REZUMAT TEZĂ

Contribuții la optimizarea funcționării sistemului de baterii LiFePo4 din instalațiile fotovoltaice rezidențiale, utilizând energia termică a pământului

Îndrumător: Prof. Dr. Ing. Valentin DOGARU-ULIERU

Doctorand: Ing. Fedlallah ISSA

2023

CUPRINS

CAPITOLUL 1. STUDIU DESPRE SOLUȚIILE ACTUALE DE DEPOZITARE ALE BATERIILOR LIFEPO4 ÎN SISTEMELE FOTOVOLTAICE REZIDENȚIALE ȘI DESPRE PERFORMANȚELE ȘI CARACTERISTICILE FUNCȚIONALE ALE ACESTORA 3

CAPITOLUL 2. STUDIUL EXPERIMENTAL REFERITOR LA CVASI-CONSTANȚA TERMICĂ A UNEI INCINTE CU GRAD ÎNALT DE IZOLARE TERMICĂ, INTEGRATĂ ÎNTR-UN MICROCLIMAT DE INCINTĂ SUBTERANĂ 19

2.1. Integrarea într-un microclimatsubteran a unei incinte cu grad înalt de izolare termică 19

2.2. Modelul experimental pentru studiul cvasi-constanței microclimatului 22

2.2.1. Ideea centrală a sistemului Microclimat și ce se urmărește prin experimentele întrerpinse 22

CAPITOLUL 3. SISTEM OPTIMIZAT DE DEPOZITARE STOCARE A ENERGIEI ELECTRICE FOTOVOLTAICE OFF-GRID, UTILIZÂND ENERGIA REGENERABILĂ TERMICĂ A PĂMÂNTULUI 27

3.1 Conceptul de Sistem optimizat de depozitare a bateriilor LiFePO4 27

3.2. Sistem de monitorizare și reglare a parametrilor de mediu ai microclimatului 32

CAPITOLUL 4. CONCLUZII, EVIDENȚIEREA CONTRIBUȚIILOR PERSONALE ȘI PERSPECTIVE DE CERCETARE VIITOARE 37

4.1. Concluzii 37

4.2. Contribuții personale 40

4.3. Perspective de cercetare viitoare 41

CAPITOLUL 1. STUDIU DESPRE SOLUȚIILE ACTUALE DE DEPOZITARE ALE BATERIILOR LIFEPO4 ÎN SISTEMELE FOTOVOLTAICE REZIDENȚIALE ȘI DESPRE PERFORMANȚELE ȘI CARACTERISTICILE FUNCȚIONALE ALE ACESTORA

Ideea de “off-grid” reprezină un deziderat al oricărui consumator casnic, în condițiile actuale energetice, când prețul unui kilowatt-oră de energie electrică este strict crescător. Panourile fotovoltaice sunt elementele de sistem prin care convertim energia solară în energie electrică, iar producătorii acestora garantează buna lor funcționare timp de 25 ani. Acest fapt este un mare avantaj, asigurând o continuitate în funcționare atât de mare, dar dezavantajul, per ansamblu, al unui sistem fotovoltaic, este înmagazinarea energiei electrice produse în momentele solare favorabile ale zilei. Electronica permite o serie de comutări ce opresc producția de energie a panourilor fotovoltaice atunci când fluxul energetic nu are consum la final, dar faptul că o investiție atât de mare rămâne neexploatată perioade lungi de timp, datorită lipsei de capacitate de înmagazinare sau a unei supradimensionări a ariei productive, este neeconomic și neamortizabil. Stocarea energiei devine un factor cheie în tot sistemul de producție energetică, dimensionarea acestei capacități în mod optim în raport cu capacitățile de producție și de consum, devenind principala pârghie de rentabilizare economică a investiției.

Am spus stocarea energiei, neadăugând atribute. Această stocare poate fi electrică, dar și termică. Perioadele solare favorabile, generatoare de cantități energetice mult mai mari decât consumul curent, au nevoie de un sistem de stocare energetic pe măsură, atât de natură electrică, dar care poate fi gândit și pe natură termică. Astfel, când producția solară este zero, aceste energii acumulate să fie returnate în circuitele de consum, atât electric, cât și termic.

Proiectarea unui sistem fotovoltaic presupune luarea în calcul a multor aspecte tehnice, precum iradierea solară și capacitățile panourilor fotovoltaice și bateriilor integrate [1]. Proiectarea poate include și aspectul schimbului de energie dintre locuințe inteligente constituite după același principiu tehnic [2].

În figura 1.1. este schematizată suita de idei anterioare pentru o fixare deplină a logicii de lucru a unui sistem energetic fotovoltaic bine proporționat. Energia solară generată în mod natural de soarele (0) este captată de subsistemul PV (*P*hoto *V*oltaic) (1), generându-se un flux de energie electrică continuă către controller-ul (2). Elementul (3) este un element de legatură, de natură conductivă, denumit “BUS-BAR”, acesta fiind un punct de „intersecție„ între invertorul (4), grupul de baterii de stocare electrică (6) și controller-ul (7) ce convertește energia electrică continuă în caldură.

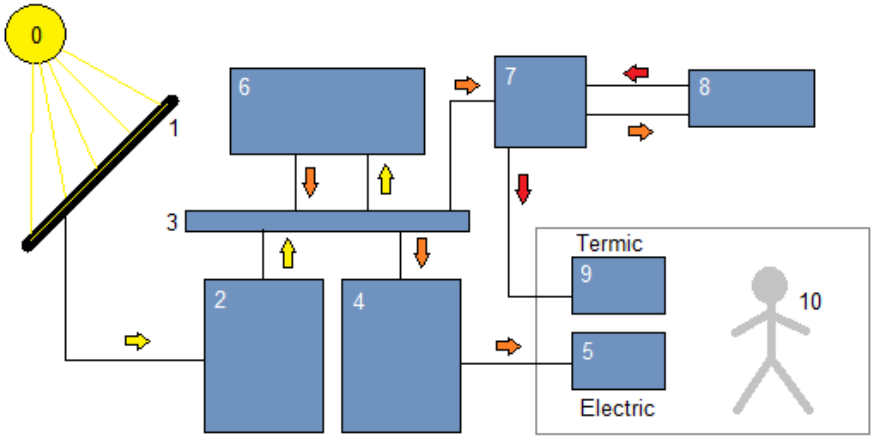

Figura 1.1. Sistem energetic PV cu stocare complexă

Căldura generată de controller-ul (7) este injectată în subsistemul de stocare termic (8), de unde termicitatea este preluată, la un moment dat, de același controller (7), pentru a fi injectată în consumatorul termic (9). Consumatorul electric (5) este alimentat de invertorul (4), ori de câte ori este nevoie, având prioritate

maximă (totală). Beneficiarul (10), omul, are astfel la dispoziție două fluxuri energetice pentru necesitățile casnice sau birou. Sistemul energetic este complex deoarece, dacă stocarea electrică în baterii este dusă la o capacitate de 100%, iar consumul electric este sub capacitatea de producție a sistemului, atunci energia solară este înmagazinată suplimentar în subsistemul de stocare termică (8) prin conversia electricității în caldură la nivelul controller-ului (7).

Notă: Elementul de stocare termică (8) este, de regulă, un recipient de înmagazinare a apei calde, recipient cu un grad înalt de izolare termică, pentru menținerea energiei termice pe o perioadă cât mai îndelungată. Denumirea englezească este PUFFER, iar această denumire este utilizată în cele ce urmează, la anumite subcapitole ce au necesitat folosirea expresă a acesui termen, cu referire directă la elementul de stocare (8) din schema din Figura 1.1.

Capacitatea de stocare termică este adițională, pentru cazul în care se dorește acest lucru sau, inițial, s-a greșit dimensionarea energetică ca echilibru între capacitățile de producție (1), de consum (5), și de stocare (6). Investițiile pot fi considerate relativ mari dacă rata de amortisment nu este comparabilă cu factura de electricitate în valoarea ei medie lunară. Când spunem comparabilă, gândim aproximativ egale, dar ideal ar fi ca rata de amortisment să fie mai mică decât valoarea medie lunară facturată pe anul în curs, la momentul la care se efectuează calculele economice.

Este foarte important calculul economic ce însoțește investiția, precum și judecățile cu privire la calitatea elementelor componente ale sistemului energetic. Raporturile preț/calitate sunt definitorii în stabilizarea valorii reale a ratei de amortisment, altfel, lipsa de predicție a componentei negarantate a procesului inerent de mentenanță ce îl însoțește pe cel de exploatare efectivă, poate complica calculul economic, beneficiarul sistemului putându-se iluziona în privința eficientei ivestiției. Managementul energetic este un aspect important ce trebuie luat în calcul, acolo unde sistemului off-grid i se poate aplica un upgrade prin integrarea

în rețeaua națională și secvențele de producție proprii se succed cu alimentarea din sistemul energetic al rețelei naționale [3].

Câtă energie se va stoca în baterie pe toată durata vieții active a acesteia?

În figura 1.10 de mai jos, am sintetizat spectrul datelor D_k ce caracterizează tehnic o baterie LiFePO4, pentru a urmări ceea ce este necesar spre informare când studiem documentația tehnică a unui producător.

Pentru a analiza o baterie, am conceput un model de calcul al unei mărimi, prin care se pot aprecia performanțele energetice ale bateriei și raportul preț/calitate din anumite puncte de vedere.

Dacă se respectă condițiile de optim ale fabricantului, se va atinge limita numărului de cicluri asumat $N_C(D_4)$. Adâncimea de descărcare indicată $D_{9.1}$, încadrată între stările de încărcare limitative maxim-$D_{9.2}$ și minim-$D_{9.1}$, ne indică mărimea procentuală energetică vehiculată de baterie la 1 ciclu. Nominal, energia vehiculată $E_{e.1}$ la 1 ciclu este estimată din datele $U_{nominal}$ (D_1) și $C_{nominal}$ (D_2) cu relația (1.14). Respectând prescripțiile DoD, se determină energia vehiculată limitata $E_{e.1}$ cu relația (1.15).

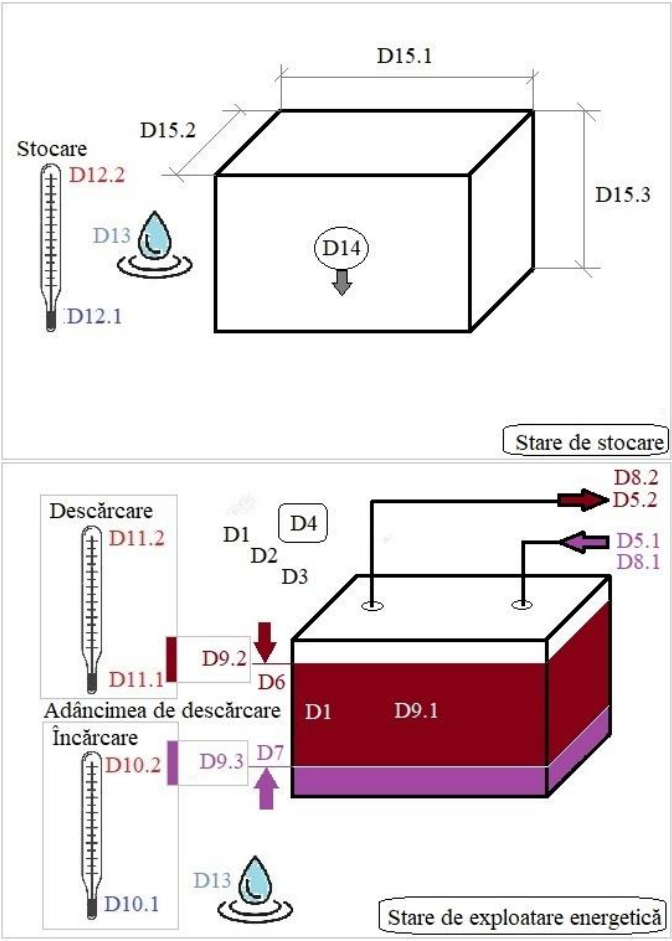

Figura 1.10. Simbolizarea datelor tehnice D_k ce caracterizează o baterie LiFePO4

Energia vehiculată prin baterie pe toată durata vieții active se va estima cu relația (1.16). Rezultatul este exprimat în Wh, pentru kWh vom utiliza relația (1.17).

$E_{n.1} = D_1 \times D_2$ (1.14)

$E_{e.1} = D_{9.1} \times E_{n.1} = D_{9.1} \times D_1 \times D_2$ (1.15)

$E_{A.N_C}^{W} = E_{e.1} \times D_4 = D_{9.1} \times D_1 \times D_2 \times D_4$ (1.16)

$E_{A.N_C}^{KW} = E_{A.N_C}^{W} \times 10^{-3} = D_{9.1} \times D_1 \times D_2 \times D_4 \times 10^{-3}$ (1.17)

Cât costă stocarea energiei electrice în prețul unui Kilowatt.oră. PV.off.grid?

Prețul bateriei $P_B(D_{16})$ ne permite să raportăm această valoare la totalul energiei vehiculate prin baterie pe toată durata vieții active și să obținem un indice I_S de preț stocare energie, cotă parte din prețul unui kWh.off.grid.PV, cu relația (1.18).

$I_S = E_{A.N_C}^{KW\ -1} \times D_{16}$ (1.18)

Cât costă 1 kWh. PV.off.grid știind ponderea costului cu stocarea energiei în cadrul costului investiției totale cu sistemul energetic PV.off.grid?

În cadrul costului total al investiției energetice, costul stocării este un procent $P_S(\%)$ din întreg, pe care îl considerăm cunoscut dintr-o serie de date reale obținute din analize de caz real, precum cel inserat în acest capitol.

Cum calculăm ponderea costului cu stocarea energiei electrice în cadrul modelului simplu al sistemului energetic PV.off.grid?

Utilizând notațiile prezentate anterior, se va ține cont de relația suplimentară (1.19).

$P_S = \frac{A}{CA_1}$ (1.19), unde A este obținut prin relația (1.1), iar CA_1 cu relația (1.4)

Costul aproximativ al unui kWh.PV.off.grid va fi calculat cu relația (1.20).

$C_{1KW.h.PV.off.grid} = \frac{I_S}{P_S}$ (1.20)

Condițiile optime de lucru în cazul unei baterii LiFePO4, conform analizei și sintezei datelor din studiul întreprins

Temperatura este un factor decisiv asupra evoluției bateriei LiFePO4, în timp. Ciclu de utilizare cu ciclu de utilizare, bateria își pierde valoric din capacitățile nominale inițiale, iar acest fapt este un proces ireversibil. Capacitatea energetică

inițială nu se mai atinge în timp, ci evoluția parametrilor este una în continuă scădere.

Problema optimizării este una a conservării, pe cât posibil, a valorilor nominale inițiale de la care se pornește operarea efectivă a bateriei. Palierele sunt stări evolutive pe care le consider a fi zone de conservare, adică de menținere a valorii unui parametru, ce atrage după sine conservarea capacității energetice în timp.

Studiul pe care l-am întreprins în acest capitol, a fost o căutare atentă în toate zonele posibile de informare, pentru a găsi care sunt observațiile cele mai pertinente cu privire la modul în care se poate conserva în timp capacitatea inițială a unei baterii, în vederea beneficierii de un timp cât mai îndelungat de această capacitate de stocare energetică. Am pus un mare accent pe lucrările de cercetare științifică în domeniul stocării de energie LiFePO4, găsind o serie de date foarte valoroase din care am dedus temperatura optimă la care o baterie LiFePO4 lucrează. La aceeași valoare am ajuns și din studiul documentațiilor tehnice ale bateriilor LiFePO4, oferite de producători/distribuitori. De asemenea, studiul de caz real de bună practică PV.off.grid, mi-a deschis perspectiva aceleiași valori optime a temperaturii de lucru cu elementul de stocare. La fel de importante au fost și discuțiile purtate cu vânzători de baterii contactați prin mijloacele media, care mi-au confirmat același lucru despre modul de exploatare al bateriilor LiFePO4, ca și documentațiile tehnice și lucrările științifice. Acest ultim fapt mi-a confirmat că, cei care se ocupă de comercializarea bateriilor, sunt ca nivel tehnic peste medie și preiau foarte atent datele tehnice de la producători, pentru a avea succes în acest timp de comerț, care este foarte dificil în condițiile în care clienții sunt nemulțumiți și așteptările lor legate de capacitatea energetică nu sunt pentru 1 an, ci pentru mulți ani de la momentul începerii exploatării acestor tipuri de baterii.

Ceea ce urmează în această ultimă sinteză, se referă la punerea cap la cap a tuturor informațiilor culese, analizându-le și sintetizându-le într-un material

scris prin care să pot defini cadrul optim de exploatare al unei baterii LiFePO4, la nivelul actual al cunoștințelor acumulate de tehnicieni.

Sistemele fotovoltaice off-grid, depind în mare măsură de capacitatea de stocare. Pierderea acestei capacități conduce la apropierea momentului în care, utilizatorul va fi nevoit să reinvestească pentru refacerea acesteia. În acel moment, costurile energiei vor crește substanțial, deoarece lucrul în grup a unei baterii noi cu altele uzate, se face prin timpi mari de nivelare a capacităților venite la confluență și astfel, noua capacitate nu poate fi utilizată la inițiala ei valoare nominală. Acest caz s-ar preta situației în care se dorește împropătarea grupului de baterii cu unele noi. Dacă se merge pe introducerea unor grupuri noi de baterii, diferite de grupurile vechi/uzate, este necesar un management energetic de comutare intermitentă de la grupul nou la grupul celor vechi, pentru a nu se produce o diferență parametrică între structurile chimice „uzate„ și cele „proaspete„, cauzatoare de accelerare a udegradării noilor elemente adăugate. Și într-un caz, și într-altul, pierderea prematură a capacităților energetice ale bateriilor din grup conduce la re-investiție și, automat, la creșterea costului kilowatt-ului-oră PV.off.grid.

Pentru evitarea pierderii premature a capacității de stocare a energiei, trebuie să se țină cont de următorii factori esențiali pe care i-am selectat ca fiind cei mai importanți:

- Temperatura la care se stochează bateria pe termen îndelungat
- Nivelul/Starea de încărcare la momentul stocării bateriei
- Timpul maxim la care trebuie reîncărcată baterie stocată, timp ce depinde de descărcarea ei naturală, pentru a menține minimul de energie necesar unei bune conservări
- Temperatura la care se produce încărcarea bateriei
- Temperatura la care se produce descărcarea bateriei
- Rata de încărcare a bateriei

- Rata de descărcare a bateriei
- Adâncimea de descărcare maximă (nivelul de încărcare la care se oprește procesul de descărcare al bateriei)
- Nivelurile/Stările de încărcare minim și maxim între care se plasează intervalul de exploatare al bateriei
- Asigurarea întreruperilor la descărcare când s-a atins nivelul minim acceptabil pentru baterie
- Asigurarea întreruperilor la încărcare când s-a atins nivelul maxim acceptabil pentru baterie

În figura 1.17 sunt redate condițiile optime pentru situația de stocare a bateriei LiFePO4. Umiditatea maximă de 95% este o limită acceptabilă, dar nu este o valoare de palier la care să menții bateria. Valoarea de 60% este una optim recomandată de marii producători de baterii. Acestei valori centrale i se aplică un interval de toleranță de ±25%, ceea ce face ca în modelul meu, să rețin această valoare.

Notă: surse documentare de la mari producători/distribuitori de baterii LiFePO4, selectate de mine pentru a fi citate, deoarece am găsit o serie completă de informații utile și asumate de agenți economici cu cifre mari de afaceri în domeniu și cu emitere de garanție de până la 10 ani, în condițiile impuse de ei prin BMS-uri: [42-44].

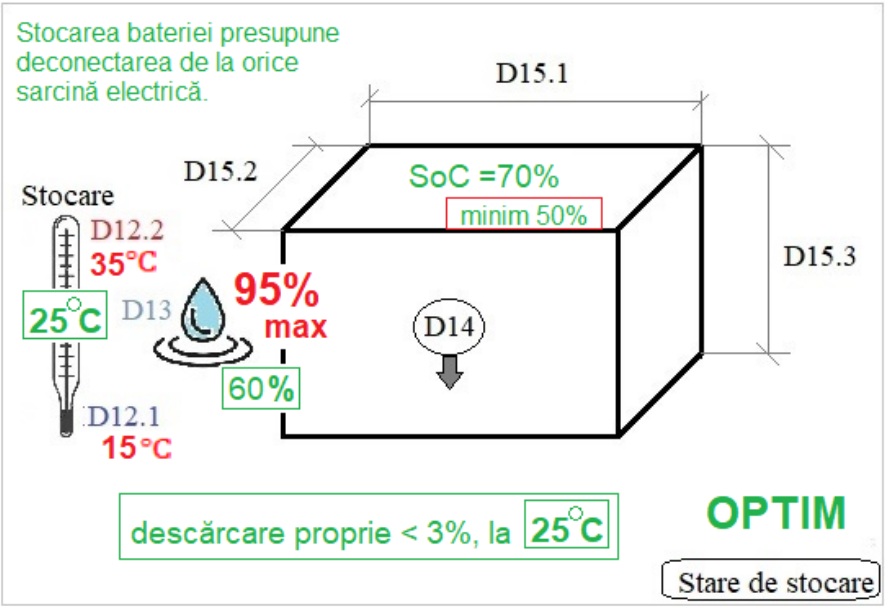

Figura 1.17. Condițiile optime de stocare a bateriei LiF3Po4

Deci, referitor la stocarea bateriei pe o perioada mai scurtă sau mai îndelungată, condițiile optime sunt cele indicate în fiura 1.17. Bateria se deconectează de la orice sarcină, în special de la încărcătoare care în mod inactiv, dacă sunt cuplate la baterie, reprezintă o sarcină prin care se produce consum în circuitul bateriei. Temperatura de 25^{0}C este indicată ca fiind optimă pentru stocare, descărcarea propie a bateriei fiind la un minim posibil. La alte etaje de temperatură, așa numitul „self-discharge„ (auto-desărcare) este mai mare și „evaporarea„ energiei din baterie este accentuată.

Umiditatea optimă de stocare/utilizare a bateriei este de 60%, valoare tolerată în limite largi, de $\pm$25%, valoarea centrală este de 60. Dacă spațiul în care este stocată bateria este centrat pe această valoare, atunci solicitarea aupra chimiei bateriei din partea acestui parametru de mediu, va fi minimă, conducând la sporirea vieții bateriei.

Model		NE-48D100-WP
Electrical Characteristics	Nominal Voltage	48V
	Nominal Capacity	100Ah
	Energy	4800Wh
	Internal Resistance	≤100mΩ (without BMS)
	Cycle Life	≥5000 cycles（25℃ 80%DOD）
	Design Life	≥10 years @25℃
	Self-Discharge (90 days)	≤5%，@25℃
	Efficiency of Charge	≥98%
	Efficiency of Discharge	≥100% @ 0.2C ≥96% @ 0.5C
Charge	Charge Voltage	54.0V±0.5V
	Charge Mode	0.2C to 54.0V, then 54.0V charge current to 0.02C (CC/CV)
	Max. Charge Current	100A
	Charge Cut-off Voltage	56.25V±0.2V
Discharge	Max. Continuous Discharge Current	100A
	Discharge Cut-off Voltage	42V±0.2V
Environmental	Charge Temperature Range	0℃~60℃
	Discharge Temperature Range	-20℃~60℃
	Optimum Operation Temperature	5℃~45℃
	Storage Temperature	0℃~45℃, ≤85% relative Humidity
	Water Dust Resistance	IP20
Mechanical	Case	Iron (Insulation painting)
	Dimensions (including the handles)	442*450*156mm
	Weight	45kg
	Gravimetric Specific energy	107Wh/kg
Others	Method	15S Cylindrical cells
	Protocol	RS485 (3 Nos) / RS232/CAN
	SOC Light	4 * LED
	LCD Screen	Optional, the default setting is no screen

Figura 1.18. Un set de informații complet despre bateria LiFePO4

Sursa documentară a graficului : https://www.evlithium.com/home-battery-energy-storage

/48v-100ah-wall-mounted-LiFePO4-battery.html

Am prezentat acest tabel integrat în figura 1.18 al bateriei NER-48D100-WP, EVLITHIUM [45], deoarece producătorul transmite foarte clar condițiile de garanție de peste 10 ani, și anume temperatura de 25^{0}C, iar pentru DoD valoarea de 80% (săgeată roșie). Asociază clar aceste doauă condiții de exploatare, ceea ce oferă un grad de seriozitate din partea celui ce oferă garanția produsului său. Studii de laborator și multe date venite din exploatare a propriilor produse în condiții reale, au permis producătorului să emită aceste informații condiționate pe care utilizatorul și le însușește în jocul garantării produsului. Curentul de încărcare este indicat ca valoare optimă de 0.2C (săgeată verde) și, la aceeași valoare a curentului de descărcare (săgeată albastră) se constată o eficiență maximă de 100%, spre deosebire de cazul unei descărcări la 0.5C ce conduce la o cădere a eficienței cu 4% față de cazul maximal. Auto-descărcarea sau descărcarea proprie (săgeata roz) este minimă tot în condițiile de temperatură de 25^{0}C.

Gradul de protecție la praf și umezeală este mic (săgeata mov) de IP20, ceea ce indică o amplasare a acestui produs în indoor (interior), ducând ideea de mediu de lucru într-un spațiu ambiebtal uman, de locuință rezidențială/birou.

În figura 1.19 este redată scăderea capacității de stocare a bateriei de-a lungul derulării exploatării acesteia în cicluri de încărcare-descărcare. Se observă că un DoD mic conduce la o prelungire a vieții bateriei și o exploatarea mai eficientă, mărind numărul de kilowatti-oră stocați în timp.

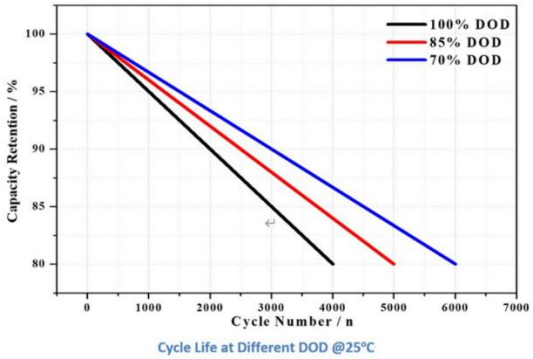

Figura 1.19. Capacitatea de retenție energetică vs. DoD, cu efect în prelungirea vieții. ***Sursa documentară a graficului*** *: https://www.evlithium.com/home-battery-energy-storage*

/48v-100ah-wall-mounted-LiFePO4-battery.html

După 6000 de cicluri cu DoD 70% se ajunge la un prag de stocare de 80%, pe când dacă se utilizează DoD 100% se atinge același prag după doar 4000 cicluri. În primul caz, până la căderea la 80% din capacitatea de stocare, energia stocată per total este de $4200E_{nominală.baterie}$, în timp ce în al doilea caz energia stocată este de 4000 $E_{nominală.baterie}$. Interesant este că maximul se obține la DoD 85%, caz aparte în care energia stocată este maximă, respectiv $4250E_{nominală.baterie}$. Recomandarea producătorului este de DoD 80%.

În figura 1.20 sunt prezentate sintetizat rezultatele analizei acestui studiu documentar amplu, cu privire la cadrul general optim de lucru cu o baterie LiFePO4,

pentru a-i prelungi viața peste 10 ani și a lucra la eficiență maximă (100%). Pentru acest tablou cu condiții de exploatare termică optimă LiFePO4, există o serie de argumente științifice ce demonstrează, fără echivoc, că temperatura de 25^0C este valoarea ce maximizează toate performanțele bateriei de acest tip. Problema acestei baterii este diferită în cazul utilizării ei în aplicațiile de tip Vehicul Electric, unde anotimpurile produc fluctuații termice mari de la un moment la altul al zilei, dar în cazul clădirilor rezidențiale/birouri, nu ne confruntăm cu aceste situații de expunere climaterică. În următorul capitol voi prezenta o soluție economică viabilă de realizare a cadrului de exploatare optim al bateriilor de tip LiFePO4, acel cadru redat în figura de mai jos.

După cum se poate vedea în imaginea din figura 1.20, condiția de mediu centrală este *temperatura de 25^0C*. Am limitat oscilațiile termice ale mediului printr-un interval de 6 unități, *$\pm 3^0$C*. Umiditatea este, ca și în cazul stocării bateriei, la aceeași valoare de *60%*. Curentul de încărcare este egal cu cel de descărcare și are valoarea de *0.20C*. Adâncimea de descărcare DoD este *80%*, situată între starea de încărcare minimă de *10%* și cea de încărcare maximă de *90%*.

Pentru fundamentarea *temperaturii de 25^0C ca OPTIM TERMIC LiFePO4*, aduc două argumente științifice, preluate dintr-o valoroasă lucrare științifică, lucrare cu informațiile de citare redate mai jos, precum și un printscreen al prestigioasei reviste Applied Energy, printscreen în care se poate vedea factorul de impact al acestei publicații de renume internațional.

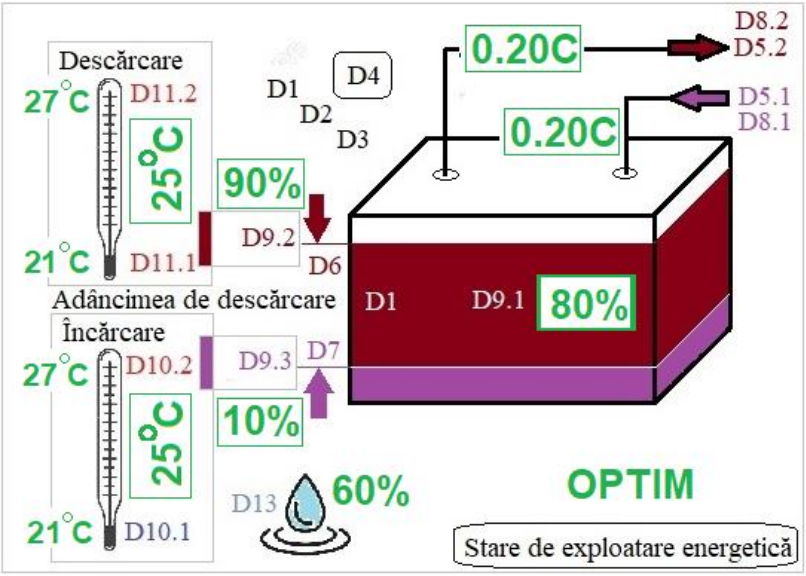

Figura 1.20 – Condițiile optime de stocare a bateriei LiF3Po4

Descriere cadrului optim de exploatare LiFePO4:

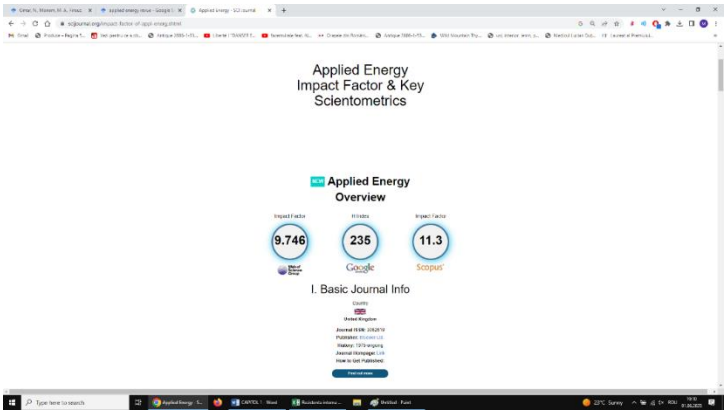

Figura 1.21. Factorul de impact al revistei Applied Energy, sursă a informațiilor de argumentare pentru impactul nivelului de temperatură a mediului de lucru asupra performanțelor bateriei LiFePO4

Pe baza datelor din această lucrare, am putut reconstrui un model matematic ce pune în valoare efectele temperaturii asupra performanțelor bateriei LiFePO4. Această matematică presupune două aspecte:

A1. Funcția ARGUMENT 1, determinată de autorii lucrării menționate, destinată calculului numărului de cicluri de solicitare maximă a unei celule LiFePO4, funcție de temperatura la care a lucrat aceasta în timpul solicitării. Reprezentarea funcției este în figura 1.22.

A2. Funcțiile ARGUMENT 2, determinată de autorii lucrării menționate, destinată calculului estimativ al rezistenței interne a unei celule LiFePO4, funcție de temperatura la care a lucrat aceasta în timpul solicitării. Reprezentarea funcției este în figura 1.23.

Conchid prin a afirma că un spațiu optim de lucru pentru o baterie LiFePO4 trebuie să aibă asigurată o temperatură constantă de 25^{0}C, cu fluctuații minime în jurul acestei valori, de +2^{0}C și -4^{0}C, interval care asigură un maxim determinat cu funcția ARGUMENT 1, respectiv 21-2700, 22-2711, 23-2718,24-2720,25-2717,26-2709,27-2694.

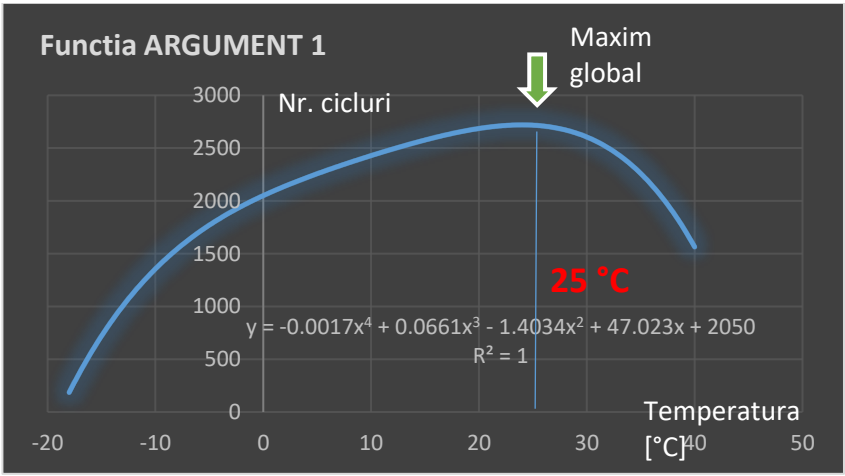

Figura 1.22. Argumentul Temperatură - Număr de cicluri LiFePO4

Sursa documentară a datelor prin care s-a construit graficul : Omar, N., Monem, M. A., Firouz, Y.,Salminen, J., Smekens, J., Hegazy, O., ... & Van Mierlo,

J. (2014). Lithium iron phosphatebased battery–Assessment of the aging parameters and development of cycle life model. Applied Energy, 113, 1575-1585.

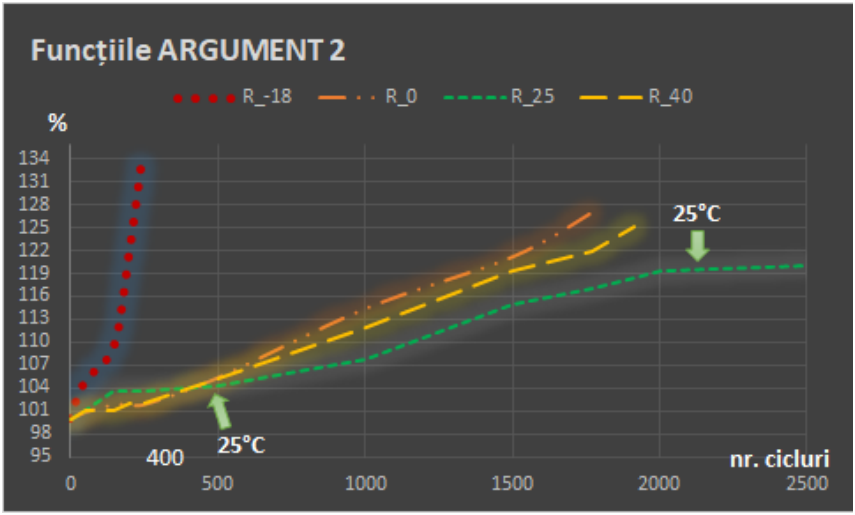

Figura 1.23. Argumentul Temperatură - Rezistență Internă LiFePO4

Sursa documentară a datelor prin care s-a construit graficul : Omar, N., Monem, M. A., Firouz, Y., Salminen, J., Smekens, J., Hegazy, O., ... & Van Mierlo, J. (2014). Lithium iron phosphate based battery–Assessment of the aging parameters and development of cycle life model.Applied Energy, 113, 1575-1585.

Deci, am conchis prin a stabili intervalul de fluctuație 21-27, cu centrare pe valoarea 25^{0}C. Se vede foarte clar, în figura 1.23, că după un număr relativ mic (circa 500) de cicluri consumate, rezistența intern la 25^{0}C are cea mai bună evoluție pe spectrul de temperaturi de lucru. *Coroborând cele două argumente decisive, temperatura de 25^{0}C este optimul termic*

CAPITOLUL 2. STUDIUL EXPERIMENTAL REFERITOR LA CVASI-CONSTANȚA TERMICĂ A UNEI INCINTE CU GRAD ÎNALT DE IZOLARE TERMICĂ, INTEGRATĂ ÎNTR-UN MICROCLIMAT DE INCINTĂ SUBTERANĂ

2.1. Integrarea într-un microclimatsubteran a unei incinte cu grad înalt de izolare termică

Energia termică regenerabilă a pământului poate asigura atenuarea amplitudinii undelor termice climatice într-un anumit punct geografic, prin utilizarea spațiului unei incinte subterane. Această atenuare de amplitudine termică, poate fi netezită printr-o accentuare a nivelării acestei amplitudini în timp, până la aducerea ei la nivelul de cvasi-constanță termică în raport cu unda termică climatică, prin integrarea în incinta subterană a unei alte incinte, respectiv o incintă cu un grad de izolare termică înalt.

Prin ***microclimat*** se definește „totalitatea condițiilor de climă (temperatură, umiditate, vânt) particulare unor spații mici„, conform DEX. Am preluat această definiție pentru a adapta această semantică sistemului tehnic pe care l-am conceput și l-am realizat prin intermediul unui model experimental demonstrativ. Acest sistem este dedicat optimizării termice a spațiului de depozitare a bateriilor LiFePO4 pe toată durata utilizării acestora, prin exploatarea colaterală a energiei termice regenerabile a pământului.

Temperatura și umiditatea sunt cele două componente active climatice ale spațiului subteran de lucru, componenta vânt fiind inexistentă și nedeterminantă în studiile pe care le-am întrerpins. Dar ipoteza utilizării acestei componente de microclimat este prevăzută a fi studiată și exploatată, în perspectiva cercetărilor viitoare, pentru reglarea atât a temperaturii, cât mai ales a umidității mediului din microclimat.

Ideea centrală de la care am pornit determinând toate acțiunile mele științifice întreprinse, a fost să demonstrez că cvasi-constanța termică a spațiului în care este depozitată bateria LiFePO4 în vederea utilizării acesteia, este pragul termic neafectat de schimbările climatice termice sezoniere și/sau zi/noapte, de la care pot regla nivelul optim de temperatură la care bateria LiFePO4 oferă sistemului maximul de performanță energetică. Acest prag termic despre care vorbesc, este unul instalat în microclimat în mod natural, fără costuri energetice, dacă se alege ca incintă de microclimat o incintă subterană.

În figura 2.1 este redată ideea de microclimat ca atenuator principal al undei termice climatice. Incinta subterană este beneficiara inerției termice a pământului, consierând această propietate ca sursă de energie termică regenerabilă.

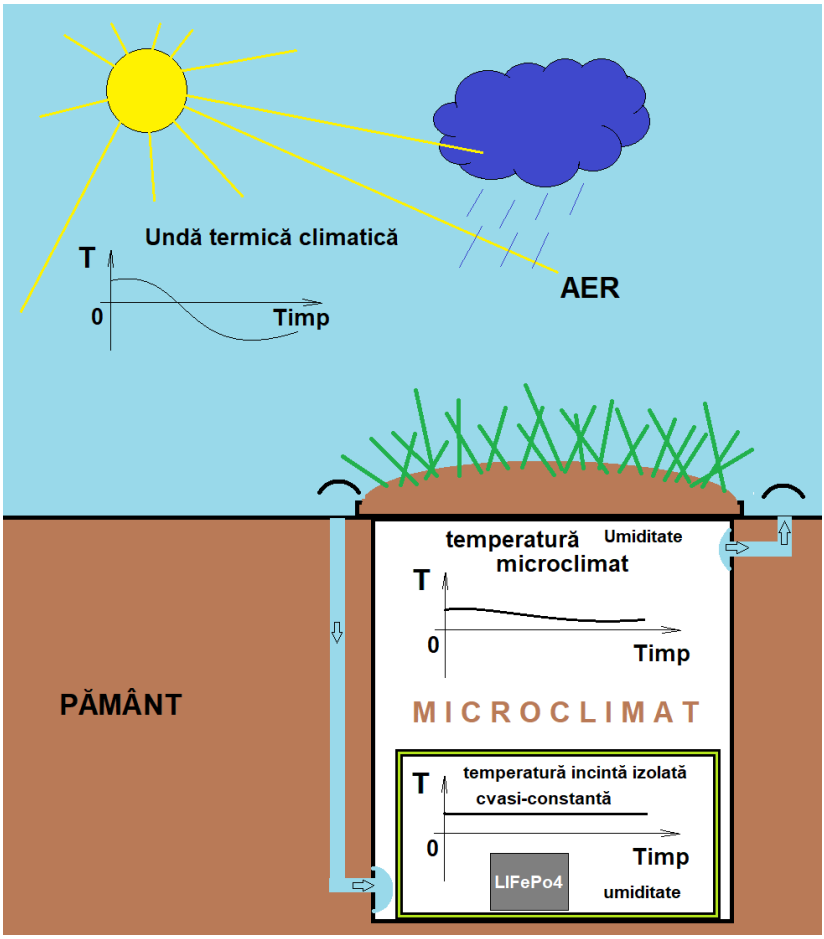

Figura 2.1. Incintă izolată în microclimat incintă subterană

Stabilizarea naturală a microclimatului pe acest prag termic, constituie acțiunea fizică de exploatare a energiei termice a pământului. Odată atins acest prag natural, se trece la faza de rafinare a ideii de optimizare termică a spațiului bateriei LiFePO4. Această rafinare presupune o integrare a unei alte incinte cu un grad înalt de izolare termică, în incinta microclimatului natural instaurat, pentru a deveni spațiul efectiv de depozitare al bateriei.

Prin utilizarea acestei incinte izolate termic se urmărește netezirea undei termice deja atenuate de microclimat în raport cu variațiile termice ale mediului exterior dictate de ciclurile sezoniere și zi/noapte. Microclimatul este deci spațiul de bază de la care se pornește pentru construirea sistemului de optimizare termică a bateriei LiFePO4, prin care se va asigura temperatura constantă optimă documentată în capitolul 1, valoric egală cu 25^0C, la cele mai mici consumuri energetice de menținere.

Nici-un sistem de condiționare de temperatură, necesar menținerii temperaturii optime LiFePO4, nu poate să se compare, ca și nivel de consum și eficiență globală, cu sistemul microclimat-incintă izolată termic, deoarece menținerea constantă a temperaturii unei incinte subterane este un fapt probat, cunoscut și exploatat de mii de ani, fără nici-un cost energetic.

Un avantaj suplimentar, pe lângă cel termic expus amplu mai sus, este acela al securizării împotriva oricărui risc de incendiu ce ar putea să apară în exploatarea bateriilor LiFePO4, chiar dacă asigurările producătorilor sunt pozitive la acest capitol.

2.2. Modelul experimental pentru studiul cvasi-constanței microclimatului

2.2.1. Ideea centrală a sistemului Microclimat și ce se urmărește prin experimentele întrerpinse

Menținerea unei temperaturi constante a grupului de baterii dintr-un sistem fotovoltaic, trebuie să se obțină cu zero energie consumată. Pentru acest deziderat, trebuie studiată fluctuația termică a interiorului, ca raspuns la fluctuația termică dictată de clima exteriorului.

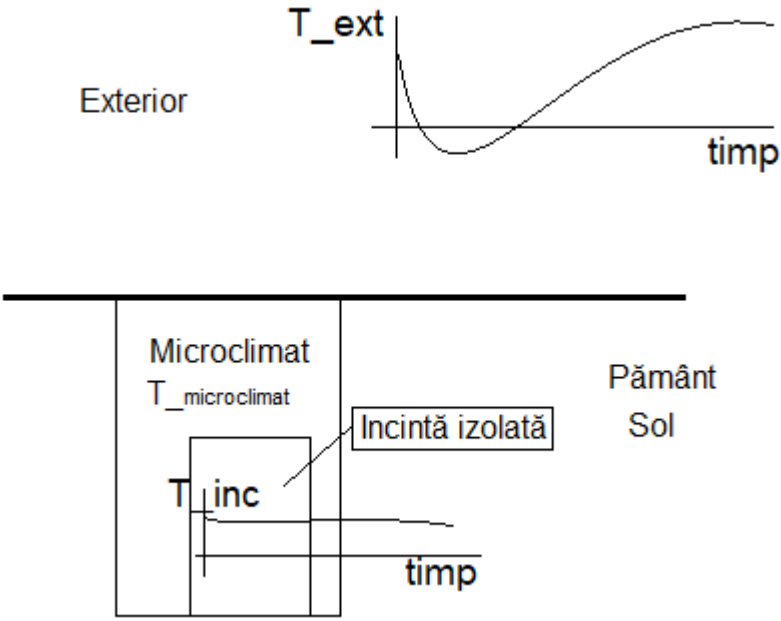

Figura 2.10. Ipoteza sistemului Microclimat de amortizare termică

După cum se poate observa în starea imaginată din figura 2.10, fluctuația aleatorie a temperaturii exterioare Text afectează în mod insignifiant evoluția temperaturii Tint.

Microclimatul este o zonă tampon unde se amortizează fluctuațiile cauzate de clima exteriorului, datorită inerției termice a pământului (solului) care „absoarbe” orice creștere sau descreștere a parametrului Tmicroclimat.

Acest model termic va trebui demonstrat în cele ce urmează, datele experimentale fiind cele ce vor pune în evidență caracteristicele prezentate imaginativ în figura 2.10.

Evident că aceasta este situația ideală imaginată, de la care s-a pornit cercetarea. În realitate, se creează cadrul tehnic prin care, eventualele

inadvertențe față de starea prezentată în figura 2.10, să fie corectate în mod automat de către un sistem cu controler și senzori. Toată această corecție se face, în mod evident, cu consum de energie electrică preluată tot din producția fotovoltaică. Această cantitate de energie trebuie să fie minim posibilă, iar în această minimizare se dezvoltă ideea de optimizare. Această energie se va numi energie electrică consumată pentru menținerea temperaturii optime de funcționare a bateriei LiFePO4, repsectiv temperatura țintă demonstrată prin studiu documentar la capitolul 1.

Ideea centrală rezumată: În mod natural, incinta subterană va forma un spațiu tampon-termic. Funcție de anotimp, „groapa în pământ„ va avea pereții cu temperatură constantă, dacă nu există zone de conductivitate termică ce ar putea transporta „frigul„ sau „căldura„ de afară. Betonul poate schimba cu câteva grade starea naturală de temperatură constantă a solului, prin puntea termică pe care o constituie între clima de afară și microclimatul din interiorul incintei subterane, cu statut de microclimat. Introducerea în joc a unei a doua incinte, pe principiul din construcții „casă în casă„, se produce o altă nivelare a amplitudinii termice atenuate din microclimat, astfel încât se poate opține cvasi-constanța dorită, fără cheltuieli energetice suplimentare.

Dacă se vizează o temperatură anume, există o bază de plecare foarte apropiată de acel 250C vizat și documentat atent în capitolul 1, cu argumente științifice și tehnic-documentare.

Studiul experimental al ipotezei cvasi-constanței termice a microclimatului

În acest ultim subcapitol, voi prezenta datele experimentale cele mai concludente, selectate dintr-un set de date prelevate timp de aproximativ 2 luni de zile. Graficele experimentale permit o caracterizare a sistemului microclimat particular, prezentat anterior în acest capitol. Din aceste date, utilizând relația

2.2., am calculat factorii de atenuare termică specifici incintelor și celor două tipuri de microclimat (A/B).

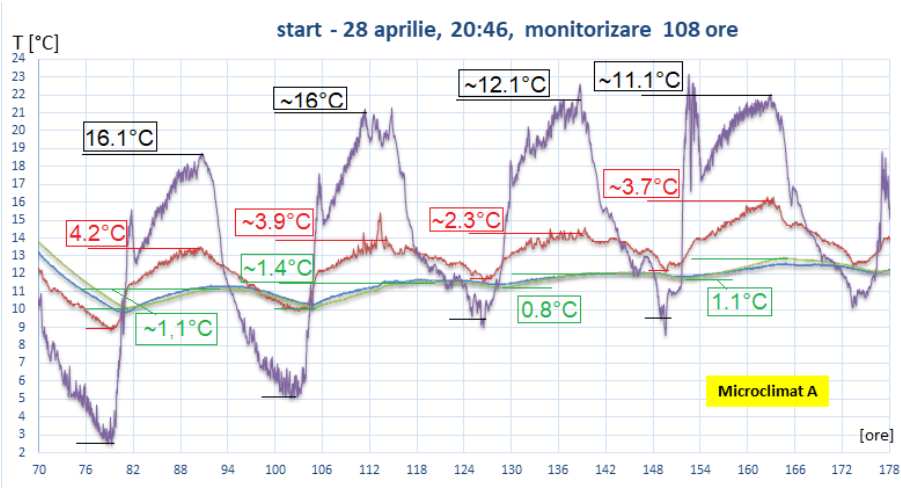

Figura 2.21. Graficul experimental 1. Microclimat A, Mov – Temp. exterior, Roșu – Temp. Microclimat A, Verde – Incintă 2, Albastru – Incintă 1

În figura 2.21, graficul prezentat reprezintă un decupaj de date experimental, între ora 70 și ora 178, începând cu 28 aprilie anul curent.

Tabel 2.1. Date rezultate din graficul figurii 2.21

Ziua	Fluctuație min-max			Atenuare	
	Exterior	Microclimat	Incinta 2	F_{micro}^{ext}	F_{inc2}^{ext}
	°C	°C	°C	coef	coef
1	16,1	4,2	1,1	3,83	14,64
2	16	3,9	1,4	4,10	11,43
3	12,1	2,3	0,8	5,26	15,13
4	11,1	3,7	1,1	3,00	10,09

În acest caz am calculat factorii de atenuare în cazul microclimatului A și în cazul incintă 2, cu relația (2.2.). Microclimatul atenuează de aproximativ 3 până

la 5 ori fluctuația externă, iar incinta 2 atenuează aceeași fluctuație între 10 și 15 ori. Datele ce au stat la baza calculelor sunt tabelate în tabelul 2.1.

CAPITOLUL 3. SISTEM OPTIMIZAT DE DEPOZITARE STOCARE A ENERGIEI ELECTRICE FOTOVOLTAICE OFF-GRID, UTILIZÂND ENERGIA REGENERABILĂ TERMICĂ A PĂMÂNTULUI

3.1 Conceptul de Sistem optimizat de depozitare a bateriilor LiFePO4

Optimizarea spațiului de depozitare presupune următoarele componente:

1. Obținerea unui nivel de temperatură ce nu necesită o energie consumată și, implicit, fără costuri, totul fiind posibil datorită spațiului subteran (microclimat).

2. Utilizarea climei externe atunci când prezintă stare termică faborabilă.

3. Utilizarea conceptului de „casă în casă” pentru netezirea oscilațiilor termice induse din exterior către interior.

4. Utilizarea etanșării pentru suprimarea fenomenelor convective.

5. Utilizarea surselor de încălzire/răcire doar dacă energiile consumate sunt considerabil mai mici decât energiile câștigate prin menținerea temperaturii optime de 25℃.

Aspectul 1

Energia termică a solului/pământului se manifestă printr-o inerție termică mare la schimbarea climatică dintr-un anumit punct geografic. În Sud-Muntenia / România, temperatura solului este de aproximativ 11℃ pe tot timpul anului. La schimbarea acestui nivel termic, solul se opune atât într-un sens, cât și în celălalt sens. Dacă incinta subterană este constituită astfel încât puntea termică cu exteriorul să fie întreruptă, atunci interția termică va fi maxim posibilă. Dacă incinta

este conectată termic la exterior, atunci puntea termică va deveni un generator de frig/cald funcție de mediu/climă, ceea ce va introduce un efect de creștere a oscilațiilor termice din spațiul subteran.

În ambele cazuri, microclimatul se va instaura, în cele de urmă, în spațiul subteran. Diferența va consta în distribuția temperaturii în acest spațiu.

Referitor la acest prim aspect al optimizării, pentru a demonstra avantajele nete ale spațiilor subterane, în detrimentul celor supraterane, am ales un spațiu conectat prin punte termică la climatul extern, infrastructura fiind complet betonată, ceea ce impune o conductivitate termică maxim posibilă. Acest sistem va induce perturbații, dar, important pentru acest studiu, este să pun în evidență faptul că microclimatul se impune finalmente în spațiul subteran.

Ideea de bază este că obținerea în aceste condiții a unui câștig energetic, ar fi argumentul decisiv pentru impunerea microclimatelor subterane ca fiind soluția optimă de depozitare. Microclimatul subteran *izolat față de exterior* este net superior celui conectat, deoarece stabilitatea termică este maximă, iar distribuția temperaturilor pe verticală în acest spațiu va fi una cvasi-constantă. Această cvasi-constanță creează premizele *izotropiei termice a microclimatului*, ceea ce este ideal în vederea depozitării mai multor baterii, fară a fi condiționat de cota pe verticală a amplasării acestora.

Microclimatul subteran, comparativ cu orice incintă supraterană, va prezenta avantajul major al instalării unui palier de temperatură de la care se poate porni atingerea nivelului optim de 25℃, pe lângă avantajul stabilității la oscilații.

Microclimatul este un absorbitor al undelor termice, cu variații mari de amplitudine pe intervale mici de timp.

Aspectul 2

Clima exterioară poate prezenta temporar temperatură favorabilă, adică un nivel de temperatură mai mare decât cel al microclimatului, situație simbolizată în figura 3.1.

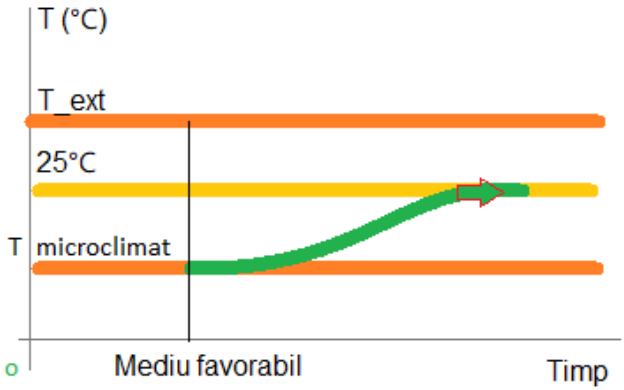

Figura 3.1. Mediul/clima extioară microclimatului în moment favorabil încălzirii acestuia

Se poate exploata acest context termic printr-un flux de ventilație care să permită aerului cald să pătrundă, în microclimat, crescând nivelul T_{micro} în sensul aducerii la nivelul 25℃.

Pentru alte zone geografice mai calde decât cea de climat temperat, se pot exploata temperaturile mici de noapte ale exteriorului în sensul scăderii T_{micro} către 25℃, precum în figura 3.2.

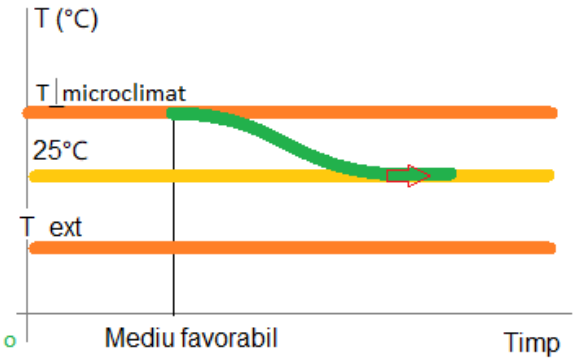

Figura 3.2. Mediul/clima extioară microclimatului în moment favorabil răcirii acestuia

Astfel, energiile termice temporare, aleatoare, dar favorabile, pot fi captate și utilizate pentru manipularea temperaturii microclimatului în sensul apropierii/suprapunerii de/peste nivelul țintă 25℃.

Aspectul 3

Conceptul de „casă în casă” este cunoscut pentru pasivizarea locuințelor, prin practicarea unui al doilea zid exterioe, în vederea construirii unui spațiu de aer tampon, reducând influența climei asupra interiorului.

Acest concept presupune, în cazul spațiului de depozitare LiFePO4, utilizarea unor incinte în care să fi amplasate bateriile, acestea fiind la rândul lor amplasate în interiorul microclimatului subteran.

Notă: Protecția la incendiu se poate aplica prin constituirea unor incinte speciale care să suporte bateriile pe grupuri, astfel încât să se evite posibilitatea incendierii întregului număr de baterii, prin propagarea incendiului de la bateria avariată către celelalte.

În figura 3.3 este simbolizate aspectul 3, al optimizării. Dacă aceste incinte de baterii sunt izolate termic foarte înalt, s-ar adăuga avantajul alveorării termice care crește interția termică a spațiilor respective.

Acest aspect 3, al optimizării, este esențial pentru reducerea oscilațiilor termice în spațiul bateriilor LiFePO4 până la cvasi-constanță, precum și la menținerea nivelului termic de lucru pe perioade foarte lungi de timp, prin pasivizarea termică a incintei denumită generic Alveolă-termică.

Dacă la aceste două avantaje se adaugă și protecția la propagarea incendiului prin alveolare cu materiale rezistente la foc, *aspectul 3 este decisiv pentru randamentul sistemului per ansamblu*.

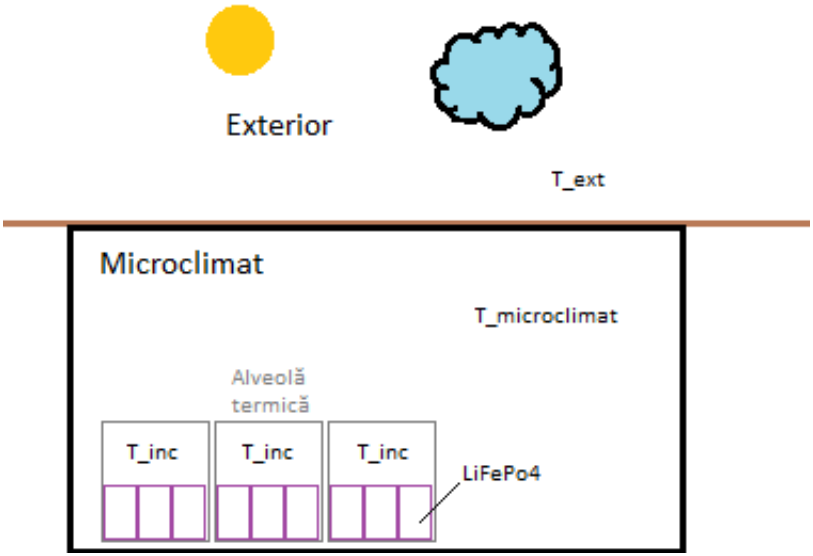

Figura 3.3. Incintă de izolare a bateriei în microclimat. Alveola termică

Aspectul 4

Etanșarea trebuie aplicată microclimatului astfel încât efectul conductiv să fie anulat și schimburile cu exteriorul eliminate. Schimbul de căldură microclimat-exterior trebuie controlat în vederea reglării temperaturii interioare la un nivel stabilit. Tot printr-un flux de ventilație controlat se va regla și umiditatea microclimatului.

În figura 3.4 este schematizat Aspectul4. Etanșsarea trebuie dublată de ruperea punții termice cu exteriorul, pentru a avea eficiență în controlul $T_{microclimat}$.

Aerul este un agent termic ce prin convecție, transportă permanent căldura și frigul într-un circuit ce produce egalizarea temperaturilor dintre două puncte spațiale cu termicități diferite. Tot timpul exteriorul va tinde să egaleze temperatura proprie cu cea a microclimatului, dacă există cale de circulare a aerului între cele două zone.

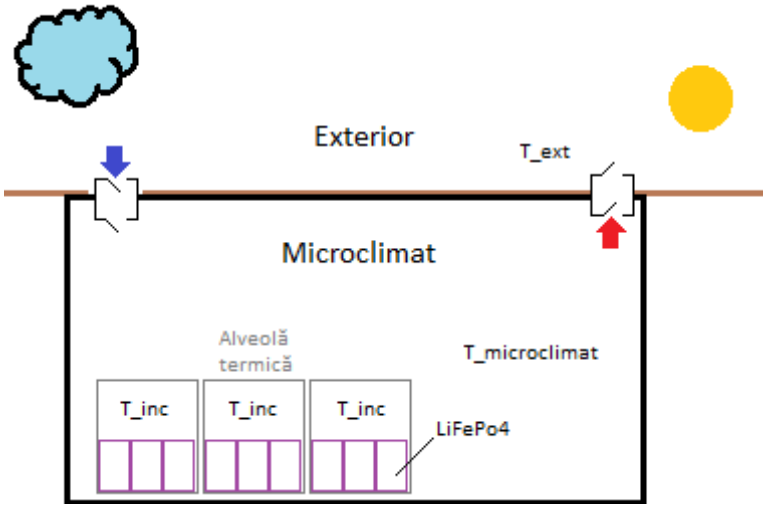

Figura 3.4. Controlul fluxurilor de aer de schimb interior-exterior ale unui microclimat etanș

Aspectul 5

Odată atinse paliere de temperatură prin materializarea aspectelor 1-4, surse de încălzire sau răcire externe pot fi utilizate pentru suprapunerea termică a spațiului bateriei peste ținta de 25℃.

Această energie necesară suprapunerii, o voi numi *energie de suprapunere* 25℃. Pentru a minimiza acest consum, este necesar ca aspectele 1-4 să fie deja rezolvate cu eficiență maximă asigurată pentru fiecare dintre acestea.

3.2. Sistem de monitorizare și reglare a parametrilor de mediu ai microclimatului

Sistemul de monitorizare presupune măsurarea unui set de temperaturi determinante pentru buclele de reglare prin care optimizează termic spațiul bateriei. Reglarea se referă la aspectele discutate anterior, toate buclele de reglare urmărind păstrarea palierului de temperatură optimă de 25°C.

Pentru a regla temperatura în spațiul bateriei, este necesară monitorizarea și reglarea temperaturii microclimatului. Temperatura microclimatului depinde de temperatura exteriorului, într-o măsură mai mare sau mai mică, funcție de gradul de etanșare al microclimatului.

Ultimul aspect al funcționării optime a sistemului per ansamblu este reprezentat de monitorizarea permanentă a gradului de consum energetic pentru menținerea temperaturii microclimatului.

Metoda directă de prelucrare a datelor experimentale. Determinarea directă a puterii cedate medii a bateriei LiFePO4

Fiecare dintre cei 2 parametri, P și T se vor caracteriza matematic prin intermediul aceloraşi funcții polinomiale regresive, la care urmărim acelaşi factor de control al preciziei matematizării R^2, cu aceeaşi valoare țintă de 1.

Se vor integra aceste funcții și se vor raporta la intervalul de timp pe care s-a realizat integrarea, obținându-se astfel valorile medii cele mai precise. Puterea este produsul valorilor instantanee U_i și I_i, iar această valoare devine puterea instantanee experimentală P_i preluată la un eșantion (sample). După obținerea unui set de date cu puterea instantanee, se integrează funcția regresie polinomială generată de mediul Excell și se raportează la intervalul de timp ce reprezintă durata experimentului respectiv. Astfel se obține valoarea medie a puterii cedate pe acea durată de timp. Ca și la prima metodă, valoarea medie a puterii cedate se asociază cu temperatura medie T_m calculată după cum s-a prezentat mai sus. Dupa obținerea mai multor cuplete (P_m, T_m) se pot face analize comparative.

Modelul matematic al prelucrării datelor experimentale după Metoda 2 – indirectă, este redat în relațiile următoare ce exprimă funcții de timp ale parametrilor:

$P_i = U_i \times I_i$ (3.9)

$P_i(t) = \sum_{k=0}^{n} \mathrm{a}_K \times t^K$, unde $K \leq 6$ (3.10)

$T(t) = \sum_{i=0}^{p} \mathrm{a}_i \times t^i$, unde $i \leq 6$ (3.11)

$$P_m = \frac{\int_0^t P_i(t)dt}{t} \quad (3.12)$$

$$T_m = \frac{\int_0^t T(t)dt}{t} \quad (3.13)$$

Pachetul de date pentru analiza comparativă este (P_m,T_m) (3.14)

Această metodă este pentru a analiza evoluția puterii în mod direct, neluând în observație evoluțiile parametrilor U și I. Este o metodă simplă, focalizată direct pe parametrul țintă de interes.

Rezultatul analizei comparative

Pentru cele 7 experimente întreprinse, se va face o analiză comparativă a rezultatelor, pentru a demonstra influența temperaturii asupra puterii cedate a bateriei LiFePO4. Se observă că câștigul maxim este obținut la 36.6°C, dar accentul optimizării se referă la modul în care rezistența internă a bateriei evoluează în timp. În cele ce urmează sunt expuse argumentele necesare nivelului de optim, respectiv **25°C**.

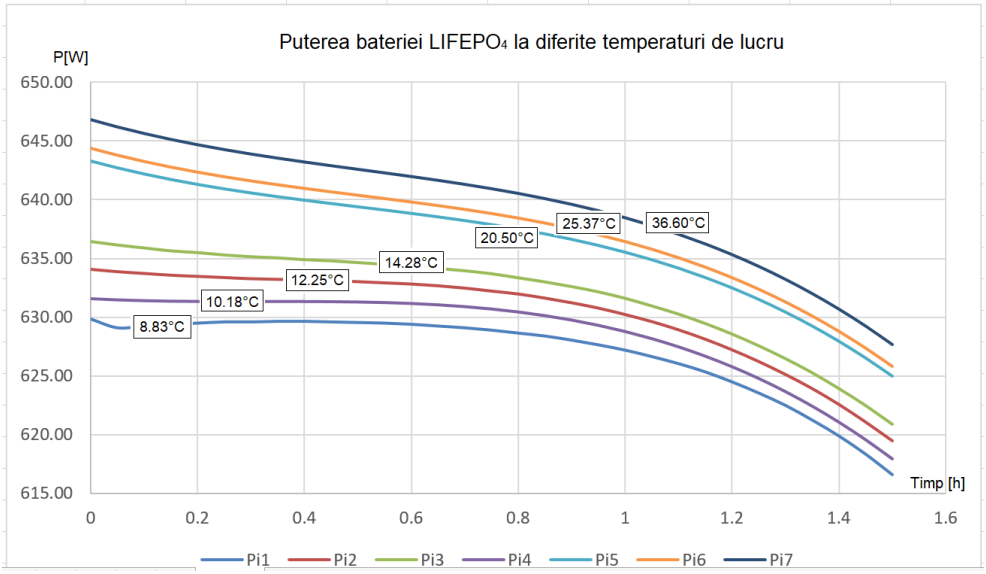

Figura 3.35. Influența temperaturii de lucru asupra valorii puterii cedate

Avantajul energetic ale cazului temperaturii de 25°C este evident, ceea ce presupune câștiguri energetice pe perioade lungi de exploatare. Acest avantaj este demonstrat de valorile cupletelor(P_m, T_m) prezentate mai sus.

În figura 3.35, se observă că, deși puterea la **25°C** este mai mică decât cea a temperaturii mai mari testate, avantajul este cel al menținerii valorii acestei capacități energetice pe perioade mai mari decât în cazul temperaturilor înalte, deoarece rezistența internă este cel mai bine conservată la această temperatură. Din aceste două considerente, de câștig de putere și de evoluție a rezistenței interne funcție de temperatură (a se vedea capitolul 1), rezultă că acest palier de 25°C este cel ***OPTIM.*** Dacă prin primele 7 experimente prezentate am demonstrat că nivelul de temperatură 25°C este cel optim pentru câștig energetic și conservare maximă a rezistenței interne în timp, prin experimentul 8, am punctat influența negativă a oscilațiilor de temperatură asupra funcționării bateriei LiFePO4.

*Experiment 10. Calculul energiei necesare menținerii unei temperaturi medii de 25°*C în alveola de depozitare

Rezistența de încălzire are valoarea de 6.8 Ω

Curentul absorbit din baterie pe circuitul de încălzire este 1.9 A

Puterea din circuitul de încălzire este $P = RI^2 = 24.55$ W

Durata experimentului a fost de 26.95 ore, respective 1617 min

S-au aplicat două pulsuri de încălzire, pulsuri prin care se înțelege un interval de timp de funcționare a circuitului de încălzire al rezistenței de încălzire. Aceste intervale de menținere a nivelului de putere P, le-am denumit puls1 și puls2 și se pot vizualiza în figura 3.39. Intervalele de timp de funcționare ale cicuitului de încălzire ce s-au aplicat pentru menținerea temperaturii optime LiFePO4 sunt: puls1 = 1.73 ore, puls 2 = 2.08 ore.

Energia consumată, denumită energie de menținere, necesară funcționării circuitului de încălzire în cele două pulsuri însumate a fost de: $E_{menținere} = 93.53$ Wh.

Media absolută a deviațiilor șirului de valori experimentale ale temperaturii T _LiFePO4 față de T_medie_LiFePO4 = 25.28°C, este de 6°C. Într-o altă

exprimare, pentru o durată de Timp_total = 27 ore, incinta bateriei LiFePO4 a fost caracterizată de temperatura medie 25.28°C, cu o fluctuație medie de 6°C.

Media absolută a deviațiilor șirului de valori experimentale ale temperaturii T _Microclimat față de T_medie_Microclimat = 23.79°C, este de 0.31°C

Efortul energetic de a menține temperatura medie 25.28°C, a fost de Emenținere = 93.53 Wh, pentru Timp_total = 27 ore. Din aceste date putem de deduce P_medie = $E_{menținere}$ / Timp_total = 3.47 W, pentru ΔT_LiFePO4_Microclimat = 1.49°C, ceea ce reprezintă diferența dintre temperaturile medii din incinta LiFePO4 (alveolă) și Microclimat.

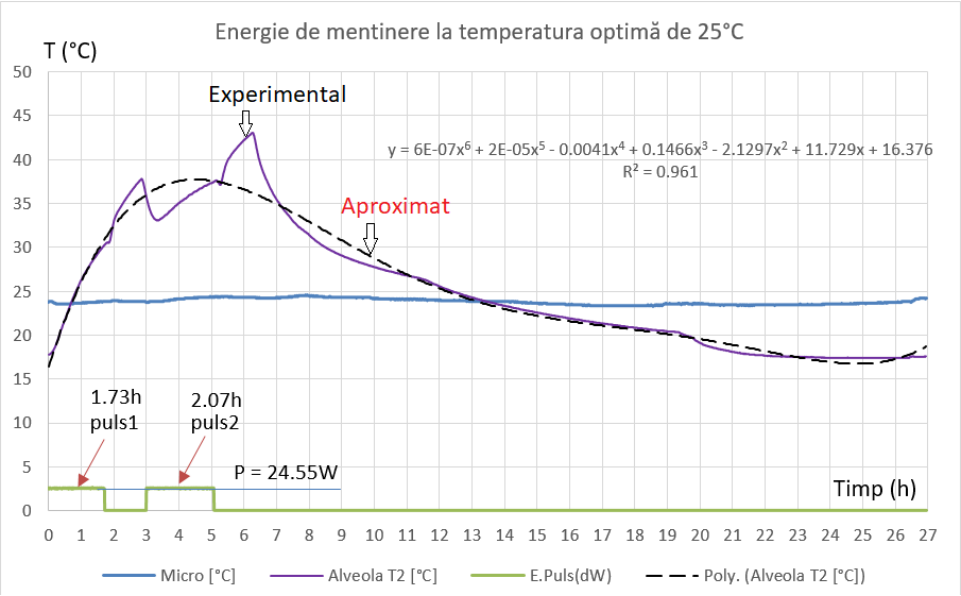

Figura 3.39. Detaliile experimentul 10

Pentru a deduce care este necesarul de putere pentru menținerea unei diferențe de 1°C între incinta LiFePO4 (alveolă) a modelului experimental și Microclimatul aceluiași model, vom utiliza raportul R = $P_{_medie}$ / $\Delta T_{_LiFePO4_Microclimat}$.
R = 2.34 [W/°C]

Simularea unui calcul energetic de menținere a temperaturii optime LiFePO4, într-un microclimat fără punte termică din spațiul Sud Muntenia, România

$T_{_microclimat}$ = 14°C (valoare teoretică). În acest caz: $\Delta T_{_LiFePO4_Microclimat}$ = 11°C (ținta fiind 25°C). Energia necesară menținerii temperaturii optime LiFePO4 pentru 1h va fi:

$\mathbf{E_{_necesară}} = R \cdot \Delta T_{_LiFePO4_Microclimat}$ = **25.74 Wh**

Raportată această valoare la energia unei baterii utilizate în modelul experimental, reprezintă **2.04%**. Dar în incinta LiFePO4, au loc 3 baterii identice, ceea ce impune că procentul energiei necesare scade la **0.68%** din capacitatea energetică instalată în acea alveolă (incintă LiFePO4).

CAPITOLUL 4. CONCLUZII, EVIDENȚIEREA CONTRIBUȚIILOR PERSONALE ȘI PERSPECTIVE DE CERCETARE VIITOARE

4.1. Concluzii

1. Deși în documentațiile tehnice ale producătorilor de baterii LiFePO4 se prezintă valorile de rerință ale acesteia, cu grafice de teste la temperatura de 25^0C, nu specifică nimeni în mod direct că această temperatură trebuie aplicată în operarea bateriei. Prin cercetările pe care le-am făcut, atât documentar, cât și experimental, am demonstrat că această temperatură de 25^0C este nivelul termic dedicat pentru a asigura bateriei un ciclu de viață maxim.
2. Identificarea temperaturii optime de lucru a bateriei prin studiu complex atât în zona de cercetare științifică, cât și în cea a laboratoarelor de cercetare proprii fabricanților de baterii LiFePO4. Acest studiu este valoros pentru argumentația științifică sintetizată.

3. Identificarea celor mai performante metode matematice actuale de monitorizare a evoluției bateriilor LiFePO4, în vederea calculării precise a indicatorului SoH, prin care utilizatorul va cunoaște foarte precis timpul de utilizare viitor față de un moment actual. Funcțiile de regresie polinomială utilizate în analiză AI/DLM, reprezintă un mijloc computerizat prin care valorile predictive sunt foarte precise.
4. Microclimatul este soluția energetică cea mai avantajoasă în orice punct geografic, indiferent de clima locală, deoarece pământul este o sursă regenerabilă de energie avantajoasă.
5. Infrastructura cu conectare prin punte termică interior-exterior a microclimatului, prezintă avantaje și dezavantaje sezoniere (pozitiv vara, negativ iarna).
6. Infrastructura fără conectare interior-exterior a microclimatului, prin ruperea punții termice prin diverse mijloace de izolare, prezintă numai avantaje, deoarece se instaurează izotropia termică și cvasi-constanță, ambele fiind natural instaurate în mediu.
7. Microclimatul utilizat în studiul întrerpins de demonstrare a avantajelor termice și energetice oferite de utilizarea acestuia, a fost unul defavorabil, cu punte termică între interior-exterior. Considerentul pentru care am recurs la acest tip de microclimat, a fost acela că, dacă voi obține rezultate pozitive în condițiile cele mai dezavantajoase, atunci o infrastructură de microclimat realizată corespunzător ruperii termice interiro-exterior, avantajele se vor amplifica valoric.
8. După cum se pot observa datele din cele două figuri de mai sus, în decurs de doar două luni, infrastructura cu punte termică și-a crescut valorile termice de referință (T1, T2, T3) de la 3 la 5°C. Aceste valori indică o legătură termică foarte pregnantă între interior și exterior. Astfel, referința de pornire către temperatura optimă de 25°C este în trend crescător, ceea ce reduce diferența termică țintă pentru optimizare și, implicit, consumul energetic pentru atingerea

valorii ideale. În acest context climateric, puntea termică este un factor de influență pozitiv, dar în trecerea anotimpurilor de la cald la rece, această referință va deveni un factor de influență negativ, crescând distanța față de ținta de 25°C

9. Prin aceasta se demonstrează că temperatura optimă stabilizată va cuprinde toate avantajele energetice, după cum urmează:

   - menținerea permanentă a bateriei la o cotă termică ce conferă posibilitatea exploatării unei puteri constante și încadrabilă în rândul temperaturilor înalte de lucru, despre care se știe că oferă randament maxim la ciclurile de încărcare/descărcare

   - chiar dacă puterea cedată la 25C este mai mică decât la temperaturile mai înalte, conform studiilor echipei de cercetare condusă de profesorul Omar, rezistența internă a bateriei va avea cea mai bună evoluție în timp, conducând la menținerea capacității de stocare a energiei în baterie pe perioada cea mai mare posibilă. Cvasi-constanța acestei temperaturi conduce la stabilizarea în timp a valorii rezistentei interne, ceea ce nu va crea paradoxuri ca cel prezentat în studiul „de șoc termic„, fapt care în mod cert crește gradul de uzură energetică al bateriei.

10. Bateria testată este nouă, fapt ce plasează cazul 25°C în numărul de cicluri de descărcare-încărcare până la care nu se produc diferențe ale rezistenței interne a bateriei de la o temperatură la alta. În acest context de cercetare defavorabil ipotezelor pe care mi le-am propus să le demonstrez, am reușit să pun în evidență efectul termic asupra puterii cedate instantanee.

11. Timpul va face diferența între regimurile termice de utilizare a bateriei, prin aceea că, orice alt nivel de temperatură decât cel de 25^0C, duce la pierderea ireversibilă a capacității de stocare energetică și, implicit, a duratei de exploatare.

12. Conexiunea la exterior a spațiului subteran este bună în anotimpul cald și contribuie la încălzirea spațiului de depozitare la 25^0C. Deci trebuie exploatată

13. Bateria utilizată acomodată la mediu pe perioade lungi de timp, face ca „substanța chimică„ din interiorul carcasei să aibă suficient timp pentru stabilizare termică și, implicit, creșterea calității energiei cedate (U și I stabili) și menținerea cât mai îndelungată a rezistenței interne.
14. În cadrul studiului, am prevăzut un experiment special dedicat șocului termic. O baterie stabilizată luni de zile la mediul unui microclimat, cu fluctuații maxime de 1-3 la 24 ore, a fost supusă răcirii bruște, într-o alveolă termică de răcire, cu pornire de la temperatura ambiantă de 22°C, până la 8°C într-un timp de 8 ore, după care s-a efectuat o descărcare moderată de 0,15C, pentru a observa oscilațiile parametrilor U și I. Concluzia este că fluctuația termică bruscă conduce la scăderea calității energiei (U și I au oscilații instantanee crescute).
15. Conceputl de „casă în casă„ s-a dovedit a fi principalul suport de realizare a netezirii oscilațiilor termice din microclimat, până la nivelul cvasi-constanței. Astfel alveola termică este incinta din incinta microclimatului, prin care bateria primește stabilitate termică, iar energieile de menținere la palierul optim de 25^0C, vor fi minim posibile.
16. Componenta de protejare a mediului: Folosind echipamente frigotehnice reciclate/rebuturi de fabricație, se dă o soluție reală protejării mediului prin nefabricarea altor incinte speciale și nici cheltuirea de energie pentru reciclare.

4.2. Contribuții personale

1. Am realizat un studiu amplu de identificare a OPTIMULUI DE TEMPERATURĂ și cuantificare a câștigurilor energetice pentru bateria LiFePO4
2. Am conceput un model de calcul al fezabilității unei investiții într-un sistem energetic de tip PV.Off.grid.
3. Am realizat în concepție proprie, un dispozitiv IoT, bazat pe cel mai performant și ieftin microcontroler existent în zona comercială, respectiv ESP32. Acest dispozitiv a fost testat timp de 4 luni iar rezultatele sunt promițătoare în vederea unei variante comerciale.

4. Am realizat un sistem de înregistrare on-line a datelor de monitorizare mediu de depozitare baterii. În acest sens amintesc realizarea site-ului de lucru www.baterie.cmcode.ro, prin care am vehiculat datele experimentale. Acest site a fost testat timp de 4 luni iar rezultatele sunt promițătoare în vederea unei variante comerciale.
5. Am inovat sistemul alveolă termică care, pe lângă avantajul termic de netezirea oscilațiilor termice ale microclimatului, are și avantajul izolării bateriilor pe grupuri, ceea ce reduce riscul de incendiu a întregii capacități nergetice de stocare, în caz accidental.
6. Prin utilizarea microclimatului la depozitarea bateriilor, am dat o soluție viabilă pentru securizarea vieții utilizatorilor în caz accidental de incendiu.

4.3. Perspective de cercetare viitoare

1. Deși „chimia„ bateriei este stabilizată, fluctuațiile termice ale mediului alveolei termice, respectiv incinta izolată a bateriei, au fost asimilate, pe perioada experimentelor, ca fiind și fluctuațiile „chimiei bateriei„. Dar în realitate este o diferență ce trebuie exact determinată. Inerția termică a substanței din baterie este considerabilă și nedeterminată exact. Deci temperatura pe care am asociat-o cu puterea medie cedată, este una apropiată de cea a „chimiei„ bateriei, dar nu întocmai aceea. Pentru ridicarea preciziei modelului, în perspectivă, voi face un studiu dedicat inerției termice a „chimiei„ bateriei în raport cu fluctuațiile netezite din alveola termică de depozitare a bateriei LiFePO4.

2. În graficul de detaliu din figura 3.39. se observă că oscilațiile parametrilor U și I indică o dezordine electrică pe care nu am surprins-o la nici-un alt set de date experimentale, unde bateria și chimia „acesteia„ era stabilizată termic pe perioade lungi de timp. Rezultatele acestui experiment îmi confirmă că termicitatea nestabilizată a chimiei a produs evoluții dezordonate ale parametrilor U și I, ceea ce îmi indică necesitatea, în perspectivă, a unui studiu foarte detaliat la fluctuațiile de temperatură accentuate, pe perioade scurte de

timp, asemeni ciclurilor noapte-zi din anotimpurile de trecre (primăvară, toamnă). Interesant va fi și extinderea acestui studiu pe specificul zonelor calde (tropicale/subtropicale), deoarece o mare parte a sistemelor PV cu randamente solare maxime sunt amplasate în acolo.

3. Camera de luat vederi în infraroșu și procesarea de imagine vor reprezenta două componente de bază pentru studiile viitoare cu privirire la inerția termică a „chimiei bateriei„ în raport cu temperatura alveolei termice.

4. Se poate schimba paradigma cercetării bateriei LiFePO4, printr-un studiu comparativ al similitudinilor dintre „exploatarea„ în timp a corpului uman și exploatarea în timp a bateriei.

5. Studiile avantajelor noului concept de depozitare a bateriilor, care prelungește viața acestora fără costuri suplimentare, poate conduce la:

- încurajarea mediului rural/urban să investească în stocarea energetică prin baterii LiFePO4.
- stimularea concurenței în rândul producătorilor de baterii.
- stimularea exploatării în comun a unor spații de depozitare cu capacități mari de stocare energetică, astfel încât să fie acoperite zone rurale/urbane la nivel de cartiere.

6. Recuperarea căldurii generate de echipamente (inverter, charger) conduce la un studiu aparte, reprezentând o perspectivă a cercetărilor viitoare, pentru creșterea randamentului energetic al sistemului PV-Off-Grid.

Posibilitatea utilizării mișcărilor convective din climatul exterior pentru substituirea ventilării artificiale a microclimatului.

THESIS ABSTRACT

Contributions to the optimization of LiFePo4 battery system operation in residential photovoltaic installations, using the thermal energy of the earth

Prof. Dr. Ing. Valentin Dogaru

Ing. Fedlallah ISSA

2023

CONTENT

CHAPTER 1. STUDY ON CURRENT LIFEPO4 BATTERY STORAGE SOLUTIONS IN RESIDENTIAL PHOTOVOLTAIC SYSTEMS AND THEIR PERFORMANCE AND FUNCTIONAL CHARACTERISTICS 3

CHAPTER 2. EXPERIMENTAL STUDY ON THE CVASI-THERMAL CONSTANT OF AN ENCLOSURE WITH A HIGH DEGREE OF THERMAL INSULATION, INTEGRATED IN AN UNDERGROUND ENCLOSURE MICROCLIMATE 18

2.1. The integration into an underground microclimate of an enclosure with a high degree of thermal insulation 18

2.2. The experimental model for the study of the quasi-constancy of the microclimate 21

2.2.1. The central idea of the Microclimate system and what is being pursued through the experiments carried out 21

CHAPTER 3. OPTIMIZED OFF-GRID PHOTOVOLTAIC ELECTRICAL ENERGY STORAGE SYSTEM, USING THE EARTH'S RENEWABLE THERMAL ENERGY 26

3.1 Concept of the optimized LiFePO4 battery storage system 26

3.2. System for monitoring and regulating the environmental parameters of the microclimate 31

3.2.1. The direct method of experimental data processing. Direct determination of the average yield power of the LiFePO4 battery 32

3.2.2. Experiment 10. Calculation of the energy required to maintain an average temperature of 25°C in the storage cell 34

CHAPTER 4. CONCLUSIONS, HIGHLIGHT OF PERSONAL CONTRIBUTIONS AND PROSPECTS FOR FUTURE RESEARCH 37

4.1. Conclusions 37

4.2. Personal contributions 39

4.3. Future research perspectives 40

CHAPTER 1. STUDY ON CURRENT LIFEPO4 BATTERY STORAGE SOLUTIONS IN RESIDENTIAL PHOTOVOLTAIC SYSTEMS AND THEIR PERFORMANCE AND FUNCTIONAL CHARACTERISTICS

The idea of "off-grid" represents a desire of any household consumer, in the current energy conditions, when the price of a kilowatt-hour of electricity is strictly increasing. Photovoltaic panels are the system elements through which we convert solar energy into electricity, and their manufacturers guarantee their good operation for 25 years. This fact is a great advantage, ensuring such a high continuity of operation, but the disadvantage, as a whole, of a photovoltaic system, is the storage of the electricity produced during the favorable solar moments of the day. The electronics allow a series of switches that stop the energy production of the photovoltaic panels when the energy flow is not consumed at the end, but the fact that such a large investment remains unused for long periods of time, due to the lack of storage capacity or an oversizing of the productive area, it is uneconomical and non-depreciable. Energy storage becomes a key factor in the entire energy production system, sizing this capacity optimally in relation to production and consumption capacities, becoming the main lever for economic return on investment. I said energy storage, not adding attributes. This storage can be electrical, but also thermal. Favorable solar periods, generating energy quantities much higher than the current consumption, need an appropriate energy storage system, both electrical in nature, but which can also be thought of in terms of thermal nature. Thus, when the solar production is zero, these accumulated energies should be returned to the consumption circuits, both electrical and thermal. The design of a photovoltaic system involves taking into account many

technical aspects, such as solar irradiation and the capacities of photovoltaic panels and integrated batteries [1]. The design can also include the aspect of energy exchange between smart homes built according to the same technical principle [2]. In figure 1.1. the suite of previous ideas for a full fixation of the working logic of a well-proportioned photovoltaic energy system is schematized. Solar energy naturally generated by the sun (0) is captured by the PV (Photo Voltaic) subsystem (1), generating a continuous flow of electricity to the controller (2). Element (3) is a connecting element, of a conductive nature, called "BUS-BAR", which is an "intersection" point between the inverter (4), the electric storage battery group (6) and the controller (7) that converts direct electrical energy into heat.

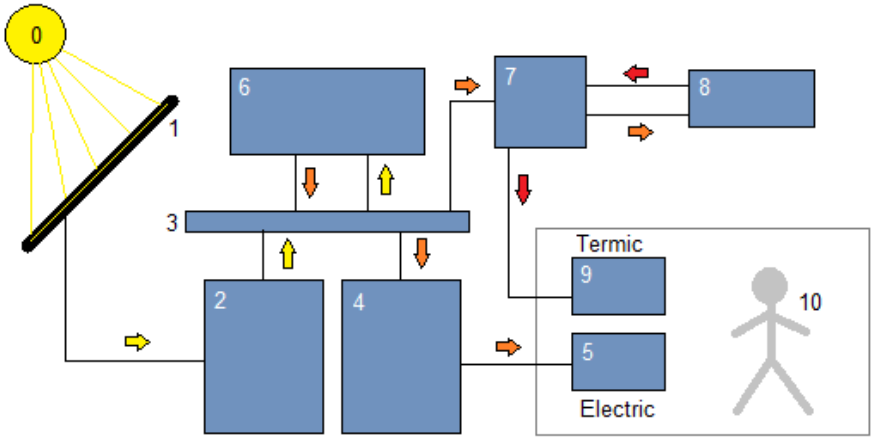

Figure 1.1. Complex storage PV energy system

The heat generated by the controller (7) is injected into the thermal storage subsystem (8), from where the thermality is taken over, at a given moment, by the same controller (7), to be injected into the thermal consumer (9). The electric consumer (5) is powered by the inverter (4), whenever needed, having maximum (total) priority. The beneficiary (10), the man, thus has at his disposal two energy flows for household or office needs. The energy system is complex because if the

electrical storage in the batteries is brought to 100% capacity and the electrical consumption is below the production capacity of the system, then the solar energy is additionally stored in the thermal storage subsystem (8) by converting electricity into heat at the controller level (7). Note: The thermal storage element (8) is, as a rule, a hot water storage container, a container with a high degree of thermal insulation, to maintain thermal energy for as long as possible. The English name is PUFFER, and this name is used in the following, in certain subsections that required the express use of the same term, with direct reference to the storage element (8) in the diagram in Figure 1.1. The thermal storage capacity is additional, in case this is desired or, initially, the energy dimensioning was wrong as a balance between the production (1), consumption (5), and storage (6) capacities. Investments can be considered relatively high if the amortization rate is not comparable to the electricity bill in its average monthly value. When we say comparable, we mean approximately equal, but ideally the amortization rate would be lower than the average monthly invoiced value for the current year, at the time when the economic calculations are performed. The economic calculation that accompanies the investment is very important, as well as the judgments regarding the quality of the components of the energy system. The price/quality ratios are defining in stabilizing the real value of the depreciation rate, otherwise, the lack of prediction of the non-guaranteed component of the inherent maintenance process that accompanies the actual operation, can complicate the economic calculation, the beneficiary of the system being able to delude himself about investment efficiency. Energy management is an important aspect that must be taken into account, where the off-grid system can be upgraded by integration into the national grid and its own production sequences succeed the supply from the energy system of the national grid [3].

How much energy will be stored in the battery during its active life?

In figure 1.10 below, we have synthesized the spectrum of Dk data that technically characterizes a LiFePO4 battery, to track what is needed for information when studying a manufacturer's technical documentation. In order to analyze a battery, we designed a calculation model of a quantity, by which the energy performance of the battery and the price/quality ratio can be appreciated from certain points of view. If the optimal conditions of the manufacturer are respected, the limit of the assumed number of cycles N_C (D_4) will be reached. The indicated depth of discharge D_9.1, between the maximum-D_9.2 and minimum-D_9.1 limiting states of charge, tells us the percentage of energy transported by the battery in 1 cycle. Nominally, the transmitted energy E_(e.1) per 1 cycle is estimated from the data U_nominal (D_1) and C_nominal (D_2) with the relation (1.14). Following the DoD prescriptions, the limited transmitted energy E_(e.1) is determined with the relation (1.15).

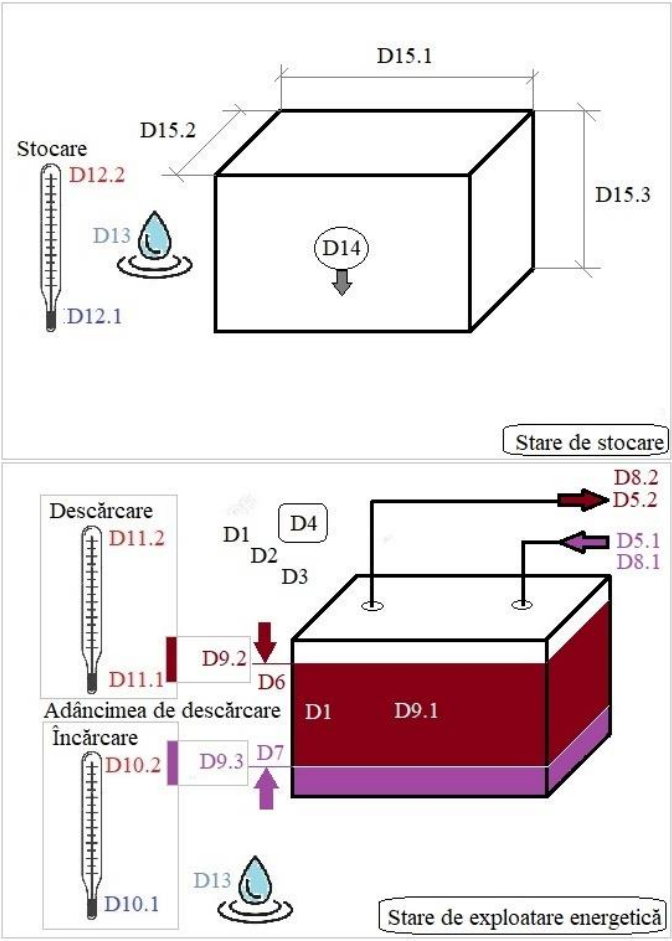

Figure 1.10. The symbolization of the technical data Dk
that characterizes a LiFePO4 battery

The energy circulated through the battery during the entire active life will be estimated with the relation (1.16). The result is expressed in Wh, for kWh we will use the relation (1.17).

$E_{n.1} = D_1 \times D_2$ (1.14)

$E_{e.1} = D_{9.1} \times E_{n.1} = D_{9.1} \times D_1 \times D_2$ (1.15)

$E_{A.N_C}^{W} = E_{e.1} \times D_4 = D_{9.1} \times D_1 \times D_2 \times D_4$ (1.16)

$E_{A.N_C}^{KW} = E_{A.N_C}^{W} \times 10^{-3} = D_{9.1} \times D_1 \times D_2 \times D_4 \times 10^{-3}$ (1.17)

How much does it cost to store electricity in the price of one Kilowatt.hour. PV.off.grid? The price of the battery P_B(D_16) allows us to relate this value to the total energy transported by the battery throughout its active life and obtain an index I_S of the price of energy storage, share of the price of a kWh.off.grid.PV, with the relation (1.18).

$I_S = E_{A.N_C}^{KW\ -1} \times D_{16}$ (1.18)

How much does 1 kWh cost? PV.off.grid knowing the share of the cost of energy storage within the cost of the total investment with the PV.off.grid energy system? Within the total energy investment cost, the storage cost is a percentage P_S(%) of the whole, which we consider known from a series of real data obtained from real case analyses, such as the one inserted in this chapter. How do we calculate the cost share with electricity storage in the simple PV.off.grid energy system model? Using the notations presented previously, the additional relation (1.19) will be taken into account.

$P_S = \frac{A}{CA_1}$ (1.19), where A is obtained by relation (1.1), and CA1 by relation (1.4)

The approximate cost of a kWh.PV.off.grid will be calculated with the relation (1.20).

$C_{1KW.h.PV.off.grid} = \frac{I_S}{P_S}$ (1.20)

The optimal working conditions in the case of a LiFePO4 battery, according to the analysis and synthesis of the data from the study undertaken

Temperature is a decisive factor on the evolution of the LiFePO4 battery over time. Cycle of use with cycle of use, the battery loses value from its initial nominal capacities, and this fact is an irreversible process. The initial energy capacity is no longer reached over time, but the evolution of the parameters is a continuously decreasing one. The problem of optimization is one of preserving, as far as possible, the initial nominal values from which the effective operation of the battery starts. Levels are evolutionary states that I consider to be areas of conservation, i.e. of maintaining the value of a parameter, which entails the conservation of energy capacity over time. The study I undertook in this chapter was a careful search in all possible areas of information to find the most pertinent observations on how a battery's original capacity can be preserved over time, in in order to benefit from this energy storage capacity for as long as possible. We put a lot of emphasis on scientific research work in the field of LiFePO4 energy storage, finding a series of very valuable data from which we deduced the optimal temperature at which a LiFePO4 battery works. We reached the same value from the study of the technical documentation of LiFePO4 batteries, offered by manufacturers/distributors. Also, the PV.off.grid good practice real case study, opened my perspective of the same optimal working temperature value with the storage element. Equally important were the discussions with battery sellers contacted through the media, who confirmed the same to me about the operation of LiFePO4 batteries, as well as the technical documentation and scientific papers. This last fact confirmed to me that those who deal with the sale of batteries are technically above average and take the technical data from the manufacturers very carefully in order to be successful in this time of trade, which is very difficult in the conditions which customers are dissatisfied and their expectations related to the energy capacity are not for 1 year, but for many years after the start of exploitation of these types of batteries. What follows in this last synthesis, refers to putting together all the collected information, analyzing and synthesizing them in a written material through which I can define the optimal operating framework of a LiFePO4 battery, at the current level of the

knowledge accumulated by the technicians. Off-grid photovoltaic systems are highly dependent on storage capacity. The loss of this capacity leads to the approach of the moment when the user will have to reinvest to restore it. At that time, the energy costs will increase substantially, because the group work of a new battery with used ones, is done by long times of leveling of the capacities coming to the confluence and thus, the new capacity cannot be used at its initial nominal value. This case would lend itself to the situation where it is desired to clean the group of batteries with new ones. If new groups of batteries, different from the old/used groups, are introduced, an energy management of intermittent switching from the new group to the old group is necessary, in order not to produce a parametric difference between the "used" and "used" chemical structures the "fresh" ones, causing acceleration of the degradation of the newly added elements. In both cases, the premature loss of the energy capacities of the batteries in the group leads to re-investment and, automatically, to an increase in the cost of the PV.off.grid kilowatt-hour. To avoid the premature loss of energy storage capacity, the following essential factors must be taken into account, which we have selected as the most important:

- The temperature at which the battery is stored for a long time
- Level/State of Charge at the time of battery storage
- The maximum time at which the stored battery must be recharged, while it depends on its natural discharge, to maintain the minimum energy required for good conservation
- The temperature at which battery charging occurs
- The temperature at which battery discharge occurs
- Battery charging rate
- Battery discharge rate
- Maximum depth of discharge (charge level at which the battery discharge process stops)

- The minimum and maximum Charge Levels/States between which the operating range of the battery is placed
- Ensuring discharge interruptions when the minimum acceptable battery level has been reached
- Ensuring charging interruptions when the maximum acceptable level for the battery has been reached

Figure 1.17 shows the optimal conditions for the LiFePO4 battery storage situation. Maximum humidity of 95% is an acceptable limit, but it is not a threshold value to keep the battery at. The value of 60% is optimally recommended by the major battery manufacturers. A tolerance range of +25% is applied to this central value, which means that in my model, I retain this value. Note: documentary sources from major manufacturers/distributors of LiFePO4 batteries, selected by me for citation, as I found a full range of useful information and assumed by economic agents with large turnovers in the field and issuing guarantees of up to at 10 years, under the conditions imposed by them through BMSs: [42-44].

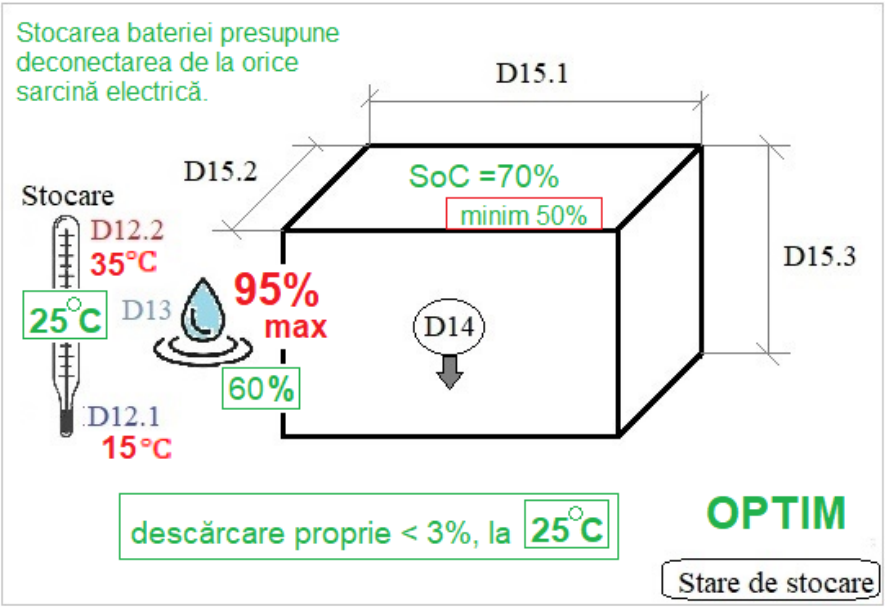

Figure 1.17. Optimum LiF3Po4 battery storage conditions

So, regarding the storage of the battery for a shorter or longer period, the optimal conditions are those indicated in figure 1.17. The battery disconnects from any load, especially from chargers which, in idle mode, if connected to the battery, are a load that produces consumption in the battery circuit. A temperature of 250C is indicated as optimal for storage, with battery self-discharge at a possible minimum. At other temperature levels, the so-called "self-discharge" is greater and the "evaporation" of energy from the battery is accentuated. Optimum humidity for battery storage/use is 60%, value tolerated within broad limits of +25%, central value is 60. If the space where the battery is stored is centered on this value, then the demand on battery chemistry from of this environmental parameter, will be minimal, leading to increased battery life.

Model		NE-48D100-WP
Electrical Characteristics	Nominal Voltage	48V
	Nominal Capacity	100Ah
	Energy	4800Wh
	Internal Resistance	≤100mΩ (without BMS)
	Cycle Life	≥5000 cycles（25℃ 80%DOD）
	Design Life	≥10 years @25℃
	Self-Discharge (90 days)	≤5%，@25℃
	Efficiency of Charge	≥98%
	Efficiency of Discharge	≥100% @ 0.2C ≥96% @ 0.5C
Charge	Charge Voltage	54.0V±0.5V
	Charge Mode	0.2C to 54.0V, then 54.0V charge current to 0.02C (CC/CV)
	Max. Charge Current	100A
	Charge Cut-off Voltage	56.25V±0.2V
Discharge	Max. Continuous Discharge Current	100A
	Discharge Cut-off Voltage	42V±0.2V
Environmental	Charge Temperature Range	0℃~60℃
	Discharge Temperature Range	-20℃~60℃
	Optimum Operation Temperature	5℃~45℃
	Storage Temperature	0℃~45℃, ≤85% relative Humidity
	Water Dust Resistance	IP20
Mechanical	Case	Iron (Insulation painting)
	Dimensions (including the handles)	442*450*156mm
	Weight	45kg
	Gravimetric Specific energy	107Wh/kg
Others	Method	15S Cylindrical cells
	Protocol	RS485 (3 Nos) / RS232/CAN
	SOC Light	4 * LED
	LCD Screen	Optional, the default setting is no screen

Figure 1.18. A complete set of information about LiFePO4 battery Documentary source of the chart: https://www.evlithium.com/home-battery-energy-storage/48v-100ah-wall-mounted-LiFePO4-battery.html

I presented this integrated table in figure 1.18 of the NER-48D100-WP battery, EVLITHIUM [45], because the manufacturer very clearly conveys the warranty conditions of over 10 years, namely the temperature of 250C, and for DoD the value of 80% (red arrow). It clearly associates these two operating conditions, which gives a degree of seriousness on the part of the one who offers the guarantee of his product. Laboratory studies and a lot of data from the operation of their own products in real conditions, have allowed the manufacturer to issue this conditional information that the user appropriates in the product guarantee game. The charging current is indicated as the optimal value of 0.2C (green arrow) and, at the same value of the discharge current (blue arrow) a maximum efficiency of 100% is found, unlike the case of a discharge at 0.5C which leads to a efficiency drop by 4% compared to the maximum case. Self-discharge or self-discharge (pink arrow) is minimal also under the temperature conditions of 250C. The degree of protection against dust and moisture is small (purple arrow) of IP20, which indicates an indoor

location of this product, taking the idea of working environment into a human ambiebtal space, residential living/office. Figure 1.19 shows the decrease in the storage capacity of the battery during its operation in charge-discharge cycles. A small DoD is observed to lead to longer battery life and more efficient operation, increasing the number of kilowatt-hours stored over time.

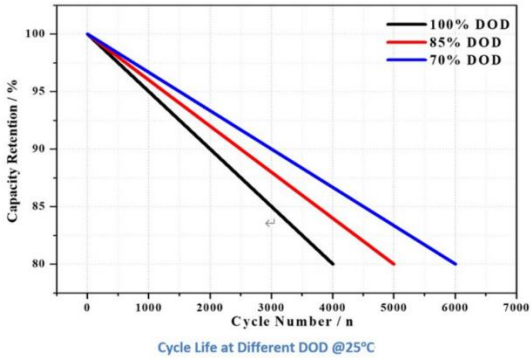

Figure 1.19. Energy retention capacity vs. DoD, with life-extending effect.
Documentary source of the chart: https://www.evlithium.com/home-battery-energy-storage /48v-100ah-wall-mounted-LiFePO4-battery.html

After 6000 cycles with DoD 70% a storage threshold of 80% is reached, while if DoD 100% is used the same threshold is reached after only 4000 cycles. In the first case, until the drop to 80% of the storage capacity, the stored energy in total is 4200 Enominal.battery, while in the second case the stored energy is 4000 Enominal.battery. Interestingly, the maximum is obtained at DoD 85%, a special case in which the stored energy is maximum, namely 4250Enominal.battery. The manufacturer's recommendation is DoD 80%. Figure 1.20 summarizes the results of the analysis of this extensive documentary study, regarding the general optimal framework for working with a LiFePO4 battery, to extend its life over 10 years and work at maximum efficiency (100%). For this table with LiFePO4 optimal thermal exploitation conditions, there are a number of scientific arguments that prove, unequivocally, that the temperature of 250C is the value that maximizes all the performances of this type of battery. The problem with this battery is different when using it in Electric Vehicle applications, where the seasons produce large thermal

fluctuations from one time of day to another, but in the case of residential/office buildings, we do not face these climatic exposure situations. In the next chapter I will present a viable economic solution to achieve the optimal operating framework of LiFePO4 type batteries, that framework shown in the figure below. As can be seen in the picture in figure 1.20, the central environmental condition is the temperature of 250C. We limited the thermal oscillations of the environment by an interval of 6 units, +30C. The humidity is, as in the case of battery storage, at the same value of 60%. The charging current is equal to the discharging current and has a value of 0.20C. The DoD depth of discharge is 80%, located between the minimum charge state of 10% and the maximum charge state of 90%. To substantiate the temperature of 250C as OPTIMAL THERMAL LiFePO4, I bring two scientific arguments, taken from a valuable scientific paper, the paper with the citation information reproduced below, as well as a printscreen of the prestigious Applied Energy magazine, printscreen in which you can see the factor of impact of this internationally renowned publication.

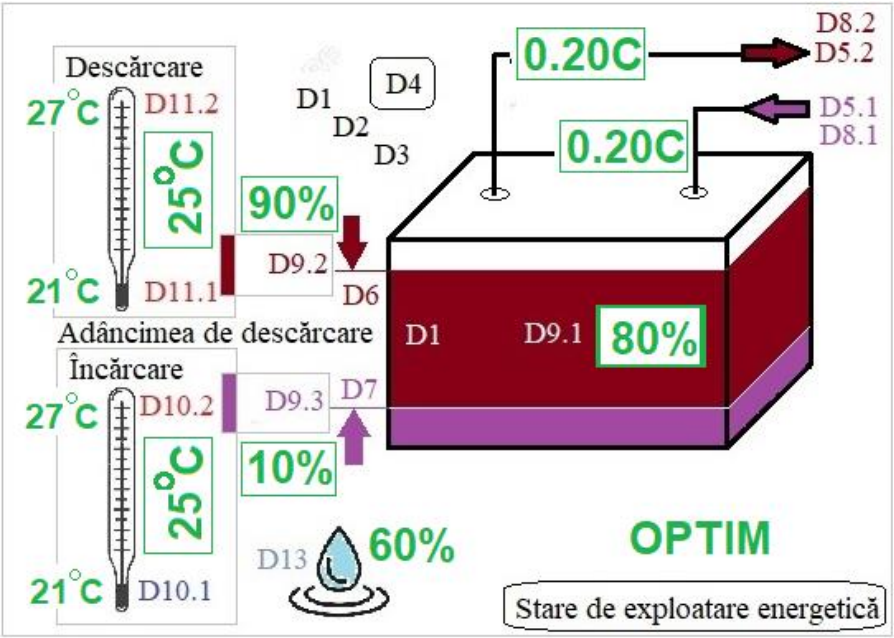

Figure 1.20 – Optimum LiF3Po4 battery storage conditions

Description of the optimal LiFePO4 operating framework:

Based on the data from this paper [11], we were able to reconstruct a mathematical model that highlights the effects of temperature on the performance of the LiFePO4 battery. This math involves two aspects: A1. ARGUMENT 1 function, determined by the authors of the mentioned work, intended for calculating the number of cycles of maximum stress of a LiFePO4 cell, depending on the temperature at which it worked during stress. The representation of the function is in figure 1.22. A2. ARGUMENT 2 functions, determined by the authors of the mentioned paper, intended for the estimation of the internal resistance of a LiFePO4 cell, depending on the temperature at which it worked during the application. The representation of the function is in figure 1.23. I conclude by stating that an optimal working space for a LiFePO4 battery must have a constant temperature of 250C, with minimal fluctuations around this value, of +20C and -40C, a range that ensures a maximum determined with the function ARGUMENT 1, respectively 21-2700, 22-2711, 23-2718, 24-2720, 25-2717, 26-2709, 27-2694.

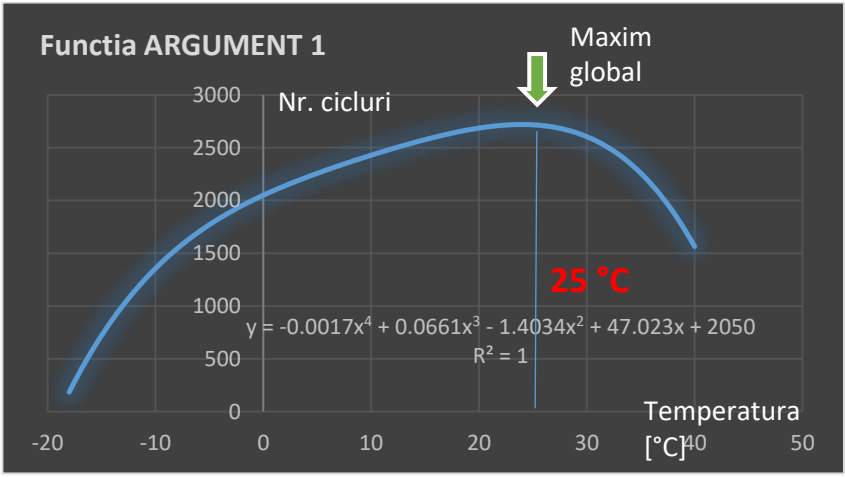

Figure 1.22. Argument Temperature - Number of LiFePO4 cycles The documentary source of the data by which the graph was built:Omar, N., Monem, M. A., Firouz, Y.,Salminen, J., Smekens, J., Hegazy, O., ... & Van Mierlo, J. (2014). Lithium iron phosphatebased battery–Assessment of the aging parameters and development of cycle life model. Applied Energy, 113, 1575-1585.

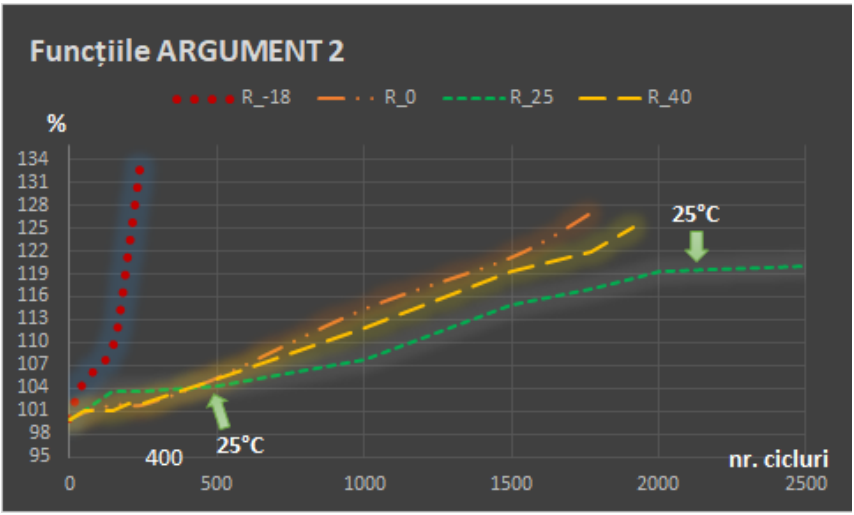

Figure 1.23. The Temperature - Internal Resistance LiFePO4 Argument The documentary source of the data by which the graph was built:Omar, N., Monem, M. A., Firouz, Y., Salminen, J., Smekens, J., Hegazy, O., ... & Van Mierlo, J. (2014). Lithium iron phosphate based battery–Assessment of the aging parameters and development of cycle life model.Applied Energy, 113, 1575-1585.

So, I ended up setting the fluctuation range 21-27, centered on the 250C value. It is very clear, in figure 1.23, that after a relatively small number (about 500) of cycles consumed, the internal resistance at 250C has the best evolution on the spectrum of working temperatures. Corroborating the two decisive arguments, the temperature of 250C is the thermal optimum.

CHAPTER 2. EXPERIMENTAL STUDY ON THE CVASI-THERMAL CONSTANT OF AN ENCLOSURE WITH A HIGH DEGREE OF THERMAL INSULATION, INTEGRATED IN AN UNDERGROUND ENCLOSURE MICROCLIMATE

2.1. The integration into an underground microclimate of an enclosure with a high degree of thermal insulation

The renewable thermal energy of the earth can ensure the attenuation of the amplitude of climatic heat waves in a certain geographical point, by using the space of an underground enclosure. This attenuation of the thermal amplitude can be smoothed out by an emphasis on the leveling of this amplitude over time, until bringing it to the level of thermal quasi-constancy in relation to the climatic thermal wave, by integrating into the underground enclosure another enclosure, respectively a enclosure with a high degree of thermal insulation. According to DEX, microclimate is defined as "the totality of climate conditions (temperature, humidity, wind) specific to small spaces". We took this definition to adapt this semantics to the technical system that we designed and realized by means of a demonstrative experimental model. This system is dedicated to the thermal optimization of the storage space of LiFePO4 batteries throughout their use, through the collateral exploitation of the renewable thermal energy of the earth. Temperature and humidity are the two active climatic components of the underground work space, the wind component being non-existent and non-determining in the studies we have carried out. But the hypothesis of using this microclimate component is intended to be studied and exploited, in the perspective of future research, for regulating both the temperature and especially the humidity of the microclimate environment. The central idea from which I started, determining all my scientific actions

undertaken, was to demonstrate that the thermal quasi-constancy of the space in which the LiFePO4 battery is stored for its use, is the thermal threshold unaffected by seasonal and/or daily thermal climate changes night, from which they can adjust the optimal temperature level at which the LiFePO4 battery gives the system maximum energy performance. This thermal threshold I'm talking about is one installed in the microclimate naturally, without energy costs, if an underground enclosure is chosen as the microclimate enclosure. Figure 2.1 shows the idea of microclimate as the main attenuator of the climatic heat wave. The underground enclosure is the beneficiary of the thermal inertia of the earth, conserving this property as a source of renewable thermal energy.

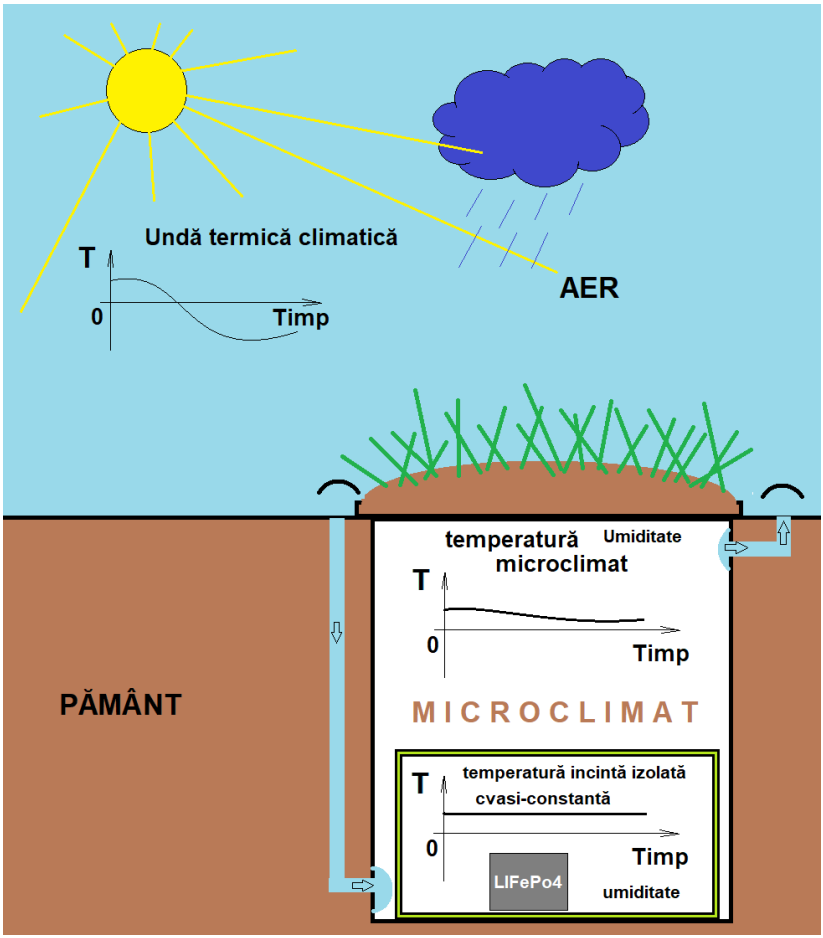

Figure 2.1. Isolated enclosure in microclimate underground enclosure

The natural stabilization of the microclimate on this thermal threshold constitutes the physical action of exploiting the earth's thermal energy. Once this natural threshold is reached, we move on to the refinement phase of the idea of thermal optimization of the LiFePO4 battery space. This refinement involves the integration of another enclosure with a high degree of thermal insulation, within the established natural microclimate, to become the effective storage space for the battery. By using this thermally insulated enclosure, the

aim is to smooth out the thermal wave already attenuated by the microclimate in relation to the thermal variations of the external environment dictated by the seasonal and day/night cycles. The microclimate is therefore the basic space from which to build the thermal optimization system of the LiFePO4 battery, which will ensure the optimal constant temperature documented in chapter 1, a value equal to 250C, at the lowest maintenance energy consumption. No temperature conditioning system, necessary to maintain the optimal LiFePO4 temperature, can compare, in terms of consumption level and overall efficiency, with the thermally insulated enclosure microclimate system, because maintaining a constant temperature of an underground enclosure is a proven fact , known and exploited for thousands of years, without any energy cost. An additional advantage, in addition to the thermal one exposed amply above, is that of securing against any risk of fire that could occur in the exploitation of LiFePO4 batteries, even if the manufacturers' assurances are positive in this regard.

2.2. The experimental model for the study of the quasi-constancy of the microclimate

2.2.1. The central idea of the Microclimate system and what is being pursued through the experiments carried out

Maintaining a constant temperature of the battery bank in a photovoltaic system must be achieved with zero energy consumption. For this purpose, the thermal fluctuation of the interior must be studied, in response to the thermal fluctuation dictated by the outdoor climate.

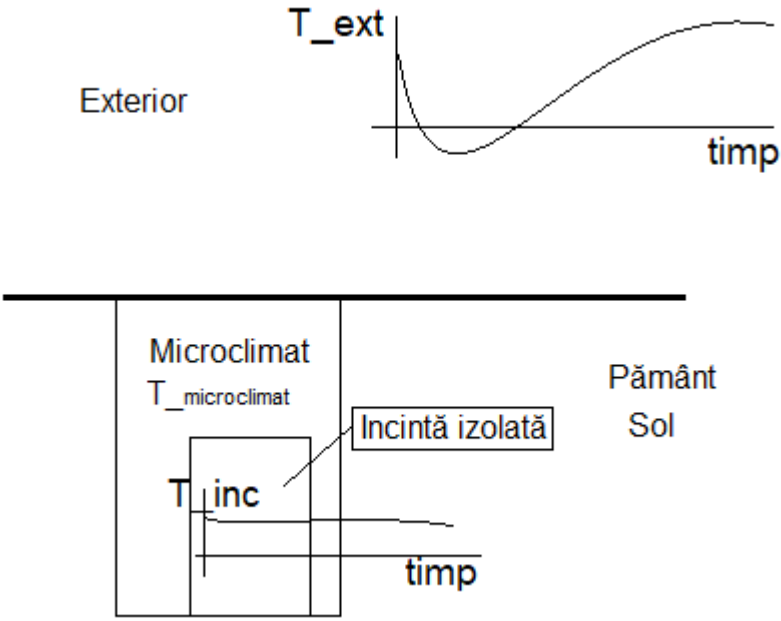

Figure 2.10. Hypothesis of the Microclimate thermal damping system

As can be seen in the imagined state in figure 2.10, the random fluctuation of the external temperature Text insignificantly affects the evolution of the temperature Tint. The microclimate is a buffer zone where the fluctuations caused by the outside climate are dampened, thanks to the thermal inertia of the earth (soil) which "absorbs" any increase or decrease of the $T_{microclimate}$ parameter. This thermal model will have to be demonstrated in the following, the experimental data being the ones that will highlight the characteristics imaginatively presented in figure 2.10. Obviously, this is the imagined ideal situation, from which the research started. In reality, the technical framework is created through which any inadvertences to the state shown in figure 2.10 can be automatically corrected by a system with a controller and sensors. All this correction is obviously done with electricity consumption also taken from photovoltaic production. This amount of energy must be the minimum possible,

and in this minimization the idea of optimization is developed. This energy will be called the electrical energy consumed to maintain the optimal operating temperature of the LiFePO4 battery, respectively the target temperature demonstrated by documentary study in chapter 1.

Summary Central Idea: Naturally, the underground enclosure will form a thermal buffer space. Seasonal function, the "pit in the ground" will have constant temperature walls, if there are no areas of thermal conductivity that could transport "cold" or "heat" from outside.

Concrete can change the natural state of constant soil temperature by a few degrees, through the thermal bridge it constitutes between the climate outside and the microclimate inside the underground enclosure, with microclimate status.

The introduction of a second enclosure, on the principle of "house in house" construction, produces another leveling of the thermal amplitude attenuated from the microclimate, so that the desired quasi-constancy can be obtained, without additional energy costs.

If a specific temperature is targeted, there is a starting point very close to that 250C targeted and carefully documented in chapter 1, with scientific arguments and technical documentation.

Experimental study of the hypothesis of thermal quasi-constancy of the microclimate

In this last sub-chapter, I will present the most conclusive experimental data, selected from a set of data taken for about 2 months. The experimental graphs allow a characterization of the particular microclimate system, previously presented in this chapter.

From these data, using relation 2.2., we calculated the thermal attenuation factors specific to the premises and the two types of microclimate (A/B).

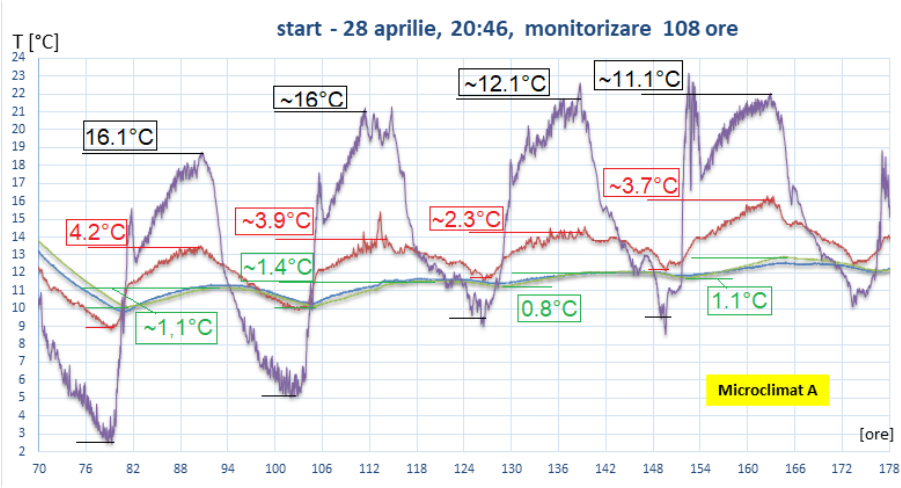

Figure 2.21. Experimental chart 1. Microclimate A, Purple – Temp. outside, Red – Temp. Microclimate A, Green – Enclosure 2, Blue – Enclosure 1

In figure 2.21, the presented graph represents an experimental data cutout, between 70 and 178 hours, starting from April 28 of the current year.

Table 2.1. Data results from the graph of figure 2.21

Ziua	Fluctuație min-max			Atenuare	
	Exterior	Microclimat	Incinta 2	F_{micro}^{ext}	F_{inc2}^{ext}
	°C	°C	°C	coef	coef
1	16,1	4,2	1,1	3,83	14,64
2	16	3,9	1,4	4,10	11,43
3	12,1	2,3	0,8	5,26	15,13
4	11,1	3,7	1,1	3,00	10,09

In this case, we calculated the mitigation factors in the case of microclimate A and in the case of enclosure 2, with the relation (2.2.). The microclimate

attenuates about 3 to 5 times the external fluctuation, and enclosure 2 attenuates the same fluctuation between 10 and 15 times. The data that were the basis of the calculations are tabulated in table 2.1.

CHAPTER 3. OPTIMIZED OFF-GRID PHOTOVOLTAIC ELECTRICAL ENERGY STORAGE SYSTEM, USING THE EARTH'S RENEWABLE THERMAL ENERGY

3.1 Concept of the optimized LiFePO4 battery storage system

Optimizing storage space involves the following components: 1. Obtaining a temperature level that does not require consumed energy and, implicitly, without costs, everything being possible thanks to the underground space (microclimate). 2. Use of the external climate when it presents a favorable thermal state. 3. Use of the "house in house" concept for smoothing thermal oscillations induced from the outside to the inside. 4. Use of sealing to suppress convective phenomena. 5. Use of heating/cooling sources only if the energies consumed are considerably lower than the energies gained by maintaining the optimal temperature of 25℃.

Appearance 1 The thermal energy of the soil/earth is manifested by a large thermal inertia to climate change from a certain geographical point. In Sud-Muntenia / Romania, the soil temperature is around 11℃ all year round. When changing this thermal level, the soil opposes both in one direction and in the other direction. If the underground enclosure is constituted in such a way that the thermal bridge with the outside is interrupted, then the thermal barrier will be maximally possible. If the enclosure is thermally connected to the outside, then the thermal bridge will become a cold/hot generator depending on the environment/climate, which will introduce an effect of increasing thermal oscillations in the underground space. In both cases, the microclimate will eventually be established in the underground space. The difference will be in the temperature distribution in this space. Regarding this first aspect of optimization, in order to demonstrate the net advantages of underground

spaces, at the expense of above-ground ones, we chose a space connected by a thermal bridge to the external climate, the infrastructure being completely concreted, which requires a maximum possible thermal conductivity. This system will induce disturbances, but, importantly for this study, it is to highlight the fact that the microclimate finally imposes itself in the underground space. The basic idea is that obtaining an energy gain under these conditions would be the decisive argument for imposing underground microclimates as the optimal storage solution. The underground microclimate isolated from the outside is clearly superior to the connected one, because the thermal stability is maximum, and the vertical temperature distribution in this space will be quasi-constant. This quasi-constancy creates the prerequisites for thermal isotropy of the microclimate, which is ideal for storing several batteries, without being conditioned by the vertical elevation of their location. The underground microclimate, compared to any above-ground enclosure, will have the major advantage of establishing a temperature threshold from which the optimal level of 25℃ can be started, in addition to the advantage of stability to oscillations. The microclimate is an absorber of heat waves, with large amplitude variations over small time intervals.

Appearance 2 The external climate can temporarily present a favorable temperature, i.e. a temperature level higher than that of the microclimate, a situation symbolized in figure 3.1.

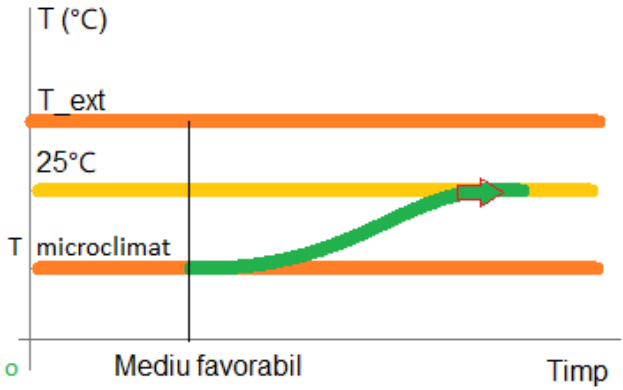

Figure 3.1. The environment/climate outside the microclimate at the moment favorable to its heating

This thermal context can be exploited through a ventilation flow that allows warm air to enter the microclimate, increasing the T_micro level in the sense of bringing it to the 25℃ level. For other geographical areas warmer than the temperate climate, the low night temperatures of the outside can be exploited in the sense of decreasing T_micro towards 25℃, as in figure 3.2.

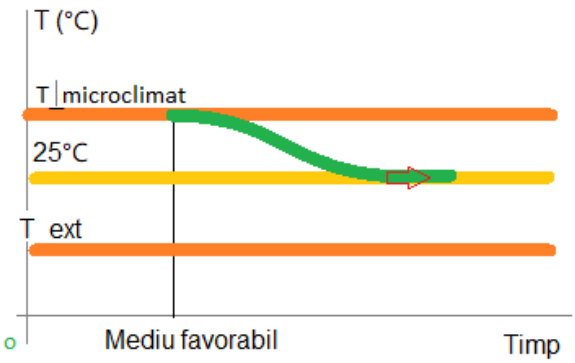

Figure 3.2. The environment/climate outside the microclimate at a favorable moment for its cooling

Thus, the temporary, random but favorable thermal energies can be captured and used to manipulate the microclimate temperature in the sense of approaching/overlapping the 25℃ target level.

Appearance 3 The "house in a house" concept is known for the passivation of homes, through the practice of a second exterior wall, in order to build a buffer air space, reducing the influence of the climate on the interior. This concept implies, in the case of the LiFePO4 storage space, the use of enclosures in which to place the batteries, which in turn are placed inside the underground microclimate. Note: Fire protection can be applied by setting up special enclosures to support the batteries in groups, so as to avoid the possibility of the entire number of batteries catching fire, by propagating the fire from the damaged battery to the others. In figure 3.3, aspect 3, of optimization, is symbolized. If these battery enclosures are thermally insulated very highly, the advantage of thermal alveoli would be added which increases the thermal insulation of the respective spaces. This aspect 3, of the optimization, is essential for reducing the thermal oscillations in the LiFePO4 battery space to quasi-constancy, as well as for maintaining the working thermal level for very long periods of time, through the thermal passivation of the enclosure generically called Thermal Alveo. If to these two advantages is added the protection against the spread of fire through alveoli with fire-resistant materials, aspect 3 is decisive for the efficiency of the system as a whole.

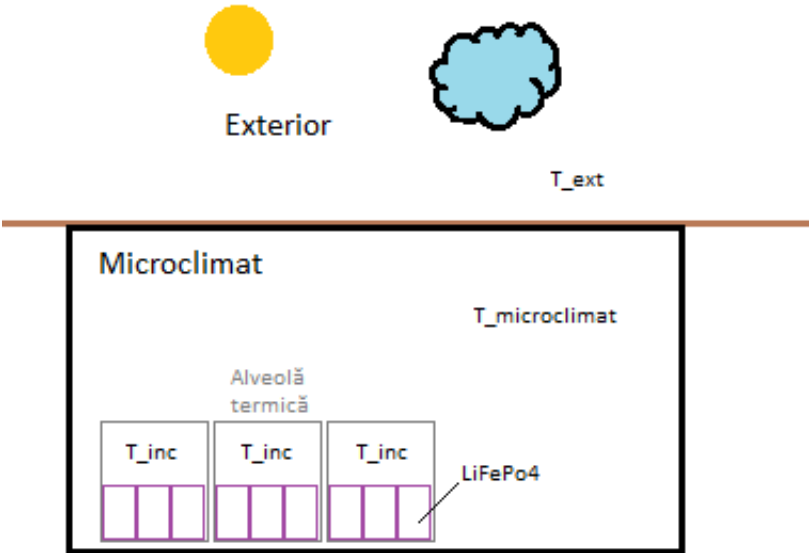

Figure 3.3. Battery isolation enclosure in microclimate. Thermal alveolus

Appearance 4 Sealing must be applied to the microclimate so that the conductive effect is canceled and exchanges with the outside are eliminated. The microclimate-outdoor heat exchange must be controlled in order to regulate the indoor temperature at a set level. The humidity of the microclimate will also be regulated through a controlled ventilation flow. In figure 3.4, Aspect 4 is schematized. Sealing must be doubled by breaking the thermal bridge with the outside, to be effective in $T_{microclimate}$ control. Air is a thermal agent that, through convection, permanently transports heat and cold in a circuit that produces the equalization of temperatures between two spatial points with different temperatures. All the time, the exterior will tend to equalize its own temperature with that of the microclimate, if there is a way for air to circulate between the two areas.

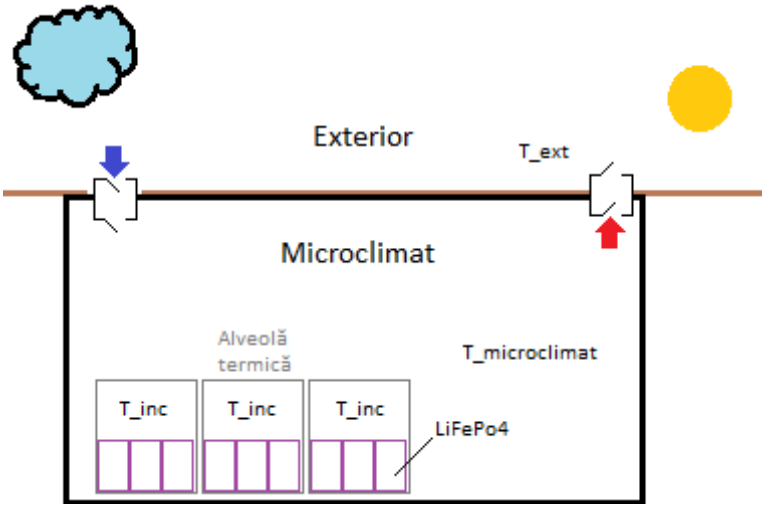

Figure 3.4. Control of indoor-outdoor exchange air flows of a sealed microclimate

Appearance ***5*** Once temperature thresholds are achieved by materializing aspects 1-4, external heating or cooling sources can be used to thermally overlap the battery space above the 25℃ target. This energy required for the overlap, I will call it the 25℃ overlap energy. To minimize this consumption, it is necessary that aspects 1-4 are already solved with maximum efficiency ensured for each of them.

3.2. System for monitoring and regulating the environmental parameters of the microclimate

The monitoring system assumes the measurement of a set of determining temperatures for the adjustment loops through which it thermally optimizes the battery space. Regulation refers to the previously discussed aspects, all regulation loops aiming to maintain the optimal temperature range of 25°C. To regulate the temperature in the battery space, it is necessary to monitor and regulate the temperature of the microclimate. The temperature of the microclimate depends on the outside temperature, to a greater or lesser extent, depending on the degree of sealing of the microclimate. The last aspect of the optimal functioning of the system

as a whole is represented by the permanent monitoring of the degree of energy consumption to maintain the temperature of the microclimate.

3.2.1. The direct method of experimental data processing. Direct determination of the average yield power of the LiFePO4 battery

Each of the 2 parameters, P and T will be characterized mathematically by means of the same regressive polynomial functions, where we aim for the same control factor of the mathematization precision R^2, with the same target value of 1. These functions will be integrated and related to the time interval over which the integration was made, thus obtaining the most accurate average values. The power is the product of the instantaneous values Ui and Ii, and this value becomes the experimental instantaneous power Pi taken at a sample. After obtaining a data set with the instantaneous power, the polynomial regression function generated by the Excell environment is integrated and related to the time interval that represents the duration of the respective experiment. Thus, the average value of the yielded power is obtained over that time period. As with the first method, the average value of the yielded power is associated with the average temperature T_m calculated as presented above. After obtaining several couplets (P_m,T_m) comparative analyzes can be made. The mathematical model of experimental data processing according to Method 2 – indirect, is reproduced in the following relationships that express time functions of the parameters:

$P_i = U_i \times I_i$ (3.9)

$P_i(t) = \sum_{k=0}^{n} \mathrm{a}_K \times t^K$, unde $K \leq 6$ (3.10)

$T(t) = \sum_{i=0}^{p} \mathrm{a}_i \times t^i$, unde $i \leq 6$ (3.11)

$P_m = \frac{\int_0^t P_i(t)dt}{t}$ (3.12)

$T_m = \frac{\int_0^t T(t)dt}{t}$ (3.13)

The data package for the benchmarking is (P_m,T_m) (3.14)

This method is to analyze the evolution of the power directly, not taking into account the evolutions of the parameters U and I. It is a simple method, directly focused on the target parameter of interest.

The result of the comparative analysis

For the 7 experiments undertaken, a comparative analysis of the results will be made, to demonstrate the influence of temperature on the yielded power of the LiFePO4 battery. It is observed that the maximum gain is obtained at 36.6°C, but the focus of the optimization is on how the internal resistance of the battery evolves over time. In the following, the necessary arguments for the optimal level, namely 25°C, are presented.

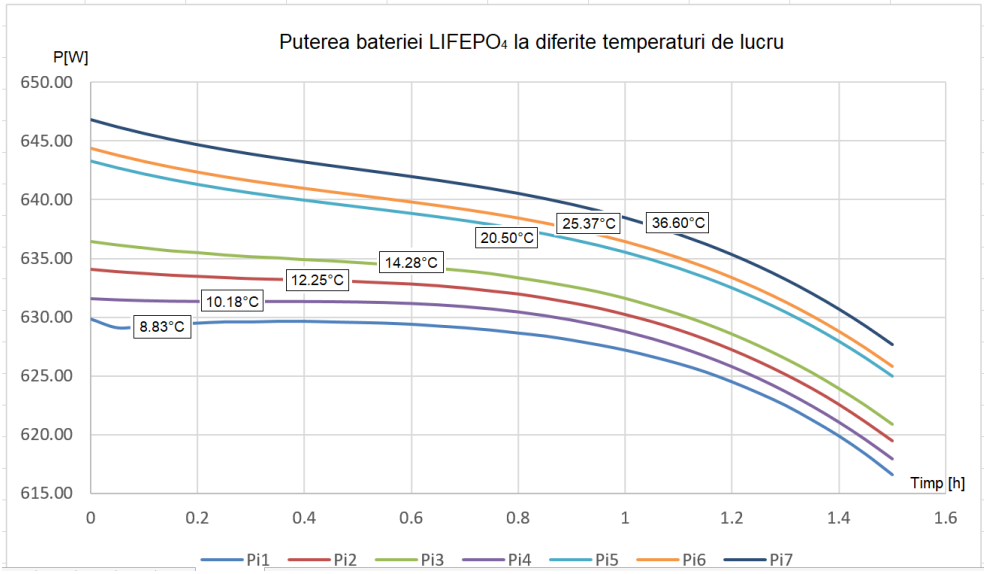

Figure 3.35. The influence of the working temperature on the value of the yielded power

The energy advantage of the 25°C temperature case is obvious, which implies energy gains over long operating periods. This advantage is demonstrated by the values of the couplets (Pm, Tm) presented above. In figure 3.35, it can be seen that although the power at 25°C is lower than that of the higher temperature

tested, the advantage is that of maintaining the value of this energy capacity for longer periods than in the case of high temperatures, since the internal resistance is the most well preserved at this temperature. From these two considerations, power gain and evolution of internal resistance as a function of temperature (see chapter 1), it follows that this level of 25°C is the OPTIMUM. If through the first 7 presented experiments we demonstrated that the 25°C temperature level is the optimal for energy gain and maximum preservation of internal resistance over time, through experiment 8, we pointed out the negative influence of temperature oscillations on the operation of the LiFePO4 battery.

3.2.2. Experiment 10. Calculation of the energy required to maintain an average temperature of 25°C in the storage cell

The heating resistance has a value of 6.8 Ω The current absorbed from the battery on the heating circuit is 1.9 A The power in the heating circuit is P = RI2 = 24.55 W The duration of the experiment was 26.95 hours, respectively 1617 min Two heating pulses were applied, pulses meaning a time interval of operation of the heating circuit of the heating resistor. These intervals for maintaining the power level P, we called them pulse1 and pulse2 and can be seen in figure 3.39. The operating time intervals of the heating cycle that were applied to maintain the optimal LiFePO4 temperature are: pulse1 = 1.73 hours, pulse 2 = 2.08 hours. The energy consumed, called maintenance energy, required for the operation of the heating circuit in the two added pulses was: Maintenance = 93.53 Wh. The absolute mean of the deviations of the series of experimental values of the temperature T _LiFePO4 compared to T_medie_LiFePO4 = 25.28°C, is 6°C. In another expression, for a duration of Total_Time = 27 hours, the LiFePO4 battery enclosure was characterized by an average temperature of 25.28°C, with an average fluctuation of 6°C. The absolute average of the deviations of the series of experimental values of the temperature T _Microclimate against T_medie_Microclimate = 23.79°C, is 0.31°C The energy effort to maintain the average temperature 25.28°C, was Ementinere = 93.53 Wh, for Total_Time = 27 hours. From these data we can deduce P_medie = Emensione / Timp_total = 3.47 W, for ΔT_LiFePO4_Microclimate = 1.49°C, which represents the difference

between the average temperatures in the LiFePO4 enclosure (cell) and Microclimate.

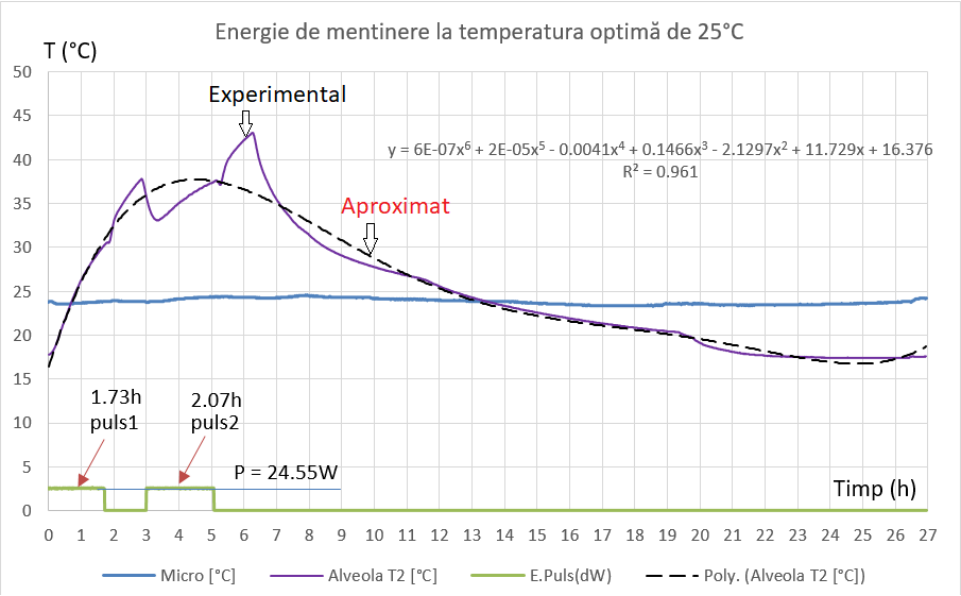

Figure 3.39. Details of experiment 10

To deduce what is the power requirement to maintain a difference of 1°C between the LiFePO4 enclosure (cell) of the experimental model and the Microclimate of the same model, we will use the ratio R = P_average / ΔT_LiFePO4_Microclimate. R = 2.34 [W/°C] Simulation of an energy calculation to maintain the optimal LiFePO4 temperature, in a microclimate without a thermal bridge in South Muntenia, Romania T_microclimate = 14°C (theoretical value). In this case: ΔT_LiFePO4_Microclimate = 11°C (target being 25°C). The energy required to maintain the optimal LiFePO4 temperature for 1h will be: E_necessary = R·ΔT_LiFePO4_Microclimate = 25.74 Wh Compared this value to the energy of a battery used in the experimental model, it represents 2.04%. But in the LiFePO4 enclosure, there are 3 identical batteries, which requires that the percentage of energy required drops to 0.68% of the energy capacity installed in that cell (LiFePO4 enclosure).

CHAPTER 4. CONCLUSIONS, HIGHLIGHT OF PERSONAL CONTRIBUTIONS AND PROSPECTS FOR FUTURE RESEARCH

4.1. Conclusions

1. Although the LiFePO4 battery manufacturer's technical documentation shows its reflow values, with test graphs at a temperature of 250C, no one directly specifies that this temperature should be applied in the operation of the battery. Through the research we have done, both documentary and experimental, we have proven that this temperature of 250C is the dedicated thermal level to ensure the battery a maximum life cycle.

2. Identifying the optimal working temperature of the battery through complex study both in the scientific research area and in that of the research laboratories of LiFePO4 battery manufacturers. This study is valuable for the synthesized scientific argumentation.

3. Identification of the most effective current mathematical methods for monitoring the evolution of LiFePO4 batteries, in order to accurately calculate the SoH indicator, through which the user will know very precisely the future usage time compared to a current moment. The polynomial regression functions used in AI/DLM analysis are a computerized means by which predictive values are highly accurate.

4. Microclimate is the most advantageous energy solution in any geographical point, regardless of the local climate, because the earth is a renewable source of advantageous energy.

5. The infrastructure with connection through the indoor-outdoor thermal bridge of the microclimate, presents seasonal advantages and disadvantages (positive in summer, negative in winter).

6. The infrastructure without internal-external connection of the microclimate, by breaking the thermal bridge through various means of insulation, presents only advantages, because thermal isotropy and quasi-constancy are established, both of which are naturally established in the environment.

7. The microclimate used in the study conducted to demonstrate the thermal and energetic advantages offered by its use, was an unfavorable one, with a thermal bridge between the interior and exterior. The consideration for which I resorted to this type of microclimate, was that, if I get positive results in the most disadvantageous conditions, then a microclimate infrastructure made according to the interior-exterior thermal break, the advantages will be amplified in value.

8. As can be seen from the data in the two figures above, within just two months, the thermal bridge infrastructure has increased its reference thermal values (T1, T2, T3) from 3 to 5°C. These values indicate a very important thermal connection between the inside and the outside. Thus, the starting reference towards the optimal temperature of 25°C is in an increasing trend, which reduces the target thermal difference for optimization and, implicitly, the energy consumption to reach the ideal value. In this climate context, the thermal bridge is a positive influence factor, but in the transition from warm to cold seasons, this reference will become a negative influence factor, increasing the distance from the 25°C target

9. It is hereby demonstrated that the optimal stabilized temperature will include all energy advantages, as follows: - the permanent maintenance of the battery at a thermal level that gives the possibility of exploiting a constant power and within the range of high working temperatures, which is known to offer maximum efficiency in charge/discharge cycles - even if the power yielded at 25C is lower than at higher temperatures, according to the studies of the research team led by Professor Omar, the internal resistance of the battery will have the best evolution over time, leading to the maintenance of the battery's energy storage capacity on the longest possible period. The quasi-constancy of this temperature leads to the stabilization of the internal resistance value over time, which will not create paradoxes like the one presented in the "thermal shock" study, a fact that certainly increases the degree of energy wear of the battery.

10. The battery tested is new, which places the 25°C case in the number of discharge-charge cycles up to which there are no differences in the internal resistance of the battery from one temperature to another. In this context of

research unfavorable to the hypotheses I set out to prove, I managed to highlight the thermal effect on the instantaneous yield power.

11. Time will make the difference between the thermal regimes of battery use, in that any temperature level other than 250C leads to the irreversible loss of the energy storage capacity and, implicitly, of the operating time.

12. External connection of the underground space is good in warm season and helps to heat the storage space to 250C. So it must be exploited

13. The used battery accommodated to the environment for long periods of time, makes the "chemical substance" inside the case have enough time for thermal stabilization and, implicitly, the increase in the quality of the yielded energy (stable U and I) and maintaining the resistance as long as possible internal.

14. In the study, we provided a special experiment dedicated to thermal shock. A battery stabilized for months in a microclimate environment, with maximum fluctuations of 1-3 per 24 hours, was subjected to sudden cooling, in a thermal cooling cell, starting from an ambient temperature of 22°C, to 8 °C over a period of 8 hours, after which a moderate discharge of 0.15C was performed to observe the oscillations of the parameters U and I. The conclusion is that the sudden thermal fluctuation leads to the decrease of the power quality (U and I have increased instantaneous oscillations).

15. The concept of "house in house" proved to be the main support for achieving the smoothing of thermal oscillations in the microclimate, up to the level of quasi-constancy. Thus, the thermal alveolus is the enclosure within the microclimate enclosure, through which the battery receives thermal stability, and the maintenance energies at the optimal level of 250C will be minimally possible.

16. Environmental protection component: Using recycled refrigeration equipment/manufacturing waste, a real solution is given to protect the environment by not making other special enclosures and not spending energy for recycling.

4.2. Personal contributions

1. We carried out an extensive study to identify the OPTIMUM TEMPERATURE and quantify the energy gains for the LiFePO4 battery

2. I designed a calculation model for the feasibility of an investment in a PV.Off.grid energy system.

3. We created an IoT device of our own design, based on the most efficient and cheap microcontroller available in the commercial area, namely ESP32. This device has been tested for 4 months and the results are promising for a commercial version.

4. We created an online data recording system for battery storage environment monitoring data. In this sense, I recall the creation of the work site www.baterie.cmcode.ro, through which I circulated the experimental data. This site has been tested for 4 months and the results are promising for a commercial version.

5. We have innovated the thermal alveolus system which, in addition to the thermal advantage of smoothing the thermal oscillations of the microclimate, also has the advantage of isolating the batteries in groups, which reduces the risk of fire of the entire energy storage capacity, in case of accident.

6. By using the microclimate to store batteries, we have given a viable solution for securing the life of users in case of accidental fire.

4.3. Future research perspectives

1. Although the "chemistry" of the battery is stabilized, the thermal fluctuations of the environment of the thermal alveolus, i.e. the isolated enclosure of the battery, were assimilated, during the experiments, as the fluctuations of the "chemistry of the battery". But in reality it is a difference that must be precisely determined. The thermal inertia of the substance in the battery is considerable and not precisely determined. So the temperature we associated with the average yielded power is close to that of the "chemistry" of the battery, but not exactly that. In order to increase the accuracy of the model, in the future, I will do a study dedicated to the thermal inertia of the battery "chemistry" in relation to the smoothed fluctuations in the thermal storage cell of the LiFePO4 battery.

2. In the detail graph in figure 3.39. it is observed that the oscillations of the U and I parameters indicate an electrical disorder that we have not observed in any other experimental data set, where the battery and "their" chemistry was thermally

stabilized over long periods of time. The results of this experiment confirm to me that the unstabilized thermality of the chemistry produced disordered evolutions of the U and I parameters, which indicates to me the need, in the future, for a very detailed study of the accentuated temperature fluctuations, for short periods of time, like the night-night cycles day of the passing seasons (spring, autumn). It will also be interesting to extend this study to the specifics of warm areas (tropical/subtropical), since a large part of PV systems with maximum solar yields are located there.

3. The infrared camera and image processing will be two core components for future studies of the thermal inertia of "battery chemistry" in relation to the thermal cavity temperature.

4. The paradigm of LiFePO4 battery research can be changed, through a comparative study of the similarities between the time "exploitation" of the human body and the time exploitation of the battery.

5. Studies of the advantages of the new concept of battery storage, which extends their life without additional costs, can lead to: - encouraging the rural/urban environment to invest in energy storage through LiFePO4 batteries. - stimulating competition among battery manufacturers. - stimulating the joint exploitation of storage spaces with large energy storage capacities, so that rural/urban areas are covered at neighborhood level.

6. The recovery of the heat generated by the equipment (inverter, charger) leads to a separate study, representing a perspective of future research, for increasing the energy yield of the PV-Off-Grid system. The possibility of using convective movements from the outside climate to replace the artificial ventilation of the microclimate.