MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE UNIVERSITATEA "VALAHIA" DIN TÂRGOVIȘTE IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI Domeniul: Inginerie Electrică

EFICIENTIZARE ENERGETICĂ ÎN INDUSTRIA APEI

- REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT -

CONDUCĂTOR DE DOCTORAT: Prof.univ.dr.ing. Horia Andrei

DOCTORAND : Drd.ing.Cristian Andrei BADEA

TÂRGOVIȘTE 2018

Cuprins

Capitolul I: Introducere 5

- 1.1. Context 5
- 1.2. Obiectivul lucrării 6

Capitolul II: Tehnologia tratării apelor uzate 7

2.1. Istoricul Tratării Apelor Uzate 7

2.2. Prezentarea fluxului tehnologic al unei uzine tipice pentru tratarea apelor uzate 8

Capitolul III: Sisteme fotovoltaice 9

- 3.1. Calculul unui sistem fotovoltaic 9
- 3.2. Alegerea bateriilor **13**
- 3.3. Alegerea cablurilor și protecțiilor **13**

Capitolul IV: Eficientizarea energetică a stațiilor de epurare mici folosind instalații fotovoltaice 14

- 4.1. Introducere 14
- 4.2. Evaluarea puterii instalate în sisteme fotovoltaice 15
- 4.3. Evaluarea populației conectate la stațiile de epurare 15

4.4 Evaluarea necesarului de energie și a producției de energie din sistemul fotovoltaic 17

Capitolul V: Studii de caz. Stațiile de epurare Luduș și Iernut 20

- 5.1. Descrierea tehnologică a stațiilor de epurare Luduș și lernut 20
- 5.2. Alimentarea cu energie electrică a stațiilor de epurare 21
- 5.3. Sistemul de achiziție de date și control 22
- 5.4. Analiza parametrilor electrici și a consumurilor energetice 23

Capitolul VI: Analiza ciclului de viață al instalației fotovoltaice montate în stația de epurare a apelor uzate 29

- 6.1. Procesul tehnologic și consumul de energie al stației de epurare 29
- 6.2. Calculul sistemului fotovoltaic și a "matching index" 31
- 6.3. Analiza ciclului de viață 33
- 6.4. Analiza costului ciclului de viață 35

Capitolul VII: Concluzii. Contribuții originale și perspective de dezvoltare a cercetarilor prezentate în teza de doctorat 38

- 7.1. Concluzii 38
- 7.2. Contribuții originale 39
- 7.3. Perspective de dezvoltare 40

Bibliografie selectivă (din totalul de 52 de lucrări) 42

Publicații 44

Capitolul I: Introducere

Cuvinte cheie: statie de epurare a apelor uzate, sisteme fotovoltaice, resurse regenerabile de energie, index de impact, analiza ciclului de viata, costul nivelat al energiei, dinamica folosirii infrastructurii, ciclu de viata, amplasarea modulelor fotovoltaice

1.1. Context

Deteriorarea resurselor de apă, ca urmare a poluării produse de urbanizarea accelerată și de parcurile industriale, face necesară inovarea în domeniul tratării apelor, atât la nivel tehnologic căt și la nivel economic.

Stațiile de tratare a apelor uzate (SEAU) sunt instalații industriale menite să depolueze apa folosită de o comunitate umană înainte de a fi returnată în mediul natural, pentru a preveni efectele negative asupra mediului, cum ar fi eutrofizarea apei.

Dezvoltarea surselor regenerabile de energie (SRE) găsește o aplicație în stațiile de epurare a apelor reziduale, pentru a reduce consumul de energie din rețea și a reduce impactul asupra mediului.

Astăzi, România contribuie la creșterea pe plan mondial a utilizării SRE. Printre acestea, sursele fotovoltaice (PV) au crescut în anul 2015 până la puterea instalată de 148 MW și, în conformitate cu directivele UE și scenariile naționale, până în anul 2035 vor crește până la 490 MW.

1.2. Obiectivul lucrării

În această teză propunem o metodologie de îmbunătățire a eficienței energetice a unei stații de epurare, din trei puncte de vedere: al costurilor, impactului asupra mediului și al impactului asupra rețelei de energie electrică.

Prima etapă constă în analiza eficienței energetice a unei stații de epurare a apelor uzate.

Pentru realizarea acestui obiectiv se pornește de la analiza numărului de utilizatori conectați la infrastructura de canalizare, care generează în final debitul de apă care trebuie tratat.

În urma acestei analize este propus un model matematic care descrie necesarul de energie electrică al stației de epurare în raport cu perioada de viață a instalației.

În continuare este propusă o metodă de instalare a modulelor fotovoltaice în stația de epurare, folosind spațiul disponibil cât mai eficient.

Sunt studiate diferite configurații ale instalației fotovoltaice, on-grid, offgrid sau hibridă.

În final este studiat impactul instalației fotovoltaice propuse din punct de vedere al economiei în bugetul pentru energie al stației de epurare.

De asemenea este studiat impactul de mediu folosind metodologia "life cycle assessement".

Impactul asupra sistemului de distribuție a energiei electrice este studiat folosind o metodologie de tip "matching index".

Întreaga metodologie este exemplificată pe două studii de caz, reprezentate de stațiile de epurare Luduș și Iernut, din județul Mureș.

Capitolul II: Tehnologia tratării apelor uzate

2.1. Istoricul Tratării Apelor Uzate

O investigație a bibliografiei relevă faptul că procesul industrial de tratare a apelor uzate în bioreactoare cu nămol activat are o istorie de mai mult de 100 de ani. [5]

Descoperitorii acestui proces sunt Eduard Ardern si W.T. Locket, ingineri care efectuau cercetări asupra apelor uzate la laboratorul *Davyhulme Sewage Works* pentru Manchester Corporation Rivers Department.

Prin aerarea conținutului recipientelor cu ape uzate realizau amestecarea completă a conținutului și nitrificarea acestuia. În urma acestor experimente au obținut nitrificarea completă a apei și au observat că pe măsură ce introduceau noi mostre și nămolul activat se acumula în sticle, procesul se accelera, noile mostre fiind nitrificate mai rapid.

În 1982, International Association on Water Pollution Research and Control (IAWPRC) a înființat Grupul pentru Modelarea Matematică pentru Proiectarea și Operarea Procesului cu Nămol Activat. La acea dată modelarea procesului era deja studiată de 15 ani, cu precădere la Universitatea din Cape Town, Africa de Sud, sub conducerea profesorului G.v.R. Marais.

Scopul acestui prim grup a fost să creeze o platformă care ar fi putut să fie folosită pentru dezvoltarea viitoare a modelelor pentru eliminarea azotului prin procesul cu nămol activat.

2.2. Prezentarea fluxului tehnologic al unei uzine tipice pentru tratarea apelor uzate

În mod tipic, o uzină de tratare a apei uzate include 2 procese principale: procesul de tratare a apei și procesul de tratare a nămolului rezultat.



- 1. Grătare mecanice
- 2. Deznisipator, separator de grăsimi
- 3. Stație de pompare
- 4. Decantor primar
- 5. Bioreactor
- 6. Decantor secundar
- 7. Îngroșător mecanic de nămol
- 8. Fermentator anaerob de nămol
- 9. Deshidratarea nămolului
- 10. Unitate de cogenerare
- 11. Tablou electric
- 12. Rețea publică de electricitate

Figura 1: Fluxul tehnologic tipic al unei uzine de tratare a apelor uzate

Fiecare dintre aceste procese are mai multe componente descrise în paragrafele următoare.

În Figura 1 este prezentat fluxul tehnologic tipic al unei uzine de tratare a apelor uzate. Se remarcă cele două ramuri principale: linia de tratare a apei, respectiv linia de tratare a nămolului.

Capitolul III: Sisteme fotovoltaice

3.1. Calculul unui sistem fotovoltaic

3.1.1. Principii generale

Un sistem fotovoltaic este un sistem capabil să transforme energia radiației solare in energie electrică.

Conform [6], acesta este alcătuit din următoarele componente principale:

- Modulele fotovoltaice
- Invertoarele pentru transformarea curentului continuu în curent alternativ
- Controllere de încărcare
- Baterii pentru stocarea energiei
- Cabluri electrice pentru transportul energiei
- Protecții electrice

Dacă sistemul este necuplat la rețeaua publică de energie atunci el se numește sistem off-grid.

Dacă sistemul este cuplat la rețeaua publică de energie atunci el se numește sistem *on-grid*. În acest caz bateriile si controllerele de încărcare lipsesc din instalație.

Sistemele pot fi hibride, adică cuplate la rețeaua publică de electricitate, dar având și baterii de stocare.

3.1.2. Stabilirea necesarului de energie al consumatorului

Pentru a stabili necesarul de energie se face analiza puterilor absorbite de consumatorii instalați la locul de consum, ținându-se cont și de coeficientul de simultaneitate.

În cazul sistemelor fotovoltaice se ține cont și de tipul de utilizare al sistemului:

- Utilizare continuă
- Utilizare periodică regulată
- Utilizare periodică neregulată

3.1.3. Evaluarea locației din punct de vedere al iradierii luminoase

Iluminarea variază în funcție de regiunea geografică și perioada din an.

Dacă sistemul fotovoltaic proiectat este utilizat pe întreaga perioadă a anului atunci trebuie luată în considerare luna cu radiația solară cea mai scăzută. [6]

Hărțile meteorologice furnizează datele necesare despre iradiere.

De asemenea sunt disponibile aplicații software pentru simularea producției de energie a sistemelor fotovoltaice în funcție de datele meteorologice și geografice.

3.1.4. Alegerea modulelor fotovoltaice

O celulă fotovoltaică este o o joncțiune semiconductoare PN, făcută de obicei din siliciu sau materiale polimerice semiconductoare.

Celulele fotovoltaice produc curent continuu atunci când sunt expuse la lumina soarelui.

O grupare de mai multe celule alcătuiește un modul fotovoltaic.

Modulele fotovoltaice sunt legate între ele în grupări serie și paralel pentru a alcătui cu sistem fotovoltaic.

Curentul de scurtcircuit (I_{sc}), curentul la puterea maximă (I_{mp}) și puterea maximă (P_{mp}) la o anumită valoare a iradierii pot fi translatate pentru a afla valorile acestor parametri la o altă valoare a iradierii:

$$I_{sc2} = I_{sc1} \times \frac{E_2}{E_1}$$

$$I_{mp2} = I_{mp1} \times \frac{E_2}{E_1}$$

$$P_{mp2} = P_{mp1} \times \frac{E_2}{E_1}$$

unde I_{sc1} [A] – valoarea curentului de scurt circuit la iradierea E_1 [W/m²], I_{sc2} [A] – valoarea curentului de scurt circuit la iradierea E_2 [W/m²], P_{mp1} [W] – valoarea punctului de putere maxima la iradierea E_1 [W/m²], P_{mp2} [W] – valoarea punctului de puere maxima la iradierea E_2 [W/m²].

La proiectarea unui sistem fotovoltaic se face o corecție a valorii tensiunii de deschidere a circuitului și a tensiunii la punctul maxim de putere folosind următoarele ecuații.

$$V_{OC1} = V_{OC} - \left[-Tc \times \Delta T \times V_{OC} \right]$$

5

 $V_{MPP1} = V_{MPP} + \left[-Tc \times \Delta T \times V_{MPP}\right]$

unde V_{OC1} - tensiunea de mers în gol a circuitului la temperatura ambientală minimă care se poate atinge la locul de instalare, V_{OC} - tensiunea de mers în gol a circuitului la temperatura standard de test a modulului fotovoltaic conform fișei de date, V_{MPP1} - tensiunea la punctul maxim de putere la temperatura ambientală maximă care se poate atinge la locul de instalare, V_{MPP} - tensiunea la punctul maxim de putere la temperatura ambientală care se poate atinge la locul de instalare, V_{MPP} - tensiunea la punctul maxim de putere la temperatura standard de test a modulului fotovoltaic conform fișei de date, Tc - factorul de corectie cu temperatura, conform fișei de date a modulului fotovoltaic, iar ΔT – diferența de temperatură între temperatura standard de test și temperatura pentru proiectare.

Înserierea modulelor fotovoltaice duce la însumarea tensiunilor. Curentul debitat de șirul fotovoltaic este egal cu curentul debitat de un singur modul.

$$V_{sir} = V_1 + V_2 + \dots + V_n = V \times n \tag{6}$$

 $I_{sir} = I_1 = I_2 = \dots = I_n \tag{7}$

Șirurile de module fotovoltaice se leagă în paralel pentru a forma un generator fotovoltaic.

În acest caz curentul generatorul este egal cu suma curenților șirurilor, iar tensiunea este egală cu tensiunea fiecărui șir.

$$V_{paralel} = V_1 = V_2 = \dots = V_n$$

 $I_{paralel} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$

3.1.5. Alegerea invertoarelor și a controllerelor de încărcare

9

Un generator fotovoltaic produce curent continuu.

Cel mai adesea, consumatorii folosesc curent alternativ. Prin urmare este necesară introducerea în circuit a unui invertor.



Figura 2 : Schema electrica de principiu a unui invertor

În funcție de algoritmul de control, controllerele se clasifică în controllere cu modulație în lungimea impulsului, sau cu algoritm "maximum power point tracking" (MPPT). Cele mai folosite sunt cele cu MPPT.

3.2. Alegerea bateriilor

Pentru alegerea bateriilor se tine cont de cantitatea de energie care trebuie stocată, tipul de alimentare de rezervă și tipul de baterii folosite.

3.3. Alegerea cablurilor și protecțiilor

Cablurile pentru sisteme fotovoltaice sunt proiectate să reziste la condiții speciale de mediu astfel încât durata de viață a lor să fie de peste 30 de ani.

Capitolul IV: Eficientizarea energetică a stațiilor de epurare mici folosind instalații fotovoltaice

4.1. Introducere

În acest capitol propunem o metodologie de eficientizare energetică bazată pe trei componente:

- Prognozarea regimului de funcționare al uzinei pe parcursul ciclului de viață, folosind un model matematic
- Analiza necesarului energetic tehnologic pe parcursul ciclului de viață
- Estimarea spațiului maxim disponibil pentru instalarea modulelor fotovoltaice, pentru a produce energie pentru nevoile interne ale uzinei

Pentru o infrastructură nouă, prognozarea regimului de funcționare se poate face folosind un model matematic simplu pentru a prezice rata cu care o populație se va conecta la aceasta.

Dată fiind prognoza de populație pentru o perioadă de timp, pentru localitatea studiată, conform *Institutului Național de Statistică (INS)*, se poate folosi un model de tip *creștere logistică* pentru a prezice rata cu care se populația se va conecta la infrastructură.

Funcția logistică are următoarea formă:

 $\frac{dN}{dt} = \boldsymbol{b} \cdot \boldsymbol{N} \left(\boldsymbol{1} - \frac{N}{c} \right)$

După stabilirea unui model de creștere pentru a descrie ciclul de viață al stației de epurare, acesta este împărțit în patru perioade, în conformitate cu procentul de populație conectată la infrastructură relativ la capacitatea maximă a stației: [0%;25%], [25%;50%], [50%;75%], [75%;100%].

A treia componentă a strategiei de eficientizare a fost să determinăm spațiul maxim disponibil în interiorul stației de epurare pentru a instala

module fotovoltaice. Acest lucru a fost realizat analizând planul de amplasare al stației.

4.2. Evaluarea puterii instalate în sisteme fotovoltaice

SEAU Bragadiru are o suprafață totală disponibilă pentru instalarea modulelor fotovoltaice de 1236 mp, repartizată pe bazinele biologice și acoperișurile clădirilor.

Pe această suprafață se pot instala 260 module fotovoltaice, având fiecare cât 250 Wp – putere maximă instalată. Prin urmare puterea maximă instalată în această stație va fi de 65 kWp.

Conform evaluării făcute cu 2 programe de proiectare a instalațiilor fotovoltaice (PVGIS și PVSyst) energia specifică produsă de 1kWp instalat în sisteme fotovoltaice este de 1267 kWh.an/kWp.

În primul an, instalația fotovoltaică amplasată în această stație va produce 82.355 kWh.

4.3. Evaluarea populației conectate la stațiile de epurare

Estimarea populației conectate s-a făcut folosind o funcție de tip *creștere logistică*.

Funcția logistică are următoarea formă:

 $\mathbf{P}(\mathbf{t}) = \frac{\mathbf{c}}{1 + a.e^{-bt}}$

10

Parametrul *c* reprezintă populația maximă. Parametrul *a* reprezintă deplasarea. Parametrul *b* reprezintă rata de creștere.

	Valoare			
Parametru	Domnești	Bragadiru		
С	5800	10800		
b	0,2	0,3		
а	7	10		

Valorile acestor paramtri pot fi văzute în Tabelul .

În Figura 3 poate fi vizualizată valoarea procentuale față de capacitatea nominală a stației în procente.



Figura 3: Evoluția procentuală a populației branșate la sistemul de canalizare față de valoarea maximă admisă

Tabelul 1: Valorile parametrilor pentru funcția creștere logistică

4.4 Evaluarea necesarului de energie și a producției de energie din sistemul fotovoltaic

Din calculul tehnologic al stației a fost evaluat necesarul de energie la capacitate nominală.

Ulterior au fost făcute 4 scenarii de funcționare a stației:

- Proporție de branşament 75%- 100% din capacitatea maximă a stației în locuitori echivalenți
- Proporție de branşament 50%- 75% din capacitatea maximă a stației în locuitori echivalenți
- Proporție de branşament 25%- 50% din capacitatea maximă a stației în locuitori echivalenți
- Proporție de branşament 0%- 25% din capacitatea maximă a stației în locuitori echivalenți

Pentru fiecare caz în parte au fost făcute ipoteze care corelează funcționarea echipamentelor cu debitul generat de populația branșată, în termeni de ore de funcționare și număr de echipamente identice în functiune.

Necesarul anual de energie rezultă conform modelului prezentat in paragraful 4.3.

Energia produsă fotovoltaic anual a fost calculată conform modelului descris în paragraful 4.3, ținându-se cont de scăderea anuală de eficiență.

Energia necesară din sistemul energetic național (SEN) este calculată ca diferență dintre necesarul anual de energie și energia produsă de sistemul fotovoltaic.

Economia procentuală de energie este calculată ca raport procentual dintre energia necesară din sistemul energetic național după ce a fost scăzută energia produsă de sistemul fotovoltaic, și necesarul anual de energie.

În Figura 4 sunt prezentate grafic datele cuprinse în Tabelul .



Figura 4: Economie procentuală

Anul	Populatie racordata la statie față de valoare nominală l.e.		Necesar anual de energie		Energia fotov	Energia produsă Energia necesară din SEN fotovoltaic		Energia necesară din SEN		enerată de otovoltaic
	Domnesti [%]	Bragadiru [%]	Domnesti [kWh]	Bragadiru [kWh]	Domnesti [kWh]	Bragadiru [kWh]	Domnesti [kWh]	Bragadiru [kWh]	Domnesti [%]	Bragadiru [%]
2020	14	11	209279	243738	53214	82355	156065	161383	25	34
2021	18	15	209279	243738	51618	79884	157661	163854	25	33
2022	21	20	209279	243738	51101	79086	158178	164652	24	32
2023	24	25	209279	243738	50590	78295	158689	165443	24	32
2024	28	31	218128	307077	50084	77512	168044	229565	23	25
2025	32	38	218128	307077	49584	76737	168544	230340	23	25
2026	37	45	218128	307077	49088	75969	169040	231108	23	25
2027	41	52	218128	514847	48597	75210	169531	439637	22	15
2028	46	60	218128	514847	48111	74457	170017	440390	22	14
2029	51	67	293685	514847	47630	73713	246055	441134	16	14
2030	56	73	293685	514847	47296	73197	246389	441650	16	14
2031	61	79	293685	535110	46965	72684	246720	462426	16	14
2032	66	83	293685	535110	46637	72176	247048	462934	16	13
2033	70	87	293685	535110	46310	71670	247375	463440	16	13
2034	74	90	293685	535110	45986	71169	247699	463941	16	13
2035	78	92	410336	535110	45664	70671	364672	464439	11	13
2036	81	94	410336	535110	45344	70176	364992	464934	11	13
2037	84	96	410336	535110	45027	69685	365309	465425	11	13
2038	86	97	410336	535110	44712	69197	365624	465913	11	13
2039	89	98	410336	535110	44399	68712	365937	466398	11	13
2040	91	98	410336	535110	44088	68232	366248	466878	11	13
2041	92	99	410336	535110	43779	67754	366557	467356	11	13
2042	93	99	410336	535110	43473	67280	366863	467830	11	13
2043	95	99	410336	535110	43169	66809	367167	468301	11	12
2044	95	99	410336	535110	42866	66341	367470	468769	10	12
2045	96	100	410336	535110	42566	65877	367770	469233	10	12

Tabelul 2: Calculul energetic

Capitolul V: Studii de caz. Stațiile de epurare Luduș și Iernut

5.1. Descrierea tehnologică a stațiilor de epurare Luduș și Iernut

Stația de epurare Luduș

Stația de epurare Luduș are o capacitate de 23120 locuitori echivalenți.

Obiectivul stației este reducerea încărcării organice, a azotului și a materiilor în suspensie.

Debitele influent pentru această stație sunt prezentate în tabelul de mai jos.

Debite de calcul	m³/zi	m³/oră
Q _{zi med} , timp uscat	2853	118.88
Qzi max timp uscat	3852	1650.50
Qorar med, timp uscat		260.30
Qorar max, timp de ploaie		520.60

Tabelul 3 : Debitele relevante de apă uzată pentru Stația de Epurare Luduș

Fluxul tehnologic al stației de epurare cuprinde o treaptă de tratare mecanică, urmată de tratarea bio-chimică a apei în reactoare biologice de tip SBR (sequence-batch reactor). [12] Nămolul este tratat într-un utilaj de tip filtru-presă. Aceste componente ale fluxului tehnologic vor fi detaliate în cele ce urmează.

Stația de epurare Iernut

Stația de epurare Iernut are o capacitate de 6200 locuitori echivalenți.

Obiectivul stației este reducerea încărcării organice și a materiilor în suspensie, deoarece nu s-au impus obiective asupra azotului total sau fosforului.

Debitele influent pentru această stație sunt prezentate în tabelul de mai jos.

Debite de calcul	m³/zi	m³/oră
Q _{zi med, timp uscat}	1162,94	48,46
Q _{zi max timp uscat}	1518,91	63,29
Qorar med, timp uscat		126,22
Qorar max, timp de ploaie		252,43

Tabelul 4: Debitele relevante de apă uzată pentru Stația de Epurare Iernut

Fluxul tehnologic al stației de epurare este similar celui prezentat anterior.

5.2. Alimentarea cu energie electrică a stațiilor de epurare

Stația de epurare Luduș

În tabelul de mai jos sunt prezentați principalii consumatori energetici din SEAU Luduş, atât tehnologici cât și auxiliari (încălzire, iluminat și prize). Se remarcă faptul că principalii consumatori sunt stația de suflante și stația de pompare influent.

De asemenea este de remarcat faptul ca 19% din puterea instalată a SEAU este dată de consumatorii auxiliari.

Echipament	Numar de echipamente in rezerva	Numar de echipamente in functiune	Putere instalata unitara [kW]	Putere absorbita unitara [kW]
Suflante aer reactoare biologice	1	3	55	46.54
Gratare rare	1	1	3.55	1.9
Pompe submersibile apa uzata	1	3	16.00	14.43
Pompe by- pass	1	2	16	14.36
Unitati compacte	1	1	5.67	4.8

pretratare				
Ejector bazin egalizare	0	1	11.8	13.4
Pompe alimentare reactoare	1	2	11.8	10.5
Statie clorura ferica	0	1	3.7	2.68
Tablou iluminat si prize	0	1	160	63

Tabelul 5: Lista echipamente principale SEAU Luduș

Stația de epurare Iernut

În tabelul de mai jos sunt prezentați principalii consumatori energetici din SEAU Iernut, atât tehnologici cât și auxiliari.

Echipament	Număr de echipamente în rezervă	Număr de echipamente țn funcțiune	Putere instalată unitară [kW]	Putere absorbită unitară [kW]
Suflante aer reactoare biologice	1	2	30	26.3
Grătare rare	1	1	4.95	2.2
Pompe submersibile apa uzată	1	2	7.50	6.62
Pompe by-pass	0	2	7.5	6.62
Unități compacte pretratare	1	1	4.02	3.22
Ejector bazin egalizare	0	1	7.5	8.98
Pompe alimentare reactoare	1	2	7.5	6.62
Stație clorură ferică	0	1	3.7	2.68
Tablou iluminat și prize	0	1	160	73.4

Tabelul 6: Lista echipamente principale SEAU Iernut

5.3. Sistemul de achiziție de date și control

Sistemul de control, supervizare și achiziții de date (SCADA) al stației de epurare, cuprinde PLC-uri și doua servere redundante cu două stații de lucru, conectate între ele printr-o rețea de date de proces de tip Ethernet. Serverele SCADA sunt alimentate dintr-un UPS.

În Figura5 se pot vedea arhitecturile sistemului SCADA pentru stațiile de epurare Luduș și lernut.



Figura 5: Arhitectura SCADA pentru SEAU Luduș and Iernut

5.4. Analiza parametrilor electrici și a consumurilor energetice

De la sistemele SCADA ale stațiilor de epurare Luduș și lernut au fost preluate date pe un interval de un an, între 2.1.2016 si 2.1.2017.

Datele sunt înregistrate cu rata de eșantionare de 10 secunde.

Au fost preluate înregistrările privind parametri electrici și a consumurilor energetice astfel:

- Tensiune
- Curent
- Putere activă
- Putere reactivă
- Frecvența
- Factorul de putere
- Nivelul armonicilor până la armonica 24

Stația de epurare Luduș

Puterea activă instantanee variază între 20kW si 110 kW. Variațiile mari ale puterii absorbite sunt date de perioadele în care suflantele bazinelor biologice sunt pornite.

Integrând puterea pe toată perioada obținem o energie consumată pentru această zi de 1414 kWh.



Figura 6 : SEAU Luduș, puterea activă instantanee 1.1.2017



Figura 7 : SEAU Luduș, curentul absorbit instantaneu 1.1.2017



Figura 8 : SEAU Luduș, tensiunea instantanee 1.1.2017

Factorul de putere este cuprins între 0,94 și 1.



Figura 9 : SEAU Luduș, factorul de putere instantaneu 1.1.2017

În urma analizei statistice descriptive asupra puterii consumate în perioada 2.1.2016 si 2.1.2017 s-au obținut următoarele date:

- Media: 61,41 kW
- Mediana: 58,07 kW
- Valoarea maxima: 146,39 kW
- Valoarea minima: 0,0

Analiza statistică descriptivă pentru puterea absorbită de consumatorii din procesul biologic, în aceeași perioadă a furnizat următoarele date.

- Media: 25,52 kW
- Mediana: 26,20 kW
- Valoarea maxima: 55,21 kW
- Valoarea minima: 0,0

Stația de epurare Iernut

Puterea activă instantanee variază între 20kW si 100 kW. Variațile mari ale puterii absorbite sunt date de perioadele în care suflantele bazinelor biologice sutn pornite. Integrând puterea pe toată perioada obținem o energie consumată pentru această zi de 1414 kWh.



Figura 10 : SEAU lernut, puterea activă instantanee 1.1.2017

Puterea reactivă variază între 0 kVAr și 32 kVAr.



Figura 11 : SEAU lernut, puterea reactivă instantanee 1.1.2017



Figura 12 : SEAU Iernut, curentul absorbit instantanee 1.1.2017

Tensiunea variază între 410V și 425V ceea ce corespunde cu normele naționale care cer ca variația tensiunii să fie cuprinsă între -5% și +10% din tensiunea nominală.



Figura 13 : SEAU lernut, tensiunea instantanee 1.1.2017

Factorul de putere este cuprins între 0,94 și 1. Acest lucru corespunde cu cerințele operatorului de rețea referitoare la factorul de putere care trebuie să aibă valori între 0,92 și 1. Spike-urile instantanee care scad factorul de putere până la valoarea de 0,87 pot fi atribuite pornirii consumatorilor mari, cum ar fi suflantele de aer sau grupuri de pompare.



Figura 14 : SEAU lernut, factorul de putere instantaneu 1.1.2017

În urma analizei statistice descriptive asupra puterii consumate în perioada 2.1.2016 si 2.1.2017 s-au obținut următoarele date:

- Media: 30,7 kW
- Mediana: 30 kW
- Valoarea maxima: 122,3 kW
- Valoarea minima: 0,0

Capitolul VI: Analiza ciclului de viață al instalației fotovoltaice montate în stația de epurare a apelor uzate

6.1. Procesul tehnologic și consumul de energie al stației de epurare

Stația de epurare pe care o analizăm în cadrul acestei lucrări are filiera tehnologică prezentată în Figura .

Acest exemplu a fost ales deoarece, în anii următori, numărul acestui tip de instalații din România va crește ca urmare a flexibilității acestei tehnologii în zona stațiilor de dimensiuni mici și mijlocii.



Figura 15 : Diagrama procesului stației de epurare

Principalii consumatori și puterile instalate sunt prezentate în Tabelul .

Etapa de tratare	Puterea absorbită [kW]		
Due tratement mesonie	15.60		
Pre-tratament mecanic	15.09		
Stație pompare influent	32		
Reactoare SBR	13.65		
Stația de suflante	165		
Stația de pompare apă tehnologică	5.8		
Îngroșarea nămolului	83		
Total	315.14		

Tabelul 7 : Consumatorii principali ai stației de epurare și puterile instalate

Analiza energetică a SEAU s-a bazat pe date măsurate la stația de epurare, în anul 2016.

Datele despre curenți și tensiuni sunt achiziționate de la PLC folosind sistemul SCADA Vijeo Citect produs de compania Schneider Electric.

Formatul fișierului de date *.CSV* este prezentat în Anexa 1. Fișierul *.CSV* care conține date pe un an, a fost împărțit în mai multe fișiere *.CSV* conținând datele pe o singură zi, folosind utilitarul Java prezentat în Anexa 2.

Același utilitar realizează statistica descriptivă a datelor, pe zile și luni.

Datele unei zile tipice sunt prezentate în Figura .



Figura 16 : Consumul tipic de energie pentru o zi din anul 2016

Următorul pas a fost calculul energiei medii consumate pentru ziua obișnuită în fiecare lună.

Luna	Consumul zilnic de energie al SEAU [kWh]	Producția zilnică de energie PV [kWh]	Necesarul din rețea [kWh]	Energie pentru stocat zilnic [kWh]
lanuarie	1534.8	366.4	1170.7	2.4
Februarie	1534.9	628.8	1052.0	145.9
Martie	1699.2	1042.6	1053.8	397.1
Aprilie	1713.2	1323.3	972.4	582.5
Mai	1449.9	1415.8	757.0	722.9
lunie	1412.8	1501.5	709.8	798.4
Iulie	1389.1	1559.5	691.6	862.0
August	1580.7	1546.3	855.6	821.2
Septembrie	1440.4	1207.8	839.1	606.5
Octombrie	1353.3	873.2	860.7	380.6
Noiembrie	1277.0	304.5	976.6	4.2
Decembrie	1280.3	304.5	979.7	3.9

Tabelul 8 : Consumul zilnic de energie în funcție de datele înregistrate în 2016, energia zilnică produsă, energia care trebuie consumată din rețeaua de distribuție și energia stocată în baterii

Cel mai mare consum de energie zilnic a fost înregistrat în aprilie, 1713 kWh / zi, iar cel mai mic consum de energie a fost în decembrie, 1280 kWh / zi.

6.2. Calculul sistemului fotovoltaic și a "matching index"

Pentru SEAU este propus un sistem hibrid de alimentare. Sistemul fotovoltaic instalat la SEAU este compus din 1242 module având câte 250 Wp fiecare, oferind o putere de vârf de 310.5 kWp.

A fost calculată o bancă de baterii, cu scopul de a maximiza "indexul de potrivire" (matching index), așa cum este prezentat în [17].

Matching index propus are relația de definiție:

$$\varphi = \frac{M^2}{L \times P}$$
 11

unde M reprezintă energia produsă de către sistemul fotovoltaic utilizat în interiorul stației de epurare, L reprezintă sarcina SEAU și P reprezintă energia totală anuală furnizată de sistemul fotovoltaic.

Pentru a dimensiona bateria, a fost efectuată o analiză detaliată a consumului stației și a producției sistemului fotovoltaic.

În Figura 7 suprafața închisă, delimitată de linia de producție și de linia de consum, reprezintă energia produsă, care nu poate fi utilizată în același moment, deci trebuie stocată în baterii.



Figura 17 : Consumul de energie electrică al SEAU și producția de energie de către sistemul fotovoltaic

Bateria este dimensionată pentru a acumula energia rezultată din diferența de energie care nu poate fi consumata instantaneu pe parcursul unei zile. Dimensiunea bateriei calculate este de 862 kWh.

Matching index a fost calculat în două situații: fără baterii și cu baterii de stocare.

Matching index pentru sistemul fotovoltaic fără baterie are o valoare de 0,21. *Matching index* pentru sistemul fotovoltaic cu baterii de stocare are o valoare de 0,68.

Sistemul cu bancă de baterii a fost simulat în PVGis 5 ca sistem off-grid, pentru a testa starea de încărcare a bateriei. Rezultatele sunt prezentate în Figura .



Figura 18 : Starea de încărcare a sistemului de baterii

6.3. Analiza ciclului de viață

Evaluarea ciclului de viață (LCA) a fost realizată pentru a ilustra performanța de mediu a sistemului fotovoltaic propus. În acest scop, LCA analizează energia și materialele folosite, si deșeurile eliberate în mediul înconjurător pe durata de viață a procesului.

Reducerea carbonului atmosferic

Analiza ciclului de viață a fost efectuată în două etape.

S-a studiat mai întâi potențialul de atenuare a carbonului atmosferic utilizând ecuația propusă în [46]:

$$CO_2 = (E_a \times T - E_{in}) \times \frac{1}{1 - L_a} \times \frac{1}{1 - L_{td}} \times 0.98$$
 12

unde termenul CO_2 reprezintă cantitatea de CO_2 atenuată pe durata de viață a sistemului fotovoltaic, E_a reprezintă energia anuală livrată de sistemul fotovoltaic, T reprezintă durata de viață a sistemului fotovoltaic, E_{in} reprezintă energia totală încorporată în sistemul fotovoltaic, L_a reprezintă pierderea din cauza iluminării slabe și L_{td} reprezintă pierderea datorată lanțului de distribuție.

Simulare LCA

A doua etapă a analizei LCA a fost efectuată utilizând instrumentul software Simapro 7.

Scopul LCA este de a compara întreaga gamă de efecte asupra mediului atribuite produselor și serviciilor prin cuantificarea tuturor intrărilor și ieșirilor fluxurilor de materiale și evaluarea modului în care aceste fluxuri materiale afectează mediul.

Deoarece studiul nostru de caz este o stație de epurare a apelor uzate, având în vedere faptul că unul dintre principalele motive pentru care se construiește stația de epurare este evitarea eutrofizării, următorii parametri prezintă un interes major pentru studiul nostru: eutrofizarea terestră, eutrofizarea acvatică și resursele utilizate.



Figura 19 : LCA pentru totalul energiilor consumate

6.4. Analiza costului ciclului de viață

Analiza costului ciclului de viață a fost efectuată pentru sistemul fotovoltaic calculat in capitolul precedent, urmând metodologia prezentată în [25] pentru determinarea costului unitar al energiei (LCOE) produse de sistemul fotovoltaic.

Costurile luate în considerare în model au fost: costul inițial al investiției, costul înlocuirii bateriilor, costul de funcționare și întreținere, costul de amortizare.

Valoarea investiției

Valoarea investiției pentru sistemul fotovoltaic a fost determinată de un studiu de piață.

Costul total al investiției a fost determinat utilizând următoarea ecuație:

$P_{i} = P_{PV} \times PV_{capacity} + P_{bat} \times Battery_{capacity}$ 13

unde P_i reprezintă investiția totală în sistemul fotovoltaic, P_{PV} reprezinta prețul unitar al sistemului fotovoltaic fără bancă de baterii exprimat în *Euro/kWp*, $PV_{capacity}$ reprezintă capacitatea totală a sistemului fotovoltaic instalat la SEAU, P_{bat} reprezintă prețul unitar al bateriei exprimat în *Euro/kWh*, *Battery_{capacity}* reprezintă capacitatea totală a bateriilor instalate la stația de epurare.

Valoarea actuală a costului de înlocuire al bateriei

Durata de viață a sistemului de baterii este considerată a fi de șapte ani. În timpul perioadei de viață de treizeci de ani a sistemului fotovoltaic, aceasta trebuie schimbată de patru ori. Valoarea actuală a fost calculată utilizând următoarea ecuație:

$P_B = (C_b - C_s) \times \left[\left(\frac{1+i}{1+d} \right)^7 + \left(\frac{1+i}{1+d} \right)^{14} + \left(\frac{1+i}{1+d} \right)^{21} + \left(\frac{1+i}{1+d} \right)^{28} \right]$ 14

unde P_b reprezintă valoarea actuală a înlocuirii sistemului de baterii pe întreaga durată de viață a sistemului, C_b reprezintă costul sistemului de

baterii, C_s reprezintă valoarea de amortizare a sistemului de baterii, *i* reprezintă rata inflației și *d* reprezintă rata de actualizare.

Valoarea actuală a funcționării și întreținerii

În literatura de specialitate, funcționarea și întreținerea unui sistem fotovoltaic este considerată a fi de 1% din costul investiției, pe an. Această valoare a fost calculată pe o perioadă de 30 de ani și actualizată, utilizând următoarea ecuație:

15

$$\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{M}} = \boldsymbol{M} \cdot \left(\frac{1+i}{1+d}\right) \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{1+i}{1+d}\right)^{T}}{1 - \left(\frac{1+i}{1+d}\right)}\right]$$

unde P_M reprezintă valoarea actuală a funcționării și întreținerii sistemului fotovoltaic, M reprezintă costul anual de funcționare și întreținere exprimat ca procent din costul investiției și T reprezintă durata de viață a sistemului fotovoltaic.

Valoarea actuală de amortizare

Valoarea de amortizare a sistemului fotovoltaic reprezintă valoarea reziduală la sfârșitul ciclului de viață. Această valoare a fost de asemenea adusă în prezent folosind ecuația:

$$P_s = S \cdot \left(\frac{1+i}{1+d}\right)^T$$
 16

unde P_s reprezintă valoarea actuală a amortizării, *S* reprezintă valoarea de amortizare a sistemului fotovoltaic la sfârșitul ciclului de viață, considerată ca procent din costul inițial al investiției.

Costul ciclului de viață al sistemului fotovoltaic

Costul ciclului de viață al sistemului fotovoltaic se calculează ca sumă a parametrilor menționați mai sus, unde valoarea actuală de salvare este considerată cu semnul minus:

$$LCC = P_i + P_M + P_B - P_s$$
 17
Costul anual al sistemului fotovoltaic

Costul anualizat uniform al sistemului fotovoltaic reprezintă costul pe durata ciclului de viață al energiei distribuite la numărul de ani de ciclu de viață, luând în considerare rata inflației și rata de actualizare. Se calculează folosind următoarea ecuație:

$$UAC = LCC \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{1+i}{1+d}\right)}{1 - \left(\frac{1+i}{1+d}\right)^{30}}\right]$$

18

Costul unitar al energiei din sistemul fotovoltaic

Costul unitar al energiei din sistemul fotovoltaic reprezintă costul anual uniform al sistemului fotovoltaic împărțit la energia totală produsă într-un an, exprimată în kWh. Se calculează folosind formula:

$$LCOE = \frac{UAC}{E_a}$$
 19

Capitolul VII: Concluzii. Contribuții originale și perspective de dezvoltare a cercetarilor prezentate în teza de doctorat

7.1. Concluzii

În această lucrare a fost analizată eficientizarea energetică a stațiilor de epurare mici folosind instalații fotovoltaice.

În primul capitol a fost prezentat contextul lucrării. În următoarele două capitole au fost prezentate noțiunile generale despre stațiile de epurare a apelor uzate, respectiv proiectarea sistemelor fotovoltaice.

În al doilea capitol a fost analizată corespondența dintre dimensionarea tehnologică a echipamentelor și puterea electrică instalată.

În al treilea capitol a fost inclus un exemplu de dimensionare, din punct de vedere electric, a unui sistem fotovoltaic de 1 MW.

În al patrulea capitol a fost analizat ciclul de viață al stațiilor de epurare, în relație cu dinamica populației conectate la infrastructură. Din această perspectivă a fost realizată o analiză a necesarului de energie electrică pe durata ciclului de viață.

Al cincilea capitol prezintă două studii de caz din industrie. Sunt studiate din punct de vedere al consumurilor energetice două stații de epurare situate în partea centrală a României.

Sunt prezentate pe scurt cele două stații din punct de vedere tehnologic.

În continuare este prezentat sistemul de achiziții de date și control al stațiilor. Cele două stații sunt automatizate folosind sisteme SCADA.

Analiza asupra stației de epurare de la Luduș a fost extinsă în al șaselea capitol, incluzând analiza potențialului de producere a energiei fotovoltaice, a impactului ecologic al instalației fotovoltaice propuse și a impactului economic.

Sistemul fotovoltaic a fost analizat din trei puncte de vedere: impactul asupra rețelei electrice, prin intermediul indexului de potrivire; impactul ecologic, printr-o analiză LCA; și impactul economic, prin intermediul unei analize LCOE.

S-a demonstrat că sistemul fotovoltaic îmbunătățește impactul ecologic al stației de epurare prin reducerea emisiilor de carbon și prin reducerea eutrofizării apei și a solului, care reprezintă principalul scop al unei stații de epurare a apelor uzate.

7.2. Contribuții originale

A fost propus un model matematic de dinamică a populației conectate la infrastructura de canalizare, constituind o contribuție originală a autorului la domeniul studiat.

O altă contribuție originală o reprezintă metoda de amplasare a modulele fotovoltaice în stația de epurare, folosind atât suprafața clădirilor cât și obiectele tehnologice, pentru a maximiza potențialul energetic al instalației fotovoltaice.

Analiza costului energiei produse de sistemul fotovoltaic instalat în stația de epurare reprezintă o altă contribuție originală a acestui capitol.

Pe parcursul lucrării am demonstrat că sistemul fotovoltaic îmbunătăţeşte impactul ecologic al stației de epurare prin reducerea emisiilor de carbon și prin reducerea eutrofizării apei și a solului, care reprezintă principalul scop al unei stații de epurare a apelor uzate.

De asemenea am demonstrat că realizarea unui sistem hibrid, cu stația de epurare alimentată atât din rețeaua publică cât și din banca de baterii a sistemului fotovoltaic, și din generatorul diesel, conduce la ameliorarea impactului asupra rețelei publice, și la diminuarea costurilor cu energia.

A fost realizată o aplicație software pentru analiza statistică rapidă a unui volum de date foarte mare, provenite de la traductoarele de tensiune și curent instalate în stațiile de epurare, și înregistrate cu o aplicație SCADA comercială.

7.3. Perspective de dezvoltare

Perspectivele de dezoltare a cercetărilor în acest domeniu trebuie să țină cont de noile tehnologii de epurare pentru stații de epurare mici. În acest sens trebuie luate în considerare tehnologiile cu biofilm (Moving bed biofilm reactor, MBBR) si biofiltrare, care sunt mai puțin energofage decât tehnolgia SBR analizată pe parcursul acesti lucrări.

În consecință, sinergia dintre astfel de tehnologii de epurare și instalațiile fotovoltaice ar putea avea rezultate superioare celei prezentate în această lucrare.

În acord cu practicile curente și cu politicile europene referitoare la autonomia energetică a clădirilor, scopul cercetărilor în această arie tehnică trebuie să fie obținerea unei instalații de epurare a apelor uzate complet autonomă din punct de vedere energetic.

O altă direcție de cercetare este reprezentată de integrarea stațiilor de epurare a apelor uzate alături de celelalte servicii municipale, în contextul tehnologiilor *smart city*, prin dezvoltarea de sisteme regionale de supervizare integrate, care să țină cont atât de starea infrastructurii de apă și apă uzată la nivel regional dar și de starea infrastructurii de energie.

Stația de epurare a apelor uzate dotată cu instalații fotovoltaice nu este doar un receptor pasiv al materiilor si energiilor generate de comunitatea urbană, ci este un element activ, care interacționează permanent cu celelalte elemente ale infrastructurii de apă și de energie. În acest sens, sistemul de control și supervizare al stației de epurare trebuie să aibă informații permanente despre starea stațiilor de pompare ale apei uzate din amonte, și despre starea rețelei de energie pentru a putea optimiza impactul asupra rețelei de energie (imbunatatirea "matching index").

Bibliografie selectivă (din totalul de 52 de lucrări)

[2] Tchobanoglous, G. (2004) : Tchobanoglous, G., F.L. Burton, H.D. Stensel, Wastewater engineering, International Edition, Fourth Edition. New York: McGraw Hill, 2004.

[3] Massoud M.A., Tarhini A., Nasr J.A., Decentralized approaches to wastewater treatment and management: applicability in developing countries. Journal of Environmental Management, 2009, 90 (1), 652-659.

[8] Photovoltaic Systems, 2nd Edition, Amer Technical Pub, 2009

[9] Andrei, H., Dogaru, V., Chicco, G., Cepisca, C. și Spertino, F., Photovoltaic Applications. Journal of Material Process and Technology, 2007, 181, 267-273.

[10] Badea, C.A., Andrei, H. "Optimization of Energy Consumption of a Wastewater Treatment Plant by Using Technological Forecasts and Green Energy." Proc. of IEEE-16th Int. Conf. on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 7-10 June 2016, Florence, Italy, paper 54.

[11] Badea, C.A., Andrei, H., Gonciariuc, A., and Rus, E. (2016). "Predictive Methods to Increase Energy Efficieny in Processes of Wastewater Treatment." Proc. of IEEE-8th Int. Conf. on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), 30 June-2 July 2016, Ploiesti, Romania, paper 8.

[12] Badea, C.A., Andrei, H., and Rus, E. (2016). "Power analysis of PV system used in wastewater treatment plant based on technological." Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty (SBEEF), 2016, DOI:10.1515/SBEEF-2016-003

[13] Steel, E.W., McGhee, T.J., Water Supply and Sewerage . New York: McGrew Hill, 1979 [14]: Bogdanov, C., Optimization of the Electricity Supply Systems and Electrical Consumption. Quarterly Science Vision 2000, 5 (4), 10-13.

[15] Badea C.A., Horia A., Case studies of energy efficiency in wastewater treatment plants, IEEE Electronics Computers and Artificial Intelligence International Conference, Targoviste, Romania, 2017, DOI: 10.1109/ECAI.2017.8166434

[17] Saini, V., Tiwari, S., Tiwari, G.N., Environ economic analysis of various types of photovoltaic technologies integrated with greenhouse solar drying system. Journal of Cleaner Production, 2017, 30-40.

[18] Luthander, R., Widén, J., Nilsson, D., Palm J., Photovoltaic selfconsumption in buildings: A review. Applied Energy, 2015, 142, 80-94

Publicații

[1] Cristian Andrei Badea, Horia Andrei, Case studies of energy efficiency in wastewater treatment plants, IEEE Electronics Computers and Artificial Intelligence International Conference, Targoviste, Romania, 2017, DOI: 10.1109/ECAI.2017.8166434

[2] Badea C.A., Andrei H., Optimization of Energy Consumption of a Wastewater Treatment Plant by Using Technological Forecasts and Green Energy, 16th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, Florenta, Italia, 2016, DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555734.

[3] Badea C.A., Andrei H., Gonciariuc A., Rus E., Predictive Methods to Increase Energy Efficiency in Processes of Wastewater Treatment, IEEE Electronics Computers and Artificial Intelligence International Conference, Ploiesti, Romania, 2016, DOI: 10.1109/ECAI.2016.7861167.

[4] Cristian Andrei Badea, Horia Andrei, Emanuel Rus, Power Analysis of PV System Used in Wastewater Treatment Plant based on Technological Forecasts, The Scientific Buletin of Electrical Engineering Faculty, Valahia University, no. 3/Nov 2016, DOI: 10.1515/sbeef-2016-0003

[5] Manasia B., Badea C.A., Lenze drive control with Step 7, Application Outline, The Scientific Buletin of Electrical Engineering Faculty, Valahia University, no. 3(17)/2011

[6] Rayen Filali, Andrei Cristian Badea, Sihem Tebbani, Didier Dumur, Sette Diop, Dominique Pareau, Filipa Lopes : Optimization of the Interval Approach for Chlorella Vulgaris Biomass Estimation, Nov 2011, IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando, FL, USA, DOI: 10.1109/CDC.2011.6161110

 [7] Rayen Filali, Cristian Andrei Badea, Sihem Tebbani, Didier Dumur, Dominique Pareau, Filipa Lopes : Interval Observers for Chlorella Vulgaris culture in a Photobioreactor, Sept. 2011,IEEE Multi Conference on Systems and Control, Denver, CO, USA, DOI: 10.1109/CCA.2011.6044419

[8] Andrei H., Fluerasu C., Stan F., Badea C.A., Caciula I., Méthodes de calcul numérique en ingénierie électrique. Applications en C++ et Turbo Pascal, editura Bibliotheca, Targoviste, 2008, ISBN (13) 978-973-712-382-4





INFORMATII PERSONALE Cristian Andrei Badea

- Str. Basarabiei, Bl. 3C, Ap. 4, 130071 Târgovi te (Romania) (+40) 727 790 336
- ⋉ c.a.badea@gmail.com

Sex M | Data nasterii 04/06/1985 | Nationalitate Romana

EXPERIENTA PROFESIONALA

03/2013. Prezent	Inginer proiectant (Electric, Instrumentatie, Control)			
	S.C. Interface Engineering S.R.L., Bucuresti (Romania)			
	Proiectarea tablourilor electrice (MDB, MCC, TPLC), SCADA.			
	Proiecte: SEAU Ludus, SEAU lernut, SEAU Blaj			
	Consultanta, Studii de fezabilitate, Caiete de sarcini			
	Proiecte: ACI Ilfov S.A., 19 statii de epurare			
09/2012. 03/2013	Inginer mentenanta			
	S.C. Siniat S.A., Bucure ti (Romania)			
	Mentenanta industriala in industria cimentului			
	Electrice, Instrumentatie, control, SCADA			
09/2011.09/2012	Inginer mentenanta			
	S.C. O elinox S.A., Târgovi te (Romania)			
	Mentenanta industriala in industria otelului.			

Electrice, Instrumentatie, control, SCADA

04/2011. 09/2011 Stagiu de cercetare

ArcelorMittal Maizières Research, Metz (Franta)

Modelare matematica si simulare in Matlab pentru un proces din industria otelului.

09/2010. 04/2011 Stagiu de cercetare

Scoala superioara de electricitate (Supelec), Paris (Franta)

Modelare matematica, simulrea observatorilor neliniari.

09/2009. 09/2010 Inginer mentenanta

S.C. O elinox S.A., Târgovi te (Romania)

Mentenanta industriala in industria otelului.

Electrice, Instrumentatie, control, SCADA

05/2009 Stagiu de cercetare

Laboratorul de microelectronica, Universitatea catolica din Louvain, Louvain-la-Neuve (Belgia)

Depuneri de polimeri in strat subtire, elipsometrie, microscopie, AFM, modelarea matematica a depunerilor de polimeri.

11/2007. 01/2009 Stagiu de cercetare

Centrul International de Biodinamica, Bucure ti (Romania)



Spectroscopie de impedanta pe suspensii celulare. Calibrarea instrumentelor. Depunerea polimerilor in strat subtire. Tratament termic. Modelare neliniara. Programare Labview pentru achizitii de date si modelare.

EDUCATION AND TRAINING

Inginer Diplomat 10/2004.07/2009

Universitatea Politehnica, Bucuresti (Romania)

Diploma in Electronica de putere si automatizari (sistem pre-bologna)

Cursuri relevante: masini electrice. convertoare statice de putere, isntalatij electrice, teoria sistemelor, sisteme de reglaj automat, identificarea sistemelor

Mobilitate Erasmus 09/2005.01/2006

Universitatea din Franche-Comté, Besançon (Franta)

Bacalaureat Matematica-Informatica 09/2000.06/2004

> Colegiul National Constantin Carabella, Târgovi te (Romania)

ABILITATI PERSONALE

Limba materna Romana

Limbi straine	INTELEGERE		VORBIRE		SCRIERE
	Ascultat	Citit	Interactiune vorbita	Productie vorbita	



Abilitati Digitale	AUTO-EVALUARE								
-	Procesarea informatiei	Comuni Creare de continut		Siguranta	Rezolvarea problemelor				
	Utilizator experimentat	Utilizator experimentat	Utilizator experimentat	Utilizator experimentat	Utilizator experimentat				

Inginerie: Matlab, Eplan Electric P8, Ecodial Advanced Calculation, LabView, Limbaje de programare: JavaSE, C Instrumente office: Microsoft Office, LaTEX, CorelDraw, Adobe Photoshop

INFORMATII ADITIONALE

Afiliere profesional :

Certificari Autorizatie ANRE IIA si IIB

MINISTRY OF NATIONAL EDUCATION "VALAHIA" UNIVERSITY OF TARGOVISTE IOSUD – ENGINEERING SCIENCES DOCTORAL SCHOOL Domain: Electrical Engineering

ENERGY EFFICIENCY IN THE WATER INDUSTRY

- PhD Thesis Summary -

PhD Superviser: Prof.univ.dr.eng. Horia Andrei

> PhD Student : Drd.ing.Cristian Andrei BADEA

TÂRGOVIȘTE 2018

Contents

Chapter I: Introduction 5

- 1.1. Context 5
- 1.2. The Objective of the Work 6

Chapter II: The Technology of Wastewater Treatment 7

- 2.1. Historical Landmarks of the Wastewater Treatment 7
- 2.2. The Technological Flux of a Typical Wasteater Treatment Plant 8

Chapter III: Photovoltaic Systems 9

- 3.1. Calculation of a Photovoltaic System 9
- 3.1.1. General Principles 9
- 3.1.2. Calcualtion of the Energy Needs of the Consumer 9
- 3.1.3. Evaluation of the Location 10
- 3.1.4. Chosing the Photovoltaic Modules 10
- 3.1.5. Choice of the Inverters and Charge Controllers 12
- 3.2. Choice of the Batteries 12
- 3.3. Choice of the Cables and Electrical Protections 13

Chapter IV: Energy Efficientization of the Wastewater Treatment Plants using Photovoltaic Installations 14

- 4.1. Introduction 14
- 4.2. Evaluation of the Power Installed in Photovoltaic Systems 15
- 4.3. Evaluation of the Population Connected to the Infrastructure 15

4.4 Evaluation of the Energy Needs and Energy Production from the Photovoltaic System 17

Chapter V: Case studies. Ludus and lernut Plants 20

5.1. Technological Characterization of the Ludus and Iernut Wastewater Treatment Plants 20

- 5.2. Energy Supply of the Wastewater Treatment Plants 21
- 5.3. Control and Data Acquisition System 22
- 5.4. Energetic Consumption and Electrical Parameters Analysis 23

Chapter VI: Life Cycle Analysis for the Photovoltaic System Mounted on the Wastewater Treatment Plant 29

6.1. Technologial Process and Energy Consumption of the Wastewater Treatment Plant 29

- 6.2. Calculation of the Photovoltaic System and "Matching Index" 32
- 6.3. Life Cycle Analysis 34
- 6.4. Life cycle analysi 35

Chapter VII: Conclusions. Original Contributions and Development Perspectives of the Research in the Doctoral Thesis 38

- 7.1. Conclusions 38
- 7.2. Original Contributions 39
- 7.3. Future Development Perspectives 40

Selective bibliography (from a total of 52 items) 41

Publications 43

Chapter I: Introduction

Key words: wastewater treatment plant, photovoltaic systems, renewable energy sources, matching index, life cycle assessment, levelized cost of energy, dynamics of infrastructure usage, lifecycle, photovoltaic modules placement

1.1. Context

Water resources deterioration, as a result of pollution produced by the accelerated urbanization and industrial parks, makes necessary the innovation in the domain of water tratement, at a technological level aswel as a economical level.

Wastewater treatment plants (WWTP) are industrial installations designed to depollute the water used by a community, prior to its discharge in the natural environment, to prevent negative effects on the environment, like for example, the eutrophization of the waters.

Development of the renewable energy sources (RES) finds an application in the WWTPs, to reduce the energy consumption from the public network and the impact on the environment.

Romania contributes to the increase of the use of RES at a global level. Among these sources, the photovoltaic (PV) have increased in the year 2015 to a installed power of 148 MW and, in conformity with the EU directive and national commitments, by the year 2035 they will increase to 490 MW.

1.2. The Objective of the Work

In this PhD thesis we propose a methodology to increase the energetic efficiency of a WWTP, from three points of view: costs, impact on the environment and impact on the power network.

The first phase consists in analyzing the energetic efficiency of a WWTP.

For this objective we analyse the number of users connected to the sewarage infrastructure, which generates the final flow of water that must be treated.

Following this analysis a mathematical model is proposed to describe the requirements of electrical energy of the WWTP, in relation with the lifetime of the installation.

After that, it is proposed a method of installation of the photovoltaic modules in the WWTP, using the available space in a efficient way.

Various configurations fo the photovoltaic installation are studied: on-grid, off-grid and hybrid.

In the end, the impact of the photovoltaic installation is analysed in terms of economy from the energy budget of the WWTP.

The impact on the environment is analysed using the metod called "life cycleassessement".

The impact on the power distribution system is studied using the methodology called "matching index".

The whole methodology is exemplified on two WWTP case studies, Ludus and lernut, located in the Mures county.

Chapter II: The Technology of Wastewater Treatment

2.1. Historical Landmarks of the Wastewater Treatment

A bibliographical study reveals that the industrial process of wastewater treatment in bioreactors using activated sludge has a history of more than 100 years.

The discoverers of this process are Edward Ardern and W.T. Locket, engineers who were doing research on wastewater treatment at the *Davyhulme Sewage Works Laboratory* for Manchester Corporation Rivers Department.

By aerating the wastewater in the containers the two researchers were doing at the same time a complet mixing and the nitrification. The results of these experiments were the complete nitrification of the wastewater and they observed that as they were adding new samples the process was accelerating, the new samples being nitrificated more rapidly.

In 1982, International Association on Water Pollution Research and Control (IAWPRC) founded The Group for Mathematica Modelling for the Design and Operation of the Activated Sludge Process. By this time, the model of the process was already being studied since 15 years, mostly at the

University of Cape Town, South Africam unde the direction of professor G.v.R. Marais.

The purpose of this group was to create a platform to be used for future development of the models for the mitigation of nitrogen by activated sludge process.

2.2. The Technological Flux of a Typical Wasteater Treatment Plant

Typicaly, a wastewater treatment plant includes two principal processes: water treatment and sludge treatment.



- 1. Mechanical screens
- 2. Grease and sand separators
- 3. Pumping station
- 4. Primary settler
- 5. Bioreactor
- 6. Secondary settler
- 7. Mechanical sludge thickner
- 8. Anaerobic fermenter
- 9. Sludge dehadration
- 10. Cogeneration unit
- 11. Electrical panel
- 12. Public power network

Figure 1: Technological flux of a typical wastewater treatment plant

In Figure 1 is presented the technological flux of a wastewater treatment plant. One can see the two principal processes: wastewater treatment and sludge treatment.

Chapter III: Photovoltaic Systems

3.1. Calculation of a Photovoltaic System

3.1.1. General Principles

A photovoltaic system is a system capable of transforming solar radiation in electrical energy.

According to [6], this is composed from the following elements:

- Photovoltaic modules
- Inverters from DC to AC current
- Charge controllers
- Energy storage battery banks
- Electrical cables for energy transport
- Electrical protection devices

If the system is not coupled to the public power network then it is called *off-grid*.

If the system is coupled to the public power network then it is called *on-grid*. In this case, the battery bank and charge controllers are not part of the installation.

The systems can also by *hybrid*, which means they are coupled to the public power network, but they also have storage battery banks.

3.1.2. Calcualtion of the Energy Needs of the Consumer

To calculate the energy needs of the consumer, one analyses the absorbed powers of the installed consumers, taking into account the simultaneity coefficient.

In the case of photovoltaic systems the type of utilization is also taken into account:

- Continous utilization
- Periodic regular use
- Periodic iregural use

3.1.3. Evaluation of the Location from the Solar Iradiation Point of View

Solar lighting varies as a function of geographical region and time of the year.

If the designed photovoltaic system is used over the entire time of the year then one must consider the solar radiation in the month with the lesser irradiation.

Meteorological maps give the necessary data about the irradiation.

Software applications are available as well, for simulating the energy production fo the photovoltaic systems as a function of meteorological and geographical data.

3.1.4. Chosing the Photovoltaic Modules

A photovoltaic cell is a PN semiconductor junctions, usualy made from silicium or polymeric semiconductor materials.

Photovoltaic cells produce direct current when they are exposed to the solar radiation.

A group fo more cells form a photovoltaic module.

Photovoltaic modules are linked in series and paralles groups to form a photovoltaic system.

The shortcircuit current (I_{sc}), current at the maximum power point (I_{mp}) and maximum power point (P_{mp}) for a certain value of the irradiation can be translated to find out this parameters for another irradiation value:

$$I_{sc2} = I_{sc1} \times \frac{E_2}{E_1}$$

$$I_{sc2} = I_{sc1} \times \frac{E_2}{E_1}$$

$$I_{sc2} = I_{sc1} \times \frac{E_2}{E_1}$$

where I_{sc1} [A] – value of the shortcircuit current for the irradiation value E_1 [W/m²], I_{sc2} [A] – value of the shortcircuit current for the irradiation value E_2 [W/m²], P_{mp1} [W] – value of the maximum power point for the irradiation value E_1 [W/m²], P_{mp2} [W] – value of the maximum power point for the irradiation value E_2 [W/m²].

When designing a photovoltaic system a correction is made for the value of the open circuit voltage and the voltage and the maximum power point voltage, using the following equations:

$$V_{OC1} = V_{OC} - \left[-Tc \times \Delta T \times V_{OC}\right]$$

 $V_{MPP1} = V_{MPP} + \left[-Tc \times \Delta T \times V_{MPP} \right]$

5

where V_{OC1} - open circuit voltage at the mimum ambiental temperature at the installation place, V_{OC} - open circuit voltage at standard temperature conditions according to the datasheet, V_{MPP1} - voltage at the maximum power point at the mimum ambiental temperature at the installation place, V_{MPP} - voltage at the maximum power point at standard temperature conditions according to the datasheet, Tc - temperature correction factor, according to the datasheet, and ΔT - temperature difference between standard test conditions and installation conditions.

Grouping photovoltaic modules in series gives the sum of the individual voltages. The current given by the photovoltaic group, in this case, is equal o the current of a single module.

$$V_{\text{sir}} = V_1 + V_2 + \dots + V_n = V \times n \tag{6}$$

$$I_{\text{sir}} = I_1 = I_2 = \dots = I_n \tag{7}$$

String of photovoltaic modules are linked in parallel to form a photovoltaic generator.

In this case the generator current is equal with the sum of currents of the strings, and the voltage is equal with the voltage of an individual string:

 $V_{paralel} = V_1 = V_2 = \dots = V_n$

 $I_{paralel} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$

3.1.5. Choice of the Inverters and Charge Controllers

9

A photovoltaic generator produces direct current. Most often, the consumers use alternative current. It follows, that an inverter is necessary to transform from direct to alternative current.



Figure 2 : Electrical diagram of an inverter

Depending on the control algorithm, the controllers can be classified as controllers with pulse width modulation algorithm, or maximum power point tracking (MPPT). The MPPT type are used more often.

3.2. Choice of the Batteries

For the choice of the batteries one must take into account the quantity of energy that must be stored, the type of the battery and type of back-up power.

3.3. Choice of the Cables and Electrical Protections

Cables for the photovoltaic systems are designed to resist in special environment conditions so the lifetime to be over 30 years.

Chapter IV: Energy Efficientization of the Wastewater Treatment Plants using Photovoltaic Installations

4.1. Introduction

In this chapter we propose a methodology of energy efficientization based on three components:

- Forecasting of the functioning regime of the plant in relation with the lifecycle, using a mathematical model
- The analysis of the energy needs in relation with the lifecycle
- Estimation of the maximum available spaces for the installation of the photovoltaic modules, to produce energy for the plant

For a a new infrastructure, the forecasting of the functioning regime can be made using a simple mathematical model which predicts the rate at which the population will connect tot the infrastructure.

Given the population forecast for a certain period of time, for the studied community, according to the National Institute of Statistics (INS), logistic function can be used to predict the rate at which the population will connect to the infrastructure.

The logistic function has the following form :

$$\frac{dN}{dt} = \boldsymbol{b} \cdot N\left(1 - \frac{N}{c}\right)$$

After establishing a growth model to describe the lifecycle of the infrastructure, the lifecycle is divided in four periods, according to the percentage of population connected to the infrastructure, relative to the maximum capacity of the wastewater treatment plant: [0%;25%], [25%;50%], [50%;75%], [75%;100%].

The third component of the efficientization strategy was to determine the maximum available space inside the wastewater treatment plant to install

photovoltaic modules. This was done by analyzing the plant layout in AutoCad.

4.2. Evaluation of the Power Installed in Photovoltaic Systems

WWTP Bragadiru has a total available surface of 1236 sq.m., for photovoltaic modules installation, distributed on the biological basins and rooftops of the technological buildings.

On this surface one can install 260 photovoltaic modules, each having 250 Wp. It follows that the maximum installed power of this plant will be 65 kWp.

According to the evaluation done with two software (PVGis and PVSyst) the specific energy produced by 1 kWp installed is 1267 kWh.year/kWp.

Conform evaluării făcute cu 2 programe de proiectare a instalațiilor fotovoltaice (PVGIS și PVSyst) energia specifică produsă de 1kWp instalat în sisteme fotovoltaice este de 1267 kWh.an/kWp.

In the first year, the photovoltaic system will produce 82355 kWp.

4.3. Evaluation of the Population Connected to the Infrastructure

The estimation of the connected population was done using the logistic growth function.

It has the following form :

$$\mathbf{P}(\mathbf{t}) = \frac{\mathbf{c}}{1 + \mathbf{a} \cdot \mathbf{e}^{-bt}}$$

10

Parameter *c* represents the maximum population. Parameter *a* represents the displacement. Parameter *b* represents the growth rate.

	Value					
Parameter	Domnești Bragadiru					
С	5800	10800				
b	0,2	0,3				
а	7	10				

The values of this parameters can be seen in Table 1.

In Figure 3 can be seen the percentage value with respect to the nominal capacity of the designed station.



Figure 3: Evolution of the percentage value of the connected population, with respect to the maximum capacity of the WWTP

Table 1: Values of the parameters of the logistic growth function

4.4 Evaluation of the Energy Needs and Energy Production from the Photovoltaic System

The energy needs were evaluated from the technological calculation of the WWTP.

Afterwards, for scenarios were proposed, for the functioning of the plang:

- 1. Connection proportion of 75%-100% from the maximum capacity of the WWTP, in equivalent population
- 2. Connection proportion of 50%-75% from the maximum capacity of the WWTP, in equivalent population
- 3. Connection proportion of 25%-50% from the maximum capacity of the WWTP, in equivalent population
- 4. Connection proportion of 0%-25% from the maximum capacity of the WWTP, in equivalent population

For each case mentioned above, some hypotheses where proposed, which correlate the functioning of the equipment with the generated flow by the connected population, in terms of functioning hours and identical equipments in service.

The annual need of energy results according to the model presented in paragraph 4.3.

The annual energy produced by the photovoltaic system was calculated according to the model described in paragraph 4.3, taking into account the annual efficiency decrease.

The necessary energy from the nationa power system was calculated as a difference between the annual necessary energy of the WWTP and the energy produced by the photovoltaic system.

The percentage energy economy was calculated as a percentage ratio between the necessary energy from the national power grid after the energy production was substracted, and the annual energy needed.

In Figure 4, the data in Table 2 is presented graphicaly.



Figure 4: Percentage economy generated by the PV system

Year	Population the V	connected to WWTP	Yearly ei	nergy needs	y needs Photovoltaic energy		 Energy necessary from the public power network 		Economy ge the PV	enerated by system
	Domnesti [%]	Bragadiru [%]	Domnesti [kWh]	Bragadiru [kWh]	Domnesti [kWh]	Bragadiru [kWh]	Domnesti [kWh]	Bragadiru [kWh]	Domnesti [%]	Bragadiru [%]
2020	14	11	209279	243738	53214	82355	156065	161383	25	34
2021	18	15	209279	243738	51618	79884	157661	163854	25	33
2022	21	20	209279	243738	51101	79086	158178	164652	24	32
2023	24	25	209279	243738	50590	78295	158689	165443	24	32
2024	28	31	218128	307077	50084	77512	168044	229565	23	25
2025	32	38	218128	307077	49584	76737	168544	230340	23	25
2026	37	45	218128	307077	49088	75969	169040	231108	23	25
2027	41	52	218128	514847	48597	75210	169531	439637	22	15
2028	46	60	218128	514847	48111	74457	170017	440390	22	14
2029	51	67	293685	514847	47630	73713	246055	441134	16	14
2030	56	73	293685	514847	47296	73197	246389	441650	16	14
2031	61	79	293685	535110	46965	72684	246720	462426	16	14
2032	66	83	293685	535110	46637	72176	247048	462934	16	13
2033	70	87	293685	535110	46310	71670	247375	463440	16	13
2034	74	90	293685	535110	45986	71169	247699	463941	16	13
2035	78	92	410336	535110	45664	70671	364672	464439	11	13
2036	81	94	410336	535110	45344	70176	364992	464934	11	13
2037	84	96	410336	535110	45027	69685	365309	465425	11	13
2038	86	97	410336	535110	44712	69197	365624	465913	11	13
2039	89	98	410336	535110	44399	68712	365937	466398	11	13
2040	91	98	410336	535110	44088	68232	366248	466878	11	13
2041	92	99	410336	535110	43779	67754	366557	467356	11	13
2042	93	99	410336	535110	43473	67280	366863	467830	11	13
2043	95	99	410336	535110	43169	66809	367167	468301	11	12
2044	95	99	410336	535110	42866	66341	367470	468769	10	12
2045	96	100	410336	535110	42566	65877	367770	469233	10	12

Table 2: Energetic calculation

Chapter V: Case studies. Ludus and Iernut Wastewater Treatment Plants

5.1. Technological Characterization of the Ludus and Iernut Wastewater Treatment Plants

Ludus Wastewater Treatment Plant

Ludus WWTP has a capacity of 23120 equivalent population.

The objective of the WWTP is the reduction of the organic charge, of the nitrogen and suspended solids.

The inflow for this station are presented in Table 3:

Debitele influent pentru această stație sunt prezentate în tabelul de mai jos.

Calculation flows	m³/day	m³/hour
Q _{day med} , dry time	2853	118.88
Q _{day max dry time}	3852	1650.50
Qhour med, dry time		260.30
Qhour max, rain time		520.60

Table 3 : Inlet flows for the Ludus WWTP

The technological flux of the WWTP is composed from a mechanical treatment step, followed by the bio-chemical treatment of the water in ther biological reactor type SBR (sequence-batch reactor). The sludge is treated in a filter-press.

Iernut Wastewater Treatment Plant

Iernut WWTP has a capacity of 6200 equivalent population.

The objective of the WWTP is the reduction of organic charge and suspended matter, because restriction on nitrogen and ortophosphates were not imposed by the authorities.

The flows for this wastewater treatment plant are presented in the following table

Debitele influent pentru această stație sunt prezentate în tabelul de mai jos.

Calculation flows	m³/day	m³/hour
Q _{day med} , dry time	1162,94	48,46
Q _{day max dry time}	1518,91	63,29
Qhour med, dry time		126,22
Qhour max, rain time		252,43

Table 4: Inlet flows for the Iernut WWTP

The technological flux of the WWTP is similar to the one presented before.

5.2. Energy Supply of the Wastewater Treatment Plants

Ludus Wastewater Treatment Plant

In the following table are presented the main energetic consumers from Ludus WWTP, technological aswel as auxiliary (heating, lighting and sockets). One can see that the main consumers are the blower station and the influent pumping station.

Also, one can see that 19% of the installed power is in auxiliary consumers.

Equipment	No. of reserve equipment	No. of functioning equipment	Installed power [kW]	Absorbed power [kW]
Biological reactors air blowers	1	3	55	46.54
Rare screens	1	1	3.55	1.9
Wastewater pumps	1	3	16.00	14.43
By-pass pumps	1	2	16	14.36
Compact pretreatment	1	1	5.67	4.8

units				
Equalization basin pump	0	1	11.8	13.4
Reactors supply pumps	1	2	11.8	10.5
FeCl3 station	0	1	3.7	2.68
Auxiliary consumers	0	1	160	63

Table	5:	WWTP	Ludus	consumer	list
-------	----	-------------	-------	----------	------

Iernut Wastewater Treatment Plant

In the following table are presented the main energetic consumers from lernut WWTP, technological aswel as auxiliary (heating, lighting and sockets).

Equipment	No. of reserve equipment	No. of functioning equipment	Installed power [kW]	Absorbed power [kW]
Biological reactors air blowers	1	2	30	26.3
Rare screens	1	1	4.95	2.2
Wastewater pumps	1	2	7.50	6.62
By-pass pumps	0	2	7.5	6.62
Compact pretreatment units	1	1	4.02	3.22
Equalization basin pump	0	1	7.5	8.98
Reactors supply pumps	1	2	7.5	6.62
FeCl3 station	0	1	3.7	2.68
Auxiliary consumers	0	1	160	73.4

Table 6: WWTP lernut consumer list

5.3. Control and Data Acquisition System

The system for control, supervisation and data acquisition (SCADA) of the WWTP is composed by the PLCs and two redundand servers with workstations, connected between them in a Ethernet network. The servers are supplied usind an UPS.

In Figure 5 one can see the architecture of the SCADA system for the Ludus and Iernut WWTPs.



Figure 5: SCADA architecture for WWTP Ludus and Iernut

5.4. Energetic Consumption and Electrical Parameters Analysis

From the SCADA system of the WWTPs Ludus and lernut data was acquired between January 2016 and January 2017.

The data were recorded with a 10 seconds sampling rate.

The following parameters were recorded:

- Voltage
- Current

- Active power
- Reactive power
- Frequency
- Power factor
- Harmonic level up to the 24th harmonic

Ludus Wastewater Treatment Plant

The active power varies between 20kW and 110 kW. The big variations of the absorbed power are given by the periods in which the air blower for the biological reactors are turned on.

By integrating the power for this day we obtain an absorbed energy of 1414 kWh for this day.



Figure 6 : WWTP Luduş, active power 1.1.2017



Figure 7 : WWTP Luduş, absorbed current 1.1.2017


Figure 8 : WWTP Luduş, voltage 1.1.2017

The power factor is between 0,94 and 1.



Figure 9: WWTP Luduş, power factor 1.1.2017

The descriptive statistics for the power, between January 2016 and January 2017 has given the following values:

- Average: 61,41 kW
- Median: 58,07 kW
- Maximum value: 146,39 kW
- Minimum value: 0,0

The descriptive statistics for the power of the consumers of the biological process, in the same period of time, has given the following values :

• Average: 25,52 kW

- Median: 26,20 kW
- Maximum value: 55,21 kW
- Minimum value: 0,0

Iernut Wastewater Treatment Plant

The active power varies between 20kW and 110 kW. The big variations of the absorbed power are given by the periods in which the air blower for the biological reactors are turned on.

By integrating the power for this day we obtain an absorbed energy of 1414 kWh for this day.



Figure 10 : WWTP lernut, active power 1.1.2017

Puterea Reactivă 40 30 20 10 0 6:36:40 19:57:50 00:90:0 :21:40 2:13:30 3:02:50 5:40:40 7:36:00 8:34:30 9:54:50 2:23:10 3:23:50 L6:58:00 8:55:40 1:17:10 4:29:20 4:17:00 5:33:50 2:16:00 8:00:50 3:04:30

The reactive power varies between 0kVAr and 32kVAr.





Figure 12 : WWTP lernut, absorbed current 1.1.2017

The voltage varies between 410V and 425V which corresponds with the national normatives that require that the voltage variation be between -5% and 10% of the nominal value.



Figure 13 : WWTP lernut, voltage 1.1.2017

The power factor is comprised between 0,94 and 1. This satisfies the requirements of the network operator of having a power factor between 0,92 and 1. The spikes can be attributed to the starting of big consumers, as for example air blowers or pumping stations.





The descriptive statistics for the power, between January 2016 and January 2017 has given the following values:

- Average: 30,7 kW
- Median: 30 kW
- Maximum value: 122,3 kW
- Minimum value: 0,0

Chapter VI: Life Cycle Analysis for the Photovoltaic System Mounted on the Wastewater Treatment Plant

6.1. Technologial Process and Energy Consumption of the Wastewater Treatment Plant

The wastewater treatment plant under analysishas the technological flux in Figure 15.

This example was chosen because, in the following years, the number of this type of installations in Romania will grow as a result of theflexibility of this technology for the small and medium wastewater treatment plants.



Figure 15 : Process diagram of the WWTP

The main consumers are presented in Table 7.

Treatment stage	Absorbed power [kW]
Mechanical pre-treatment	15.69
Influent pumping station	32
SBR reactors	13.65
Blower station	165
Technological water station	5.8
Sludge thickening	83
Total	315.14

Table 7 : Main consumers of the WWTP

The energetic analysis for this WWTP was based on data measured in 2016.

The data about curents and voltages were acquired from the PLC using the SCADA system Vijeo Citect, produced by the company Schenider Electric.

The format of the data file *.csv* is presented in Appendix 1. The *.csv* file contains the data for one year, and has been split in more *.csv* containing the data for a single day, using the Java software presented in Appendix 2.

The same software is doing the descriptive statistics of the data for days and months.

The data for a typical day are presented in Figure 16.



Figure 16 : Typical energy consumption for a day in 2016

The next step was to calculate the average energy consumed for an average day in each month.

Months	Daily energy consumption of the WWTP [kWh]	Daily energy production of the PV [kWh]	Necessary from the public network [kWh]	Energy to be storde daily [kWh]
January	1534.8	366.4	1170.7	2.4
February	1534.9	628.8	1052.0	145.9
March	1699.2	1042.6	1053.8	397.1
April	1713.2	1323.3	972.4	582.5
May	1449.9	1415.8	757.0	722.9
June	1412.8	1501.5	709.8	798.4
July	1389.1	1559.5	691.6	862.0
August	1580.7	1546.3	855.6	821.2
Septembre	1440.4	1207.8	839.1	606.5
October	1353.3	873.2	860.7	380.6
November	1277.0	304.5	976.6	4.2
December	1280.3	304.5	979.7	3.9

Table 8 : Daily energy consumption for 2016

The highest daily energy consumption was recorded in April, 1713 kWh/day, and the lowest was in December, 1280 kWh/day.

6.2. Calculation of the Photovoltaic System and "Matching Index"

For the WWTP a hybrid power system was proposed. The photovoltaic system installed at the WWTP is composed by 1242 modules having 250 Wp each, offering a peak power of 310.5 kWp.

A battery bank was calculated, with the purpose fo maximizing the "matching index", according to [17].

Matching index has the following deffinition:

$$\varphi = \frac{M^2}{L \times P}$$
 11

where M – the energy produced by the photovoltaic system used inside the WWTP, L – the charge of the WWTP and P – total annual energy of the photovoltaic system.

To size the battery, a detailed energetic analysis was carried taking into account the production of the photovoltaic system and the consumption of the WWTP.

In Figure 17, the closed surface delimited by the production line and the consumption line, representing the produced energy that can not be used instantaneously, represents energy that has to be stored in batteries.



Figure 17 : Consumption of the WWTP and production of the PV system

The battery is sized to accumulate the energy resulted from the differerence of energy which cannot be used during the day-light. The calculated battery is 862 kWh.

The *matching index* was calculated in two situations: without batteries and with batteries.

The matching index for the photovoltaic system without batteries has a value of 0.21. The *matching index* for the photovoltaic system with batteries has a value of 0,68.

The system with battery bank was simulated in PVGis 5 as an off-grid system, to test that charging state fo the batteries. The results are presented in Figure 18.



Figure 18 : Charging state of the battery bank

6.3. Life Cycle Analysis

The analysis of the life cycle (LCA) was done to illustrate the environmental benefits of the proposed photovoltaic system. For this purpose, the LCA analyses the energy and used materials, the waste released in the environment for the entire duration of the system.

Atmospheric carbon reduction

The analysis of the life cycle was done in two steps.

First was studied the saving potential for the atmospheric carbon using the equation proposed in [46]:

$$CO_2 = (E_a \times T - E_{in}) \times \frac{1}{1 - L_a} \times \frac{1}{1 - L_{td}} \times 0.98$$
 12

where the term CO_2 – quantity of CO_2 saved for the lifetime of the photovoltaic system, E_a – annual energy delivered by the photovoltaic system, T – the lifetime of the photovoltaic system, E_{in} – total energy incorporated in the photovoltaic system, L_a - loss due to poor illumination and L_{td} - loss due to the distribution chain.

LCA simulation

The second step of the LCA analysis was done using the software Simapro 7.

The purpose of the LCA simulation is to compare an entire range of effects on the environment assigned to the products and services by quantifying all of the input and output fluxes of materials, and evaluation of the way in which this material fluxes affect the environment.

Given the fact that this study is about a wastewater treatment plant, and the fact that the main reason wastewater treatment plants are build is avoiding eutrophisation, the following parameters are of major interest for this study: land eutrophisation, aquatic eutrophisation and used resources.



Figure 19: LCA simulation

6.4. Life cycle analysis

The lifecycle analysis was made for the photovoltaic system calculated in the preceding chapter, following the methodology proposed in [25] for the determination fo the unit cost of energy (LCOE) produced by the photovoltaic system.

The costs taken into consideration were: the initial investment cost, the unit cost of the batteries, the cost for functioning and maintenance, the amortization cost.

Investment value

The investment value for the photovoltaic system was determined from a market study.

The initial investment cost was determined using the following equation:

$P_{i} = P_{PV} \times PV_{capacity} + P_{bat} \times Battery_{capacity}$ 13

where P_i – total investment for the photovoltaic system, P_{PV} – price of the photovoltaic system without battery bank in *Euro/kWp*, $PV_{capacity}$ – total capacity of the photovoltaic system installed at the WWTP, P_{bat} – unit price of the battery in *Euro/kWh*, *Battery*_{capacity} – total capacity of the battery installed at the WWTP.

Present value of the battery replacement cost

The lifecycle of the battery bank is seven years. Thus, in the lifecycle of the photovoltaic system, which is thirty years, this must be replaced four times. The present value was calculated using the equation:

$$P_B = (C_b - C_s) \times \left[\left(\frac{1+i}{1+d} \right)^7 + \left(\frac{1+i}{1+d} \right)^{14} + \left(\frac{1+i}{1+d} \right)^{21} + \left(\frac{1+i}{1+d} \right)^{28} \right]$$
 14

where P_b – present value of battery replacement on the lifecycle of the photovoltaic system, C_b – battery system cost, C_s – salvage cost of the battery, *i* – inflation rate and *d* – discount rate.

Present value of operation and maintenance

In the literature, the operation and maintenance of a photovoltaic system is considered to be 1% from the investment cost. [25] This value was calculated for a period of thirty years using the following equation:

$$\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{M}} = \boldsymbol{M} \cdot \left(\frac{1+i}{1+d}\right) \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{1+i}{1+d}\right)^{T}}{1 - \left(\frac{1+i}{1+d}\right)}\right]$$

where P_M – present value of operation and maintenance of the photovoltaic system, M – yearly cost with operation and maintenance, expressed as a percentage from total investment cost and T – lifetime of the photovoltaic system.

15

Present salvage value

The salvage value is the value of the photovoltaic system at the end of the lifetime. This value was calculated for the present day using the following equation:

$$P_s = S \cdot \left(\frac{1+i}{1+d}\right)^T$$
 16

where P_s – present salvage value, S – salvage value of the photovoltaic system at the end of the lifetime, as a percentage from the initial investment cost.

Cost of the lifecycle of the photovoltaic system

The cost of the lifecycle of the photovoltaic system is calculated as the sum of the above parameters, where the salvage present value is taken with the sign minus:

$$LCC = P_i + P_M + P_B - P_s$$

Yearly cost of the photovoltaic system

The yearly uniform cost of the photovoltaic system represents the cost for the energy cost for the entire lifetime of the system uniformely distributed for each year, taking into account the inflation rate and the discount rate. It is calculated using the following equation:

$$UAC = LCC \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{1+i}{1+d}\right)}{1 - \left(\frac{1+i}{1+d}\right)^{30}}\right]$$

18

17

Unit cost of energy from the photovoltaic system

The unit cost of energy from the photovoltaic system represents the uniformly distributed yearly cost divided by the total produced energy for a year, in kWh. It is calculated using the following equation:

$$LCOE = \frac{UAC}{E_a}$$
 19

Chapter VII: Conclusions. Original Contributions and Development Perspectives of the Research in the Doctoral Thesis

7.1. Conclusions

In this thesis the energy efficiency of the wastewater treatment plants was analysed using photovoltaic systems.

In the first chapter was presented the context of the work. In the following two chapters were presented the general notions about wastewater treatment plants and general notions about the design of the photovoltaic systems.

In the second chapter was also analysed the correspondence between the technological sizing of the equipment and installed electrical power.

In the third chapter was introduced a sizing example for a 1MW photovoltaic system.

In the fourth chapter was analysed the lifecycle of the wastewater treatment plants, in relation with the dynamics of the population connected to the infrastructure. From this perspective was done an analysis of the energetig needs for the entire lifetime of the plant.

The fifth chapter presents two case studies from industry. Two wastewater treatment plants in central Romania were studied from the energetic consumption point of view.

The two stations were also presented from the technological point of view.

Afterwards the system of data acquisitions and control system is presented. The two wastewater treatment plants are automated using a SCADA system.

The analysis of the wasteater treatment plant at Ludus was extended in the sixt chapter, including the potential of photovoltaic energy production, the ecological impact of the proposed photovoltaic installation and the economical impact.

The photovoltaic system was analysed from three points of view : impact on the public power system using the matching index ; ecological impact, using an LCA analysis and economical impact, using an LCOE analysis.

7.2. Original Contributions

A mathematical model was proposed, for the dynamics of the connected population to the sewage infrastructure, which constitutes a original conribution of the author to the studied domain.

Another orignal contribution consists of the method of placement of the photovoltaic modules on the wastewater treatment plant, using the surface of the buildings and also the technological objects, to maximize the energetic potential of the photovoltaic installation.

The analysis of the cost of the produced energy by the photovoltaic installed at the wastewater treatment plant represents another original contribution.

In the thesis it is demonstrated that the photovoltaic system improves the ecological impact of the wastewater treatment plant by reducing the carbon emissions and by reducing the eutrophization of the water and soil, which represents the main purpose of a wastewater treatment plant.

Also, it was demonstrated that by realizing a hybrid system, with the wastewater treatment plant suplied by both public network and the battery bank of the photovoltaic system, and also from the diesel generator, one achieves the improvement of the impact on the public power network and to the decrease of the costs with energy.

A software application was also done, for the statistical analysis of big data volume, retrieved from the voltage and current transducers, installed at the wastewater treatment plants, and recorded using a commercial SCADA application.

7.3. Future Development Perspectives

The development perspectives in this area of research must take into account the new technologie of treatment for small plants. In this perspective, one should consider the technologies using biofilm (moving bed biofilm reactor, MBBR) si biofilters, which are less energy intensive than the SBR technology, which was analysed during this work. As a consequence, the sinergy between these technologies and the photovoltaic systems could have superior results compared to the one presented in this thesis.

In agreement with the current practices and European policies regarding the energetic authonomy of the buildings, the purpose of this area of research should be a wastewater treatment plant that is completely authonomous from an energetic point of view.

Another research direction is represented by the integration of the wastewater treatment plants alongside the other municipal services, in the context of the smart city technologies, by developing integrated regional systems of supervision, which should take into account the water and wastewater infrastructure at a regional level but also the state of the energy infrastructure. The wastewater treatment plant equipped with photovoltaic systems is not only a passive receiver of materials and energies generated by the urban community, but a active element, which permanently interacts with the other elements of the water and energy infrastructures. In this context, the supervising and contrl system of the wastewater treatment plant must have permanent informations about about the state of the wastewater pumping stations upstream and the state of the energy network so it could optimize the impact on the nergy network (improve the "matching index").

Selective bibliography (from a total of 52 items)

[2] Tchobanoglous, G. (2004) : Tchobanoglous, G., F.L. Burton, H.D. Stensel, Wastewater engineering, International Edition, Fourth Edition. New York: McGraw Hill, 2004.

[3] Massoud M.A., Tarhini A., Nasr J.A., Decentralized approaches to wastewater treatment and management: applicability in developing countries. Journal of Environmental Management, 2009, 90 (1), 652-659.

[8] Photovoltaic Systems, 2nd Edition, Amer Technical Pub, 2009

[9] Andrei, H., Dogaru, V., Chicco, G., Cepisca, C. și Spertino, F., Photovoltaic Applications. Journal of Material Process and Technology, 2007, 181, 267-273.

[10] Badea, C.A., Andrei, H. "Optimization of Energy Consumption of a Wastewater Treatment Plant by Using Technological Forecasts and Green Energy." Proc. of IEEE-16th Int. Conf. on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 7-10 June 2016, Florence, Italy, paper 54.

[11] Badea, C.A., Andrei, H., Gonciariuc, A., and Rus, E. (2016). "Predictive Methods to Increase Energy Efficieny in Processes of Wastewater Treatment." Proc. of IEEE-8th Int. Conf. on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), 30 June-2 July 2016, Ploiesti, Romania, paper 8.

[12] Badea, C.A., Andrei, H., and Rus, E. (2016). "Power analysis of PV system used in wastewater treatment plant based on technological." Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty (SBEEF), 2016, DOI:10.1515/SBEEF-2016-003

[13] Steel, E.W., McGhee, T.J., Water Supply and Sewerage . New York: McGrew Hill, 1979 [14]: Bogdanov, C., Optimization of the Electricity Supply Systems and Electrical Consumption. Quarterly Science Vision 2000, 5 (4), 10-13.

[15] Badea C.A., Horia A., Case studies of energy efficiency in wastewater treatment plants, IEEE Electronics Computers and Artificial Intelligence International Conference, Targoviste, Romania, 2017, DOI: 10.1109/ECAI.2017.8166434

[17] Saini, V., Tiwari, S., Tiwari, G.N., Environ economic analysis of various types of photovoltaic technologies integrated with greenhouse solar drying system. Journal of Cleaner Production, 2017, 30-40.

[18] Luthander, R., Widén, J., Nilsson, D., Palm J., Photovoltaic selfconsumption in buildings: A review. Applied Energy, 2015, 142, 80-94

Publications

[1] Cristian Andrei Badea, Horia Andrei, Case studies of energy efficiency in wastewater treatment plants, IEEE Electronics Computers and Artificial Intelligence International Conference, Targoviste, Romania, 2017, DOI: 10.1109/ECAI.2017.8166434

[2] Badea C.A., Andrei H., Optimization of Energy Consumption of a Wastewater Treatment Plant by Using Technological Forecasts and Green Energy, 16th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, Florenta, Italia, 2016, DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555734.

[3] Badea C.A., Andrei H., Gonciariuc A., Rus E., Predictive Methods to Increase Energy Efficiency in Processes of Wastewater Treatment, IEEE Electronics Computers and Artificial Intelligence International Conference, Ploiesti, Romania, 2016, DOI: 10.1109/ECAI.2016.7861167.

[4] Cristian Andrei Badea, Horia Andrei, Emanuel Rus, Power Analysis of PV System Used in Wastewater Treatment Plant based on Technological Forecasts, The Scientific Buletin of Electrical Engineering Faculty, Valahia University, no. 3/Nov 2016, DOI: 10.1515/sbeef-2016-0003

[5] Manasia B., Badea C.A., Lenze drive control with Step 7, Application Outline, The Scientific Buletin of Electrical Engineering Faculty, Valahia University, no. 3(17)/2011

[6] Rayen Filali, Andrei Cristian Badea, Sihem Tebbani, Didier Dumur, Sette Diop, Dominique Pareau, Filipa Lopes : Optimization of the Interval Approach for Chlorella Vulgaris Biomass Estimation, Nov 2011, IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando, FL, USA, DOI: 10.1109/CDC.2011.6161110

 [7] Rayen Filali, Cristian Andrei Badea, Sihem Tebbani, Didier Dumur, Dominique Pareau, Filipa Lopes : Interval Observers for Chlorella Vulgaris culture in a Photobioreactor, Sept. 2011,IEEE Multi Conference on Systems and Control, Denver, CO, USA, DOI: 10.1109/CCA.2011.6044419

[8] Andrei H., Fluerasu C., Stan F., Badea C.A., Caciula I., Méthodes de calcul numérique en ingénierie électrique. Applications en C++ et Turbo Pascal, editura Bibliotheca, Targoviste, 2008, ISBN (13) 978-973-712-382-4



PERSONAL INFORMATION



Cristian Andrei Badea

Sasarabiei Street, Bl. 3C, App. 4, 130071 Târgovi te (Romania) (+40) 727 790 336

c.a.badea@gmail.com

Sex Male | Date of birth 04/06/1985 | Nationality Romanian

WORK EXPERIENCE

03/2013. Present	Design Engineer, Electrical, Instrumentation, Control		
	S.C. Interface Engineering S.R.L., Bucharest (Romania)		
	Design of electrical panels (MDB, MCC, TPLC), SCADA.		
	Projects: WWTP Ludus, WWTP lernut, WWTP Blaj		
	Consultancy, feasibility studies, tender documentation		
	Projects: ACI Ilfov S.A., 19 wastewater treatment plants		
09/2012. 03/2013	Maintenance Engineer		
	S.C. Siniat S.A., Bucure ti (Romania)		
	Industrial maintenance in cement industry.		
	Electrical, instrumentation, control, SCADA		
09/2011.09/2012	Maintenance Engineer		
	S.C. O elinox S.A., Târgovi te (Romania)		
	Maintenance engineer in the stainless steel industry.		
	Electrical, instrumentation, control, SCADA		

04/2011. 09/2011 Research internship

ArcelorMittal Maizières Research, Metz (France)

Mathematical modeling and Matlab simulation for the steel industry.

09/2010. 04/2011 Research internship

Ecole Superieure d'Electricité (Supelec), Paris (France)

Mathematical modelling, simulation of nonlinear observers for bioreactors.

09/2009. 09/2010 Maintenance Engineer

S.C. O elinox S.A., Târgovi te (Romania)

Maintenance engineer in the stainless steel industry.

Electrical, instrumentation, control, SCADA

05/2009 Research internship

Microelectronics Laboratory, Catholic University of Leuven, Louvain-la-Neuve (Belgium)

Thin layer polymer deposition, elipsometry, microscopy, AFM, mathematical modelling of polymer layers.

11/2007. 01/2009 Research internship

International Center for Biodynamics, Bucure ti (Romania)

Impedance spectroscopy for cell suspensions. Instrument calibration. Thin film



polymer deposition. Thermal treatment. Nonlinear modelling, Labview programming for data acquisition and modelling.

EDUCATION AND TRAINING					
10/2004. 07/2009	Dipl. Engineer Polytechnic University of Bucharest, Bucharest (Romania)				Sucharest
	Diploma in Power Electronics and Automation (ante- bologna System)			tion (ante-	
	Relevant converter automatic	courses: e s, electrica control s	electric mac al installatio ystems, sys	hines, static ns, system t tems identif	power heory, ication
09/2005. 01/2006	Erasmus exchange student Université de Franche-Comté, Besançon (France)				
09/2000. 06/2004	Baccalaureate of Mathematics and Computer Science Constantin Carabella High School, Târgovi te (Romania)				
PERSONAL SKILLS					
Mother tongue(s)	Romanian				
Foreign language(s)	ge(s) UNDERSTANDING		SPEA	SPEAKING WRITING	
	Listening	Reading	Spoken interaction	Spoken production	



Digital skills	SELF-ASSESSMENT					
	Information processing	Commu nication	Content creation	Safety	Problem solving	
	Proficient user	Proficient user	Proficient user	Proficient user	Proficient user	

Digital skills - Self-assessment grid

Engineering: Matlab, Eplan Electric P8, Ecodial Advanced Calculation, LabView, Programming languages: JavaSE, C Office tools: Microsoft Office, LaTEX, CorelDraw, Adobe Photoshop

ADDITIONAL INFORMATION

Professional Afiliation:

Certifications National Agency for Energy Regulation: Grade IIA and IIB Authorization