



Izv. prof. dr. sc. Mario Vašak

Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva

mario.vasak@fer.hr

Hijerarhijsko koordinirano upravljanje velikim potrošačima s ciljem njihove integracije u napredne energetske mreže

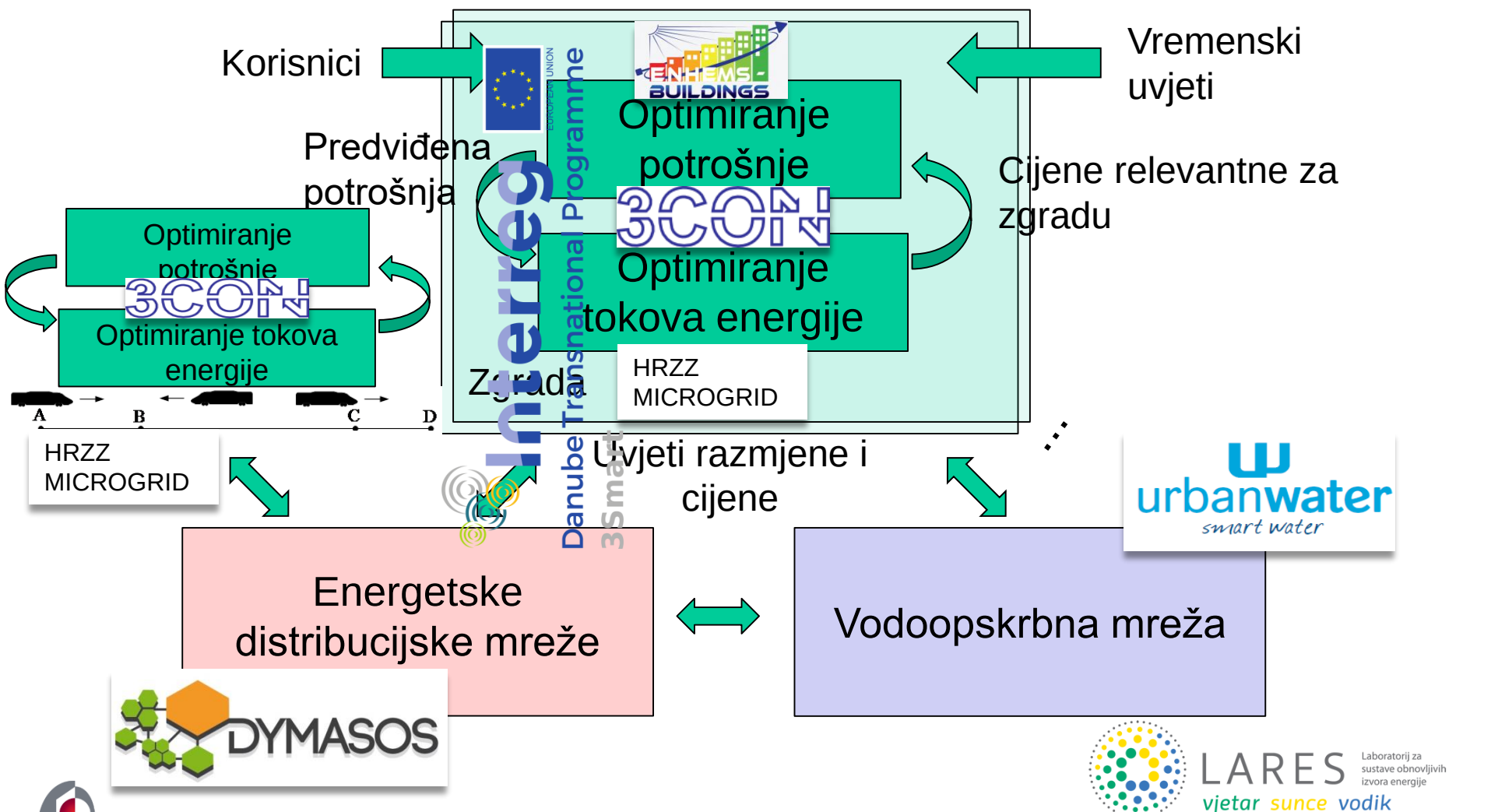
IX. kolokvij Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti i Hrvatske zaklade za znanost
Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti, 13. studenog 2017.



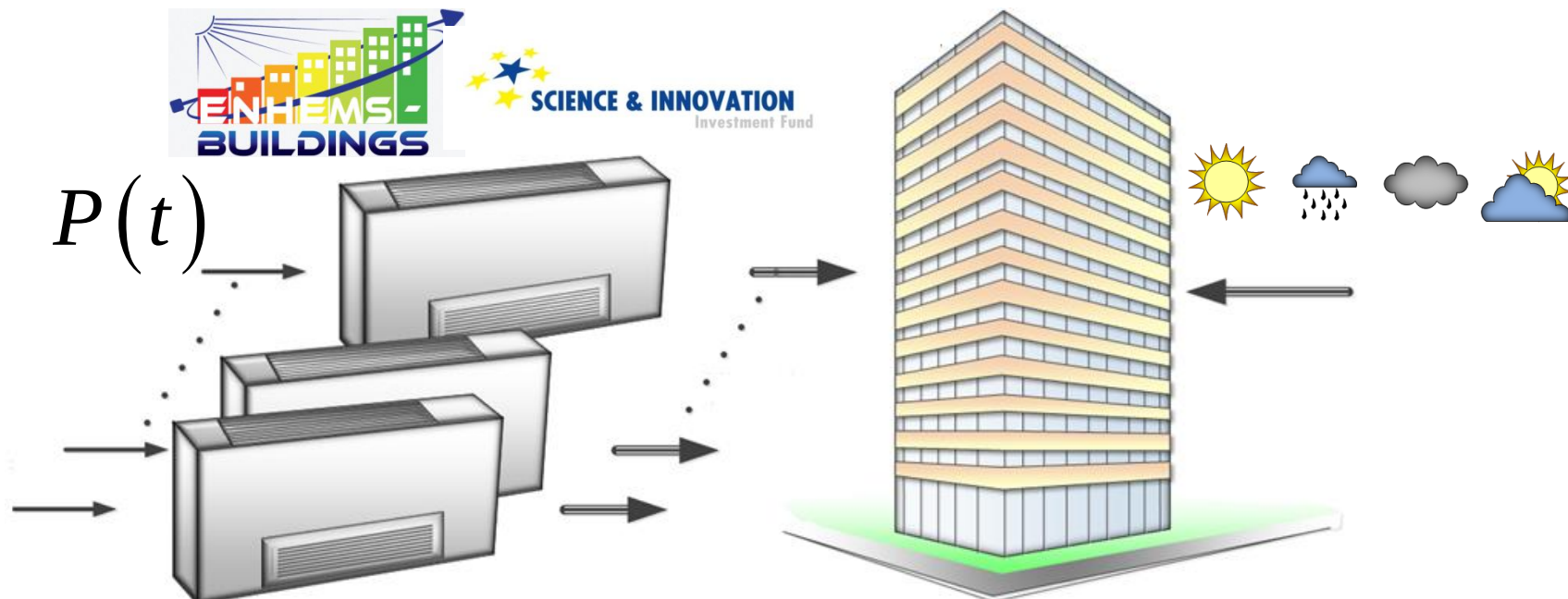
Pregled izlaganja

- Hijerarhijsko koordinirano upravljanje
- Primjena na zgrade
 - Koncept implementacije i rezultati
- Primjena na željeznički elektrovočni sustav
 - Koncept implementacije i rezultati
- Daljnje korištenje provedenih istraživanja
 - Interreg Dunav projekt 3Smart
 - IRI projekt s tvrtkom Klimaoprema d.d.
 - Centar kompetencija za napredno gospodarenje energijom u zgradama i infrastrukturi (CEKOM GEZI)

Širi okvir istraživanja u Laboratoriju za sustave obnovljivih izvora energije (LARES)



Sustav grijanja/hlađenja zgrade kao potrošač energije



Fiksna cijena energije c i energija uvijek dostupna:

$$c \min_{P(t)} \int P(t) dt$$

uvjeti na $P(t)$

Vremenski ovisna cijena energije $c(t)$ i dostupnost energije:

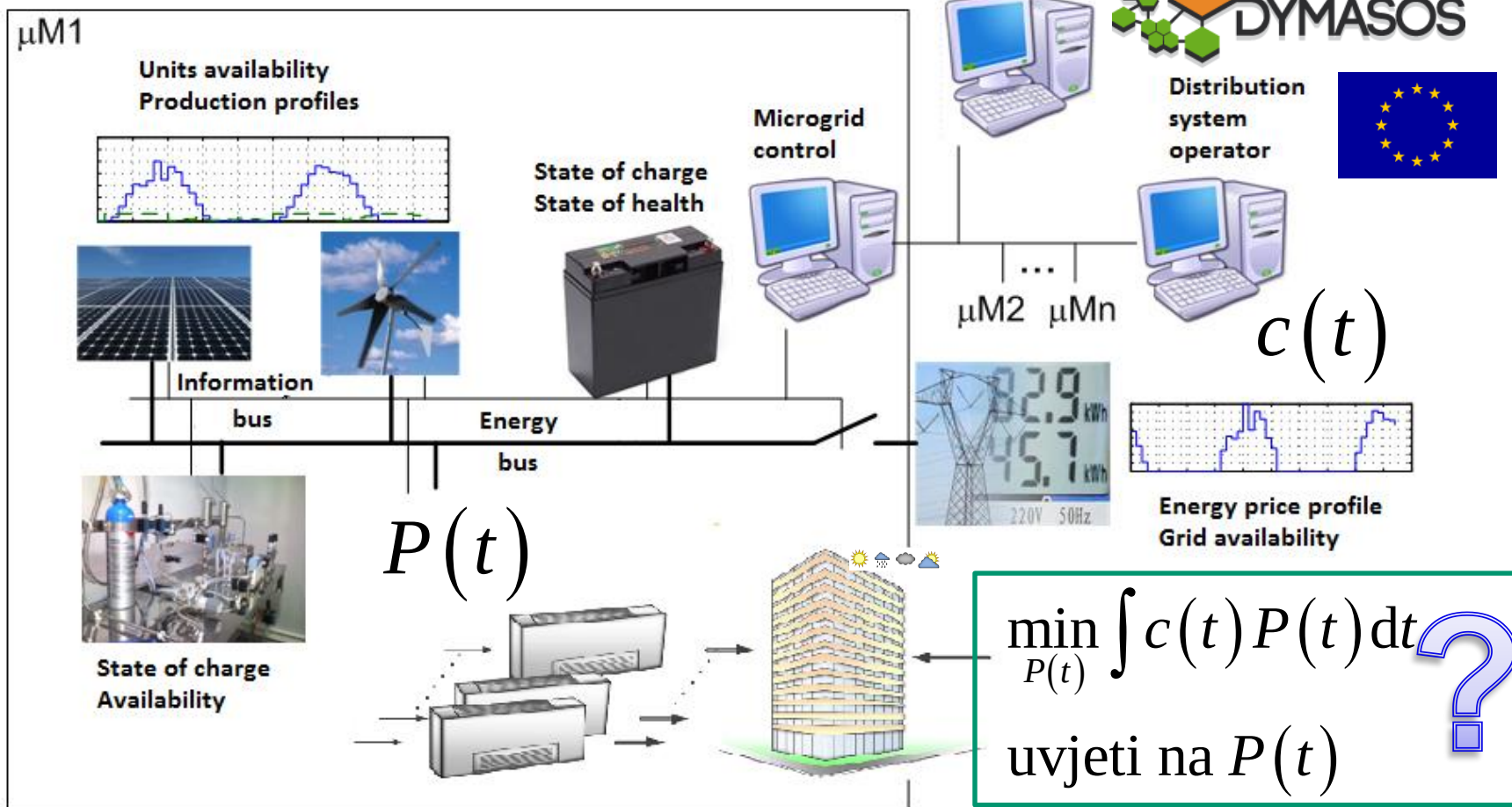
$$\min_{P(t)} \int c(t) P(t) dt$$

uvjeti na $P(t)$ (uklj. dostupnost)

Zgrada kao proizvođač, pohrana i potrošač (1)



project MICROGRID



Zgrada kao proizvođač, pohrana i potrošač (2)

- Za proizvoljnu snagu grijanja/hlađenja $P(t)$ postoji optimalan način upravljanja mikromrežom koji rezultira minimalnim energetske troškom: $J(P(t))$
- Stoga, pri optimiranju potrošnje troškovno optimalno je upravljati na ovaj način:

$$\min_{P(t)} J(P(t))$$

uvjeti na $P(t)$

Hijerarhijska
dekompozicija
složenog sustava

- ... te deklarirati proračunan optimalni profil potrošnje $P^*(t)$ razini upravljanja mikromrežom

Interakcija upravljanja potrošnjom i upravljanja tokovima energije u sustavu

$$E = \int P(t) dt$$

$$E = \sum U_i$$

Uvjeti razmjene energije s mrežom c_G

Predviđeni profil razmjene energije s mrežom E_G

Upravljanje tokovima energije

$$J^*(E) = \min_{E_s} c_G E_G$$

uvjeti na E_s i E

Stanje pohrana

Naredbe za razmjenu energije s pohranom E_s

cijene J^* za izvedive profile potrošnje

predviđeni profil potrošnje $E = \sum U_i$

Upravljanje potrošnjom

$$\min_{U_i} J^*(\sum U_i)$$

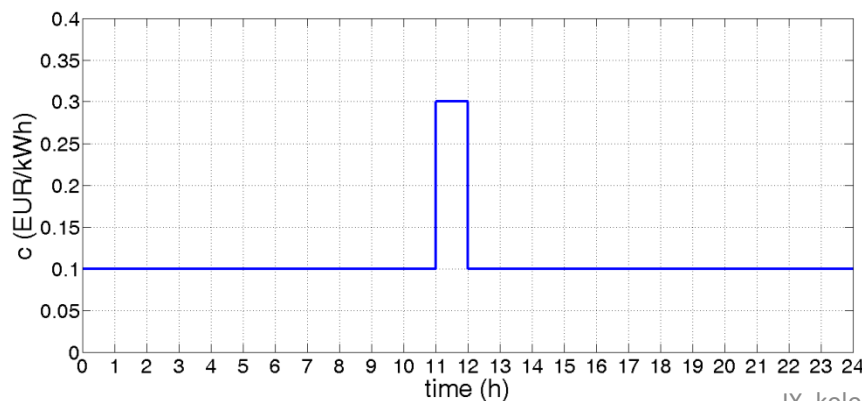
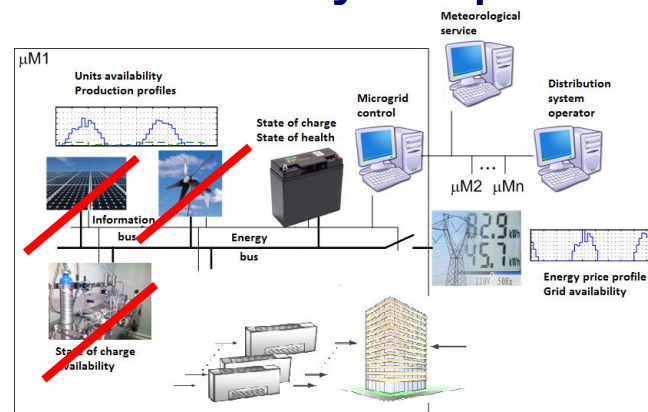
uvjeti rada/komfora na U_i

Stanje sustava (mjera komfora)

Naredbe za potrošnju energije po jedinicama sustava U_i

Zgrada kao proizvođač, pohrana i potrošač – Primjer (1)

- Mikromreža se sastoji samo od baterijske pohrane
 - bez baterijskih gubitaka
 - nema ograničenja snage razmjene s mrežom
 - nema povrata u mrežu
- Profil cijene energije razmjene $c(t)$ kojeg diktira distribucijska mreža



Zgrada kao proizvođač, pohrana i potrošač – Primjer (2)

- Slučajevi:
 - komforom zahtijevani $P(t)$ može se u potpunosti ostvariti iz baterije između 11:00 i 12:00
 - $J = 0.1 \int_0^{24} P(t) dt$
 - Mikromreža **transformira** cijenu energije sa “špicom” u konstantnu cijenu jednaku donjoj razini za konačnu potrošnju
 - komforom zahtijevani $P(t)$ ne može se u potpunosti ostvariti iz baterije između 11:00 i 12:00
 - Cijena energije za konačnu potrošnju **ovisi o vremenu upotrebe** (unutar ili izvan 11-12) i **količini upotrebe** (ovisno koliko je $\int_{11}^{12} P(t) dt$ veće od kapaciteta baterije)
- Mikromreža transformira cijenu energije za potrošnju (na optimalan način ako je optimalno upravljana)

Istraživački projekt 3CON

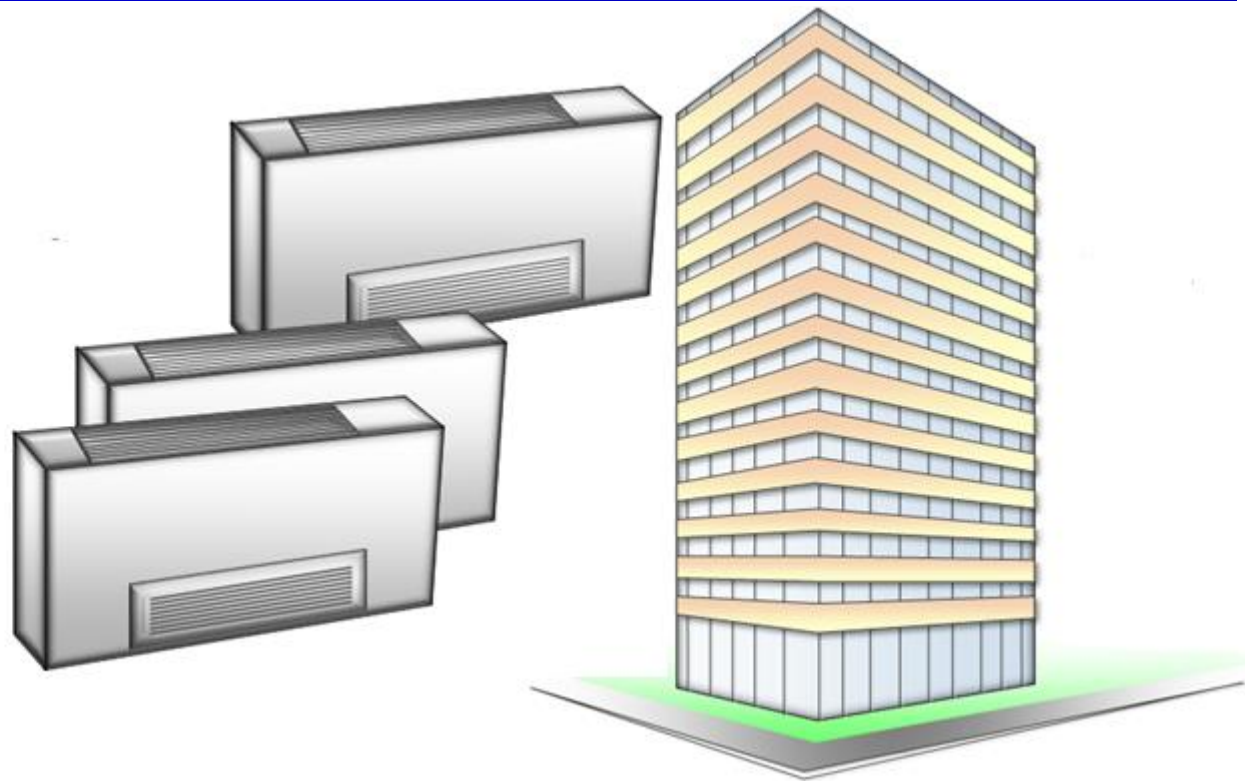
- 3CON
 - CONtrol-based Hierarchical CONsolidation of Large CONsumers for Integration in Smart Grids (3CON, 2014-2017)



- Cilj: Povezati cjeline optimalnog upravljanja energetskeg tokovima i optimalnog upravljanja potrošnjom kod velikih potrošača – zgrada i željezničkih elektroenergetskih sustava

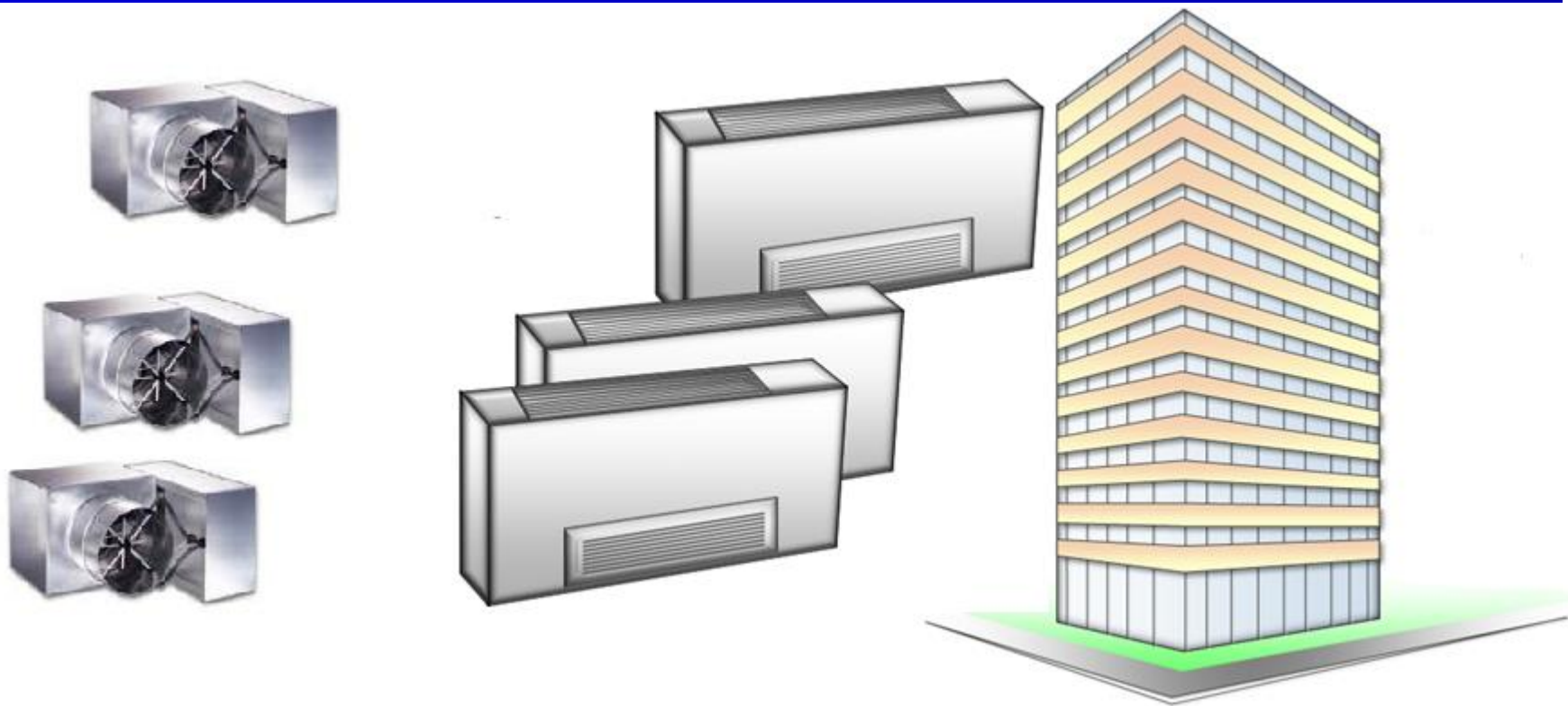
ZGRADE KAO VELIKI POTROŠAČI

Klasične komercijalne zgrade



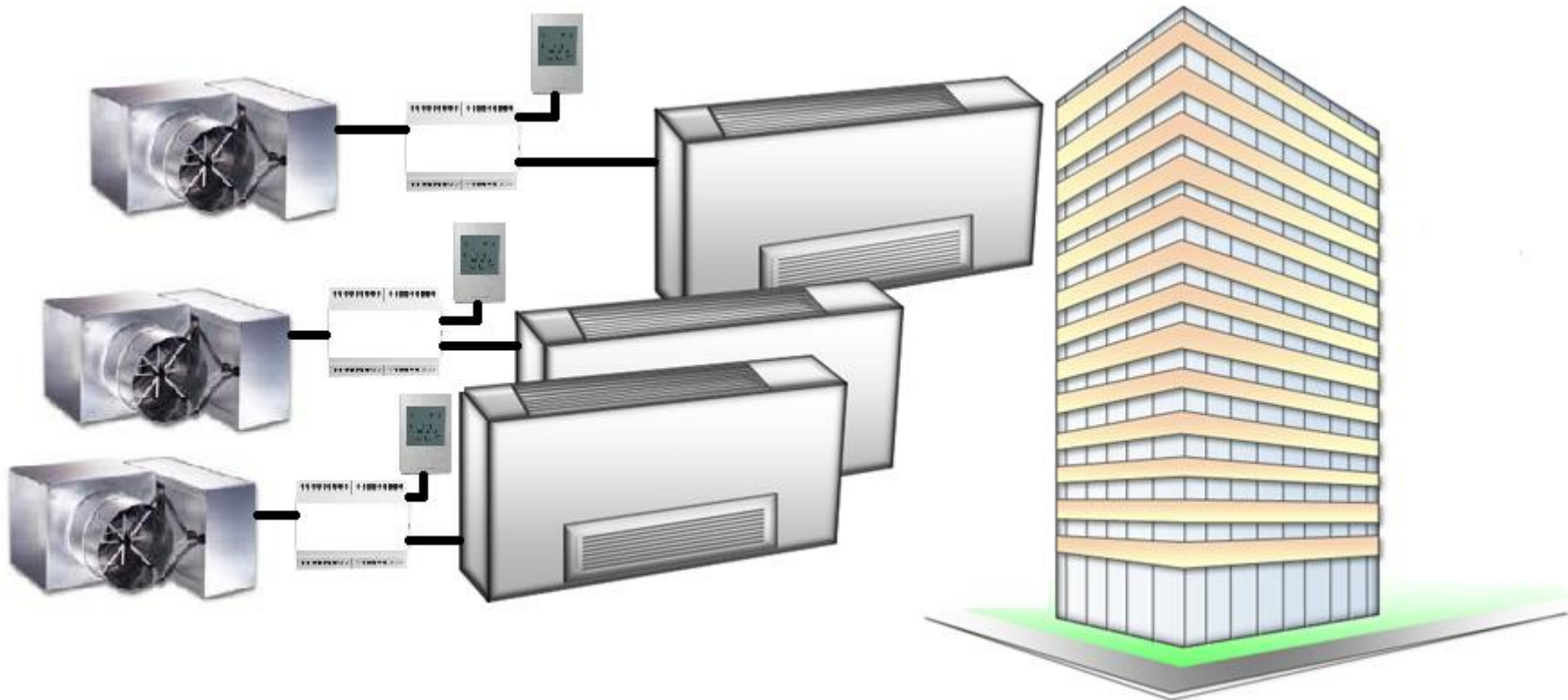
Elementi za održavanje komfora u zonama:
ventilokonvektori

Klasične komercijalne zgrade



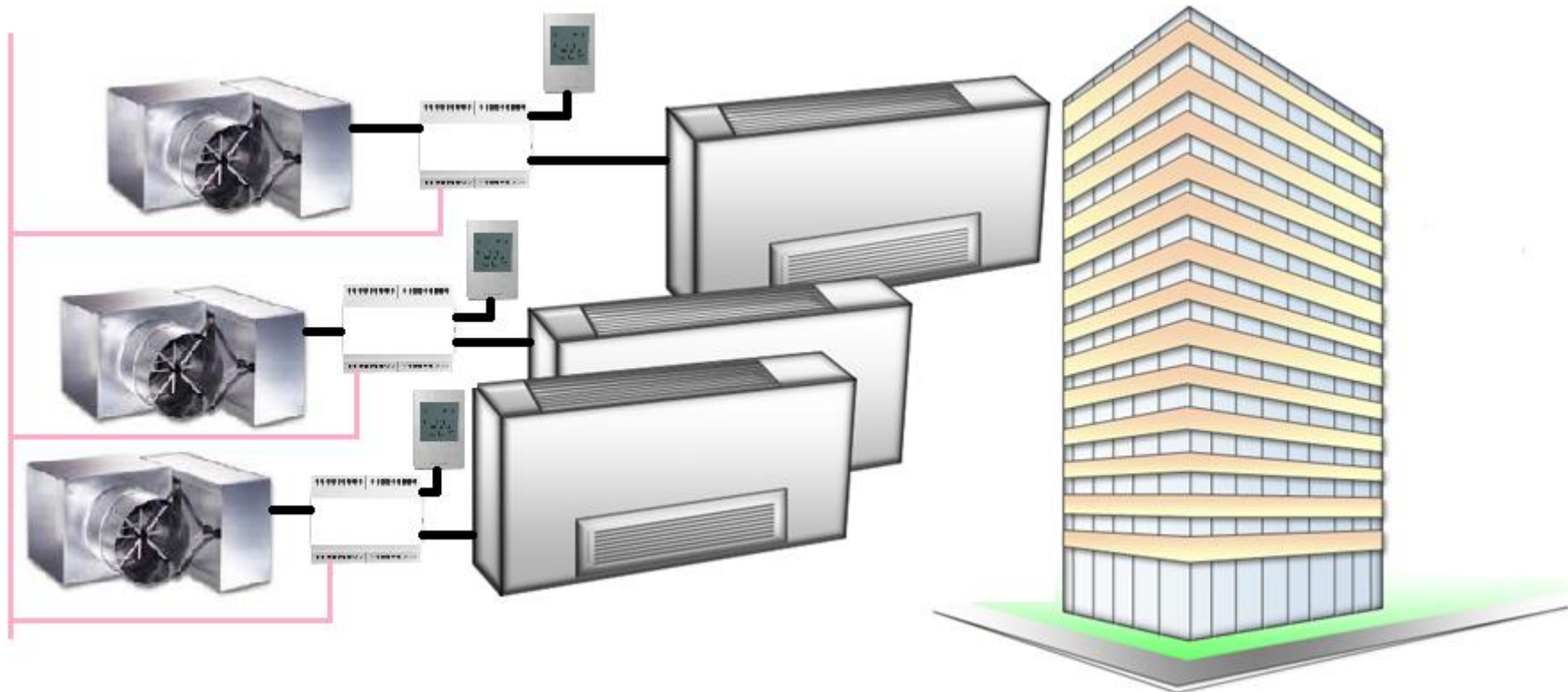
Elementi za održavanje komfora u zonama:
ventilokonvektori, VAV box-evi ili oboje

Klasične komercijalne zgrade



Digitalni zonski regulatori obavljaju upravljačke funkcije

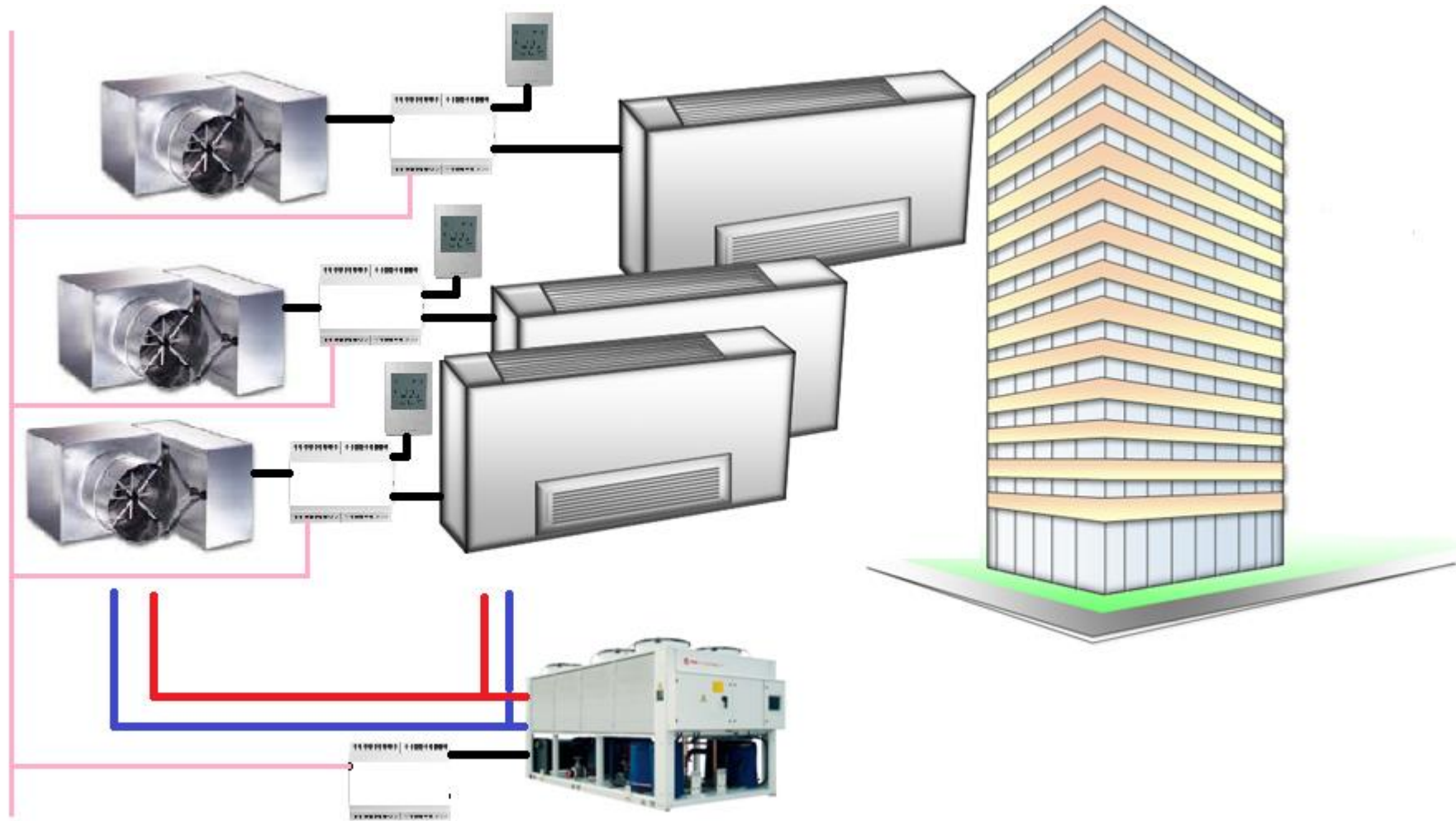
Klasične komercijalne zgrade



Digitalni zonski regulatori obavljaju upravljačke funkcije

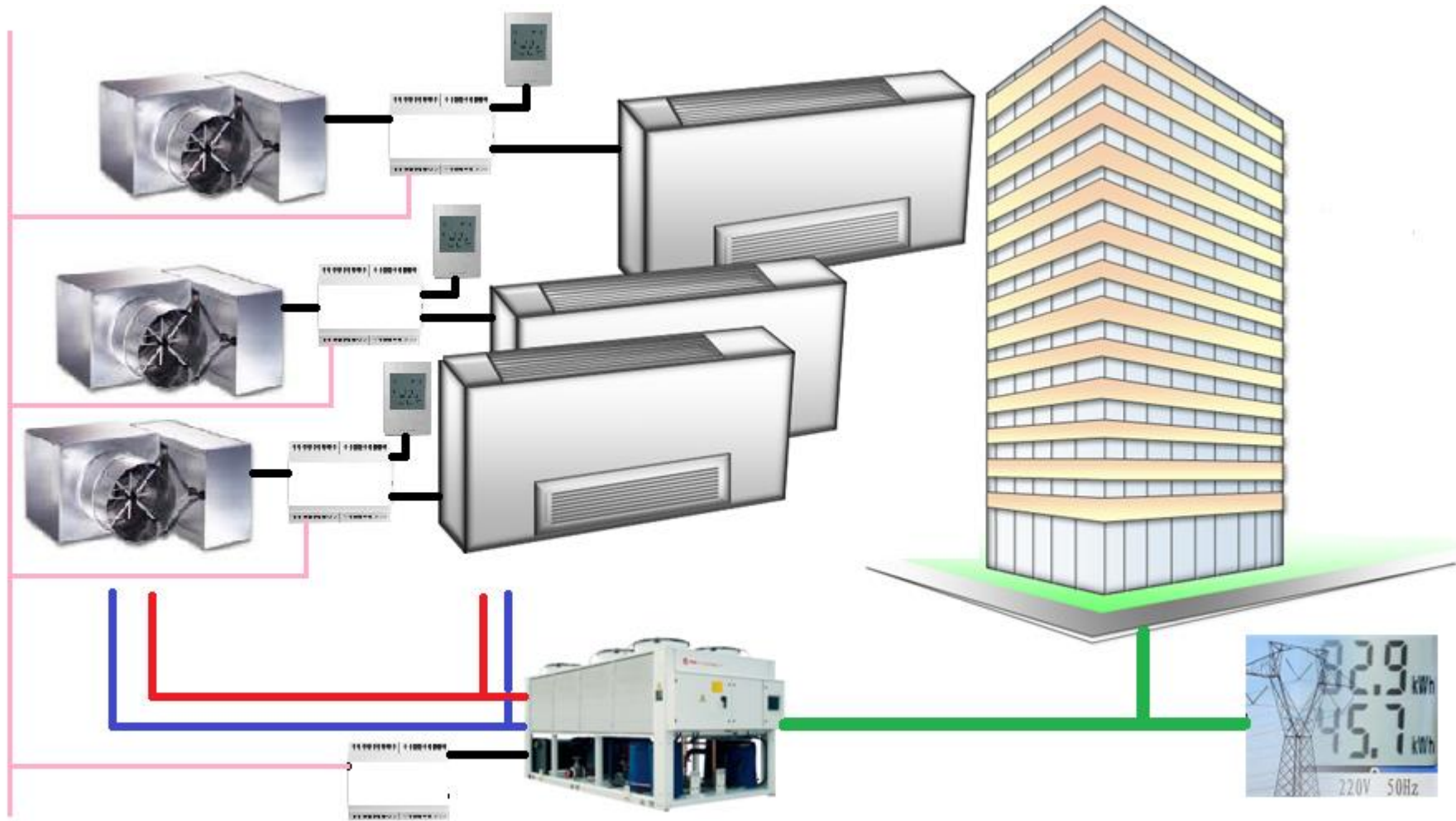
Umreženi za omogućavanje centralne akvizicije podataka

Klasične komercijalne zgrade



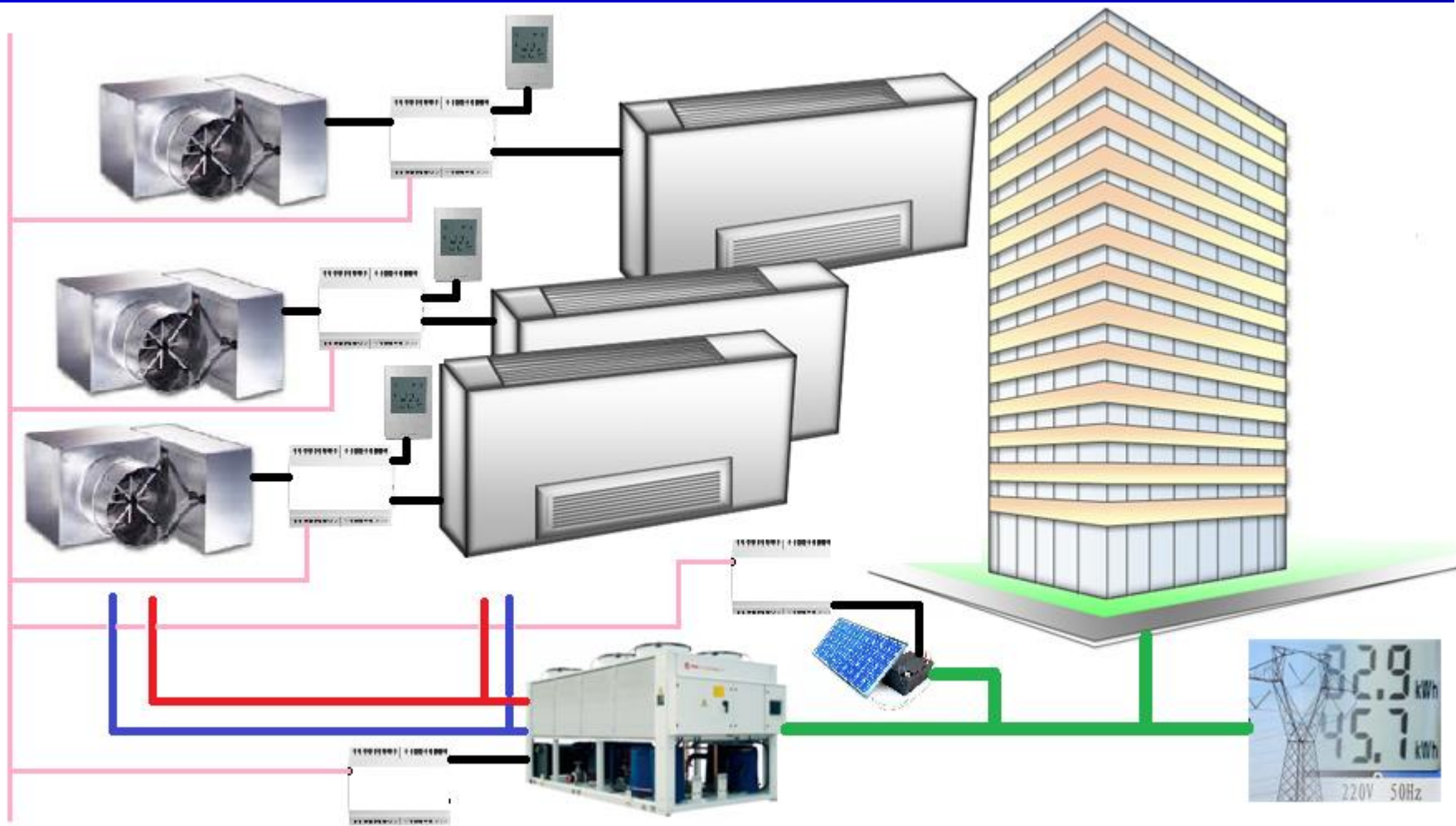
Upravljanje jedinice za proizvodnju medija za zone...

Klasične komercijalne zgrade



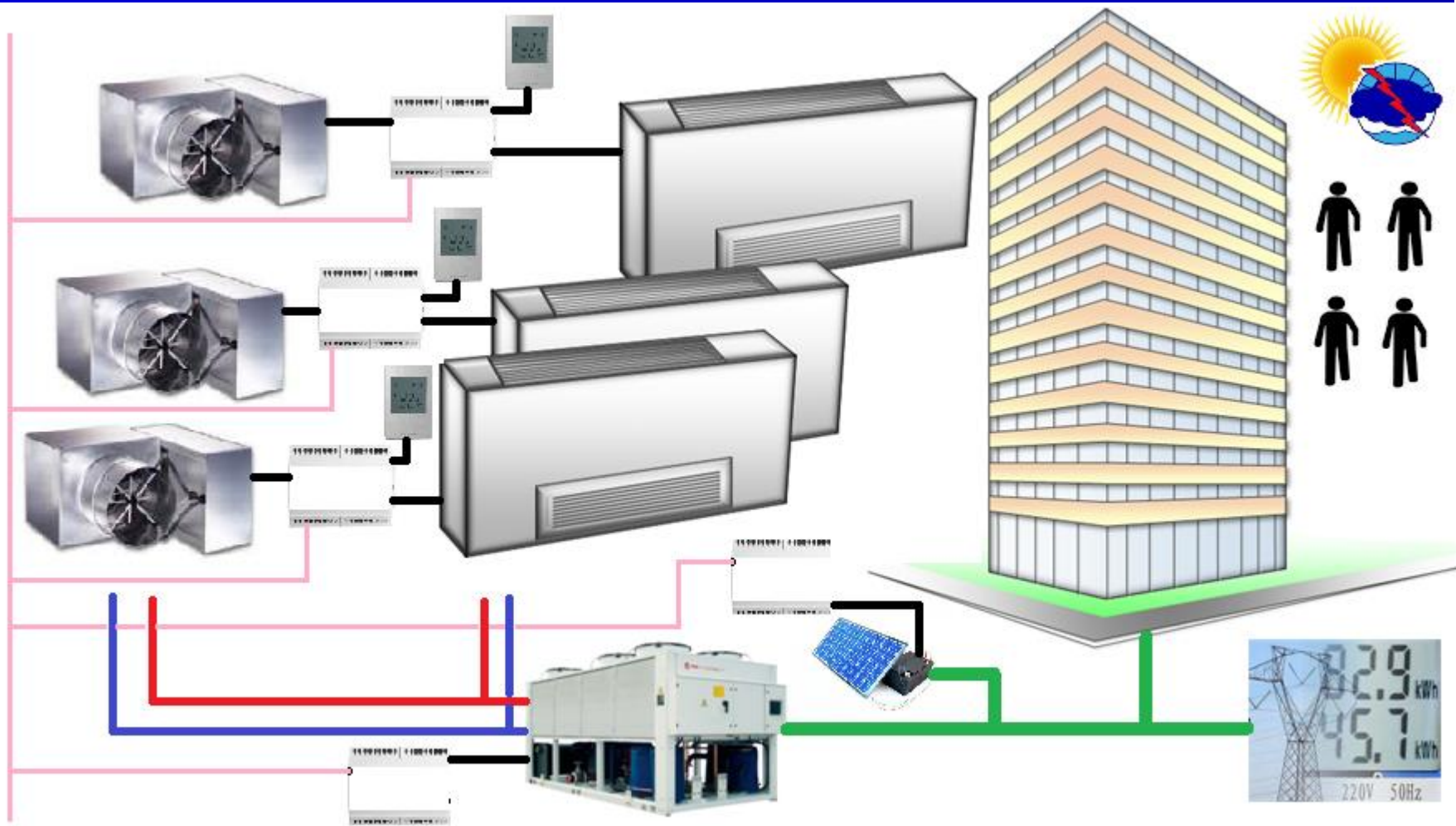
Povezane na energetske distribucijske mreže

Klasične komercijalne zgrade

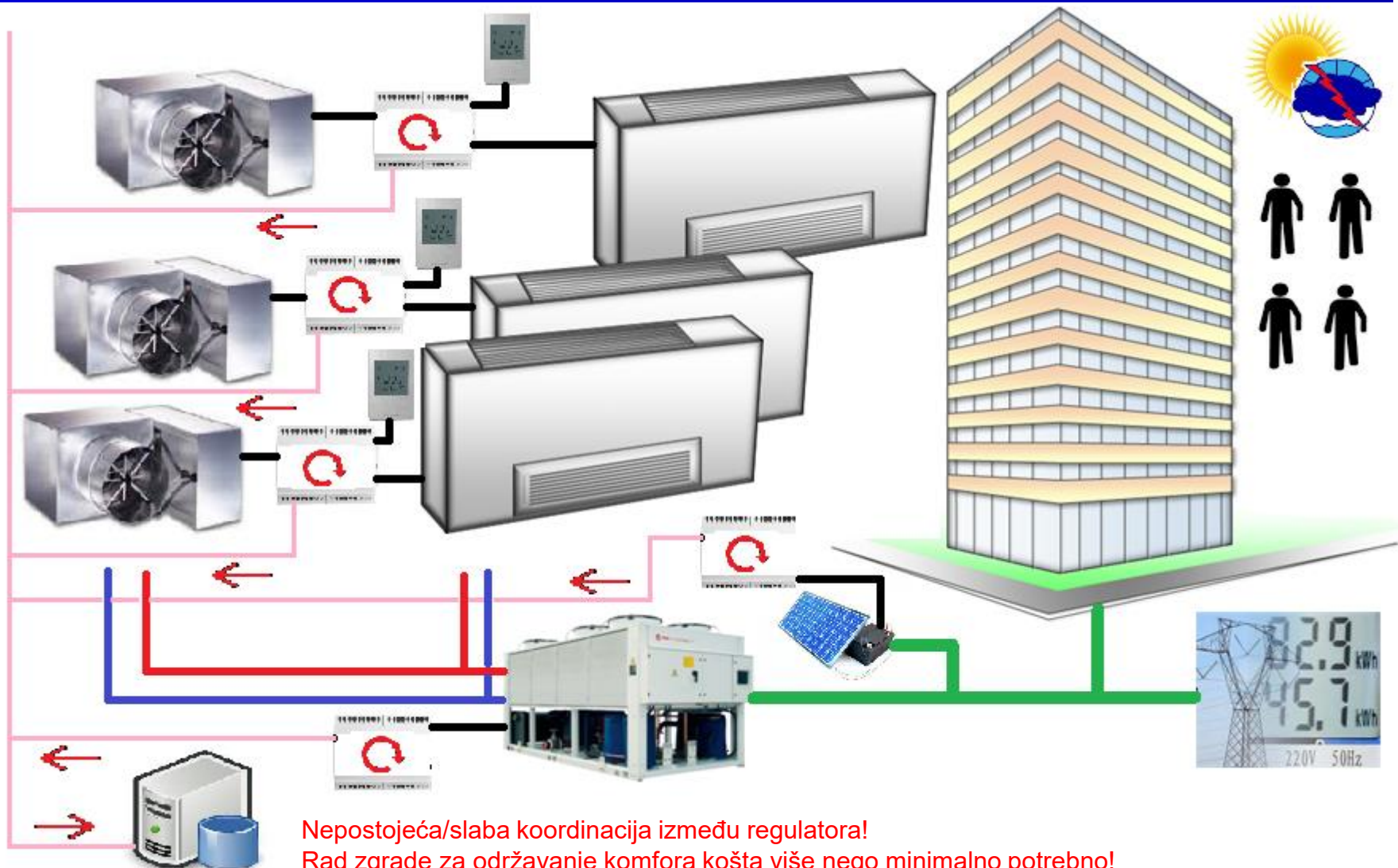


Lokalna proizvodnja energije i upravljiva pohrana

Klasične komercijalne zgrade



Klasične komercijalne zgrade



Nepostojeća/slaba koordinacija između regulatora!
Rad zgrade za održavanje komfora košta više nego minimalno potrebno!

IX. kolokvij HAZU i HRZZ, HAZU, 13. studenog 2017.

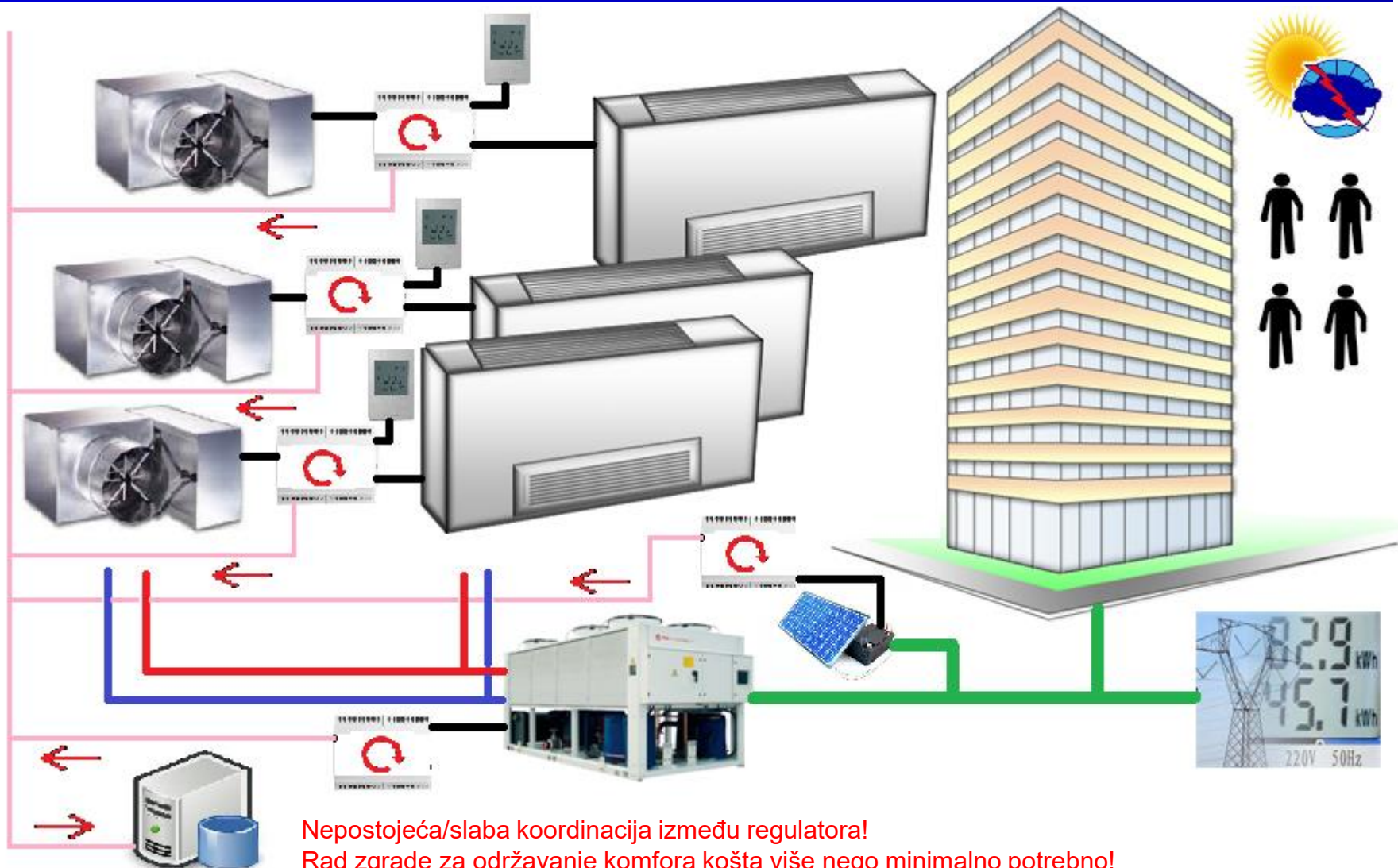
Primjer 1 – Predviđanje dozračenosti Sunca kod grijanja

- Bez koordinacije: Soba se zagrijava do trenutka kada se zbog skokovite promjene dozračenosti Sunca događa pregrijavanje i narušava komfor
→ nepotrebno potrošena energija grijanja
- S koordinacijom: Prediktivni regulator smanjuje/zaustavlja grijanje prije skokovite promjene dozračenosti i ostajemo cijelo vrijeme unutar ograničenja komfora
→ dobro iskorištena besplatna energija od Sunca

Primjer 2 – Vršna potrošnja

- Bez koordinacije: Hlađenje se uključuje u 7:00, rashladni elementi u svim zonama počinju hladiti istovremeno i rezultiraju velikom vršnom potrošnjom prema mreži
 - velika vršna potrošnja može značajno uvećati trošak energije za zgradu
- S koordinacijom: Rashladni elementi u zonama su koordinirani u povlačenju energije iz medija – izbjegnuta velika vršna potrošnja
 - snaga na mreži unutar zadanih ograničenja

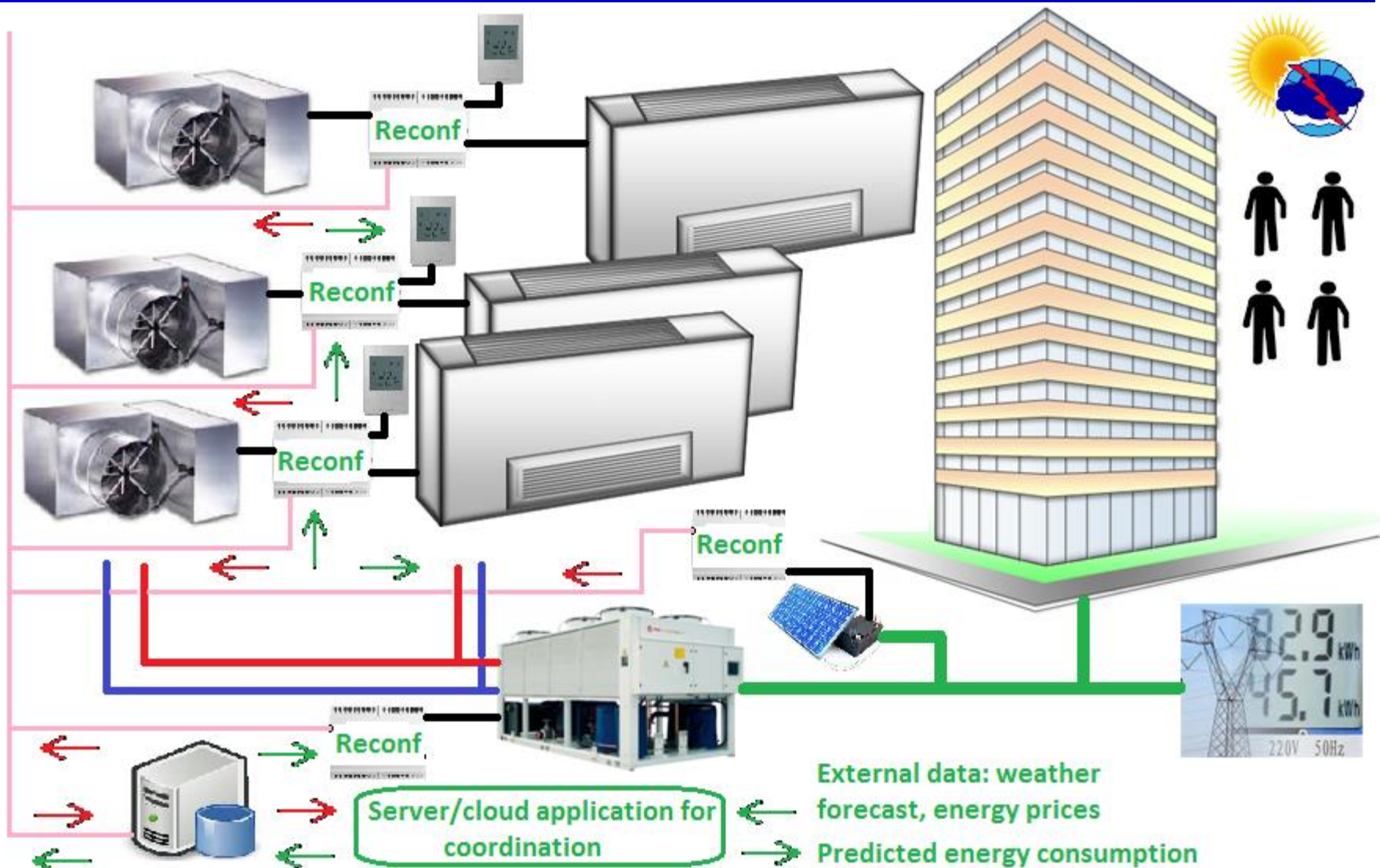
Klasična komercijalna zgrada



Nepostojeća/slaba koordinacija između regulatora!
Rad zgrade za održavanje komfora košta više nego minimalno potrebno!

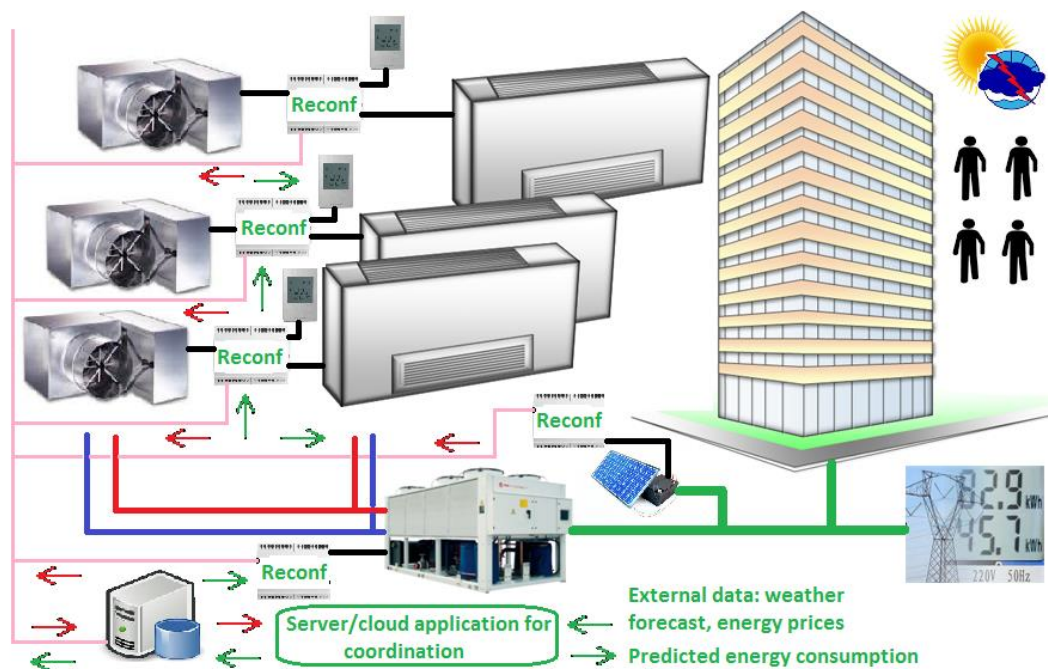
IX. kolokvij HAZU i HRZZ, HAZU, 13. studenog 2017.

Koordinacija zgrada i mreža (3)



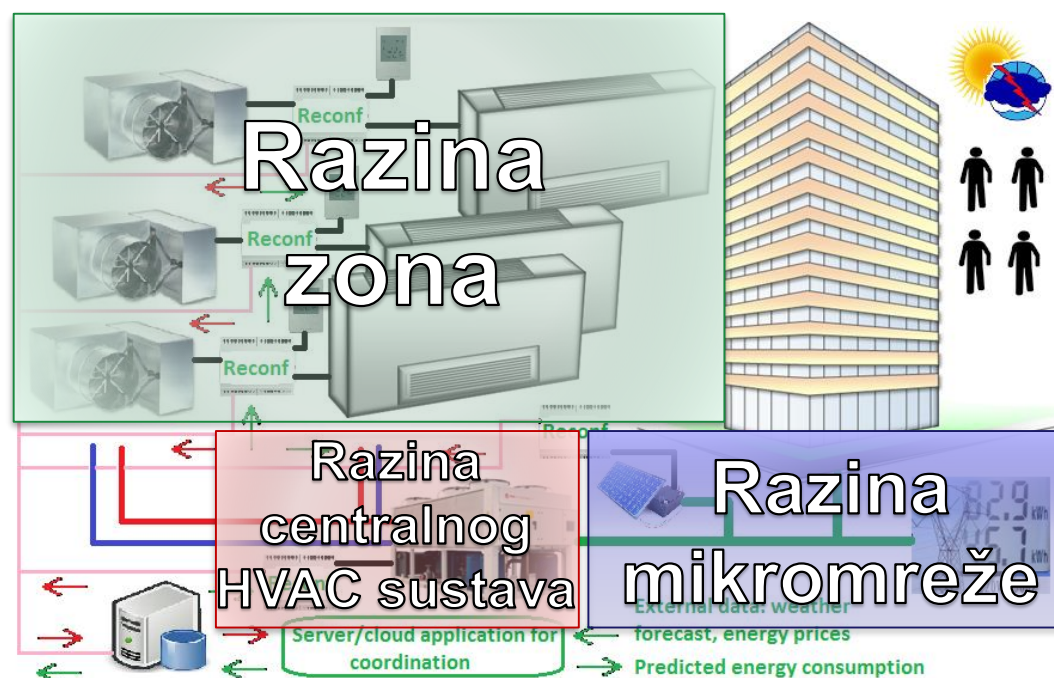
Koordinacija zgrada i mreža (4)

- Modularnost koordinacijske usluge
 - Različiti moduli za različite razine podsustava zgrade



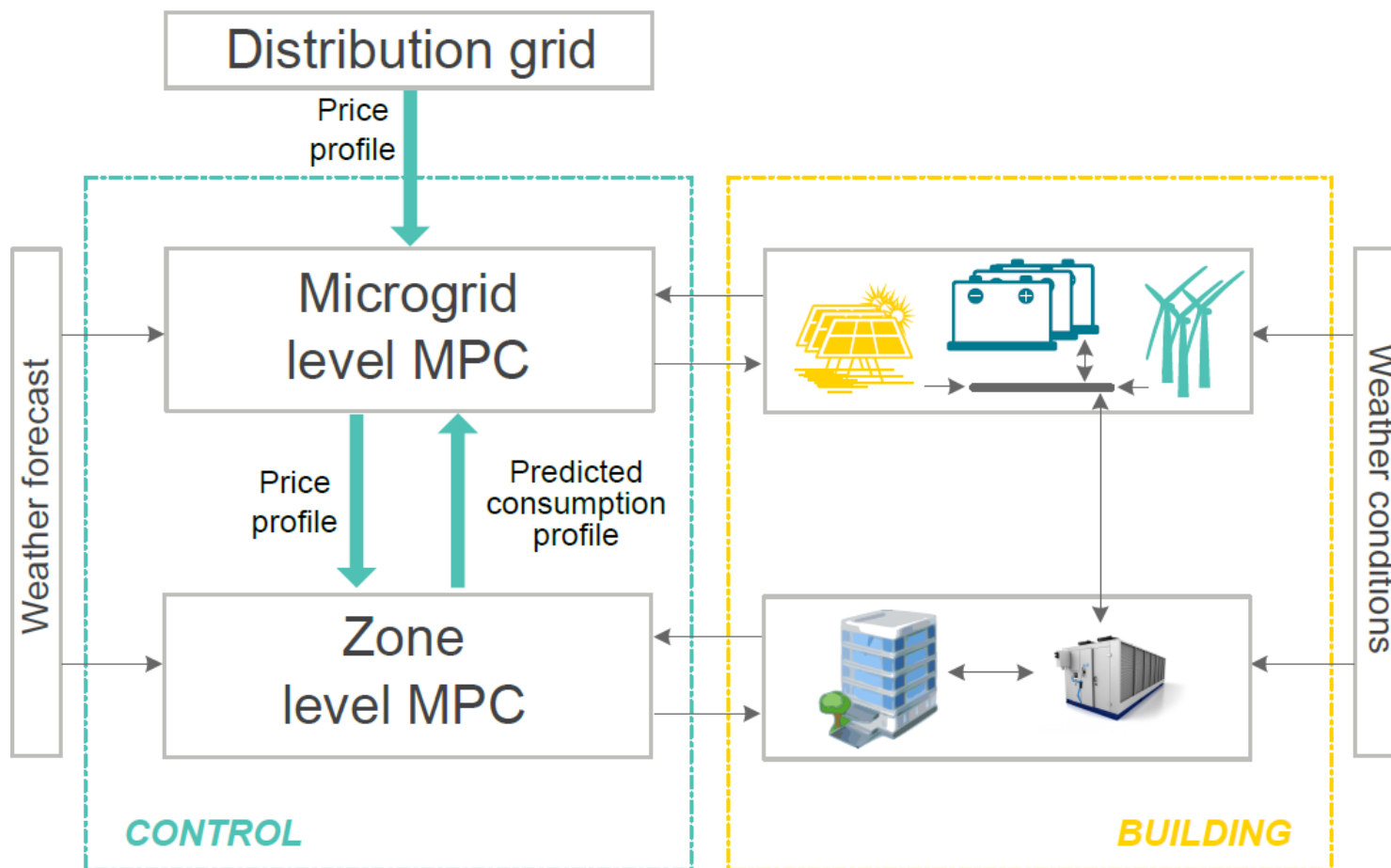
Koordinacija zgrada i mreža (5)

- Modularnost koordinacijske usluge
 - Različiti moduli za različite razine podsustava zgrade

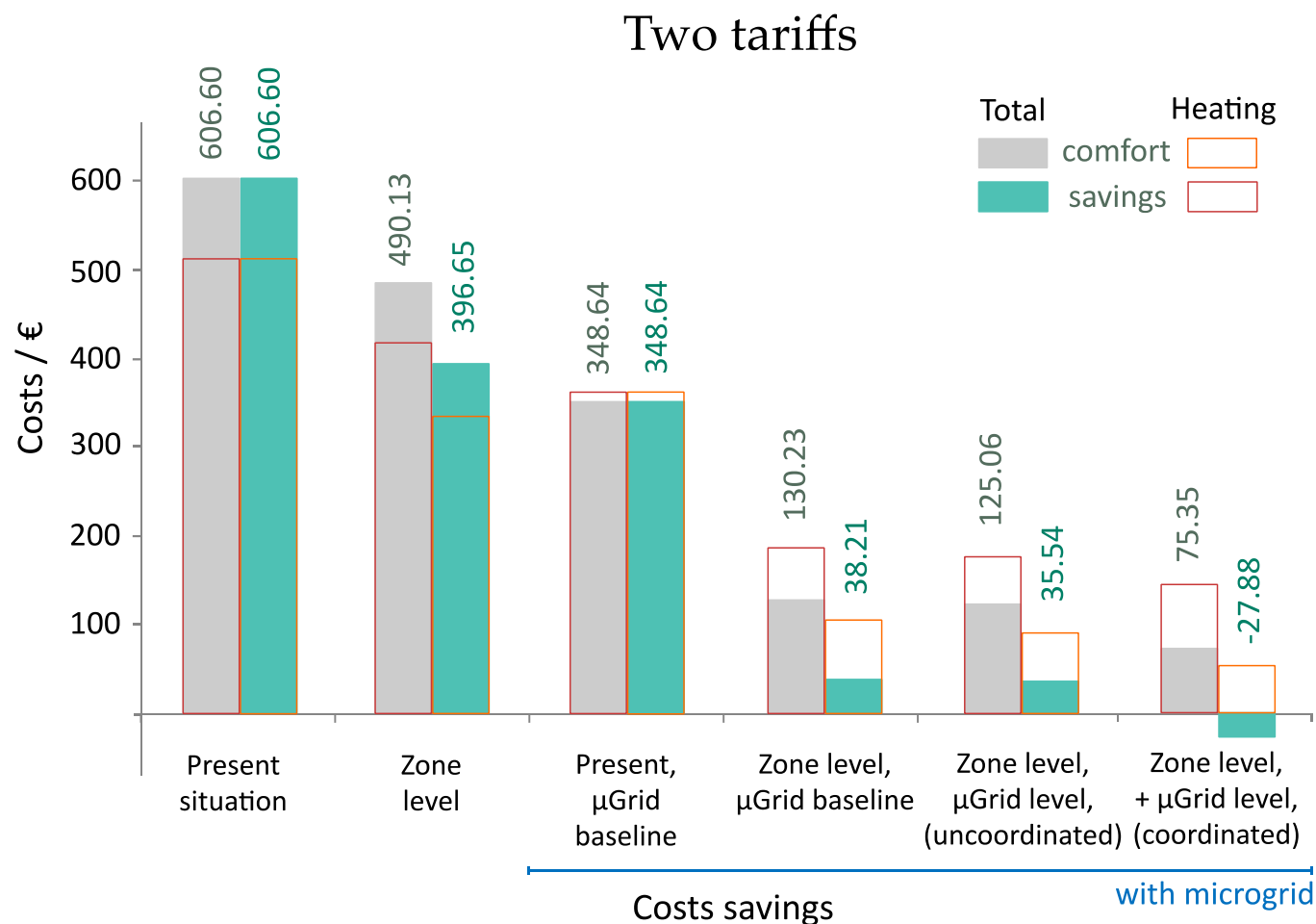


- Međusobno koordinirani moduli u bilo kojoj konfiguraciji

Interakcija sustava grijanja/hlađenja i mikromreže



Studija slučaja – kat neboderske zgrade FERa i mikromreža



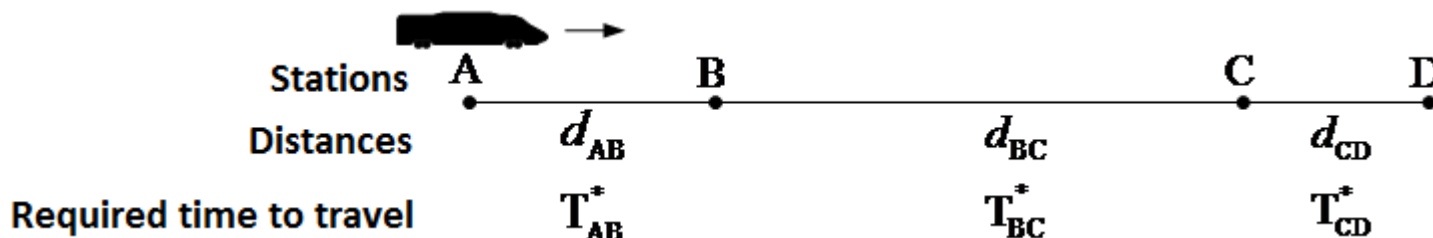
- 9. kat
- Vremenske prilike za cijelu 2014. godinu
- Trenutne komercijalne cijene električne energije

Lešić, Vinko; Martinčević, Anita; Vašak, Mario. **Modular energy cost optimization for buildings with integrated microgrid.** *Applied Energy*. 197 (2017); 14-28

IX. kolokvij HAZU i HRZZ, HAZU, 13. studenog 2017.

ŽELJEZNIČKI ELEKTROVUČNI SUSTAV KAO VELIKI POTROŠAČ

Problem energetske optimalne vožnje vlaka



- Kako po segmentima putovanja (AB ili BC ili CD) upravljati vučnom silom vlaka (ili savjetovati vozača o njoj) u stvarnom vremenu tako da:
 - Vlak sljedeću stanicu dosegne u željenom trenutku (i zaustavi se);
 - Potroši minimalnu moguću energiju za to putovanje; pritom
 - Uzimajući u obzir
 - aerodinamiku vlaka,
 - oblik trase,
 - dopušteni profil brzine na trasi,
 - ograničenja i efikasnost pogona vlaka...

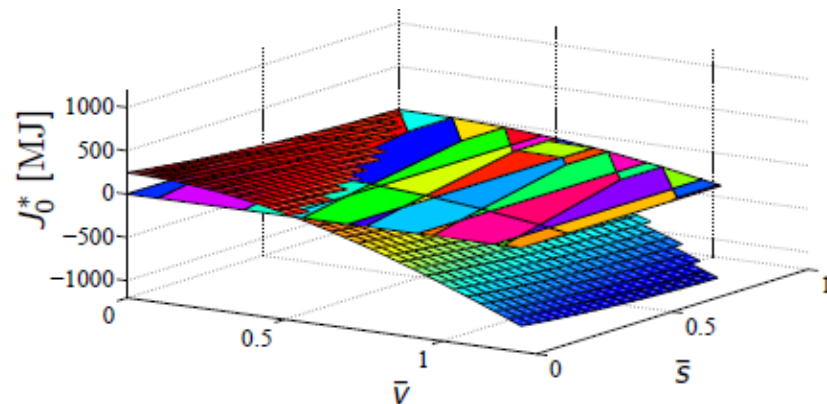
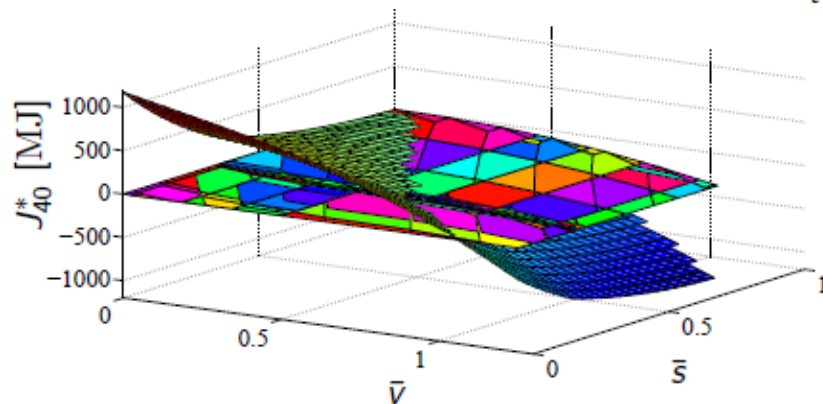
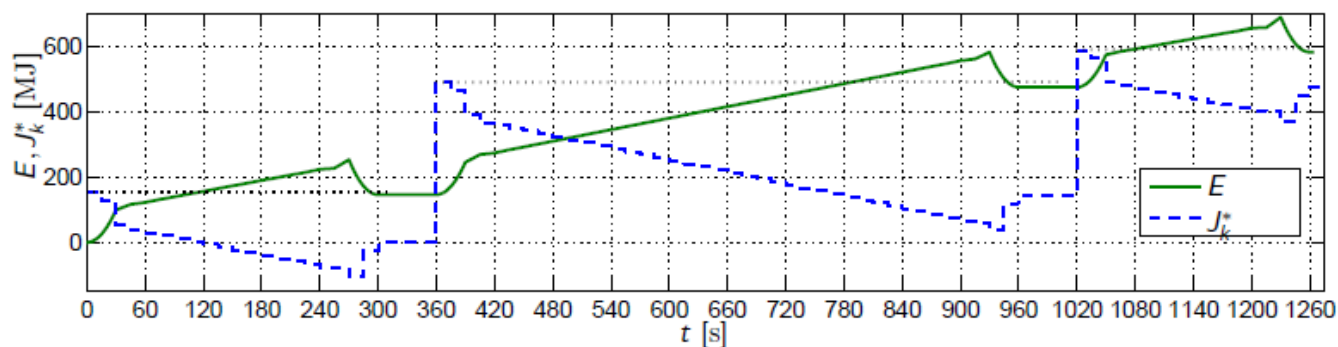
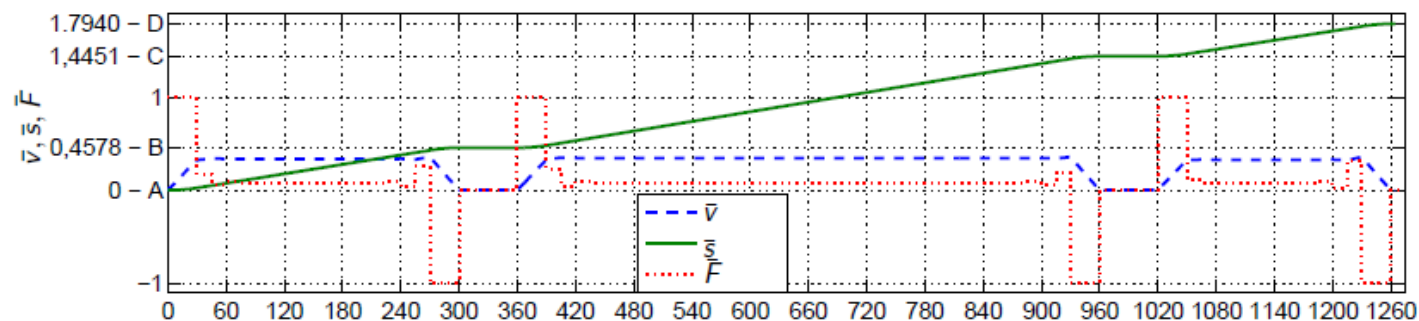
Rješenje (ECC 2009)

- Upravljački zakon po vučnoj sili proračuna se off-line za niz diskretnih masa vlaka m i željenih vremena dosizanja stanice T^* :

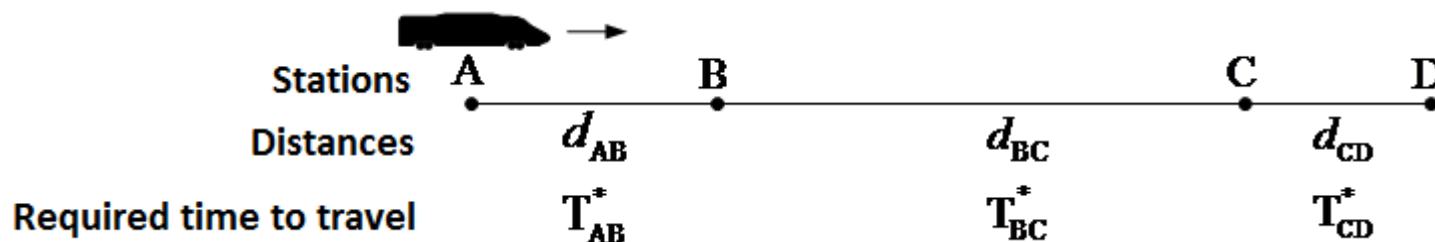
vučna sila $F = f_{T^*,m}$ (položaj na trasi s , trenutna brzina kretanja v)

- Za trenutno ustanovljene s , v i m , te željeni T^* pripadni optimalni F moguće je jednostavno on-line proračunati

Simulacijski rezultati (ECC 2009)



Vlak na trasi



Fiksna cijena energije c :

$$c \min_{F(t)} \int F(t) v(t) dt$$

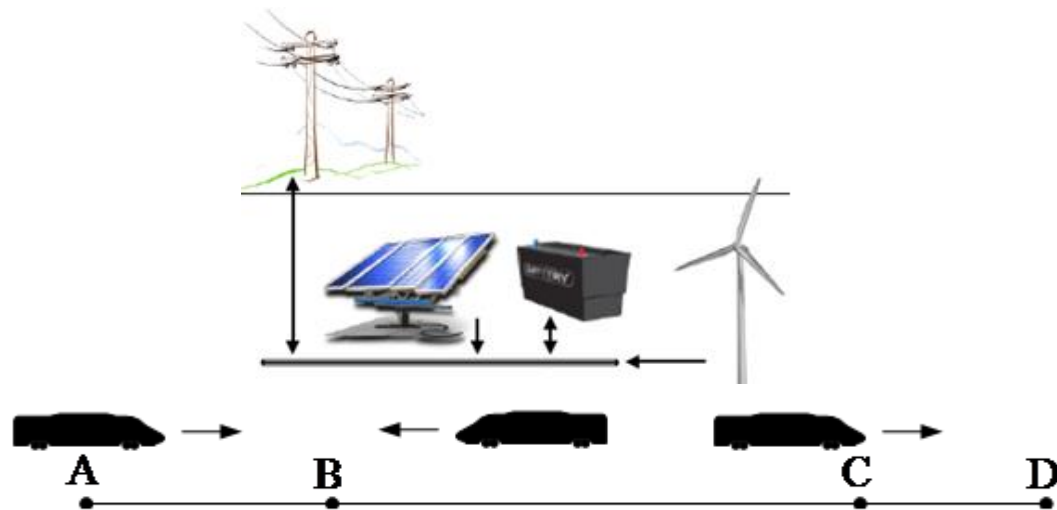
uvjeti na $F(t)$

Promjenjiva cijena energije $c(t)$ i
promjenjiva njena dostupnost:

$$\min_{F(t)} \int c(t) F(t) v(t) dt$$

uvjeti na $F(t)$ (uklj. dostupnost)

Koordinacija vlakova na ruti



Bez mikromrežne
infrastrukture:

S mikromrežnom
infrastrukturom:

$$\min_{F_1(t), \dots, F_i(t), \dots} \int c(t) \sum_i F_i(t) v_i(t) dt$$

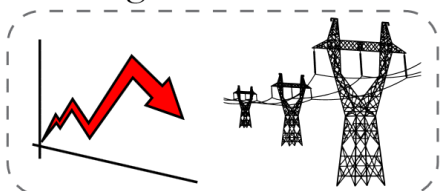
uvjeti na $F_i(t)$ (uklj. dostupnost)

$$\min_{F_1(t), \dots, F_i(t), \dots} J \left(\sum_i F_i(t) v_i(t) \right)$$

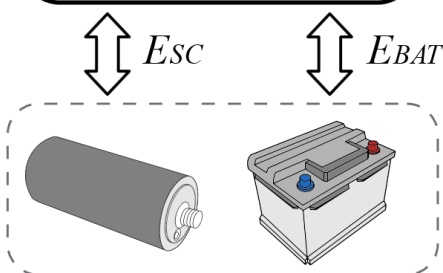
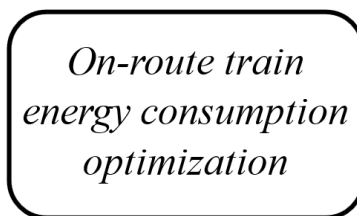
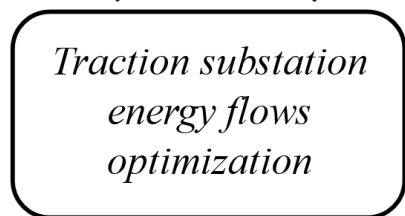
uvjeti na $F_i(t)$ (uklj. dostupnost)

Hijerarhijsko koordinirano upravljanje

Power grid 110 kV, 50 Hz



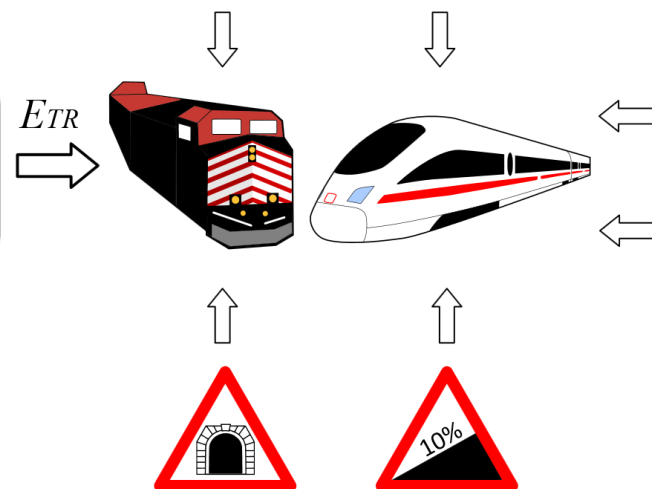
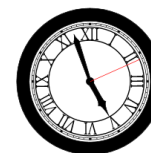
c E_G



Hybrid energy storage system

Timetable constraints

DOLAZAK	ARRIVEE	ARRIVAL	ANKUNFT
06:15	06:15	06:15	06:15
06:45	06:45	06:45	06:45
07:15	07:15	07:15	07:15
07:45	07:45	07:45	07:45
08:15	08:15	08:15	08:15
08:45	08:45	08:45	08:45
09:15	09:15	09:15	09:15
09:45	09:45	09:45	09:45
10:15	10:15	10:15	10:15
10:45	10:45	10:45	10:45
11:15	11:15	11:15	11:15



On-route speed and path constraint.

Inicijalni simulacijski scenarij

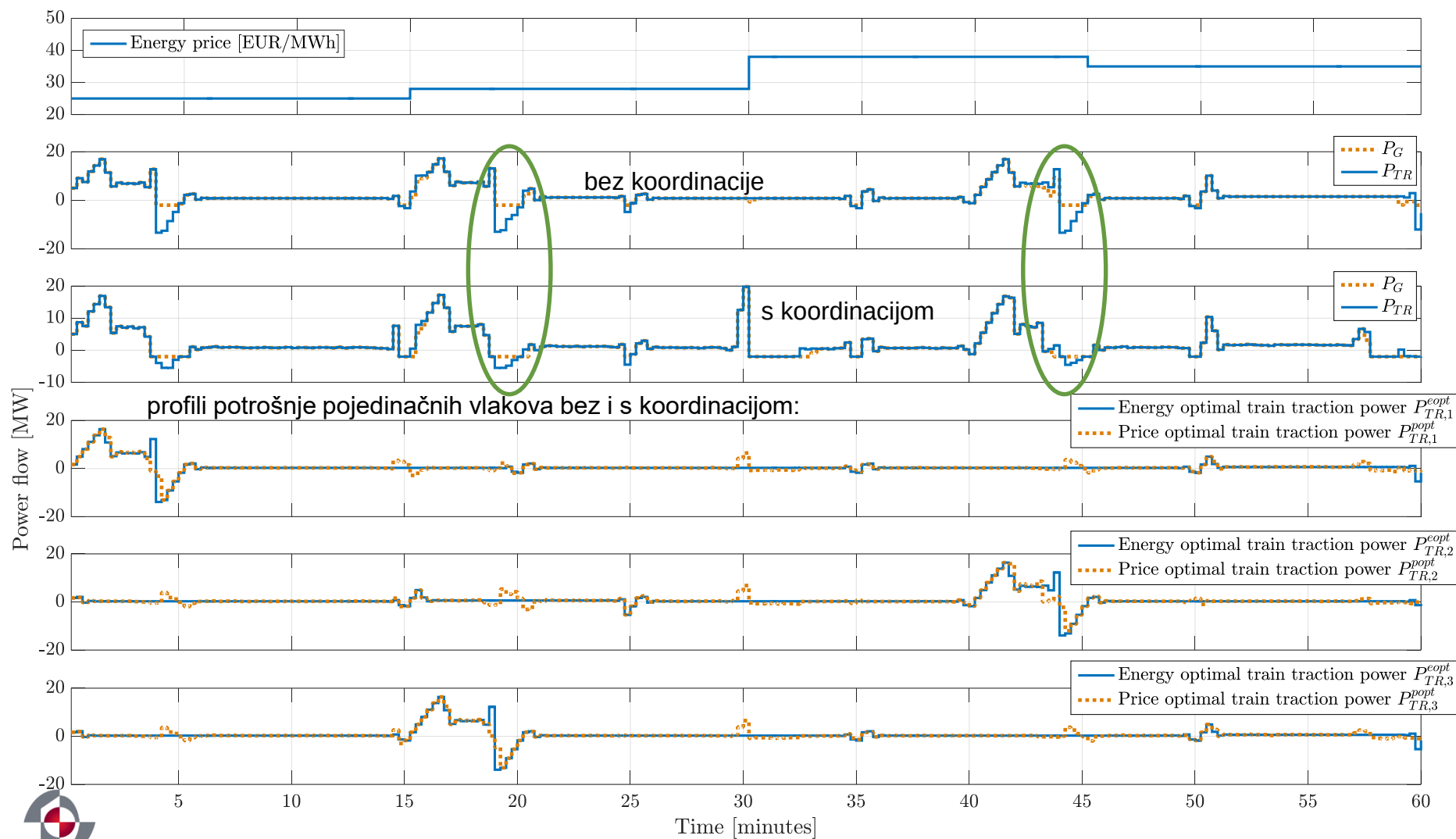
- Željeznička trasa sa 6 stanica, jednako razmaknutih (10 km) i 3 vlaka sa zadanim vremenima puta 5, 10 i 15 minuta između stanica
- EPEX cjenovni profil (4 različite cijene u jednom satu)
- Hibridni sustav pohrane (mikromreža)

Parameter	Battery storage	Supercapacitor
Capacity [kWh]	140	30
Charge/Discharge efficiency	0.8	0.95
Maximum SoC	1	1
Minimum SoC	0.1	0.1
Initial SoC	0.1	0.1

- **Uštede od mikromreže ~6 % i od hijerarhijske koordinacije ~14 % za ovaj inicijalni simulacijski scenarij**

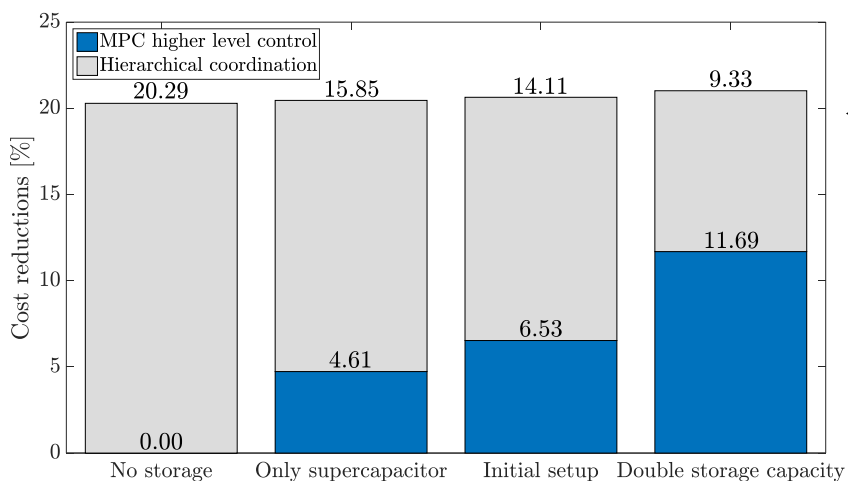
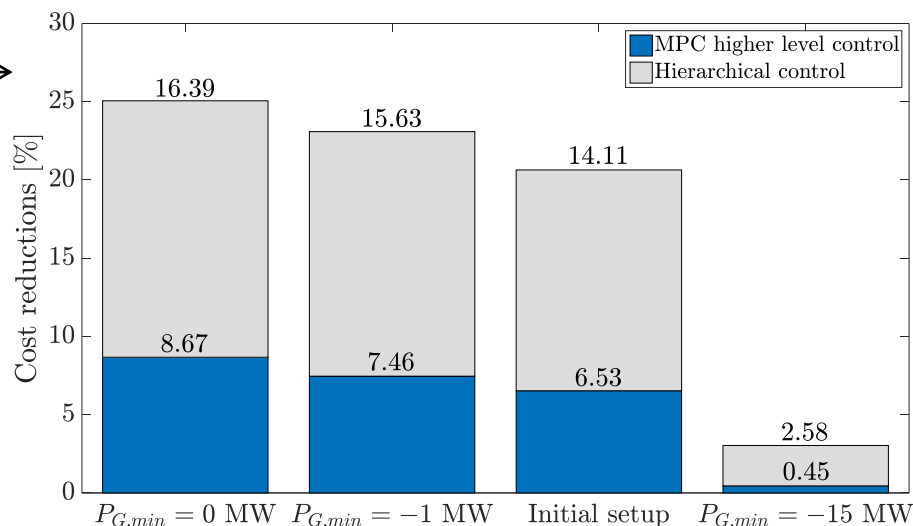
	Without microgrid	With microgrid	Hierarchically coordinated
Energy consumed [MWh]	35.497	33.4262	28.9936
Energy costs [€]	1095.52	1024.01	869.53
Improvement [%]	-	6.53%	20.63%

Rezultati ostvareni za inicijalni simulacijski scenarij



Simulacijski scenariji – Varijacije

- Kapacitet mreže za prihvāt → povratne energije:
 - Bolje redukcije troškova događaju se za konzervativnije mreže
 - Kada se sva rekuperirana energija može vratiti u mrežu, dobitak ostaje samo zbog fluktuacije cijena



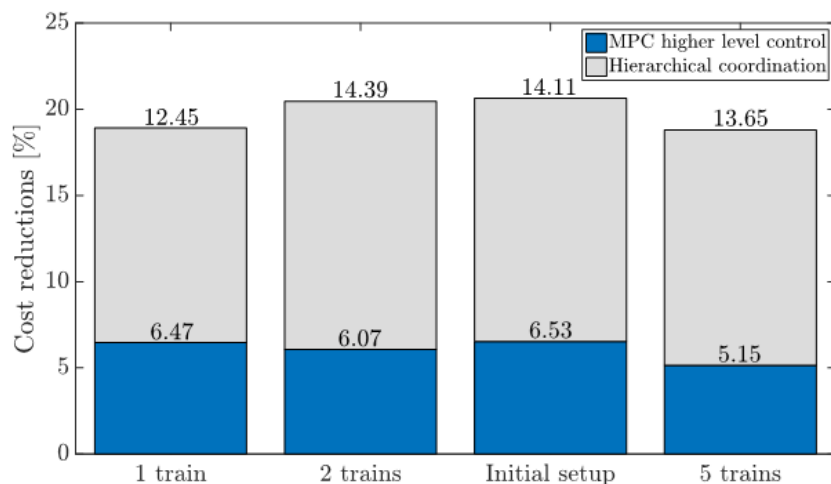
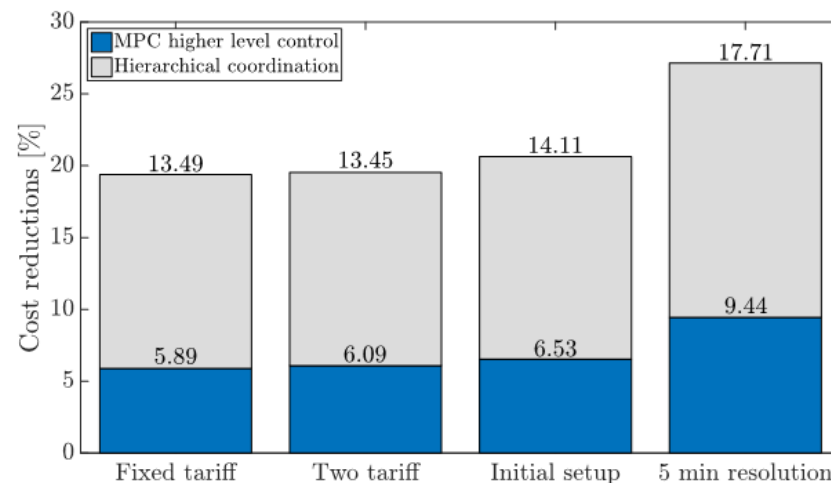
• Strukture mikromreže

- Veličina pohrane vrlo malo utječe na uštede pri koordiniranom radu
- Slučaj bez pohrane rezultirao je, zahvaljujući hijerarhijskoj koordinaciji, u uštedama koje su praktički identične onima za slučaj kada postoji pohrana →

hijerarhijska koordinacija može eliminirati potrebu za pohranom

Simulacijski scenariji – varijacije

- Tarife za energiju
 - Više promjena cijene (promjene na kraćem vremenskom razmaku) rezultira boljim uštedama



- Broj vlakova:

- Manji postotak ušteda za više vlakova
- **Veće uštede u apsolutnom iznosu za više vlakova**

KORIŠTENJE REZULTATA I DALJNI RAD

Smart Building – Smart Grid – Smart City

- Projekt **3Smart** financiran kroz Program transnacionalne suradnje Dunav (2017-2019)
 - 13 partnera iz 6 država, 5 suradnih partnera
 - FER je koordinator projekta
- Implementacija programskih modula za omogućavanje koordinacije kod zgrade i mreže
- Interakcija s mrežom
- Uspostava 5 pilota u 5 država
- Analiza zapreka u legislativi



<http://www.interreg-danube.eu/3smart>

Prediktivno upravljanje i autonomno trgovanje energijom u zgradi

- Istraživačko-razvojno-inovacijski projekt koji vodi tvrtka **Klimaoprema d.d.** (IRI projekt MINGO financiran iz strukturnih fondova) – odobren
- Implementacija koordinacijskih modula na razini upravljanja zonom i centralnim sustavom pripreme medija
 - povezivanje s kompaktnim upravljačkim uređajima tvrtke Klimaoprema, velik spektar konfiguracija zone
- Trgovanje energijom bez posrednika (peer-to-peer) potpomognuto prediktivnim upravljanjem

Centar kompetencija za napredno gospodarenje energijom u zgradama i infrastrukturi

- Podnesena prijava na natječaj MINGO za uspostavu Centara kompetencija (**CEKOM GEZI**)
- Prijavitelj **Inovacijski centar Nikola Tesla**, FER je jedan od 5 istraživačkih partnera, 17 partnera su poduzetnici (mali/srednji/veliki)
- Poduzetnici razvijaju kompatibilno sklopovlje te upravljačko-komunikacijsku platformu
- Tematska područja: 1. Zgrade, 2. Flote električnih vozila, 3. Elektrodistribucija, 4. Distribucija topline, 5. Distribucija vode i plina

“Željeznička” trasa korištenja rezultata

- Rezultati pokazuju i u ovom segmentu velik potencijal i moguće značajne uštede
- Još nije koncipiran daljnji projekt, jedan dio rezultata bit će dalje razrađen u 3Smart
 - pojačanje koordinacije zgrade-mreža kroz koordinaciju mreža i infrastrukture
- Rezultati će biti iskomunicirani s industrijskim savjetodavnim odborom 3CON projekta (poduzeća u sastavu HŽ holdinga)

Zahvala

Predstavljeni istraživački rezultati dobiveni su unutar projekata **3CON – Hijerarhijska konsolidacija velikih potrošača temeljena na upravljanju za integraciju u napredne mreže** (projekt financira Hrvatska zaklada za znanost u iznosu 1.000.000,00 HRK) i **3Smart – Smart Building – Smart Grid – Smart City** (projekt sufinancira Europska unija putem Europskog fonda za regionalni razvoj i IPA fondova u iznosu od 3.222.641,85 EUR kroz Program transnacionalne suradnje Dunav).

WEB STRANICA PROJEKTA 3CON

<http://www.fer.unizg.hr/3con>

WEB STRANICA PROJEKTA 3SMART

<http://www.interreg-danube.eu/3smart>

Izjava o isključenju odgovornosti

Sadržaj ove prezentacije isključiva je odgovornost autora i ona ne odražava nužno mišljenje Europske unije ili Hrvatske zaklade za znanost.