 29). Jos päivänvaloa ei ole tarpeeksi, niin

järjestelmä antaa käskyn PoE-kytkimelle, joka säätää valaisimen valonmäärää (kuva 30). [31, s.4–5].



Kuva 29. Vuokaavio esimerkki läsnäolotunnistimen toiminnasta [31, s.4].



Kuva 30. Vuokaaviossa on kuvattu päivänvalotunnistimen toiminta [31, s.5].

### 7.3 Etuja perinteiseen AC-valaistukseen verrattuna

PoE-järjestelmä soveltuu erinomaisesti LEDien tehon syöttöön, yhdistämiseen ja ohjaukseen LAN-verkossa. LAN-verkon kautta LED-valaistusjärjestelmä tulee osaksi tietoliikenneverkkoa. Verkottuminen mahdollistaa älypuhelimien, tablettien ja tietokoneiden käyttämisen valaistuksen ohjauksessa. Tämän lisäksi käyttäjä voi käyttää myös järjestelmän läsnäolotunnistimia esimerkiksi löytääkseen lähimmän vapaana olevan kokoushuoneen. Lisäksi reaaliaikainen näkymä valaistuksen energian kulutuksesta on mahdollista.

Mittaamalla, seuraamalla ja ohjaamalla järjestelmän verkkoa reaaliajassa mukaan lukien myös lämmitystä ja ilmanvaihtoa, laitteiston haltijat voivat tunnistaa energian säästön ja toiminnallisen tehokkuuden parantamisen mahdollisuudet. Näiden tietojen avulla voidaan säätää lämpötilaa, valaistusta ja siivouksen aikatauluja perustuen käyttäjätietohistoriaan. [3, s.2–3.]

Uudet tunnistimet ja hajautetut lyhyen matkan langattomat tukiasemat voidaan asentaa pienellä kustannuksella ja suhteellisen pienellä työllä. Järjestelmä on myös hyvin muuntojoustava. Esimerkiksi valaistustilanteiden muutokset konfiguroidaan ohjelmallisesti, jotta fyysisiä kytkentämuutoksia ei tarvitse tehdä. [3, s.2–3.]

Käytettäessä PoE-järjestelmää voidaan käyttöönoton ja asennusten kustannuksissa säästää käytettäessä IP-osoitteen mahdollistavia laitteita, oli sitten kyseessä LED-valaisin tai tunnistin. Kaapelointikustannukset ovat pienemmät, koska tiedonsiirto ja sähkönsyöttö kulkevat samassa kaapelissa. Asennuskustannukset ovat myös pienemmät, kun pätevää sähköasentajaa ei tarvita verkkokaapelin kytkemiseen. Lisäksi asennus on turvallisempaa, koska PoE-järjestelmä toimii DC-pienoisjännitteellä. [3, s.4.]

PoE-järjestelmä tarjoaa sekä erillisen ohjauksen laitteille, että varavirran syötön sähkökatkosten aikana. Esimerkkinä PoE-valaistuksen lisäarvosta kertoo tapaus Yhdysvalloista. Super Bowl XLVII -loppuottelu pelattiin 3. helmikuuta 2013 New Orleansissa, jolloin sähkökatkoksen takia hissit ja valaistus eivät toimineet 35 minuuttiin. Samaan aikaan stadionin Wi-Fi-verkko säilyi täysin ennallaan saaden virtansa akkuvarmennetun PoE-järjestelmän kautta. [3, s.4.]



PoE-valaistusjärjestelmillä saavutetaan monia etuja AC-valaistusjärjestelmiin verrattuna:

- pienemmät asennuskustannukset
  - o ei kalliita johtimia ja kaapeleita
  - o pienemmät työvoimakustannukset, kun asennus on helppoa ja nopeaa
  - o kaapelit kevyitä asentaa, päättää ja testata
- helpompi huollettavuus
  - o ei tarvetta katkaisijoille tai piirin katkaisemiselle
- energiatehokkuus
  - o ei AC/DC muuntamisen häviöitä
- standardin IP-pohjaisuus
- DC-pienoisjännitteen turvallisuus [35.]

Näiden lisäksi voidaan olettaa, että sähkönlaatu paranee verkossa, koska tasasähköpiirejä käytettäessä sähköverkossa ei esiinny harmonisia yliaaltoja eikä loistehoa. Toisaalta ei ole tutkimustuloksia siitä, miten valaistusjärjestelmän PoE-kytkin vaikuttaa sähköverkkoon päin.

#### 7.4 PoE-valaistuksen tehohäviöt

Seuraavaksi tutkitaan kolmea tapausta, joissa syötetään 10 W:n ja 20 W:n LED-valaisimia. Kaksi skenaariota toteutetaan standardin IEEE802.3af (15 W PSE ja 13 W PD) mukaan ja kolmas skenaario toteutetaan standardin IEEE802.3at (30 W PSE ja 25.5 W PD) mukaan. AC-skenaario perustuu 230 V:n vaihejännitteeseen. [3, s.4.]

### 7.4.1 Kaapelipituuksien vaikutus

Vertailussa käytetty PoE-kytkin (PSE) on mallia CUI INC PSE-1000, jonka nimellisteho on 1000 W ja hyötysuhde tyypillisesti 90 %. PoE-kytkimelle tuodaan 230 V:n sähkönsyöttö. PoE-kytkintä ohjataan 40 W:n MAX5984 PSE -ohjaimella ja päätelaitetta (PD) 70 W:n MAX5982-ohjaimella. Kaapelointi on toteutettu Cat6 23AWG -tyypin kaapeleilla. Kaapelin yhden säikeen resistanssi on 67  $\Omega$ /km. Järjestelmän komponenttien sähkötekniset ominaisuudet on esitetty taulukossa 3. [3, s.5.]

Taulukko 3. Järjestelmän komponenttien sähkötekniset ominaisuudet [3, s.5].

AC/DC power supply	CUI INC PSE-1000, 54V, 1000W, 230 VAC, 90% typ.
Cat6	23AWG, 67 $\Omega$ /1 km per strand or 0.067 $\Omega$ /m
PSE MAX5980	$R_{SENSE}$ 0.25 $\Omega$ switch FDMC3612 $R_{DS(on)}$ 0.1 $\Omega$
PD MAX5982	Isolation switch, 0.1 $\Omega$ typ, 0.25 $\Omega$ max.
MAX16832	LED driver with eff. >95%

AWG (American Wire Gauge) on pohjoisamerikkalainen kaapelimittojen määrittämisen standardi. Johtimien mitat on määritetty ASTM -standardissa B 258. Kaapeleiden johtimien halkaisijat [mm] ja johdinpoikkipinta-alat [mm<sup>2</sup>] saadaan laskettua käyttäen kaavoja 11 ja 12. [36.]

$$d_{n(mm)} = 0.127 \text{ mm} \times 92^{(36-n)/39} \quad (11)$$

$d_n$  on n-johtimen halkaisija [mm]

$n$  on johtimen AWG-mitta. Esimerkiksi jos kaapelin merkinnässä lukee AWG 36, niin johtimen halkaisija on 0.127 mm.

$$A_{n(mm^2)} = \frac{\pi}{4} \times d_n^2 = 0.012668 \text{ mm}^2 \times 92^{(36-n)/19.5} \quad (12)$$

$A_n$  on n-johtimen johdinpoikkipinta-ala neliömillimetreinä. Esimerkiksi jos kaapelin merkinnässä lukee AWG 36, niin johtimen poikkipinta-ala on 0.012668 mm<sup>2</sup>.

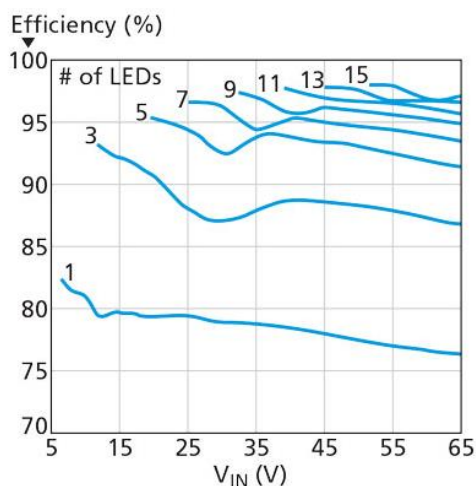
Järjestelmän kokonaishyötysuhteeseen vaikuttavat AC/DC-virtalähteiden ja valaisimien liitäntälaitteiden hyötysuhteet sekä syöttökaapeleiden pituudet. Vertailussa käytetään kolmea eri kaapelipituutta; 25 m, 50 m ja 100 m (maksimipituus, jonka järjestelmä sallii)

syötettävien tehojen ollessa 10 W ja 20 W jokaisessa tapauksessa. Virtalähteiden ja liitännälaitteiden hyötysuhteet kolmessa eri tilanteessa on esitetty taulukossa 4. [3, s.5.]

Taulukko 4. AC/DC-virtalähteiden ja LED-liitännälaitteiden hyötysuhteet [3, s.5].

AC/DC power supply (1000W)			PSE			Ethernet cable (23AWG Cat6)		PD		LED driver		LED
Input power	Eff. (%)	Output voltage	Switch	Fuse	Diode	Cable length (m)	R	FET bridge (each FET)	Isolation switch	Input power	Eff. (%)	Power (W)
$P_{Ac}$		V1	R1	R1b	Vd1		R2	R3	R4	P3		PLED
11.92	90	54	0.5	0.1	0.5	25	1.68	0.1	0.1	10.53	95	10
24.08	90	54	0.5	0.1	0.5	25	1.68	0.1	0.1	21.05	95	20
12.00	90	54	0.5	0.1	0.5	50	3.35	0.1	0.1	10.53	95	10
24.40	90	54	0.5	0.1	0.5	50	3.35	0.1	0.1	21.05	95	20
12.16	90	54	0.5	0.1	0.5	100	6.70	0.1	0.1	10.53	95	10
25.10	90	54	0.5	0.1	0.5	100	6.70	0.1	0.1	21.05	95	20

Vertailussa LED-liitännälaitteen hyötysuhteeksi arvioitiin 95 % nimellisjännitteellä 48 VDC. Todellisuudessa hyötysuhde voi olla korkeampi. Vertailussa havaittiin, että suuremmalla LEDien määrällä ja pienemmällä nimellisjännitteellä valaisimen liitännälaitteen hyötysuhde paranee (kuva 31). [3, s.5.]



Kuva 31. MAX16832 -LED-liitännälaitteen hyötysuhteet nimellisjännitteen funktiona [3, s.5].

Järjestelmän hyötysuhde vaihtelee välillä 79.7 %...83.9 % riippuen kaapelipituudesta ja syötettävien LED-valaisimien tehosta (taulukko 5). Suurempitehoisilla LED-valaisimilla järjestelmän hyötysuhde vähenee merkittävästi. Siksi olisi edullisempaa pitää yksittäisen

PoE-lähdön teho mieluummin pienempänä. Tämä mahdollistaisi myös tarkemman ohjauksen. Karkeasti sanottuna 20 W (noin 1800 lm) LED-lamppu vastaa noin 150 W tehoista hehkulamppua, joten voidaan sanoa, että se antaa riittävän valonmäärän monesakin käyttökohteessa. [3, s.6.]

Taulukko 5. Syöttövirran kasvaessa ja LED-liitäntälaitteen jännitteen pienentyessä PoE-valaistusjärjestelmän hyötysuhde pienenee [3, s.7].

Calculation		Result
Ethernet cable current	Voltage at LED driver input	System eff. (%)
I2	V3	
0.199	52.99	83.9
0.401	52.46	83.1
0.200	52.65	83.4
0.407	51.77	82.0
0.203	51.96	82.3
0.418	50.32	79.7

#### 7.4.2 AC/DC-muuntamisen vaikutus

Tässä AC-skenaariossa, 230 VAC sähkönsyöttö viedään suoraan LED-valaisimelle. Tällöin LED-valaisimessa tarvitaan AC/DC-muuntajaa. AC-skenaarion kaapelihäviöt ovat pienemmät kuin PoE-skenaarion, mutta kokonaishyötysuhde on huonompi, koska jokaisessa valaisimessa tarvitaan AC/DC-virtalähde. MAX16841 on offline LED-liitäntälaitte, joka sisältää jatkuvan taajuusohjaustekniikan. Se mahdollistaa tehonmuuntamisen hyötysuhteen maksimoimisen sekä pienellä, että suurella AC-jännitteellä, pienentäen kytkentähäviöitä. [3, s.7.]

#### 7.4.3 AC-järjestelmä vs. PoE-järjestelmä

Olettaen, että käytetään himmennettäviä 10 W:n LED-valaisimia kaapelipituuksien ollessa 100 m, AC-valaistuksen hyötysuhde (82,9 %) on vain hiukan parempi kuin PoE-valaistuksen (82,3 %). Jos kaapelin pituus on 25 m ja PoE-valaisinta syötetään Cat5 kaapelilla, niin AC-valaistuksen hyötysuhde pienenee 1 prosenttiyksikköä arvoon 82,9 %, PoE-valaistuksen hyötysuhteen ollessa 83,9 %. Kun yksittäisen valaisimen teho suurenee, PoE-järjestelmän hyötysuhde pienenee ja siitä tulee huonompi hyötysuhteeltaan kuin AC-järjestelmästä. [3, s.6–8.]

PoE-valaistuksen ja AC-valaistuksen hyötysuhteet riippuvat loppujen lopuksi jonkin tietyn sovelluksen valaistustarpeista. PoE-valaistuksen hyötysuhde on aina parempi kuin AC-valaistuksen, jos yksittäisen valaisimen teho on pieni ja Cat5- tai Cat6-kaapelit ovat lyhyitä. [3, s.6–8.]

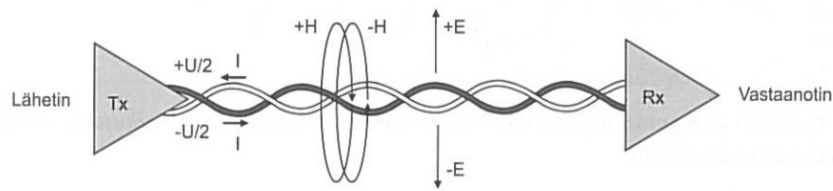
Vertailussa käytettiin PoE-valaistuksen kaapelointina 23AWG Cat6 -tyypin kaapeleita. PoE-valaistuksen hyötysuhdetta voitaisiin vieläkin parantaa, jos kaapeloinnissa käytettäisiin johdinpoikkipinta-aloiltaan suurempia 22AWG Cat6 -tyypin kaapeleita. Tällä hetkellä 22AWG Cat6 -tyypin kaapelit eivät ole yleisiä, mutta ne voisivat yleistyä PoE-valaistuksen leviämisen myötä. [3, s.6–8.]

## 7.5 PoE-valaistuksen turvallisuuskohdat ja häiriönsietokyky

PoE-valaistusta voidaan käyttää myös turvallisuuden parantamiseen. Esimerkiksi Raytec Systems Inc. tarjoaa valaisimia, joita voidaan ohjelmoida syyttämään valot hälytysulostulon mukaan. Lisäksi valaisimille voidaan myös määrittää varoituskuvioita ja erilaisia välkkymisnopeuksia. [2.]

PoE-valaistukseen liittyy myös tietoturvariskejä johtuen siitä, että PoE-valaisimet ovat tietoverkkoihin liitettyjä laitteita, joihin on mahdollista päästä käsiksi verkon ulkopuolelta. Käytettäessä PoE-valaistusta esimerkiksi turvavalaistuksessa tai rikos- ja murtojärjestelmien yhteydessä tulisi tietoturvaominaisuuksia lisätä. Ensiksi pitäisi varmistaa valaistus-toimintojen ylläpitäminen ja toiseksi suojella verkkoa murtautumiselta. Valmistajien tulisi puolestaan harkita salattua viestintää (ainakin https kautta) ja säännöllisiä laiteohjelmistopäivityksiä. [2.]

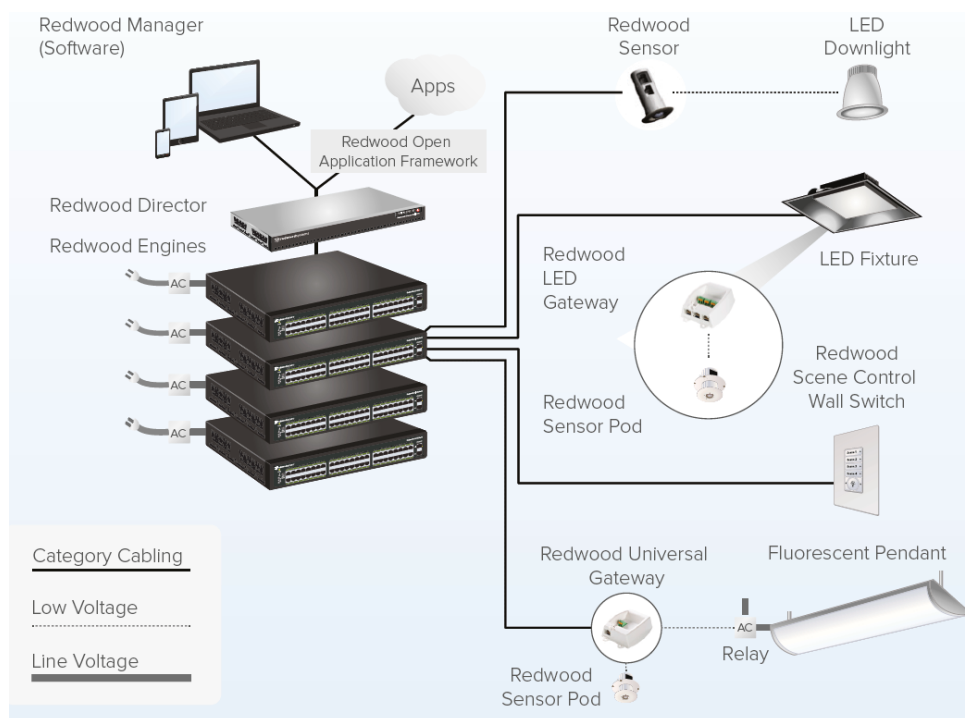
PoE-valaistusta syöttävien parikaapelien signaalin siirto perustuu symmetriaan (kuva 32). Symmetrisessä siirrossa kaapelin johdinpari ei aiheuta häiriötä ympäristöönsä. Epäsymmetrisessä siirrossa järjestelmä on häiriöille altis. Tästä syystä PoE-kaapeloinnit tulisi sijoittaa erilleen vahvavirtajärjestelmistä. Vahvavirtajärjestelmistä aiheutuvat sähkömagneettiset säteilyt voivat haitata PoE-valaistusjärjestelmien toimintaa.



Kuva 32. Kun johtimissa kulkee vastakkaisiin suuntiin itseisarvoiltaan yhtä suuret virrat, niin niiden magneettikentät kumoavat toisensa [38, s.115].

## 8 Redwood ILNS-valaistusjärjestelmä

Redwood ILNS-valaistusjärjestelmä on älykäs valaistuksenkäyttöliittymä, joka voidaan ohjelmoida käyttäjäkohtaisesti vastaamaan asiakkaan tarpeita ja toiveita. Toiminta perustuu tehon ja ohjaustiedon siirtoon samaa parikaapelia pitkin. Valaistuksen, tunnistimien ja tilannekytkimien kaapeloinnissa käytetään vähintään Cat5-kategorian häiriösuojaamattomia UTP-parikaapeleita. Kaapeloinnin maksimi pituus on 100 metriä. PoE-kytkimet toimivat LED-valaistuksen keskitettyinä virtalähteinä ja ohjaavat/säätävät valaistusta. Valaisimissa ei ole liitäntälaitteita, koska syöttöjännite on 48 VDC ja LEDit toimivat suoraan tällä jännitteellä. Järjestelmän rakenne on esitetty kuvassa 33.



Kuva 33. Redwood ILNS-valaistusjärjestelmän rakenne [39, s.5].

## Tunnistimet

LED-valaisimia ohjataan tilannekytkimien ja tunnistimien avulla. Yksittäiset tunnistimet (kuva 34) havaitsevat liikkeen, valonmäärän ja lämpötilan. Ne toimivat myös läsnäolo-tunnistimina. Tunnistimet lähettävät mittaustietonsa PoE-kytkimelle gatewayn kautta. Lisäksi tunnistin voidaan liittää tavalliseen valaistuskyttimeen 18AWG-liittimien avulla mahdollistaen manuaalisen valaistuksen ohjauksen. Tunnistimet ja tilannekytkimet on tarkoitettu vain sisätilojen käyttöön. [40, s.1.]

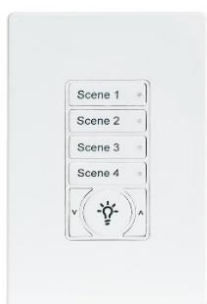
Tunnistin voidaan upottaa valaisimeen tai alakattolevyyn lähelle valaisinta. Tunnistimessa on yksi RJ25- ja yksi RJ45- liitin. Valaisimen liitosjohto kytketään RJ25-liittimeen ja PoE-kytkimeltä tuleva parikaapeli kytketään RJ45-liittimeen. [40.]



Kuva 34. Redwood ILNS-valaistusjärjestelmän tunnistin.

## Tilannekytkimet

Tilannekytkimellä (kuva 35) voidaan ohittaa automaattiset ohjaukset ja säätää valaistuksen voimakkuutta portaattomasti tai valita valmiiksi ohjelmoituja valaistustilanteita [41, s.4]. Tilannekytkimessä on neljä ohjelmoitavaa valaistustilannetta. Se sisältää lisäksi ON/OFF-painikkeen, himmennysken ja lämpötilan mittauksen. [42.]



Kuva 35. Tilannekytkin [42].

## Gateway-kytkimet

*Redwood Universal Gateway* on eräänlainen portti, joka toimii rajapintana tavallisen valaistuksen ja Redwood järjestelmän välillä. Sen avulla voidaan ohjata tavallista vaihtovirralla toimivaa valaistusta. Havaittuaan liikettä Redwood tunnistin antaa käskyn gatewaylle, joka ohjaa sähkökeskuksessa olevaa tavallista kontaktoria päälle/pois. Kontaktori puolestaan ohjaa valoja. [43, s.1.]

*Redwood LED Gateway* (kuva 36) lähettää sensorin keräämän tiedon takaisin Redwood-järjestelmän PoE-kytkimelle. Gateway kommunikoi ja saa sähkönsyöttönsä yhden PoE-kytkimen väylän kautta. [44, s.1.]



Kuva 36. Redwood LED Gateway 3Q [44, s.1].

## Redwood Lighting Engine

Redwood Engine on PoE-kytkin, joka syöttää DC-käyttöjännitteen gateway-kytkinporteille, sensoreille ja seinällä oleville tilannekytkimille ja kommunikoi niiden kanssa. Kytkenäpaneelistä lähtevät parikaapelit RJ45-liittimillä gateway-kytkinporteille tai tilannekytkimille (kuva 37). Gateway-kytkinporteilta jatketaan kaapelointia RJ25-liittimillä tunnistimille tai suoraan valaisimille. Redwood Engine mahdollistaa tarkan ohjauksen ja vähentää merkittävästi energian kulutusta.

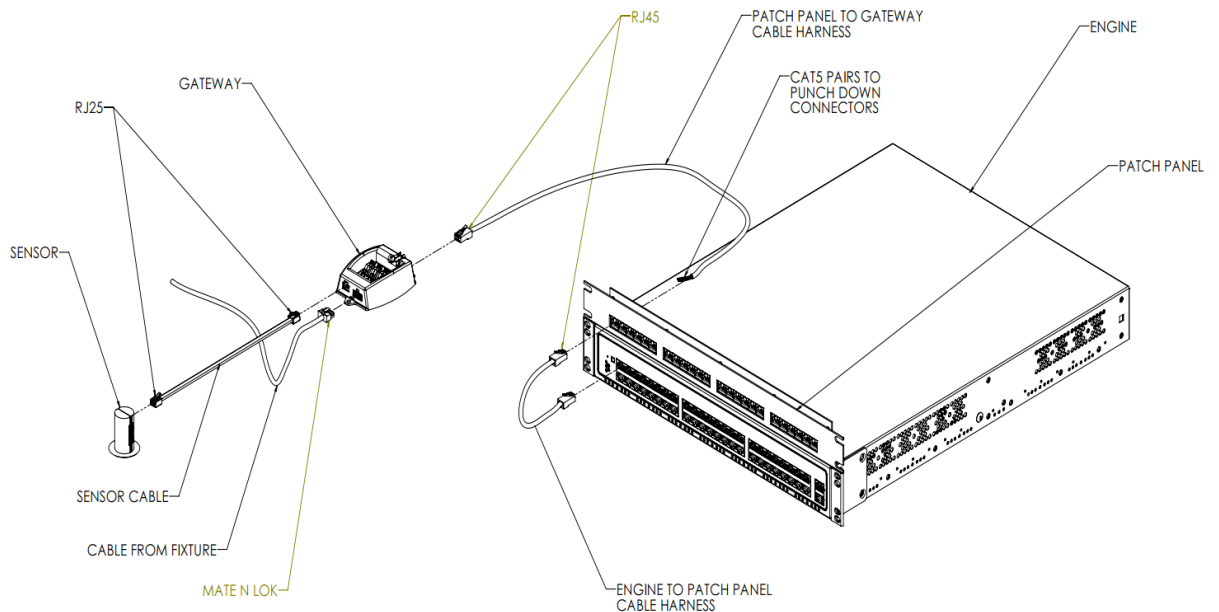
Tekniset tiedot (malli nro: ENG-3-4834-200-250) ovat seuraavat:

- käyttölämpötila: 0°C ... 50°C
- sähkönsyöttö: 230...250 VAC/10A, 50...60 Hz
- Max. tehon kulutus: 2200 W
- portaaton himmennysalue 10...100 %
- 48 kytkinporttia



- yhden kytkinportin nimellisteho tasasähköllä: 34 W
- yhden kytkinportin nimellisjännite/-virta: 18...53 VDC/ 100...700 mA
- tehokerroin täydellä kuormituksella, kun  $U_n=200...250$  VAC: 0,99
- hyötysuhde täydellä kuormituksella: 83 %
- tehohäviö täydellä kuormituksella: 375 W
- liitännät kategorian 5e tai 6/6a kaapeleilla.

PoE-kytkin (malli nro: ENG-3-4834-200-250) vaatii minimissään 152 mm tilaa edestä, takaa ja sivuilta tuulettusta varten. Käytettäessä RJ45-liittimiä voidaan käyttää suorakytkentätapaa T568A tai ristikytchentapaa T568B. [45, s.2.]



Kuva 37. Kaapeloinnit ja kytkennät Redwood ILNS-valaistusjärjestelmässä. PoE-kytkin on mallia Redwood Engine 3-model 4834.

## Redwood Director

Redwood director on Linux-käyttöinen laite, joka hallinnoi, ohjaa sekä raportoi PoE-kytkimiä ja niiden toimintaa (kuva 38). Se käyttää Redwood-järjestelmän avointa sovellusrakennetta, mahdollistaen kommunikoinnin kahteen suuntaan ja integroinnin Redwood-alustan ja muiden ulkoisten laitteiden ja järjestelmien välillä. [46, s.1.]

Directoria tarvitaan, kun PoE-valaistusjärjestelmässä on 8...128 PoE-kytkintä. Se asennetaan normaaliin standardin mukaiseen ATK-ristikytkentätelineeseen. Director hallinnoi Ethernet-verkon kautta PoE-kytkimiä. [47, s. 13.]

Tekniset tiedot ovat seuraavat:

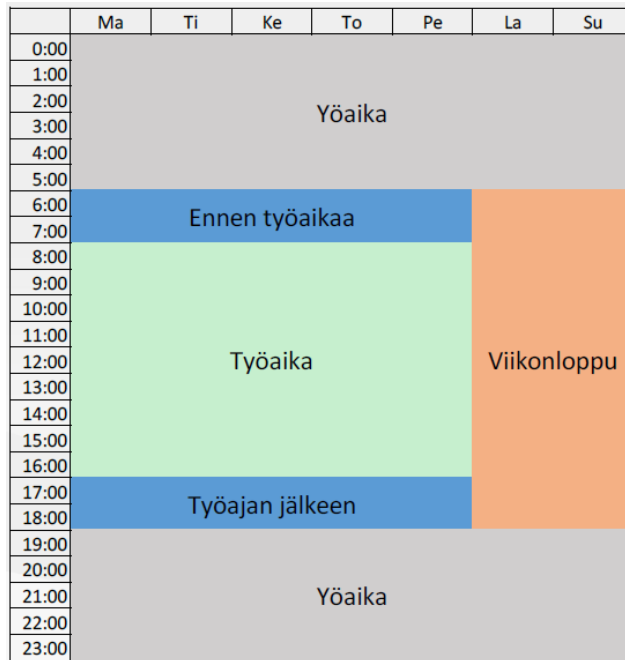
- käyttölämpötila: 10°C ... 35°C
- sähkönsyöttö: 100...240 VAC, 50...60 Hz
- ottoteho: 350 W
- 2x RJ45 LAN ports
- 1x RJ45 Dedicated IPMI LAN port
- 2x USB rear ports
- 1x USB Type-A
- 1x VGA port
- PS/2 keyboard and mouse ports
- 1x Fast UART 16550 serial port [46, s.1].



Kuva 38. Redwood-järjestelmän Director ja Engine [41, s.4].

## Redwood Manager

Redwood manager on selainpohjainen käyttöliittymä Redwood-järjestelmän käyttöönottoa, valaistuksen hallinnointia, raportointia ja huollon seuranta varten [47, s.5]. Järjestelmään voidaan ohjelmoida aikataput ja määritellä erilaisia valaistuskäytäntöjä (kuva 39). Aseteltavia arvoja ovat valotaso (0...100 %), läsnäolotunnistuksen toiminta (normaali, seuraa, ei käytössä), vakiovalonsäätö, sytytys- ja sammutusrampit ja päällä oloaika viimeisen tunnistuksen jälkeen. Valaistuskäytännöt asetellaan tilakohtaisesti jokaiselle aikataputapahtumalle (taulukko 6). [42.]



Kuva 39. Esimerkki aikatapahtumista [42].

Taulukko 6. Esimerkki valaistuskäytännöistä [42].

Aikatapahtuma	Aika	Tilaohjelma	Valotaso	Läsnäolotunnistus	Vakiovalonsäätö	Päälläoloaika [min]	Sytytys [s]	Sammutus [s]
Yöaika	19.00-5.00	"agressiivinen"	50 %	Normaali	Ei käytössä	1	1	3
Ennen työaika	5.00-7.00	"työhuone, muu aika"	75 %	Normaali	Käytössä	5	1	10
Työaika	7.00-17.00	"työhuone"	80 %	Normaali	Käytössä	5	1	10
Työajan jälkeen	17.00-19.00	"työhuone, muu aika"	75 %	Normaali	Käytössä	5	1	10
Viikonloppu (la ja su)	5.00-19.00	"viikonloppu"	75 %	Normaali	Käytössä	5	1	5

## 9 Yhteenveto

Vuonna 2012 tehdyssä yhdysvaltalaisessa tutkimuksessa todettiin, että LED-valaisimien käyttö toimisto- ja liikerakennuksissa on kustannustehokkain ratkaisu, olivat valaisimet sitten AC-tai DC-käyttöisiä. Mallinnuksessa havaittiin, että DC-LEDien käyttö voi johtaa 5 %:n nousuun tai 15 %:n laskuun vuosittaiskustannuksissa ja 2 %:n nousuun tai 14 %:n laskuun pääomakustannuksissa verrattuna AC-LEDeihin. Tämä johtui siitä, että eri valmistajien LED-komponenteilla on vaihtelevia hyötysuhteita ja pääomakustannuksia. Ennusteiden mukaan DC-LEDit (ilman PV+B-järjestelmää) ovat halvin vaihtoehto vuoteen 2030 asti. Toisaalta AC LED -liitäntälaitteet ja PV-järjestelmien vaihtosuuntaajat parantavat tasaisesti energiatehokkuuttaan ja pienentävät kustannuksiaan.

Erityisen DC-jännitestandardin valinnalla on rajallinen vaikutus valaistusjärjestelmien vuosittaiskustannuksiin, koska kaapelointien tehohäviöt ja kytkimien kustannukset, jotka riippuvat jakelujärjestelmän jännitteestä, ovat pienet verrattuna LED-valaistuksen ja PV-järjestelmän pääomakustannuksiin. Lisäksi DC-sähkönjakelun taloudelliset merkitykset rakennustasolla ovat vähäpätöiset, jos tehokertoimen korjaukseen, radiotaajuushäiriöiden suodattamiseen ja luotettavuuden parantamiseen minimoimalla tehoelektronikan komponentteja ei panosteta. Toisaalta standardoidun rakennusten DC-jännitteen avulla voitaisiin vähentää AC/DC-virtalähteiden määrää, mikä parantaisi järjestelmien hyötysuhteita.

AC ja DC LEDien vertailussa todettiin, että niillä toteutetun valaistusjärjestelmän vuosittaiskustannukset riippuvat oleellisesti virtalähteiden hyötysuhteista, kaapelipituuksista, syöttöjännitteestä ja syötettävän tehon määrästä. Lisäksi todettiin myös, että jos rakennustason DC-sähkönjakelua käytettäisiin laajemmin myös muihin sovelluksiin, kuten HVAC-järjestelmiin ja tietokoneisiin, olisi rakennusten DC-sähkönjakelun toteuttaminen järkevämpää.

Vanha komponenttien kiinnityskäytäntö AC-järjestelmiin aiheuttaa esteitä DC-järjestelmien käyttöönotolle rakennuksissa. Virtalähteet, johdonsuojakatkaisijat ja muut komponentit on suunniteltu pääosin AC-järjestelmille. Jotta siirtyminen DC-sähkönjakeluun voisi toteutua, olisi standardointiin ja koulutukseen panostettava.

Työssä todettiin PoE-valaistusjärjestelmien olevan DC LED -valaistusjärjestelmiä, joilla on keskitetty virtalähde (PoE-kytkin). PoE-valaistusjärjestelmien käytöllä voidaan pienentää LENI-arvoa verrattuna tavanomaisiin valaistusratkaisuihin ja helpottaa ympäristösertifikaattien kuten, LEED ja BREEAM, hakemista.

Kustannustekijöiden ja hyötysuhteiden lisäksi ei tulisi unohtaa sitä, kuinka helposti PoE-valaistuksessa LED-valaisimet voidaan liittää tunnistimiin, langattomiin tukiasemiin ja älykkäisiin keskuksiin. Älykkäiden LED-valaisimien ja tunnistimien liittäminen LAN-verkkoon on tärkeä kehitysaskel tulevaisuuden kannalta. Se mahdollistaa LED-valaisimien liittämisen IoT -toimintaympäristöön ja on siten erittäin muuntojoustava, jolloin käyttäjän tarpeet on helppo huomioida. Lisäksi tehtäessä muutoksia järjestelmään, voidaan säästyä perinteiseltä ja kalliilta valaistusmuutostyöltä (esimerkiksi ohjaustavan muutos), koska muutokset voidaan tehdä ohjelmallisesti.

Haasteellista työssä oli lähdemateriaalin kerääminen, sillä tuntui, että tietoa PoE-valaistuksesta ei ollut helposti saatavilla. Tarkoitus oli myös tehdä malliasennus Granlundin tiloihin Philips Envision PoE-valaistusjärjestelmästä, mutta järjestelmän lanseeraus oli vielä kesken, joten se ei toteutunut. Lisäksi Philipsillä ei ollut Suomen päässä osaamista järjestelmästä.

Sähkökuva Oy:n tiloista saatiin valaistusteknisiä mittaustuloksia, mutta sähkötekniisiä mittauksia, kuten PoE-kytkimen verkosta ottaman sähkönlaadun ja tehon mittausta, ei ollut mahdollista toteuttaa. Myös PoE-kytkimen lämpökuorman mittaus ATK-ristikytöntätelineestä ei ollut järkevää, koska järjestelmässä oli vain yksi PoE-kytkin. Suuremmassa järjestelmässä olevien useampien PoE-kytkimien lämpökuormien mittaus olisi ollut tarpeellista lämpöhäviöiden tutkimisen kannalta.

Liitteissä esitettyjen mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että mitattavien valaisimien spektrijakaumat olivat LED-valaisimille tyypillisiä tuloksia. Mittaustuloksista nähdään, että LED-valaisimilla on laadukas valontuotto laajalla valonvärien spektrijakamalla.

Työn tuloksena saatiin kattava määrä tietoa PoE-valaistusjärjestelmistä sekä rakennusten AC- ja DC LED-valaistuksen kannattavuudesta. Työssä perehdyttiin erityisesti Redwood ILNS-valaistusjärjestelmään.

## Lähteet

- 1 Valaistuksen sähkönkulutus. 2016. Verkkodokumentti. Vattenfall. <<http://www.vattenfall.fi/fi/valaistus.htm>>. Luettu 5.8.2016.
- 2 Coulombe, Ray. 2014. The latest in lighting and power. Verkkodokumentti. <<http://www.securityinfowatch.com/article/12019886/tech-trends-the-latest-in-lighting-and-power>>. Luettu 26.10.2016.
- 3 PoE technology for LED lighting delivers benefits beyond efficiency. 2015. Verkkodokumentti. LEDs magazine. <<http://www.ledsmagazine.com/articles/print/volume-12/issue-8/features/dc-grid/poe-technology-for-led-lighting-delivers-benefits-beyond-efficiency.html>>. Luettu 25.10.2016.
- 4 Ahponen, Veikko; Kasurinen, Esko & Timonen, Tapani. 1996. Valaistuksen laskenta, mittaukset ja huolto. Espoo: Sähköinfo Oy.
- 5 SFS-EN 12464-1. Valo ja valaistus. Työkohteiden valaistus. Osa 1: Sisätilojen työkohteiden valaistus. 2011. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- 6 Luminanssi. 2016. Verkkodokumentti. Ensto Oy. <<http://www2.amk.fi/Ensto/www.amk.fi/opintojak-sot/0705016/1228387313247/1228397989485/1228398034451/1228398134018.html>>. Luettu 22.10.2016.
- 7 Ashdown, Ian. 2014. In Search of Luminance. Verkkodokumentti. <[http://agi32.com/blog/category/interior\\_lighting/](http://agi32.com/blog/category/interior_lighting/)>. Luettu 20.10.2016.
- 8 Välisuo, Petri. 2014. Fysiikan perusteet 3 – Optiikka. Verkkodokumentti. <<http://siilo.dyndns.org/wiki/images/1/11/FYSI1040Luentopruju.pdf>>. Luettu 20.10.2016.
- 9 Winder, Steve. 2012. The Nuts & Bolts of LEDs-Part II. Verkkodokumentti. <<http://www.edn.com/design/led/4391798/The-Nuts---Bolts-of-LEDs-Part-II>>. Luettu 22.10.2016.
- 10 Valaistussuunnittelijan käsikirja. 2016. Verkkodokumentti. Fagerhult Oy. <[http://np.netpublicator.com/np/n30265811/tekniskinfo\\_fi\\_09.pdf](http://np.netpublicator.com/np/n30265811/tekniskinfo_fi_09.pdf)>. Luettu 31.10.2016.
- 11 Ahponen, Veikko; Lähikari, Maritta & Karppinen, Eeva. 1999. Lamput ja valaisimet. Espoo: Sähköinfo Oy.
- 12 Silmän suhteellinen herkkyys eri aallonpituuksilla kirkkaassa (tappisolut) ja hämärässä (sauvasolut). 2016. Verkkodokumentti. <<http://slideplayer.biz/slide/4867606/>>. Luettu 19.10.2016.

- 13 Halonen, Liisa & Lehtovaara, Jorma. 1992. Valaistustekniikka. Espoo: Otatieto.
- 14 Kruithof diagram. 2016. Verkkodokumentti. <<https://www.educate-sustainability.eu/kb/print/1876>>. Luettu 20.10.2016.
- 15 Ahponen, Veikko; Oksaharju, Sinikka; Kaján, Tuomas; Aalto, Mauri & Falck, Sauli. 1977. Valaistustekniikan käsikirja 1. Helsinki: Sähköliikkeiden palvelu ja kustannus.
- 16 Juslén, Henri. 2016. Valaistus ja tuottavuus-luento, valoakatemia.
- 17 Valaistusvoimakkuus. 2016. Verkkodokumentti. Glamox Luxo Lighting Oy. <<http://glamox.com/fi/valaistusvoimakkuus>>. Luettu 28.10.2016.
- 18 Tietoa unettomuudesta. 2016. Verkkodokumentti. <<http://www.tietoaunettomuudesta.fi/unettomuuden-hoito/melatoniini/>>. Luettu 28.10.2016.
- 19 Hämäläinen, Kalevi. 2016. Vain hyvin suunniteltu on hyvin valaistu-seminariesitys, Valaistu fiksusta valosta-seminaari.
- 20 Human Centric Lighting: Going Beyond Energy Efficiency. 2016. Verkkodokumentti. LightingEurope. <[http://www.lightingeurope.org/uploads/files/Human\\_Centric\\_Lighting\\_short\\_brochure.pdf](http://www.lightingeurope.org/uploads/files/Human_Centric_Lighting_short_brochure.pdf)>. Luettu 1.11.2016.
- 21 Juslén, Henri. 2016. Ihmiskeskeinen valaistus?-seminariesitys, Valoakatemia.
- 22 Brinda A. Thomas, Ines L. Azevedo & Granger Morgan. 2012. Energy Policy. Edison Revisited: Should we use DC circuits for lighting in commercial buildings? Verkkodokumentti. <[https://www.andrew.cmu.edu/user/ilimade/Ines\\_Azevedo/papers/thomas\\_2012.pdf](https://www.andrew.cmu.edu/user/ilimade/Ines_Azevedo/papers/thomas_2012.pdf)>. Luettu 1.11.2016.
- 23 Martikainen, Marko. 2016. Sisävalaistuksen valonlähteet-seminariesitys, Valoakatemia.
- 24 How long do LEDs last? 2016. Verkkodokumentti. U.S. Department of Energy. <<http://www.energy.gov/eere/ssl/led-basics>>. Luettu 2.11.2016.
- 25 Lamppujen ja valaisimien energiamerkintä. 2016. Verkkodokumentti. Motiva Oy. <[http://www.motiva.fi/koti\\_ja\\_asuminen/ostajan\\_opas/energiamerkinta/lamppu\\_ja\\_valaisimet](http://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/ostajan_opas/energiamerkinta/lamppu_ja_valaisimet)>. Luettu 2.11.2016.
- 26 Kallasjoki, Tapio. 2016. Valonlähteet ja energia-seminariesitys, valoakatemia.
- 27 Valaistushankintojen energiatehokkuus. 2008. Verkkodokumentti. Suomen Valoteknillinen Seura ry. <[http://www.valosto.com/tiedostot/SVS\\_Valaistushankintojen\\_energiatehokkuus\\_V4.pdf](http://www.valosto.com/tiedostot/SVS_Valaistushankintojen_energiatehokkuus_V4.pdf)>. Luettu 4.12.2016.

- 28 Uddin, Sohel; Shareef, Hussain; Mohamed, Azah & A Hannan, Mahammad. 2012. Verkkodokumentti. <<http://www.pe.org.pl/articles/2012/11a/61.pdf>>. Luettu 28.10.2016.
- 29 ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, 9. loistehon kompensointi ja yliaaltosuojaus. Verkkodokumentti. <[http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/09\\_0\\_Loistehon%20kompensointi%20ja%20yliaallot.pdf](http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/09_0_Loistehon%20kompensointi%20ja%20yliaallot.pdf)>. Luettu 28.10.2016.
- 30 Power factor correction of predominantly inductive load component with capacitor. 2015. Verkkodokumentti. <<http://electronics.stackexchange.com/questions/171892/power-factor-correction-of-predominantly-inductive-load-component-with-capacitor>>. Luettu 2.11.2016.
- 31 Qiang, Gao; Xiangyu, Li; Yuxian, Sui; Haiqing, Gu; Zhizhong, Yu; Qing, Zhang & Peng, Li. 2015. Design and implementation of LED intelligent lighting system. Based on the technology of PoE. IEEE.
- 32 Jones, Chad. 2014. PoE Targets More Applications With Higher-Power IEEE 802.3bt. Verkkodokumentti. <<http://electronicdesign.com/power/poe-targets-more-applications-higher-power-ieee-8023bt>>. Luettu 26.10.2016.
- 33 Väänänen, Aki. 2015. Internet of Things-seminaariesitys, Granlund Oy:n sähköpäivä 2015.
- 34 Holler, Jan; Tsiatsis, Vlasios; Mulligan, Catherine; Avesand, Stefan; Karnouskos, Stamatis & Boyle, David. 2014. From Machine-to-Machine to the Internet of Things: introduction to a new age of intelligence.
- 35 Mark Stanley Rea; Illuminating Engineering Society of North America. 2000. The IESNA Lighting Handbook, 9th edition. Illuminating Engineering.
- 36 Tägtström, Janne. 2016. Cisco Digital Ceiling, power point-esitys.
- 37 How to convert AWG to mm. 2016. Verkkodokumentti. <<http://www.rapidtables.com/calc/wire/awg-to-mm.htm>>. Luettu 29.10.2016.
- 38 Annanpalo, Jaakko; Hovatta, Tauno; Härkönen, Pentti; Kauppi, Veijo; Koivisto, Pekka; Lindfors, Timo & Marttila Heikki. 2008. Yleiskaapelointijärjestelmät, ST-käsikirja 16. Espoo: Sähköinfo Oy.
- 39 Redwood Cabling Design Guide-esite. 2016. Verkkodokumentti. <[http://www.bitpipe.com/detail/RES/1399044602\\_909.html](http://www.bitpipe.com/detail/RES/1399044602_909.html)>. Luettu 5.8.2016.
- 40 Redwood Sensor- Model 3M1 Installation Instructions-esite. 2014. Verkkodokumentti. <[http://www.commscope.com/catalog/doc/pdf/9071/Sensor\\_3\\_Installation\\_Instructions\\_-\\_PDF.pdf](http://www.commscope.com/catalog/doc/pdf/9071/Sensor_3_Installation_Instructions_-_PDF.pdf)>. Luettu 21.8.2016.

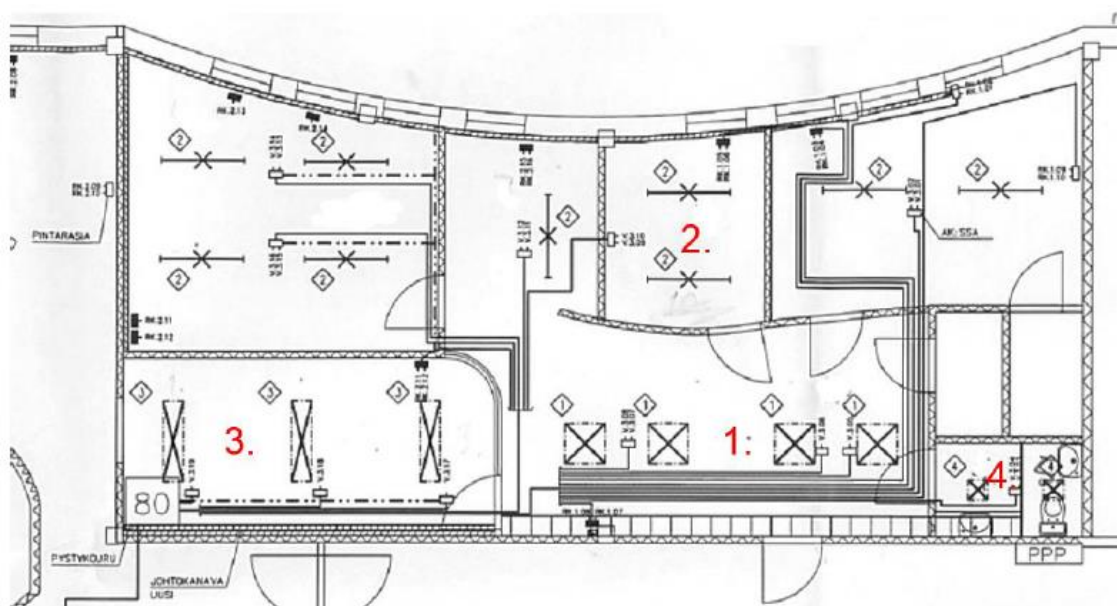


- 41 Redwood Intelligent Lighting Network Solutions-esite. 2016. Verkkodokumentti. <[http://www.wesco.com/lighting/ilns/Redwood\\_Solution\\_Brochure.pdf](http://www.wesco.com/lighting/ilns/Redwood_Solution_Brochure.pdf)>. Luettu 5.8.2016.
- 42 Hämäläinen, Mikko. 2016. Redwood valaistusjärjestelmä Sähkökuva Oy:n toimistolla, power point-esitys.
- 43 Redwood Universal Gateway Installation Instructions-esite. 2014. Verkkodokumentti. <[http://www.commscope.com/catalog/doc/pdf/9069/Universal\\_Gateway\\_Installation\\_Instructions\\_-\\_PDF.pdf](http://www.commscope.com/catalog/doc/pdf/9069/Universal_Gateway_Installation_Instructions_-_PDF.pdf)>. Luettu 2.12.2016.
- 44 LED Gateway 3Q Installation. 2015. Verkkodokumentti. <[http://www.commscope.com/catalog/doc/pdf/10246/860\\_616\\_622\\_-\\_LED\\_Gateway\\_3Q\\_Installation.pdf](http://www.commscope.com/catalog/doc/pdf/10246/860_616_622_-_LED_Gateway_3Q_Installation.pdf)>. Luettu 5.8.2016.
- 45 Redwood Engine 3 Installation Instructions-esite. 2013. Verkkodokumentti. <[http://www.commscope.com/catalog/doc/pdf/9066/Engine\\_3\\_Model\\_4834\\_Installation\\_Instructions\\_-\\_PDF.pdf](http://www.commscope.com/catalog/doc/pdf/9066/Engine_3_Model_4834_Installation_Instructions_-_PDF.pdf)>. Luettu 3.12.2016.
- 46 Redwood Director product specification-esite. 2012. Verkkodokumentti. <<https://objects.eanixter.com/PD372130.PDF>>. Luettu 21.8.2016.
- 47 Redwood System Installation Guide-esite. 2012. Verkkodokumentti. <[http://www.commscope.com/catalog/doc/pdf/9065/Redwood\\_\\_Installation\\_Guide.pdf](http://www.commscope.com/catalog/doc/pdf/9065/Redwood__Installation_Guide.pdf)>. Luettu 21.8.2016.

## Valaistusmittauspisteiden sijainnit Sähkökuva Oy: tiloissa

Tasopiirustuksessa näkyy neljä mittauspistettä. Mittauksia suoritettiin yhteensä 7 kpl, tilan valaistuksen ollessa pois päältä ja 100 % päällä. Tämä johtui siitä, että tilaan tulevaa luonnonvalaistusta ei voitu täysin estää. Ainoastaan WC-tilasta (mittauspiste 4) ei suoritettu kahta mittausta, koska tilaan ei päässyt luonnonvaloa häiritsemään mittaustulosta. Yleisesti ottaen tällä menetelmällä voidaan laskea keinovalaistuksen tuottama valaistusvoimakkuus mitattaville tasopinnoille. Mittaustulosten erotuksesta saadaan keinovalaistuksen tuottama valaistusvoimakkuus.

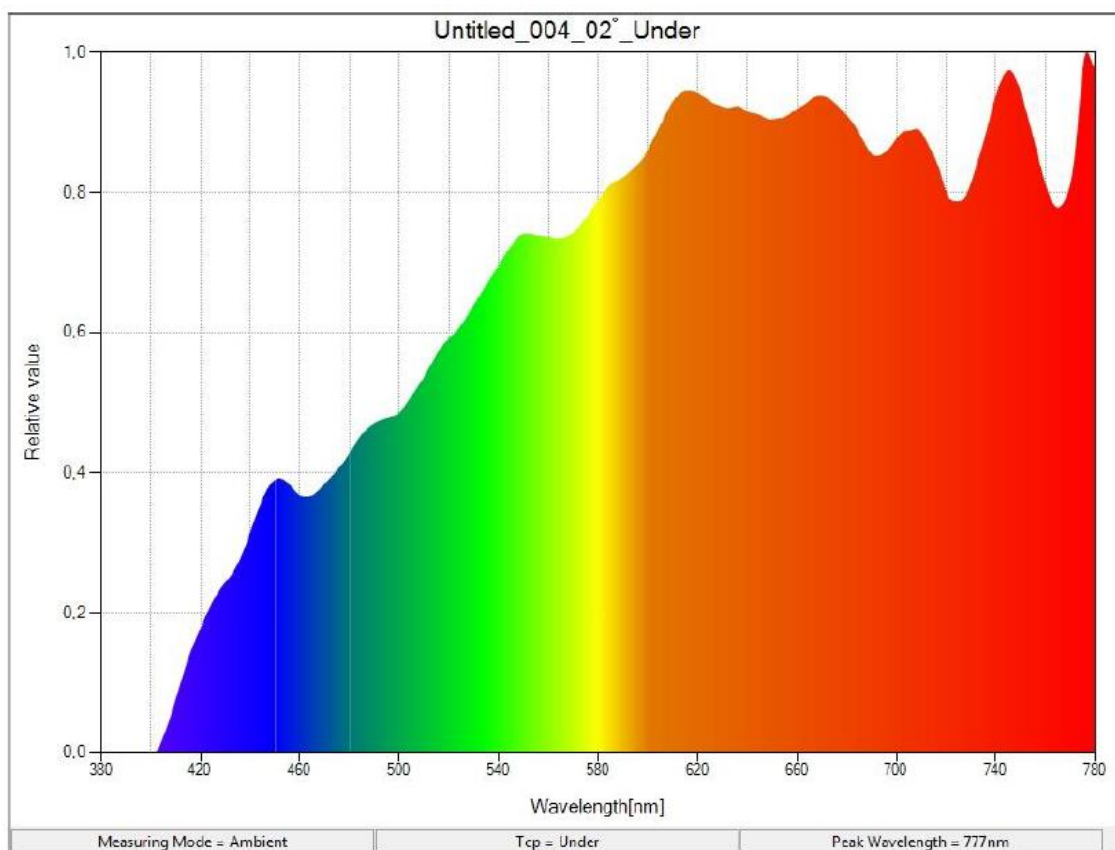
Mittaukset suoritettiin Sähkökuva Oy:n Kotkan toimistolla 3.6.2016 keskipäiväsaikaan. Kiinteistössä oli käytössä Redwood ILNS-valaistusjärjestelmä. Tilojen valaisimet on esitetty liitteessä 3. Mittauksissa käytettiin Conica Minolta CL-70F valaistusmittaria.



## Mittaustulokset

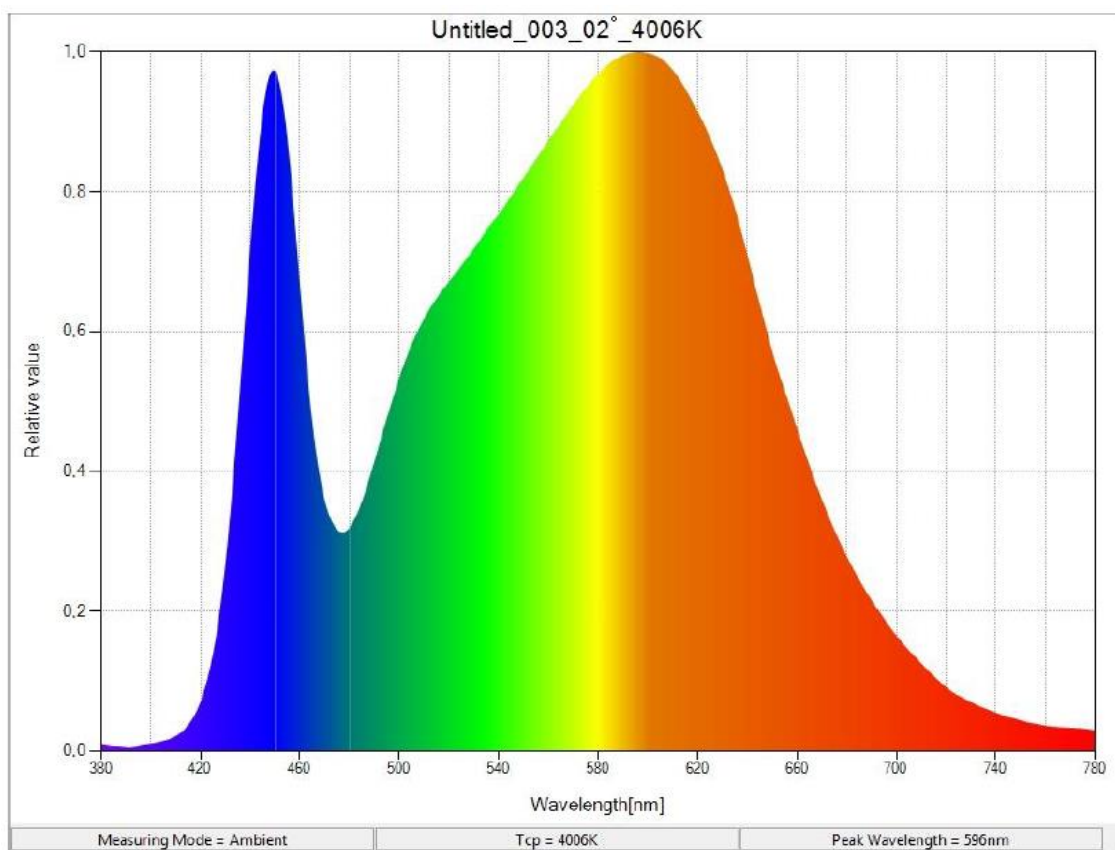
Mittauspiste 1. Tilan valaistus ei päällä, mittauskorkeus lattiasta 0,8m (työtaso).

- valaistusvoimakkuus: 2,5 lx



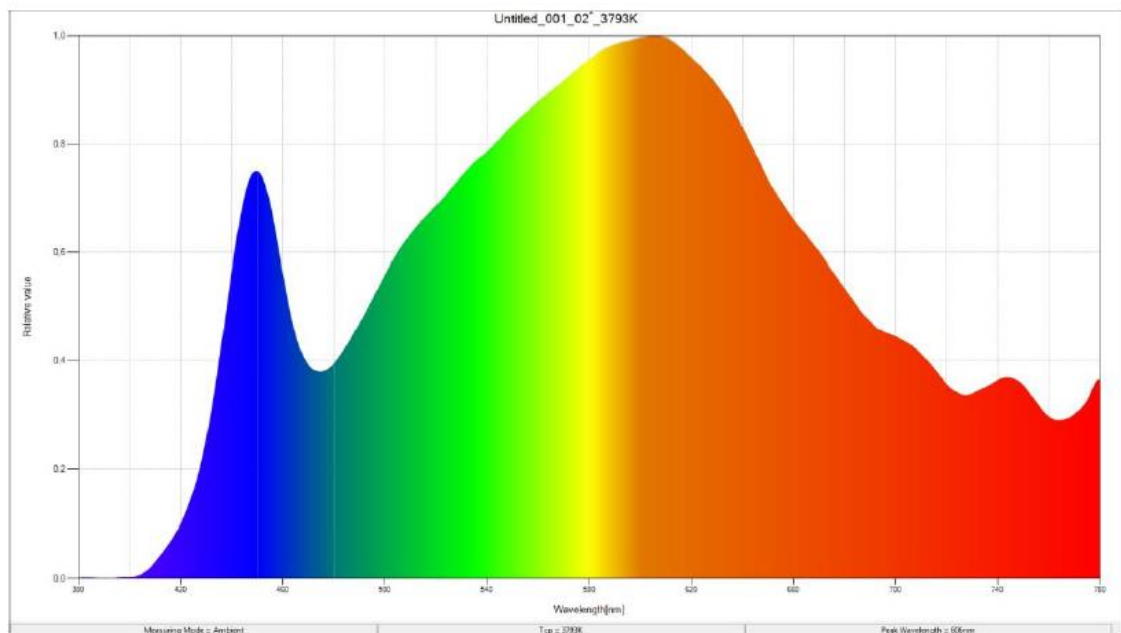
Mittauspiste 1. Tilan valaistus 100 % päällä, mittauskorkeus lattiasta 0,8m (työtaso).

- valaistusvoimakkuus: 581 lx
- väriämpötila: 4006 K
- värikoordinaatit
  - o  $x=0,3790$
  - o  $y=0,3722$



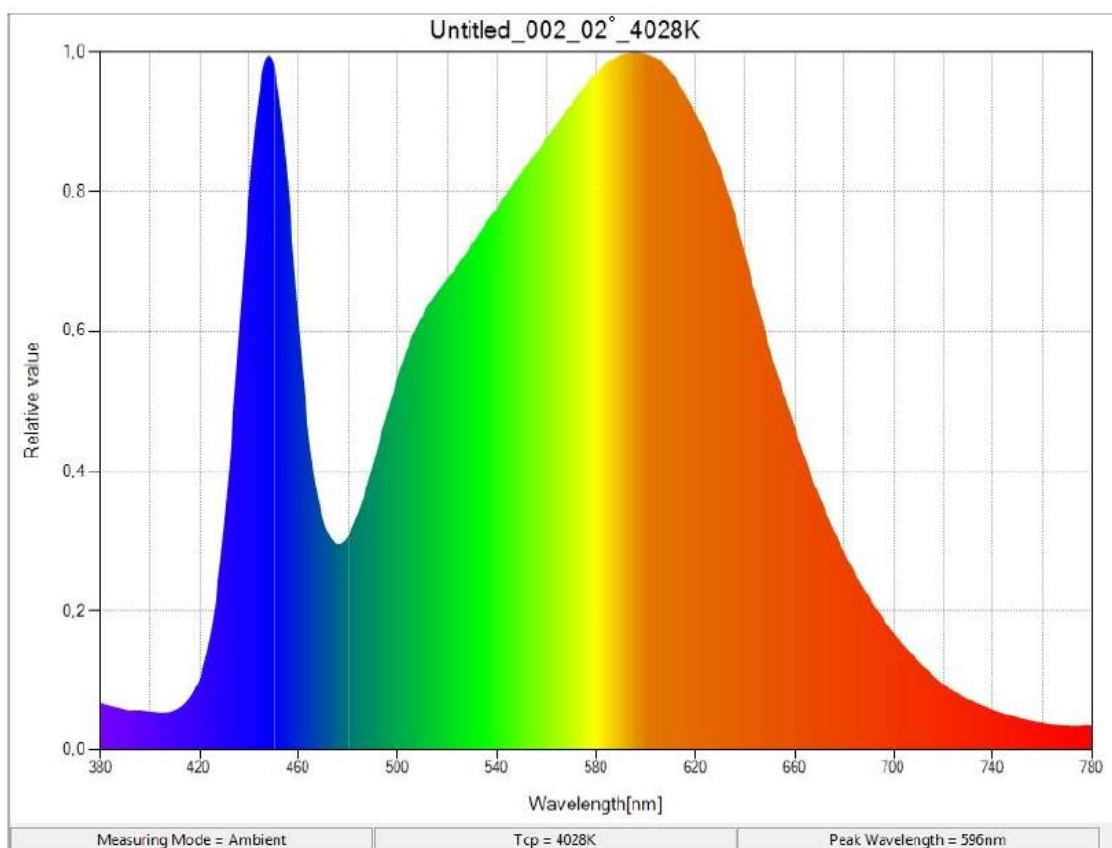
Mittauspiste 2. Tilan valaistus ei päällä, mittauskorkeus lattiasta 0,8m (työtaso).

- valaistusvoimakkuus: 15,1 lx
- väriämpötila: 3793 K
- värikoordinaatit
  - o  $x=0,3911$
  - o  $y=0,3859$



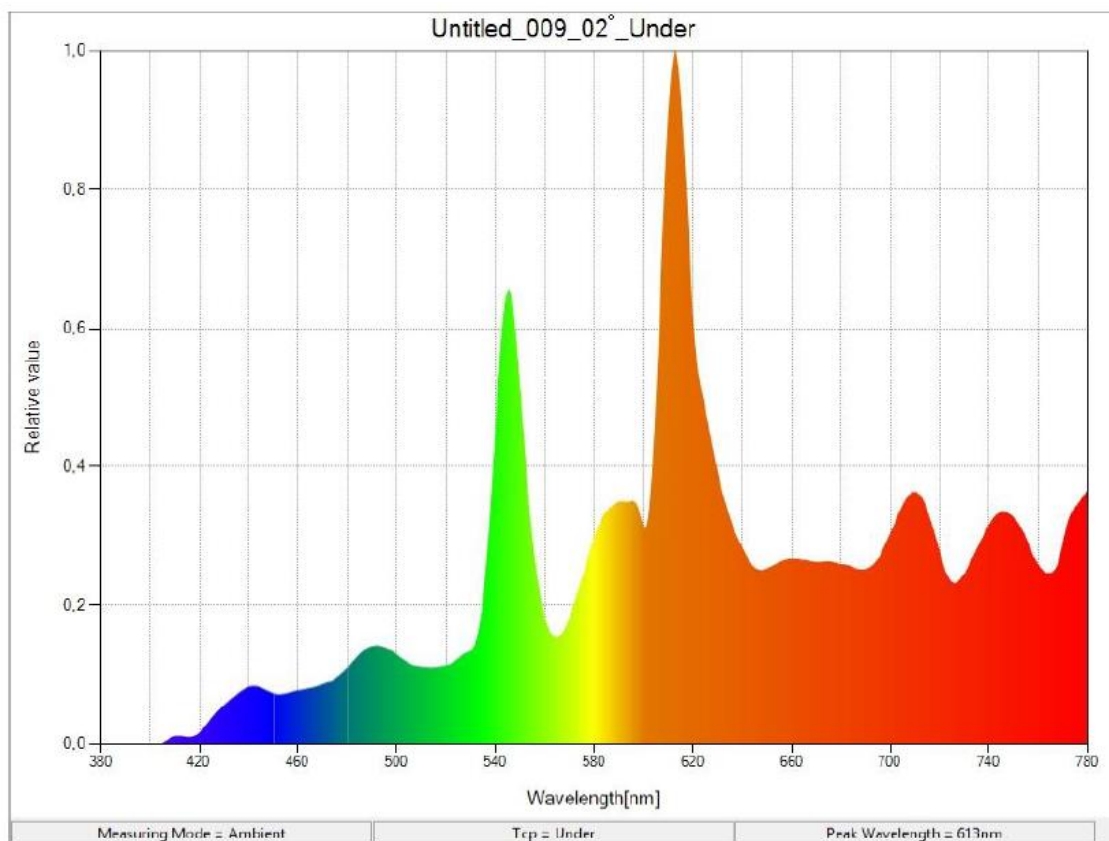
Mittauspiste 2. Tilan valaistus 100 % päällä, mittauskorkeus lattiasta 0,8m (työtaso).

- valaistusvoimakkuus: 759 lx
- värielämpötila: 4028 K
- värikoordinaatit
  - o  $x=0,3777$
  - o  $y=0,3704$



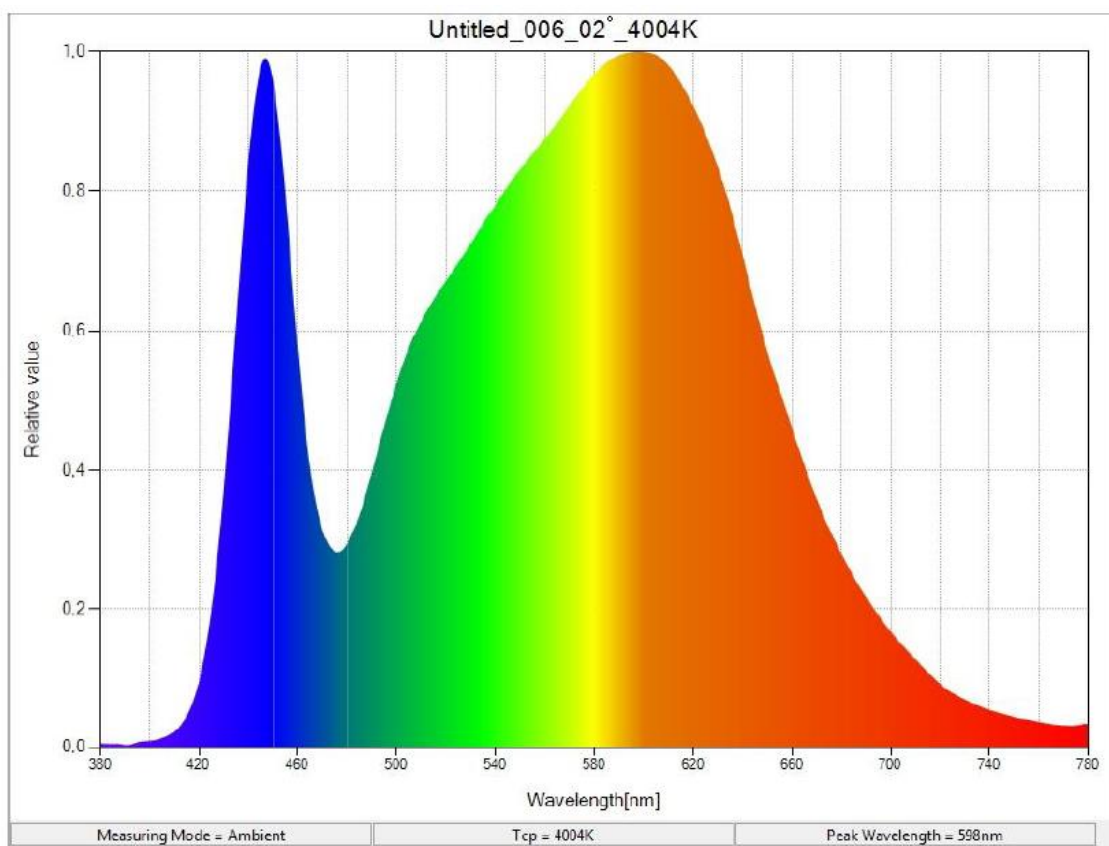
Mittauspiste 3. Tilan valaistus ei päällä, mittauskorkeus lattiasta 0,8m (työtaso).

- valaistusvoimakkuus: 3,3 lx



Mittauspiste 3. Tilan valaistus 100 % päällä, mittauskorkeus lattiasta 0,8m (työtaso).

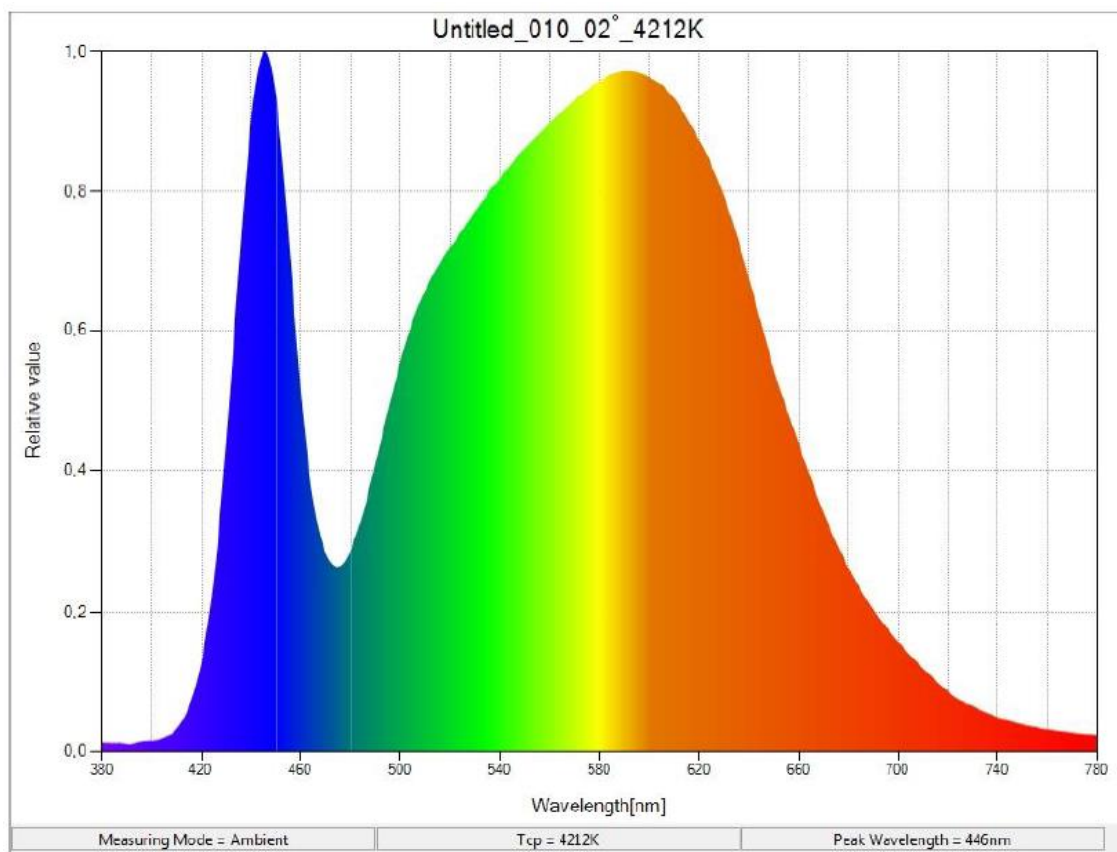
- valaistusvoimakkuus: 427 lx
- väriämpötila: 4004 K
- värikoordinaatit
  - o  $x=0,3785$
  - o  $y=0,3702$





Mittauspiste 4. Tilan valaistus 100 % päällä, mittauskorkeus lattiasta 0,8m (työtaso).

- valaistusvoimakkuus: 408 lx
- värilämpötila: 4212 K
- värikoordinaatit
  - o  $x=0,3722$
  - o  $y=0,3737$



## Sähkökuva Oy:n tilojen PoE-valaisimet



### POS 1

Northcliffe, Corona C LED 1X4100

- 31 W / 4100 lm
- 4000 K
- käytävällä



### POS 2

Northcliffe, Tucana S PAR LED 2x2350

- 34 W / 4700 lm
- 4000 K
- työhuoneissa



POS 3

Northcliffe, Bootes LED 1x4400

- 31 W / 4400 lm
- 4000 K
- kirjastossa



POS 4

Northcliffe, Bootes LED 1x2000

- 17 W / 2000 lm
- 4000 K
- WC-tiloissa

## Valokuvia Sähkökuva Oy:n PoE-valaistusasennuksista



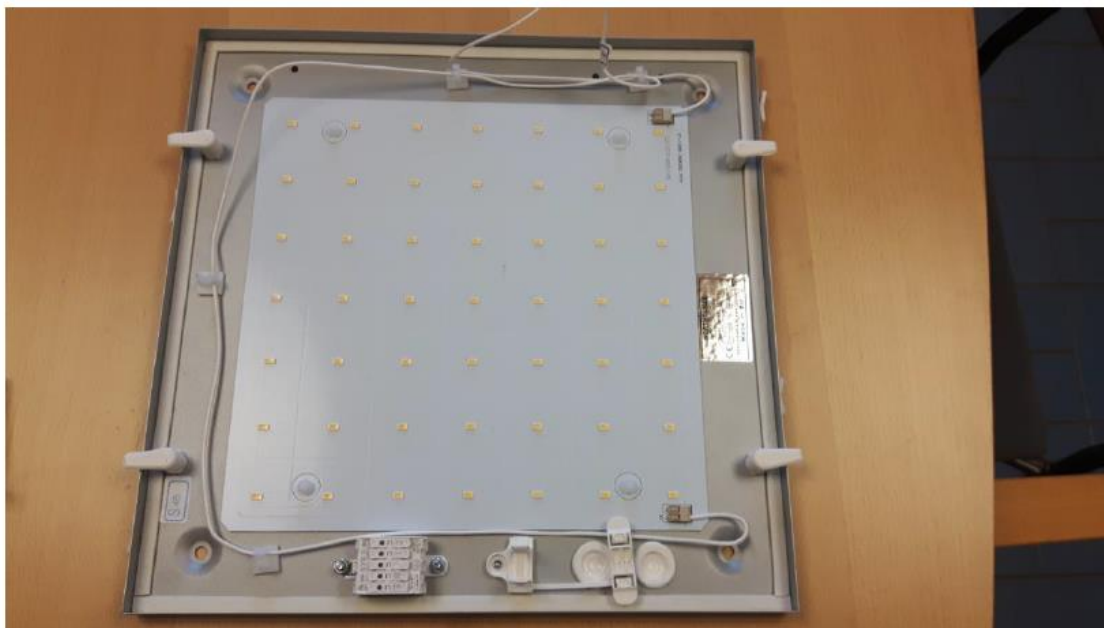
Kuva 1. Kuvassa näkyy Redwood ILNS-valaistusjärjestelmän PoE-kytkin (Malli nro: ENG-3-4834-200-250) sijoitettuna ATK-ristikytentätelineeseen. PoE-kytkimen lähdöt yhdistetään kytkentätauluun (patch panel) RJ45-liittimillä. Kytchentäulusta lähtee Cat6-parikaapelit valaisimien kytkinporteille (gateway:lle). Yksi valaisin vaatii yhden kytkinportin.



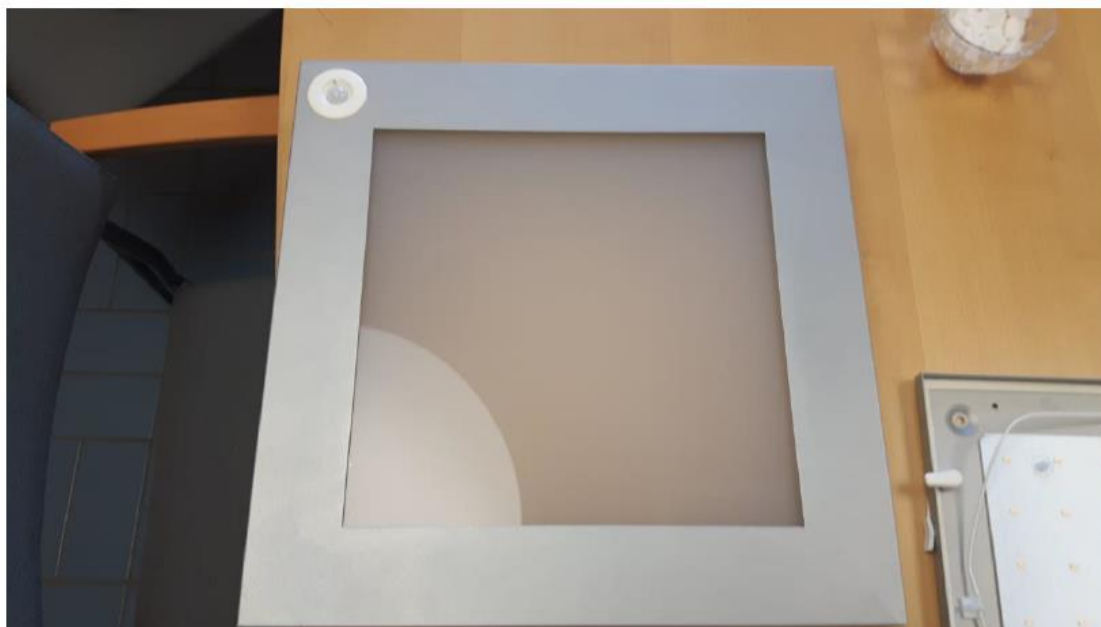
Kuva 2. Kuvassa näkyy pinta-asennus rasia, joka sisältää gatewayn. Cat6-parikaapeli on kytketty RJ45-liittimellä rasiaan. Rasiasta on jatkettu RJ25-liittimellä valaisimeen integroidulle Redwood päivänvalo/läsnäolotunnistimelle. Tunnistimelta on puolestaan jatkettu RJ25-liittimellä valaisimelle.



Kuva 3. Katossa näkyy vanhojen valaisinasennuksien jäljet. Yhdestä pintarasiasta on haaroitettu kahdelle valaisimelle syöttö.



Kuva 4. Kuvassa näkyy position 4 valaisin. Valaisimessa ei ole liitännälaitetta. LED-valonlähde kytketään käytännössä suoraan Redwood ILNS-valaistusjärjestelmään, jonka nimellisjännite on 48 VDC.



Kuva 5. Kuvassa näkyy position 4 valaisimen kupu. Valaisimen kupuun on integroitu tunnistin.