



**UNIVERSITATEA “POLITEHNICA” DIN BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE MECANICĂ ȘI
MECATRONICĂ**

TEZĂ DE DOCTORAT

**Contributions to energy storage using hybrid systems
from alternative energy sources**

Autor: Alexandru CIOCAN

Conducători de doctorat: Prof. Tudor PRISECARU

Prof. Mohand TAZEROUT

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof. Mariana Ștefănescu	Universitatea Politehnica din București
Referent	Prof. Liviu Drughean	Universitatea Tehnica de Construcții București
Referent	Prof. Said Abboudi	Universitatea de Technologie Belfort-Montbéliard
Examinator	Conf. Valentin Apostol	Universitatea Politehnica din București
Examinator	Prof. Jean-Felix Durastanti	Universitatea Paris Est Créteil
Conducător de doctorat	Prof. Tudor Prisecaru	Universitatea Politehnica din București
Conducător de doctorat	Prof. Mohand Tazerout	École des Mines de Nantes

București 2017

Cuprins

1. Introducere	3
2. Privire de ansamblu asupra surselor regenerabile de energie	6
3. Evoluția sectorului energetic.....	7
4. Prezentare generală a soluțiilor de stocare a energiei	13
5. Modelarea matematică a unui sistem de stocare a energiei sub forma de aer comprimat	14
6. Simularea a unui sistem CAES în Matlab.....	17
7. Reprezentarea configurației experimentale.....	20
8. Studiu de caz	27
9. Optimizarea costului de producție	31
10. Concluziile tezei și perspective.....	34
Contribuții originale.....	36
Bibliography	37

1. Introducere

În ultimele două decenii au fost înregistrate schimbări majore în felul în care comunitatea științifică și factorii de decizie au văzut viitorul sectorului energetic. De-a lungul anilor au existat mai multe scenarii previzionate cu privire la principalii combustibili fosili, precum că, având în vedere rezervele cunoscute, aceștia se vor termina undeva până la sfârșitul acestui secol, și că epuizarea acestora este doar o chestiune de timp, nu o incertitudine [1]. Chiar dacă se vor găsi niște rezerve noi care vor contribui la prelungirea termenului limită, rezervele care vor fi descoperite vor fi semnificativ mai mici decât cele descoperite în trecut. Evident, este bine cunoscut faptul că combustibilii fosili nu reprezintă o opțiune viabilă și că vor fi folosiți din ce în ce mai puțin, precum și faptul că sursele regenerabile de energie vor primi o atenție din ce în ce mai mare.

În prezent, interesul pentru stocarea energiei este în creștere, în special cu scopul de a integra sursele regenerabile de energie în rețea și de a satisface în mod direct nevoile consumatorilor. Energia regenerabilă are o mare importanță în siguranța alimentării cu energie și poate fi utilizată în conservarea combustibilului, în special al materiilor prime în centrale termice sau pentru transportul rutier, feroviar, maritim și aerian.

Cea mai mare provocare în ceea ce privește energia regenerabilă o reprezintă natura sa intermitentă. Referindu-ne numai la energia solară și eoliană, acestea generează energie electrică numai atunci când soarele strălucește sau vântul suflă. Astfel trebuie identificate modalitățile de stocare a energiei pentru a putea fi utilizată pe perioade fără vânt sau fără soare și trebuie să se meargă pe principiul „luați-l când îl puteți obține” [2]. Gestionarea problemei fluctuației SRE este chestiunea esențială în dezvoltarea și utilizarea stocării energiei în viitorul apropiat [3].

Un punct important care stă la baza integrării și utilizării surselor regenerabile este reprezentat de necesitatea reducerii emisiilor de gaze cu efect de seră, dat fiind faptul că o parte semnificativă din ceea ce se eliberează în atmosfera reprezintă efectul proceselor de producție a energiei electrice și termice de către centralele termice (SO_2 , NO_2 , CO_2 , praf, zgură, cenușă și poluare termică).

Cu timpul, au existat mai multe inițiative la nivel global, iar în martie 2007, Uniunea Europeană a adoptat o nouă politică de stabilire a obiectivelor în materie de energie regenerabilă, astfel încât până în 2020 să se obțină cel puțin 20% din necesarul de energie al UE din surse regenerabile. Pentru a atinge acest obiectiv, Comisia Europeană a elaborat o serie de noi directive care vizează industria energetică, și proceduri în ceea ce privește construcțiile publice și private. Printre acestea se numără: reducerea cu 20% față de anii '90 a emisiilor de gaze cu efect de seră (GES) până în 2020, creșterea ponderii energiei regenerabile (SRE) la 20% din sursele sale de energie până în 2020 și reducerea consumului primar mondial cu 20% până în 2020. Având aceste obiective rezumate, programul a fost numit 20-20-20% [4]. Mai târziu, în 2012, o nouă directivă a venit în sprijinul proiecției din 2007 și în vederea asumării, încă o dată, a obiectivelor privind consumul de energie primară până în 2020 [5].

Scop și obiective

Stocarea energiei este una dintre principalele provocări pentru tehnologia din domeniul energiei regenerabile, datorită naturii intermitente a acestora. **Astfel, abordarea tezei este de a realiza contribuții și de a ilustra dacă sistemul de stocare a energiei cu aer comprimat poate deveni sau nu o soluție tehnică și economică viabilă în domeniul stocării energiei.**

Ar trebui să menționăm încă de la început că tema impusă în teză a fost aceea de a aborda aplicațiile care propun sisteme de stocare a energiei la scară mică, concentrându-ne în principal atenția asupra energiei stocate sub formă de aer comprimat.

Stocarea energiei în aer comprimat (Compressed Air Energy Storage - CAES) nu este doar un sistem simplu de stocare a energiei, precum bateriile și supercondensatorii, deoarece presupune un transfer important de căldură în timpul procesului de transformare a energiei electrice în formă mecanică. Analiza globală a acestor sisteme ar trebui realizată luând în considerare toate aceste aspecte referitoare la transferul de căldură.

Obiective:

- Dezvoltarea unui model general de studiu pentru un sistem de stocare a energiei sub forma de aer comprimat.
- Înțelegerea provocărilor în utilizarea aerului comprimat ca mediu de stocare a energiei.
- Realizarea unui studiu cuprinzător al bibliografiei cu privire la modelul matematic în domeniul stocării energiei, în special ca aer comprimat.
- Înțelegerea rolului potențial al stocării energiei sub forma de aer comprimat, în comparație cu alte concepte de stocare a energiei.
- Înțelegerea implicațiilor teoretice și practice ale termodinamicii în astfel de sisteme de stocare de energie.
- Găsirea unei soluții adecvate de stocare a căldurii.
- Dezvoltarea unui sistem operabil, sigur și economic.

Sistemele CAES reprezintă cea de-a doua tehnologie majoră de stocare a energiei la scară largă, după sistemele cu pompaj hidro (pumped hydro energy storage - PHES), unde un gaz (de obicei aer) este comprimat la o presiune ridicată (zeci, poate chiar sute de bari) și injectat într-o structură subterană (cavernă, acvifer, mină abandonată etc) dacă este vorba de dimensiuni mari, sau în rezervoare supraterane, dacă este vorba de stocare la o scară mai mică. Într-un sistem CAES, pentru a genera energie electrică, aerul este amestecat cu combustibili suplimentari, de obicei gaze naturale arse și expandate printr-o turbină convențională cu gaz, care acționează un generator electric. Pe lângă această tehnologie convențională numită „CAES diabatic”, există și alte concepte avansate ale CAES numite „CAES adiabatic avansat”. Conceptul AA-CAES diferă de CAES convențional în sensul că funcționează fără ardere de gaz natural. Această soluție impune ca energia termică rezultată din procesul de comprimare să fie stocată într-un sistem de stocare a energiei termice (TES) și folosită mai târziu în timpul procesului de expansiune pentru a reîncălzi aerul înainte de a intra în turbina cu gaz. În cazul în care căldura rezultată în urma comprimării este utilizată în alte scopuri și nu pentru reîncălzirea aerului în

timpul expansiunii, atunci se va produce o cantitate semnificativă de frig și pot fi luate în considerare trei tipuri de energie obținută: electrică, termică și frig și sistemul a devenit unul de „trigenerare”, satisfăcând în același timp nevoile mai multor consumatori [6]. Pentru a evita consumul de combustibil care reprezintă un element de bază în CAES convențional, cunoscându-se dependența de acesta, studiul de față prezintă un sistem alternativ de stocare fără combustibil. Sunt analizate două scenarii, primul în care căldura este utilizată în scopuri cum ar fi: încălzirea apei pentru consum casnic, încălzirea clădirilor și așa mai departe, iar cel de-al doilea scenariu este acela în care căldura este utilizată pentru reîncălzirea aerului comprimat înaintea procesului de expansiune.

2. Privire de ansamblu asupra surselor regenerabile de energie

Dezvoltarea energiei regenerabile ca energie curată la nivel global este unul dintre principalele obiective ale politicii energetice mondiale care, în contextul dezvoltării durabile, vizează reducerea consumului de combustibili fosili, reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră și dezvoltarea de noi tehnologii viabile în producția de energie [7], [8].

În prezent folosim în principal combustibili fosili pentru a ne încălzi și alimenta casele și pentru a ne alimenta mașina, chiar dacă în sectorul de mobilitate s-au făcut multe progrese în special în ceea ce privește vehiculele electrice și mai puțin în vehiculele bazate pe pile de combustibil. Poate că este convenabil să folosim cărbune, petrol și gaze naturale pentru a ne satisface nevoile energetice, însă acestea sunt limitate, iar ritmul lor de regenerare este mai lent decât consumul. În orice caz, chiar dacă aprovizionarea cu combustibili fosili va fi nelimitată, utilizarea energiei regenerabile este mai bună pentru mediu și, de obicei, aceasta se numește curată sau verde.

Centrala hidroelectrică este cea mai matură tehnologie utilizată pentru stocarea și producția de energie din surse regenerabile de energie. Capacitatea unei centrale hidroelectrice este incomparabilă cu capacitatea oricăror alte centrale electrice care utilizează orice altă formă de energie regenerabilă. Alte tehnologii de conversie a energiei regenerabile în energie electrică sunt legate de celulele fotovoltaice și de concentrarea energiei solare, în ceea ce privește energia solară, de turbinele eoliene, în ceea ce privește energia eoliană, iar la scară mai mică, dar cu un potențial considerabil, sunt tehnologiile bazate pe biomasă, pe energia geotermală și pe energia valurilor și a mareelor.

Cea mai mare provocare în ceea ce privește o mare parte a surselor regenerabile de energie o constituie natura intermitentă a acestora. Panourile fotovoltaice și turbinele eoliene nu pot produce energie atunci când este necesar, ci numai atunci când strălucește soarele și suflă vântul. Din acest motiv, sursele regenerabile de energie nu pot înlocui centralele electrice tradiționale și nu le pot înlocui numai cu echivalentul în turbinele eoliene și panouri fotovoltaice. Deoarece energia trebuie să fie produsă și în perioadele în care sursele regenerabile nu pot acoperi cererea, centralele electrice tradiționale ar trebui să fie menținute în funcțiune, iar inconvenientul constă în faptul că menținerea în funcțiune a centralei electrice tradiționale în timpul orelor de vârf determină o eficiență economică scăzută, care se reflectă în cost. Totuși, o pondere mare a energiei regenerabile obținută cu ajutorul panourilor fotovoltaice și turbinelor eoliene în mixul energetic reprezintă o necesitate, iar acest lucru ar putea să se întâmple numai prin îmbunătățirea îmbinării lor cu alte concepte tehnice care ar asigura o aprovizionare securizată.

În 2015, ponderea energiei din surse regenerabile în consumul final brut de energie a ajuns la 16,7% la nivelul Uniunii Europene, iar obiectivul care trebuie atins până în 2020 este o pondere de 20% a energiei din surse regenerabile [sursa: Eurostat].

La nivelul anului 2016 s-a înregistrat o creștere a energiei eoliene până la 486 GW, a hidroenergiei de până la 1064 GW, a energiei solare de până la 303 GW, a energiei pe bază de biomasă de până la 296 GW și a energiei geotermale de până la 13,2 GW.

3. Evoluția sectorului energetic

Dacă la sfârșitul secolului al XX-lea, sectorul energetic a fost aproape dominat de combustibilii fosili, în ultimul deceniu energia regenerabilă a început să aibă un impact din ce în ce mai mare în întreaga lume. Un raport al Administrației Americane pentru Informații în Domeniul Energiei (U.S. Energy Information Administration) arată rata de penetrare a surselor fără emisii de carbon din țările Uniunii Europene și din SUA la nivelul anului 2012, raportată la nivelul din anul 2002. Conform aceluiași raport, la nivelul anului 2002 optsprezece țări din Uniunea Europeană generau cel puțin o treime din producția lor totală folosind surse fără emisii de carbon. Chiar dacă turbinele eoliene și panourile fotovoltaice au avut o dezvoltare rapidă în ultimii ani, mai ales în țări precum Germania sau țările nordice, impactul acestora rămâne încă la un nivel scăzut. Cu toate acestea, aproape toate țările fac ca aportul de energie din surse regenerabile de energie să fie într-o creștere constantă.

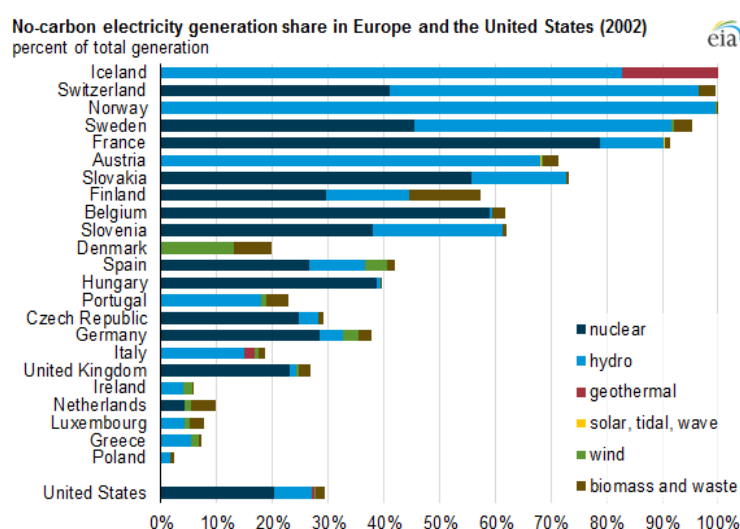


Figura 1 – Un instantaneu cu privire la ponderea energiei din surse regenerabile pentru anul 2002 [9]

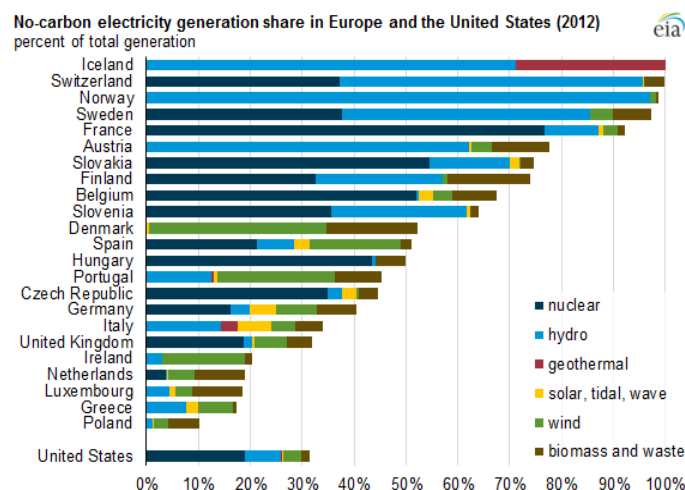


Figura 2 – Un instantaneu cu privire la ponderea energiei din surse regenerabile pentru anul 2012 [9]

Contextul energetic din Franța

Sectorul energiei electrice din Franța este caracterizat prin specificitatea sa ridicată în comparație cu cel din oricare altă țară din întreaga lume. Drept consecință a crizelor petroliere din 1974, Franța decide să investească masiv în sectorul nuclear datorită faptului că această energie este mai puțin dependentă de evenimentele economice [10]. Din anii '90, energia nucleară din Franța reprezintă mai mult de 75% din consumul de energie electrică. Majoritatea investițiilor au fost realizate din rațiuni politice în așa fel încât să încurajeze tehnologiile bazate pe acest tip de energie și lăsând foarte puțin spațiu pentru dezvoltarea altor surse de energie.

În prezent, Franța este atât de dependentă de sectorul nuclear, încât guvernul a hotărât că un nou reactor nuclear va fi pornit doar atunci când unul vechi se va opri. Această decizie vine imediat după accidentul de la Fukushima, când sectorul energiei nucleare din întreaga lume s-a confruntat cu nevoia de a-și reconsidera politica energetică. Multe țări au decis să se îndrepte spre sursele regenerabile de energie și să-și închidă treptat centralele nucleare. Germania a fost una dintre țările care au reacționat imediat, iar prin vocea cancelarului său, a anunțat că toate reactoarele nucleare vor fi închise până la sfârșitul anului 2022.

De asemenea, având în vedere politicile urmărite de Uniunea Europeană, care au impus atingerea obiectivului propus privind energia provenita din surse regenerabile până în 2020 pentru fiecare țară, se constată că Franța se află într-o situație foarte dificilă, având la sfârșitul anului 2014 o capacitate de producție de numai 9.100 MW din surse eoliene și o capacitate de producție de aproximativ 5.300 din panouri fotovoltaice [11].

Ca orice mecanism de piață, piața franceză a energiei este concentrată pe: Producția de electricitate, ce este dominată în mare parte de EDF care, la rândul său, este controlată de statul francez, Transportul și Distribuția fiind asigurate de operatorii de sistem RTE și ERDF, care sunt deținute în proporție de 100% de EDF. Piața cu amănuntul este liberalizată începând cu 1999, când consumatorii industriali au devenit eligibili pentru a-și alege furnizorii, iar în 2007 această opțiune a devenit posibilă și pentru clienții rezidențiali.

Sectorul energetic francez este bine interconectat cu vecinii țării. În figura 8 sunt prezentate exporturile și importurile pentru anul 2014 în care Franța a fost implicată. Se poate observa că Franța exportă energie electrică în Marea Britanie, Belgia, Elveția, Italia și Spania și în cea mai mare parte importă din Germania, Elveția și Spania.

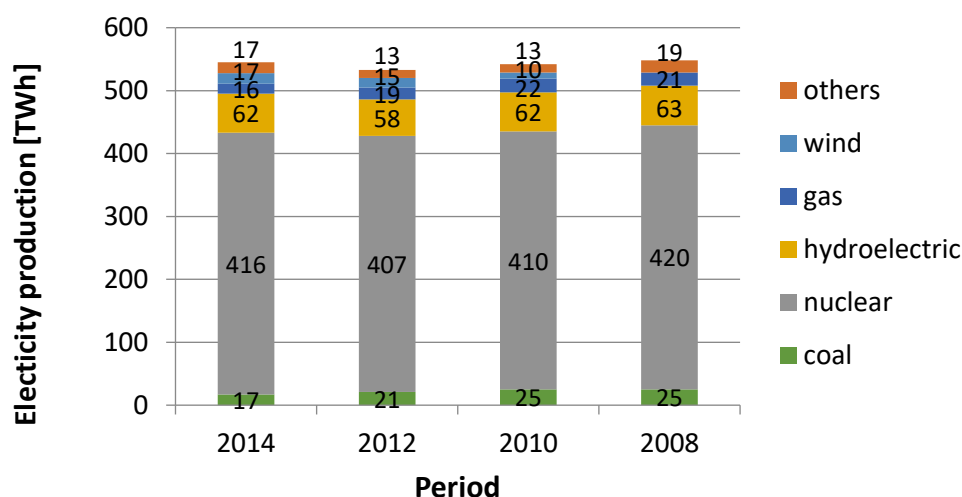


Figura 3 – Producția de electricitate din toate sursele de energie: Cazul Franței

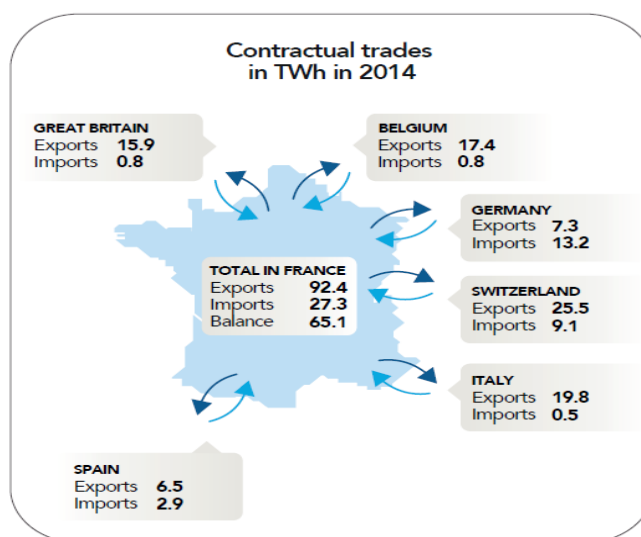


Figura 4 – Interconectarea Franței în sectorul energetic [11]

Contextul energetic din România

În prezent, România dispune de o gamă largă, dar redusă cantitativ, de surse și minerale primare de natură fosilă: petrol, gaze naturale, cărbune, uraniu și de un potențial utilizabil de surse regenerabile. În același timp, se poate spune că România are un grad relativ scăzut de dependență față de importul de energie, în comparație cu alte țări europene. În Europa, numai Danemarca și Estonia sunt mai bine plasate din acest punct de vedere. În întreaga Uniune

Europeană, cererea de energie primară este asigurată doar în proporție de 47% din producția proprie, diferența fiind importată.

Față de anii '80, se poate observa că în prezent cererea de energie primară a fost aproape înjumătățită datorită procesului de dezindustrializare și datorită apariției noilor tehnologii mai eficiente din punct de vedere energetic.

Rețeaua națională de energie electrică din România este un sistem atât pentru producția, cât și pentru distribuția energiei electrice, ce constă în toate centralele electrice și rețelele de distribuție. Componentele rețelei naționale românești sunt: Termoelectrica, Hidroelectrică, Nuclearelectrică, Electrică, Transelectrică. Primele trei companii au rol în producția de energie, în timp ce Electrică are rolul de distribuție și furnizare a energiei electrice, iar Transelectrică este operatorul de transport.

Dacă ne uităm la figura 5, putem observa cu ușurință că sectorul energetic din România este mult diversificat, nefiind dependent de o singură sursă de energie. În anul 2014, 27,5% din energia totală produsă a provenit din cărbune, 30% din hidro, 18% din sectorul nuclear, 12,5% din gazele naturale și 12% din energia solară și eoliană. Raportată la anul 2008, în anul 2014 producția de energie din cărbune a scăzut cu aproape 10%, procent acoperit de sursele regenerabile, în cea mai mare parte de energia solară și eoliană.

La sfârșitul anului 2015, capacitatea instalată din surse regenerabile în România este de 4.662 MW, conform ANRE [12], din care 2.931 MW reprezintă turbine eoliene, 1.296 MW reprezintă panouri fotovoltaice, 106,5 MW reprezintă biomasă, biogaz și gaz de fermentare a deșeurilor și 327,8 MW reprezintă micro - hidrocentrale cu putere instalată mai mică de 10 MW.

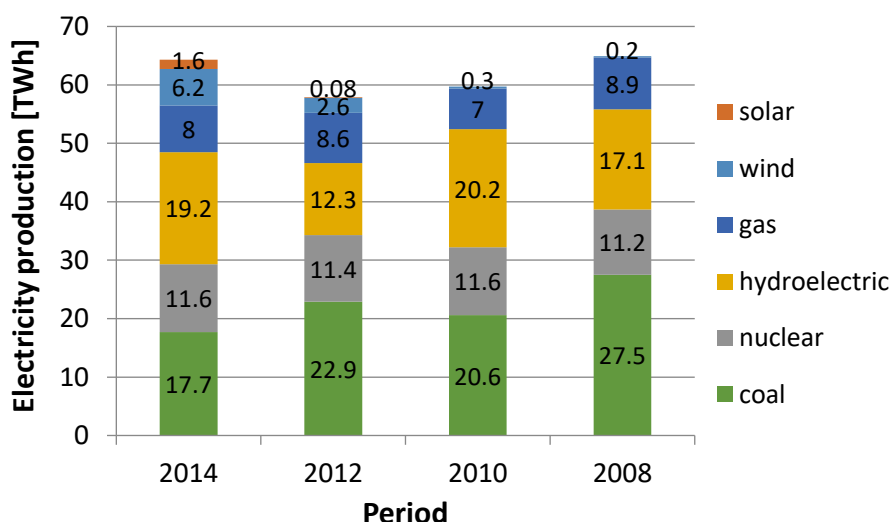


Figura 5 – Producția de electricitate din toate sursele de energie: Cazul României

Luând în considerare toate constrângerile legate de sursele regenerabile, de natura lor fluctuantă, se constată că sistemul energetic actual nu poate integra pe scară largă aceste

tehnologii fără investiții noi în sectorul de transport și, cu siguranță, în sistemele de stocare [13], [14], [15], [16].

- Extinderea rețelei - ar trebui să reprezinte o prioritate într-o rețea de energie electrică capabilă să absoarbă o pondere din ce în ce mai mare de energie regenerabilă. Tehnologia necesară este disponibilă comercial, existând însă câteva aspecte care trebuie îmbunătățite în domeniul securității și flexibilității aprovizionării. Cu toate acestea, o altă problemă care apare aici este reprezentată de percepția publică, însă dacă oamenii doresc energie regenerabilă, trebuie să accepte mai multe rețele în cartierele lor.
- Stocarea energiei – este de departe opțiunea care oferă cel mai înalt nivel de flexibilitate pentru integrarea la scară largă a surselor de energie regenerabilă. În literatura științifică sunt prezentate diferite tehnologii, iar cele mai multe dintre acestea s-au dovedit a fi viabile din punct de vedere tehnic. În funcție de scară, se pot menționa stocarea prin pompaj hidro, aerul comprimat, volantul, bateriile, celulele de combustie și supercondensatorii. Problema în cazul stocării apare atunci când ne uităm la costurile sale, totuși considerăm că orice tehnologie de stocare este costisitoare la acest moment. În orice caz, există o mulțime de îmbunătățiri în ceea ce privește eficiența și fiabilitatea acestora și dacă ne uităm la prețul său, care este într-un declin constant; numai dacă luăm în considerare Tesla, care raportează la începutul anului 2016 un preț de 3500 USD pentru baterii Li-Ion de 10 kWh, ne putem aștepta ca prețurile viitoare să atingă un nivel acceptabil.
- Demand Side Management - cunoscută și sub numele de gestionarea cererii de energie, reprezintă modificarea cererii de energie a consumatorilor. Scopul DSM este de a încuraja consumatorul să utilizeze mai puțină energie în timpul orelor de vârf și să se concentreze pe utilizarea energiei în perioade din afara orelor de vârf, cum ar fi noaptea și în weekend. DSM nu are ca obiectiv reducerea consumului total de energie, ci doar a cererii la care este expusă rețeaua electrică. Așadar, rezultă diverse efecte benefice, dintre care ar putea fi menționate atenuarea urgențelor din sistemul electric, reducerea numărului de întreruperi și creșterea fiabilității sistemului, beneficiile posibile ar putea include, de asemenea, reducerea dependenței de combustibilii fosili, reducerea prețurilor la energie și reducerea investițiilor în generare, rețeaua de transport și rețeaua de distribuție. O soluție este utilizarea unităților de stocare a energiei în perioadele din afara orelor de vârf și descărcarea acestora în perioadele de vârf. În DSM, un rol semnificativ îl joacă integrarea tehnologiei de comunicații cu sistemul de energie și astfel în zilele noastre, în loc de DSM, se utilizează mai mult termenul de rețea inteligentă. Scopul rețelei inteligente este de a reduce costurile energetice și de a-i aduce beneficii imediate consumatorului.

Discuții și perspective

În prezent, toate politicile referitoare la sectorul energetic se concentrează din ce în ce mai mult pe sursele regenerabile de energie. Totuși, această tranziție la o energie ecologică nu poate fi realizată fără dezvoltarea facilităților de stocare, în principal la scară largă. Natura fluctuantă a surselor regenerabile necesită acest lucru, pentru a avea un sistem energetic echilibrat.

Din punct de vedere tehnic, există mai multe tehnologii de stocare ale căror capacități de stocare au fost dovedite. Desigur, există spațiu pentru progrese suplimentare, în special în ceea ce privește eficiența și durata de viață. Cu toate acestea, marele impas pe care tehnologiile de stocare trebuie să îl depășească este atingerea fezabilității economice.

Progresele viitoare în domeniul cercetării și dezvoltării noilor concentratori de energie solară și în domeniul tehnologiilor de stocare a energiei sunt de așteptat să contribuie la scăderea prețului în același mod în care s-a întâmplat în cazul celulelor fotovoltaice și chiar în cazul turbinelor eoliene.

Sistemele regenerabile, inclusiv cele eoliene și panourile fotovoltaice solare, sunt din ce în ce mai competitive, chiar și într-un regim cu prețuri reduse la combustibilii fosili. Căldura provenită din surse regenerabile poate fi o opțiune competitivă din punctul de vedere al costurilor, însă nu se bucură de o atenție suficientă în cadrul politicilor. Politicile ar trebui să se concentreze asupra creării unor piețe și a unor cadre de reglementare adecvate. Măsurile de piață și de reglementare pot influența media costurilor și pot îmbunătăți competitivitatea.

Un sprijin constant pentru dezvoltarea pieței și în sectoarele R&D va reduce costurile odată ce tehnologia va deveni matură. Dacă analizăm tendințele tehnologice, putem observa că tehnologia fotovoltaică este extrem de modulară, ușor și rapid de instalat și accesibilă tuturor. Scăderea rapidă a costurilor a confirmat rata rapidă de învățare în cazul fotovoltaicelor, ceea ce duce la o creștere a încrederii că implementarea susținută va continua să reducă costurile în viitor.

În ziua de astăzi, energia solară termică bazată pe tehnologii de concentrare a energiei solare poate fi utilizată în locuri în care soarele este foarte strălucitor și cerul este senin, și unde linii de transport pe distanțe lungi sunt utilizate pentru a conecta diferite zone. Energia electrică termică solară este de obicei utilizată la scară mare, însă piețele de nișă pot fi identificate și la scară mai mică în rețele izolate.

4. Prezentare generală a soluțiilor de stocare a energiei

Există trei piloni principali pe care se bazează stocarea energiei.

- Stocarea energiei ar trebui să aibă un avantaj important în creșterea gradului de penetrare a energiei regenerabile.
- Stocarea energiei ar trebui să reprezinte pentru autoritățile de reglementare o opțiune eficientă de soluționare a problemelor legate de fiabilitatea rețelei.
- Stocarea energiei ar trebui să aibă un impact enorm în realizarea rețelelor inteligente, în special în dezvoltarea de noi stații electrice pentru transport și pentru o utilizare optimă a consumului electric [17].

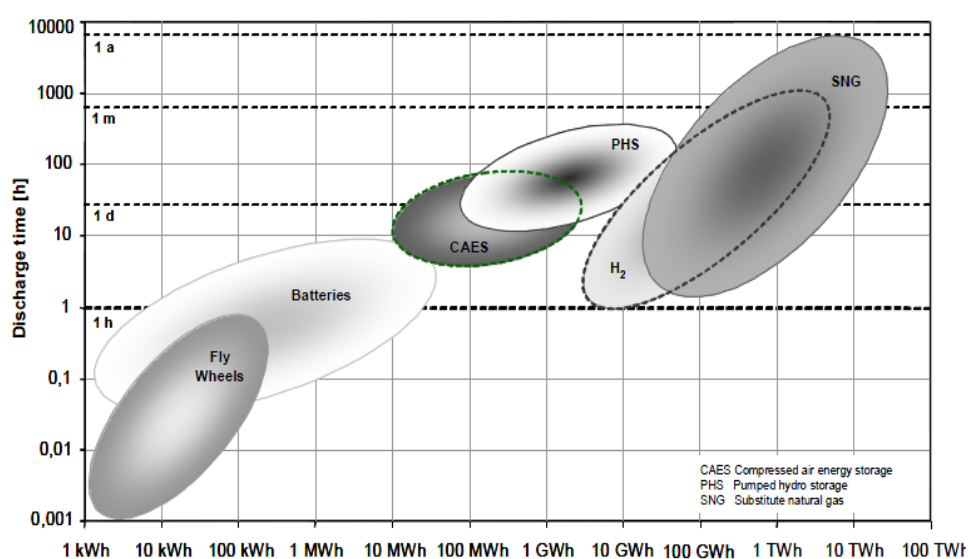


Figura 6 – Prezentare generală a sistemelor de stocare a energiei [18]

Indiferent de mediul de stocare, fie că este vorba despre baterii, presiunea gazului, deplasarea apei și așa mai departe, majoritatea tehnologiilor prezentate în figura de mai sus urmează același principiu de lucru în ceea ce privește procesele de încărcare, stocare și descărcare.

Modul de încărcare – este acel mod în care surplusul de energie din afara orelor de vârf este luat din surse regenerabile și utilizat pentru a comprima aerul și a-l stoca într-un vas de stocare. Dacă sistemul este conectat la rețeaua electrică, atunci acesta operează în afara orelor de vârf de sarcină, iar prețul energiei electrice este scăzut, de obicei pe timpul nopții.

Modul de descărcare – când energia este necesară și nu există alte surse de energie, aerul comprimat este extras din rezervorul în care este stocat, trecut printr-un expander, pentru a acționa un generator și pentru a injecta electricitate în rețea în vârf de consum sau pentru a furniza energie către utilizatorul final.

5. Modelarea matematică a unui sistem de stocare a energiei sub forma de aer comprimat

Scenarii de funcționare CAES

Tehnologia CAES include cinci componente principale: unul sau mai multe compresoare, mai multe răcitoare intermediare, un vas de stocare, una sau mai multe turbine și unul sau mai multe generatoare electrice. În timpul procesului de comprimare a aerului, compresorul-motor consumă energie de la sursele regenerabile sau de la rețea. Aerul ambiental este comprimat la o presiune înaltă, răcit și stocat într-un vas de stocare pentru o anumită perioadă de timp. Atunci când este nevoie de energie, aerul este decomprimit printr-un motor cu aer sau o turbină care acționează un generator electric pentru a produce energie electrică.

Din punct de vedere termodinamic, există trei cazuri posibile de compresie și expansiune în care poate funcționa un sistem CAES, într-un proces izoterm, politrop sau adiabatic. Această fapt implică mai multe scenarii, în funcție de raportul presiunii de stocare și de variațiile de volum [19], [20], [21]:

- Presiune variabilă la admisia în turbina, care variază cu presiunea vasului de stocare.
- Presiune constantă la admisia în turbina, prin reglarea debitului aerului din amonte până la o presiune fixă.
- Menținerea unei presiuni constante, prin utilizarea metodelor care permit acest lucru [22], [23].

Unele dintre aceste trei scenarii sunt mai de dorit decât altele, în funcție de cerințele aplicațiilor. Este bine cunoscut faptul că, în multe cazuri, este nevoie de o putere constantă care să fie furnizată consumatorului.

Procesul de încărcare

Atunci când aerul la presiune atmosferică este comprimat mecanic de un compresor de la 1 bar la o presiune mai mare, transformarea aerului este supusă legilor termodinamicii. În cadrul procesului de încărcare, aerul este luat din atmosferă și este comprimat de un compresor la o presiune mai mare. În timpul unei comprimări teoretic adiabatică sau a unei comprimări politrope mai realiste, odată ce crește presiunea, crește și temperatura.

Odată cu creșterea temperaturii apar o serie de fenomene care se doresc a fi evitate:

- Are loc o scădere a eficienței compresorului.
- Pereții vasului de stocare sunt expuși la solicitări termice.
- Modificările densității gazelor duc la o reducere a cantității de gaz stocate.

Pentru a elimina toate aceste dificultăți, este important ca aerul să fie răcit înainte de a fi stocat în rezervor, prin utilizarea schimbătoarelor de căldură. Căldura rezultată din procesul de

comprimare poate fi utilizată în diferite scopuri sau poate fi stocată într-un sistem de stocare a energiei termice pentru o utilizare ulterioară.

În ceea ce privește principiul de funcționare, compresoarele sunt împărțite în două categorii: compresoare volumetrice, care pot fi compresoare cu piston sau compresoare rotative, și compresoare dinamice, care pot fi compresoare centrifuge (turbocompresoare, turbosuflante, ventilatoare) și compresoare axiale.

Procesul de stocare

După comprimare, aerul presurizat intră în vasul de stocare la o presiune ridicată P_f și la o temperatură T_0 apropiată de temperatura mediului ambiant. Aerul sub presiune poate fi stocat pentru o perioadă nedeterminată de timp. Se presupune că temperatura de stocare este constantă.

Procesul de descărcare

Similar procesului de compres a fost analizat procesul de expansiune, urmând a se compara toate rezultatele obținute pentru a face o evaluare a eficienței globale a sistemului în ansamblu. A fost realizată o analiză pentru o expansiune izotermă, adiabată și politropă pentru procesul de descărcare. Aerul comprimat este expandat printr-un motor cu aer considerând o presiune o presiune de admisie a aerului constantă. Motorul cu aer constă într-o dispunere piston-cilindru cu mișcare alternantă, astfel încât aerul comprimat să fie admis în cilindru atunci când supapa de admisie este deschisă pentru o perioadă limitată de timp, apoi aerul care intră în cilindru cauzează mișcarea pistonului și produce lucrul mecanic al arborelui. Principiul este relativ similar cu cel al compresoarelor în care pistonul este deplasat pentru a comprima aerul, în timp ce la motorul cu aer, gazul (aerul) deplasează (împinge) pistonul pentru a produce lucru mecanic.

Stocarea energiei termice

Stocarea energiei termice este o tehnologie de conservare a energiei termice prin încălzirea sau răcirea unui mediu de lucru, astfel încât acesta să poată fi utilizat mai târziu pentru încălzire, răcire sau producere de energie [24], [25]. De fapt, stocarea energiei termice va fi un factor decisiv pentru problema gestionării energiei. În momentul de față sunt cunoscute două tipuri de sisteme de stocare a energiei termice, în funcție de modul în care energia urmează să fie utilizată, drept căldură sensibilă sau drept căldură latentă [26], [27].

Cea mai obișnuită metodă de stocare a energiei termice este ca și căldură sensibilă, care reprezintă schimbul de căldură al unui fluid / corp care își mărește temperatura și rămâne în aceeași fază de agregare. Această tehnologie este relativ ieftină și se utilizează în întreaga lume, fiind mai puțin complicată în comparație cu căldura latentă sau, pentru anumite aplicații, cu căldura chimică. Sistemele tipice bazate pe stocarea căldurii sensibile pot sau nu să implice un fluid de transfer de căldură pentru a transporta căldură de la sursa fierbinte la mediul de stocare, de obicei, dacă mediul este solid. Sau chiar și fluidul de lucru poate reprezenta el însuși mediul de stocare, jucând în același timp rolul schimbătorului de căldură și de stocare a energiei termice. Cea mai utilizată metoda de stocare a căldurii sensibile este prin folosirea a două

rezervoare, unul rece și unul fierbinte și fluidul este mutat de la un rezervor la altul, trecând printr-un schimbător de căldură. În schimb, căldura latentă reprezintă cantitatea de căldură schimbată de un corp care trece de la o fază la alta, de la un gaz la un lichid sau un solid sau invers, la o temperatură constantă [28]. Comparativ cu mediul convențional de stocare a căldurii sensibile, stocarea pe bază de materiale cu schimbare de fază permite o densitate mare de energie la o temperatură de operare constantă.

6. Simularea a unui sistem CAES în Matlab

Un cod Matlab a fost scris în conformitate cu modelul teoretic prezentat la capitolul 5. Rezultatele modelării obținute au fost validate pe un stand experimental de laborator și toate acestea sunt prezentate în tabelele și graficele care urmează.

Ipotezele enumerate mai jos au fost luate în considerare pentru a simplifica analiza sistemului propus, un sistem AA-CAES:

- Energia furnizată de sursele de energie regenerabilă prin intermediul panourilor fotovoltaice, concentratoarelor solare și/sau turbinelor eoliene este cel puțin egală cu energia consumată de compresorul de aer.
- Aerul comprimat este considerat a fi un gaz ideal.
- Toată energia cinetică și cea potențială sunt neglijabile.
- Căderile de presiune în oricare dintre componentele sistemului sunt ignorate.
- Exponentul politropic $n=1,2$ (exponentul politropic mediu obținut în timpul rezultatelor experimentale variază între 1,18 și 1,2, cel puțin 5 răspunsuri au fost făcute, astfel am ales valoarea de 1,2 în simulările teoretice).
- Variația temperaturii în interiorul vasului de stocare în timpul proceselor de compresie și de expandare este modelată urmărind un proces izoterm.
- Schimbătoarele de căldură sunt modelate astfel încât să aducă temperatura aerului după fiecare treapta de compresie sau de destindere la o valoare apropiată de temperatura ambiantă.

Rezultatele teoretice prezentate în figurile de mai jos au fost luate în considerare astfel încât să urmeze caracteristicile tehnice ale echipamentelor ce au fost utilizate pe standul experimental, ceea ce înseamnă: un compresor cu 3 trepte de compresie, cu o presiune maximă de 330 bari, un rezervor de $0,3 \text{ m}^3$ și un motor de aer.

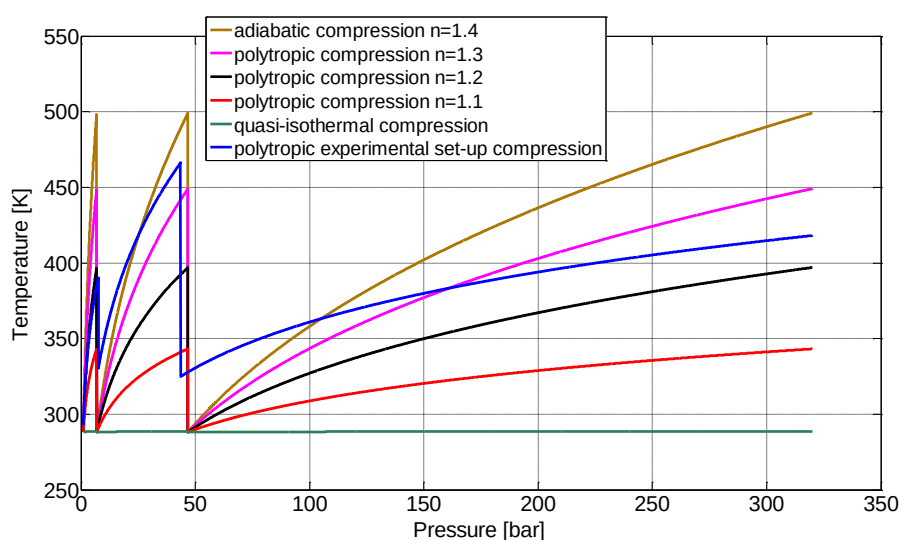


Figura 7 – Reprezentarea grafica a unui proces de comprimare în trepte

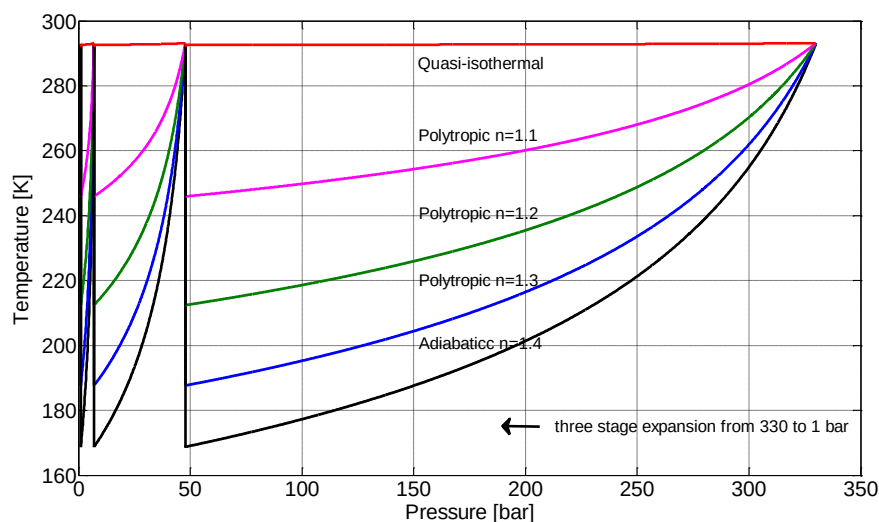


Figura 8 – Reprezentarea grafica a unui proces de destindere în trepte

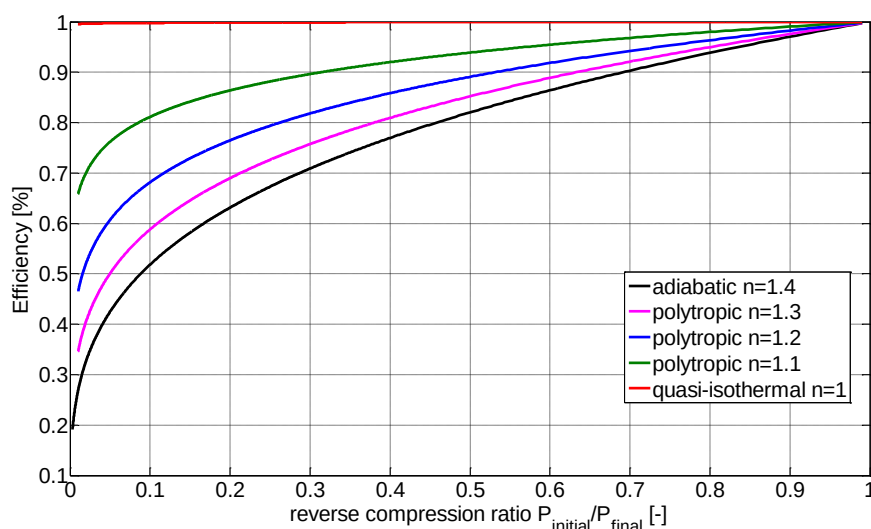


Figura 9 – Dependența eficienței ciclului de raportul de compresie și indicele politropic

Figura 9 arată că eficiența întregului ciclu depinde numai de raportul de compresie și exponentul adiabatic sau politropic. Eficiența este mai mare atât timp cât transformările termodinamice sunt mai aproape de un proces adiabatic, precum și atunci când raportul de compresie este din ce în ce mai mic.

Un alt scenariu luat în calcul a fost acela în care căldura rezultată în timpul procesului de comprimare este stocată într-un sistem de stocare a energiei termice și folosită ulterior pentru a reîncălzi aerul înainte de procesul de destindere. În acest caz, eficiența primară a sistemului crește considerabil, eliminând însă posibilitatea de a-i furniza utilizatorului final o altă formă de energie, cum ar fi căldura și frigul.

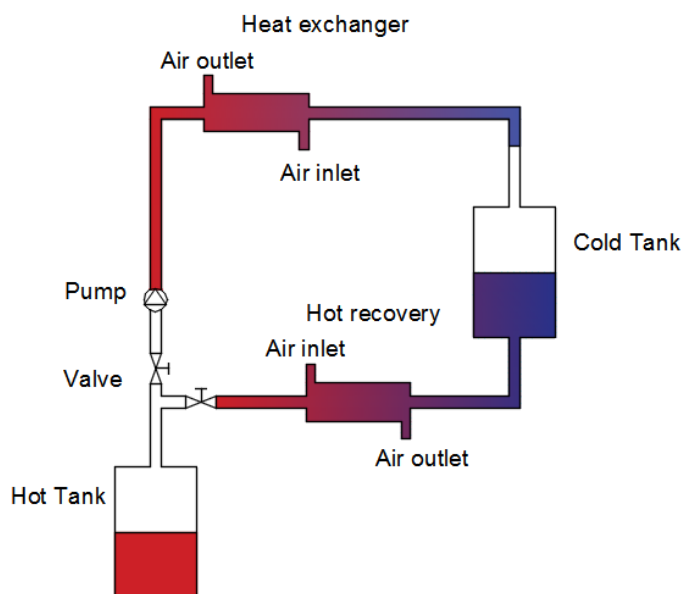


Figura 10 – Sistem de stocare a energiei termice

Pentru stocarea energiei termice, soluția cel mai des întâlnită constă în doua rezervoare, unul rece și unul cald, în care fluidul de lucru de stocare este pompat dintr-un rezervor, trecând prin schimbătoare de căldură, unde este încălzit sau răcit, după cum este necesar, și apoi este stocat în celălalt. Obținerea răcirii perfecte sau a temperaturii impuse la intrarea în vasul de stocare este posibilă prin controlul debitului masic al fluidului de lucru de răcire.

Tabelul 1 – O listă de materiale solide și lichide folosite pentru stocarea căldurii sensibile [29].

Denumire	Cp \[kJ/kgK]	Temperatura \[°C]
Beton (solid)	0,916	-
Piatră	0,879	-
Căramidă	0,84	-
Granit	0,8	-
Gresie	0,72	-
Hidrați săruri		Punct de topire
LiNO ₃ -3H ₂ O	-	30
K ₂ HPO ₄ -6H ₂ O		14
FeBr ₃ -6H ₂ O		27
Uleiuri minerale	1,97	Până la 320
Ulei de motor	1,88	Până la 160
Caloria HT43	2,2	Până la 260
TherminolVP-1	2,48	Până la 257
Glicerol	0,578	Până la 297
Propilenglicol	1	Până la 187
Apă la 16 bari	4,41	Până la 200

7. Reprezentarea configurației experimentale

Pentru a valida toate ipotezele luate în considerare în modelul teoretic, a fost construit un stand experimental de laborator la IMT Atlantique – Nantes / Franța. Configurația standului este prezentată în figurile 11 și 12, Trebuie însă menționat ca în partea detaliată a lucrării în ceea ce privește raportarea la rezultatele teoretice a fost luată în considerare și o configurație cu trei trepte de destindere.

- Compresie – proces de compresie în 3 etape,
- Expansiune – proces de expansiune în 1 etapă (experimentală) sau 3 etape (teoretice).

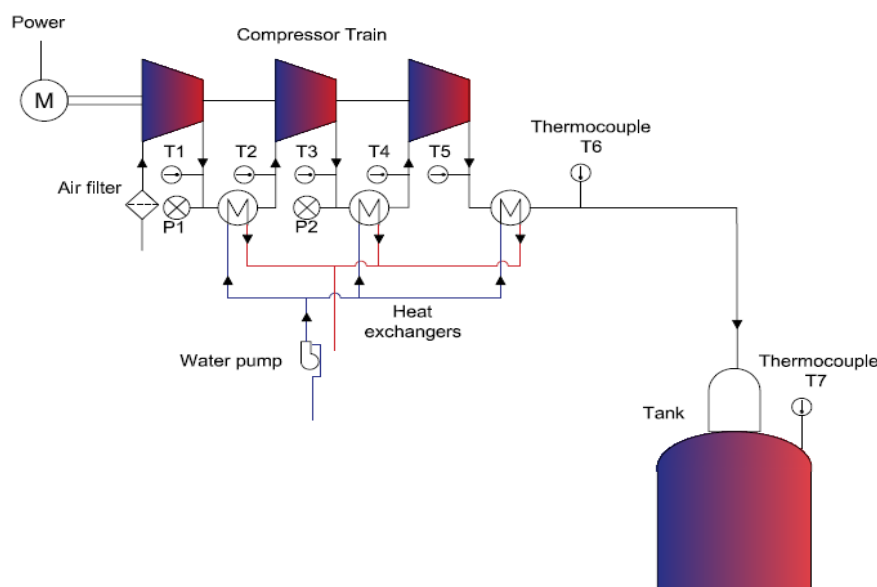


Figura 11 – Configurația experimentală a procesului de comprimare

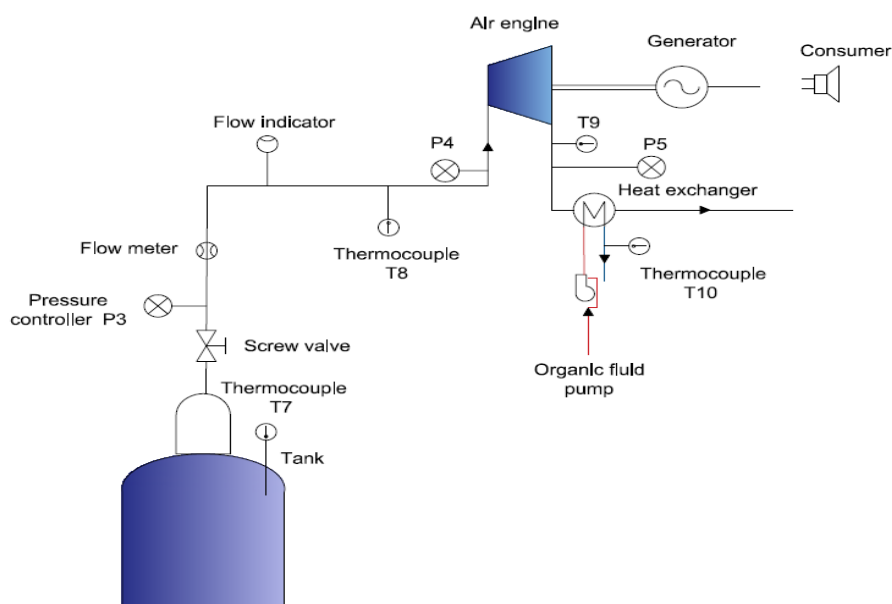


Figura 12 – Configurația experimentală procesului de destindere



Figura 13 – Vedere laterală a compresorului



Figura 14 – Vedere laterală a vasului de stocare

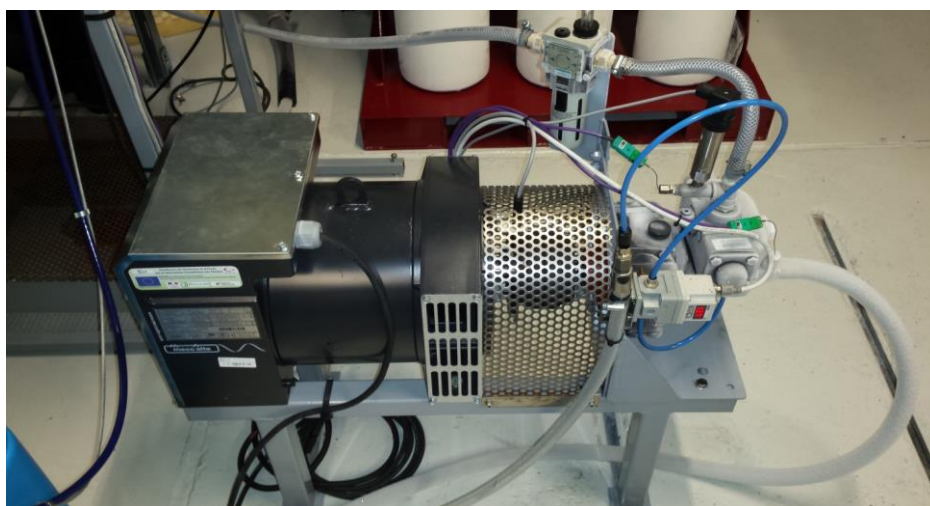


Figura 15 – Vedere laterală a motorului cu aer

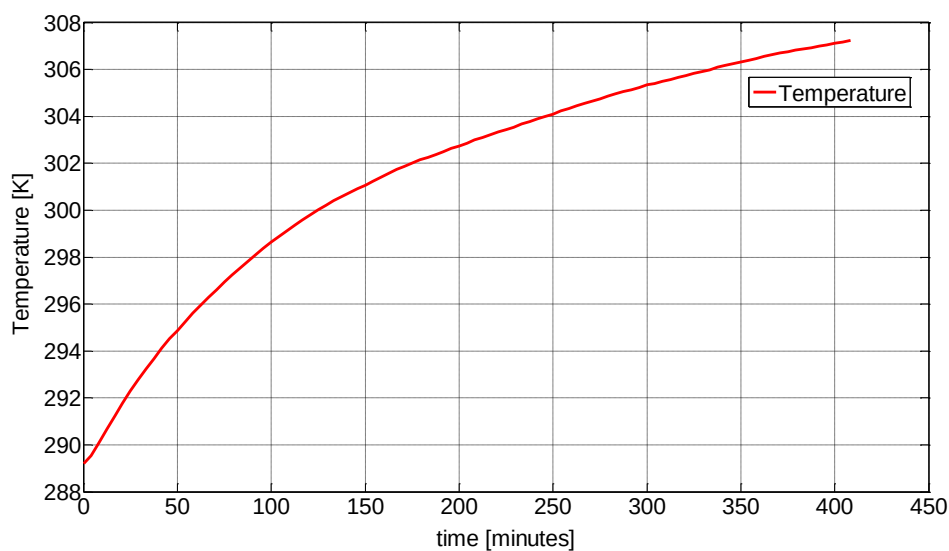


Figura 16 – Variația temperaturii aerului din rezervor în timpul procesului de incarcare

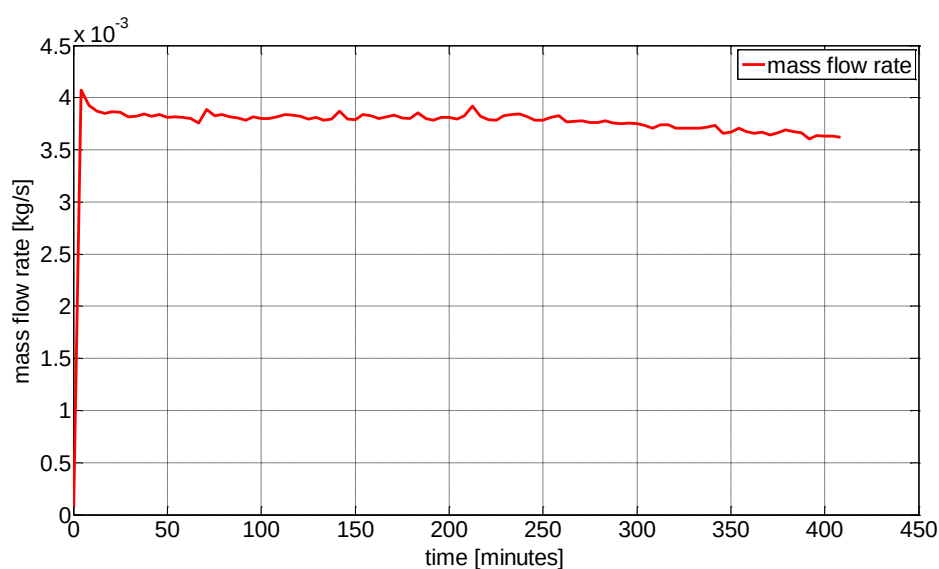


Figura 17 – Variația obținută a debitului masei de aer în timpul procesului de comprimare a aerului

În Figura 16 și Figura 17 sunt prezentate variația temperaturii aerului în rezervorul în care este stocat aerul și variația debitului masic al aerului în timpul procesului de comprimare. Panta ascendentă a temperaturii aerului tinde să se stabilizeze la valoarea de ieșire din ultimul schimbător de căldură. În ceea ce privește debitul masic, acesta are o valoare aproape constantă, cu o ușoară scădere în timpul procesului de comprimare.

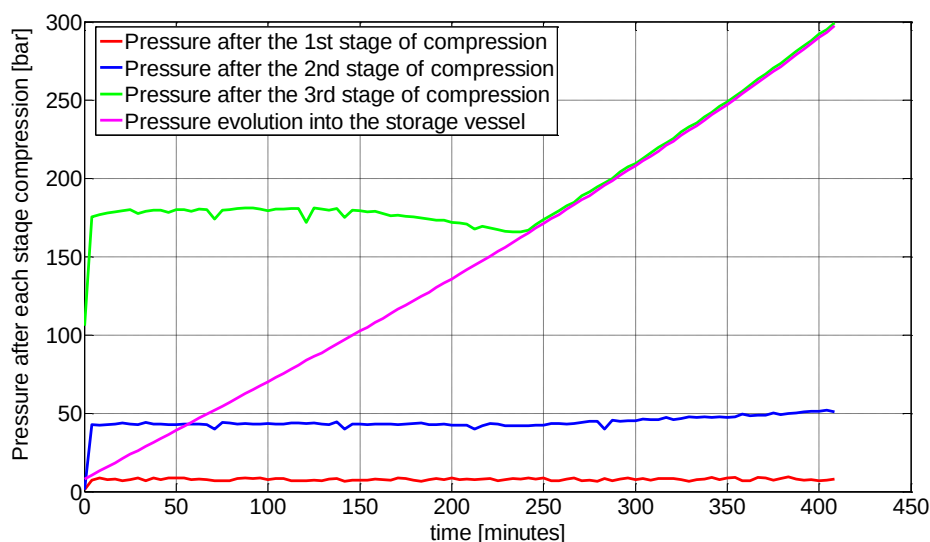


Figura 18 – Evoluția presiunii aerului după fiecare etapă de compresie

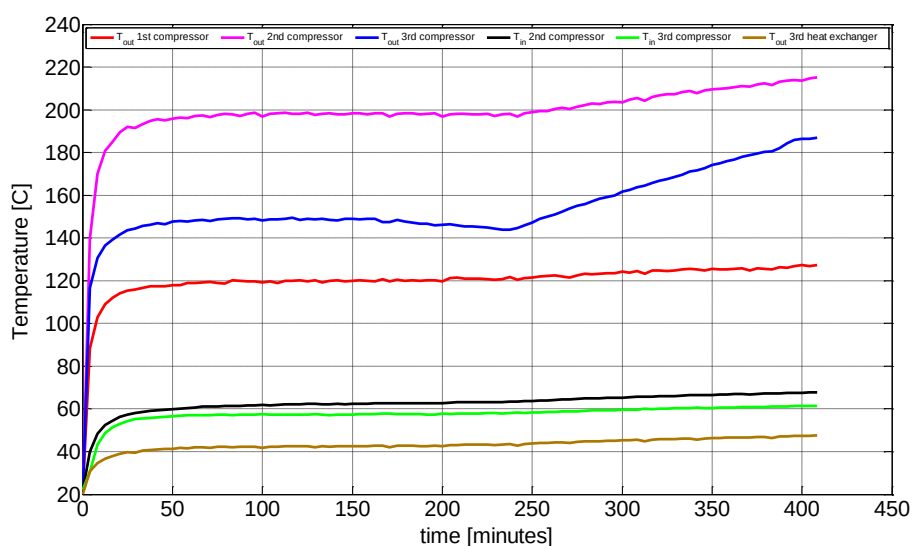


Figura 19 – Măsurători experimentale ale temperaturii înainte și după fiecare treaptă de comprimare a aerului

Figura 18 și Figura 19 prezintă valorile temperaturii și presiunii după fiecare treaptă de comprimare. Ambele figuri arată că cea de a treia treaptă de comprimare are un comportament diferit față de celelalte două. Dacă în primele două trepte supapele de evacuare se deschid la o valoare constantă a presiunii, în cea de a treia treaptă supapa de evacuare se deschide mai întâi la o valoare constantă a presiunii de circa 170 bari, atunci când presiunea în vasul de stocare atinge această valoare, apoi valorile de evacuare funcționează pe baza presiunii diferențiale. Pe lângă valorile presiunii prezentate în figura 18, în figura 19 sunt prezentate valorile temperaturii aerului atât la ieșirea din fiecare cilindru de compresie, cât și la ieșirea din fiecare schimbător de căldură.

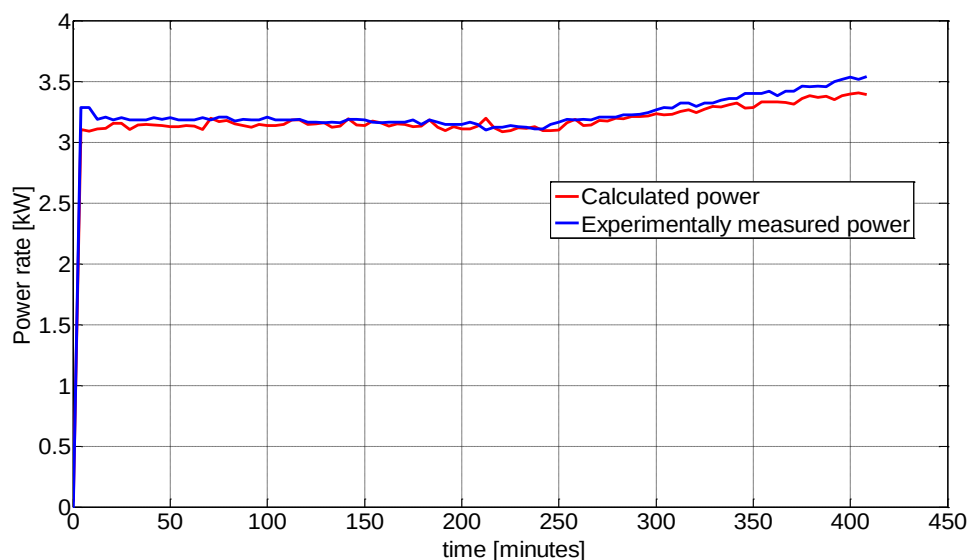


Figura 20 – Energia consumată de către compresor în timpul procesului de compresie

Figura 20 ilustrează pentru început energia consumată de compresorul de aer pentru comprimarea acestuia, obținută prin măsurători experimentale, curba albastră, în timp ce curba roșie reprezintă energia consumată de compresorul de aer pentru comprimarea acestuia, obținută prin calcule utilizând ecuațiile prezentate în capitolul 5, unde toți ceilalți parametri utilizați în ecuații, precum: debitul masic, presiunile, temperaturile și exponentul politropic sunt obținute din măsurători experimentale.

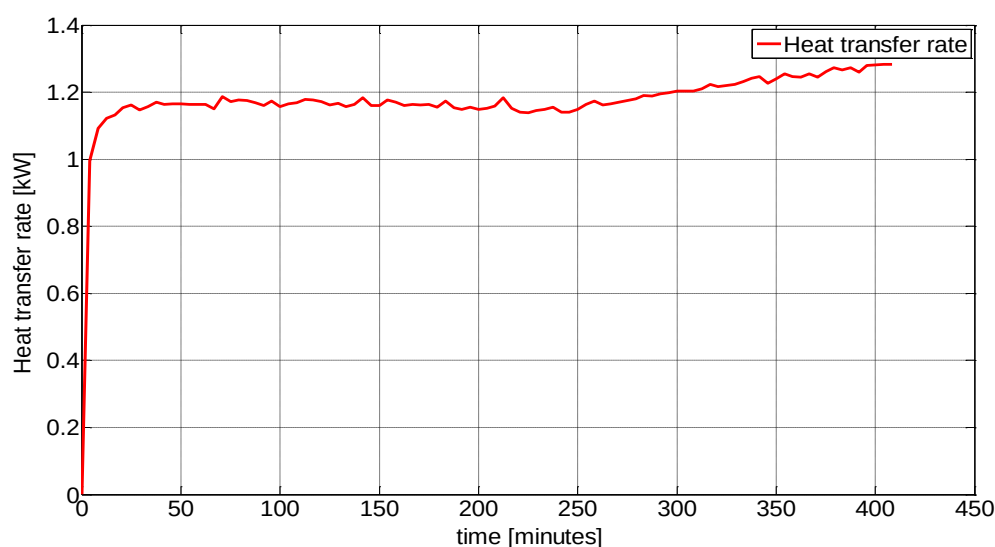


Figura 21 – Rata de transfer a căldurii rezultată în timpul procesului de compresie

Figura 21 prezintă variația cantitativă a transferului de căldură rezultat în timpul procesului de comprimare. Energia rezultată poate fi stocată pentru utilizare ulterioară. În configurația noastră experimentală, folosind un compresor industrial, căldura rezultată este disipată printr-un ventilator conectat la arborele compresorului, astfel încât putem menționa faptul că răcitoarele intermediare și răcitorul final sunt răcite în fluxul de aer.

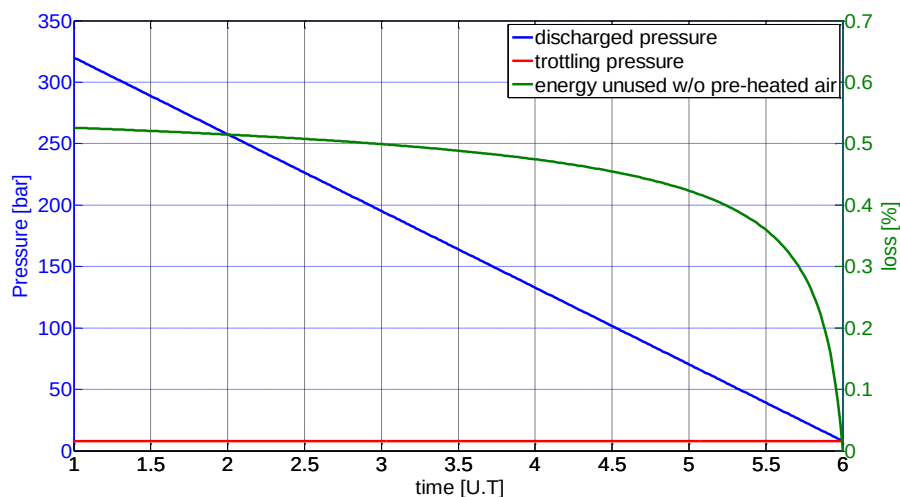


Figura 22 – Valoarea teoretică a energiei neutilizată prin utilizarea supapei de reglaj în cazul în care aerul nu este preîncălzit înainte de a procesul de destindere

Prin reglarea presiunii aerului din amonte la o valoare constantă, o parte importantă a energiei este "distrusă". Această valoare a energiei neutilizată depinde de raportul presiunii de stocare. Se remarcă faptul că aceste pierderi nu sunt influențate de încălzirea aerului, având aceleași valori chiar dacă aerul este încălzit sau nu, de fapt, lucrul mecanic maxim și minim realizat de aerul comprimat crește în aceeași proporție dacă aerul este preîncălzit înainte de a fi decompresat prin motorul cu aer.

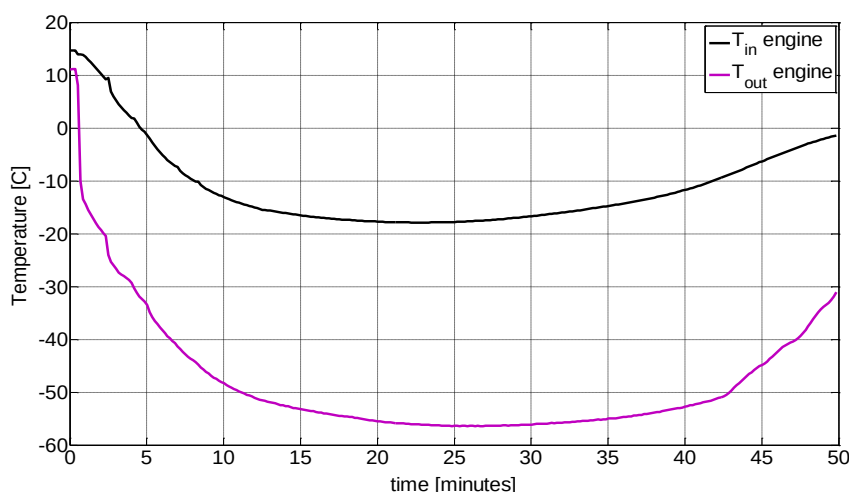


Figura 23 – Temperatura aerului la intrare și la ieșirea din motorul cu aer

În timpul procesului de destindere s-a observat că temperatura aerului în rezervor a scăzut ușor datorită relaxării aerului, dar după cum se arată în grafice, aceasta atinge o valoare minimă și apoi începe să crească. Acest lucru este ușor de explicat prin simplu fapt că odată ce cantitatea de aer din rezervor se micșorează, prin urmare și rata cu care gazul primește căldură din vecinătate este mai mare decât rata pierderilor de căldură datorate destinderii gazului. Cu cât procesul este mai lent, cu atât diferența de temperatură din vasul de stocare a aerului este mai mică.

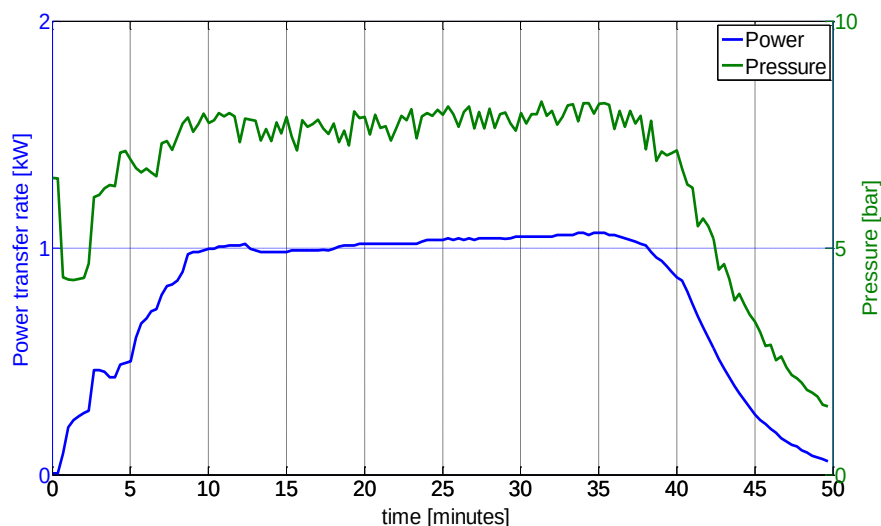


Figura 24 – Evoluția în timp a energiei și presiunii în timpul procesului de furnizare energie către consumator

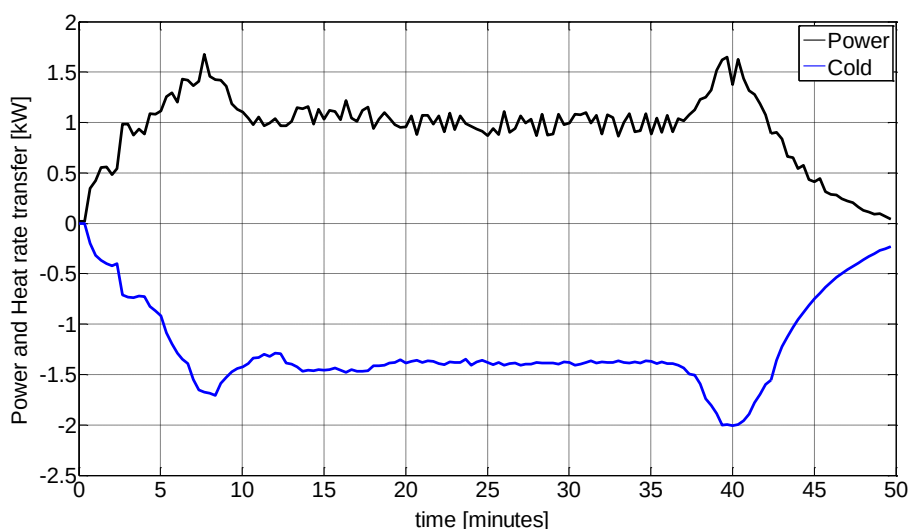


Figura 25 – Valoarea energiei generate și a frigului rezultat

Atâta timp cât destinderea aerului în motor se face de la temperatura ambientală, temperatura finală a aerului la ieșirea din motor va fi cu mult sub zero grade Celsius. Astfel, se produce o cantitate semnificativă de frig, care poate fi recuperată prin intermediul schimbătoarelor de căldură și utilizată în alte scopuri, cum ar fi aerul condiționat sau frigiderile. Vârfurile observate în partea finală a experimentului din figura 25 se datorează principiului de funcționare a regulatorului de presiune. Astfel, în timpul procesului de destindere odată ce presiunea în vasul de stocare se apropie de presiunea de admisie setată pentru intrarea în motorul de aer, este necesară o ajustare a supapei de distribuție în partea finală a experimentului, pentru a menține cât mai mult timp o presiune constantă, și pentru a controla puterea furnizată consumatorului. Evident, această variație a presiunii implică variații la nivelul tuturor celorlalți parametri precum ar fi debitul masic, energia, frigul, eventual alții.

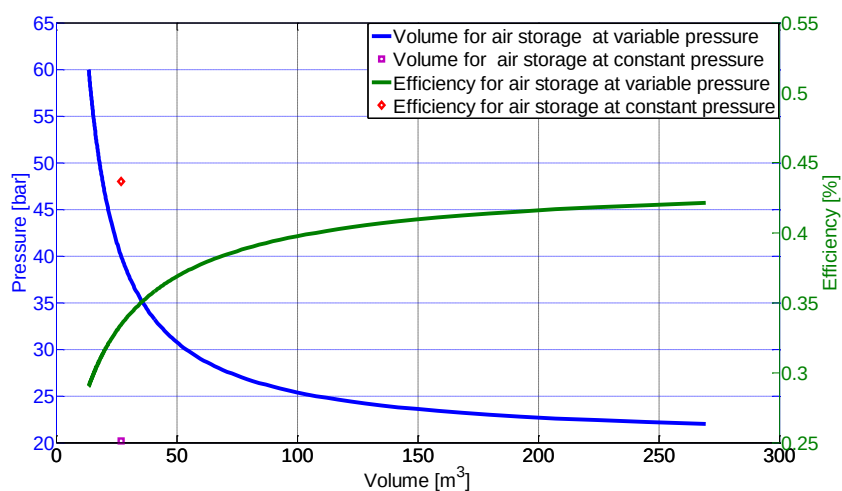


Figura 27– Volumul vasului de stocare necesar în funcție de presiunea de stocare: 1 etapă compresie – 1 etapă expansiune fără aer preîncălzit

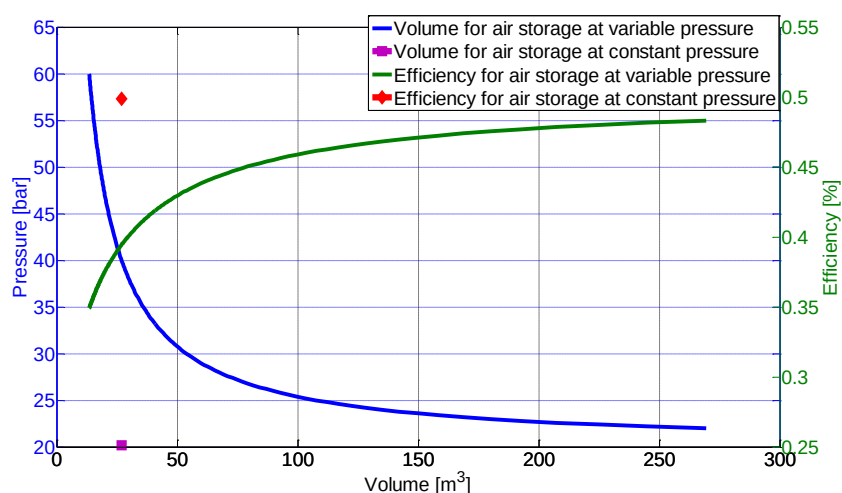


Figura 28 – Volumul vasului de stocare necesar în funcție de presiunea de stocare: 2 etape compresie – 1 etapă expansiune fără aer preîncălzit

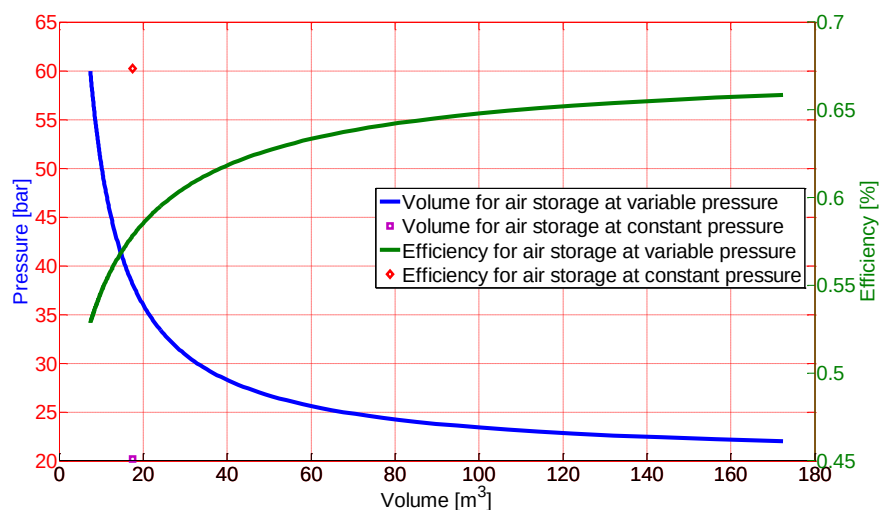


Figura 29 – Volumul vasului de stocare necesar în funcție de presiunea de stocare: 1 etapă compresie – 1 etapă expansiune cu aer preîncălzit

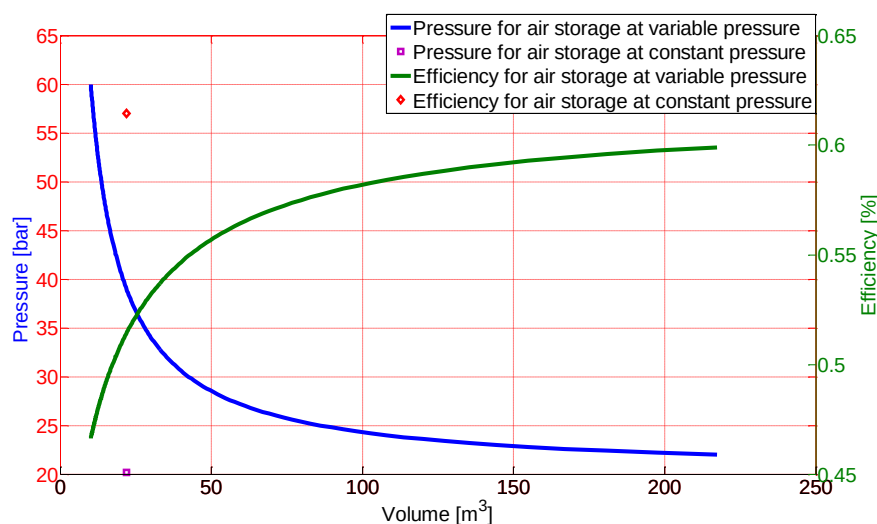


Figura 30 – Volumul vasului de stocare necesar în funcție de presiune: 2 etape compresie – 1 etapă expansiune cu aer preîncălzit

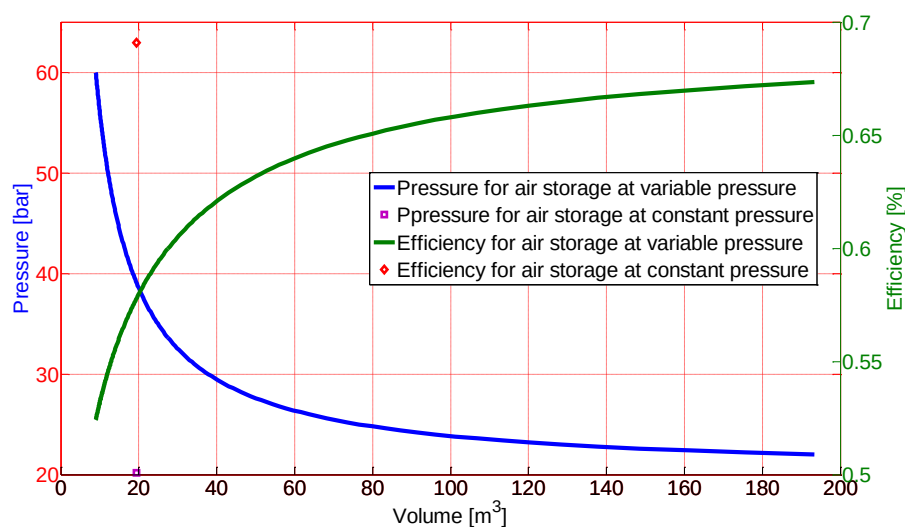


Figura 31 – Volumul vasului de stocare necesar în funcție de presiune: 2 etape compresie – 2 etape expansiune cu aer preîncălzit

Toate figurile de mai sus, de la 27 la 31, ilustrează volumul vaselor de stocare necesare și eficiența primară a sistemului, în funcție de presiunea de stocare, temperatură și numărului de trepte de compresie / destindere, considerând că sistemul este capabil să îi furnizeze utilizatorului final 30 kWh de energie electrică la o putere constantă, timp de 6 ore, având o presiune de intrare în motor de 20 bari. Așa cum era de așteptat, se obține o eficiență mai mare pentru scenariile în care coeficientul presiunii de stocare este pe cât de mic posibil, ceea ce implică un vas de stocare mai mare. Oricum, cea mai mare eficiență posibilă ar putea fi obținută în cazul în care în timpul ambelor procese de compresie / destindere presiunea rămâne constantă, fapt care poate fi obținut prin utilizarea de soluții care permit acest lucru, un exemplu fiind baloane subacvatice.

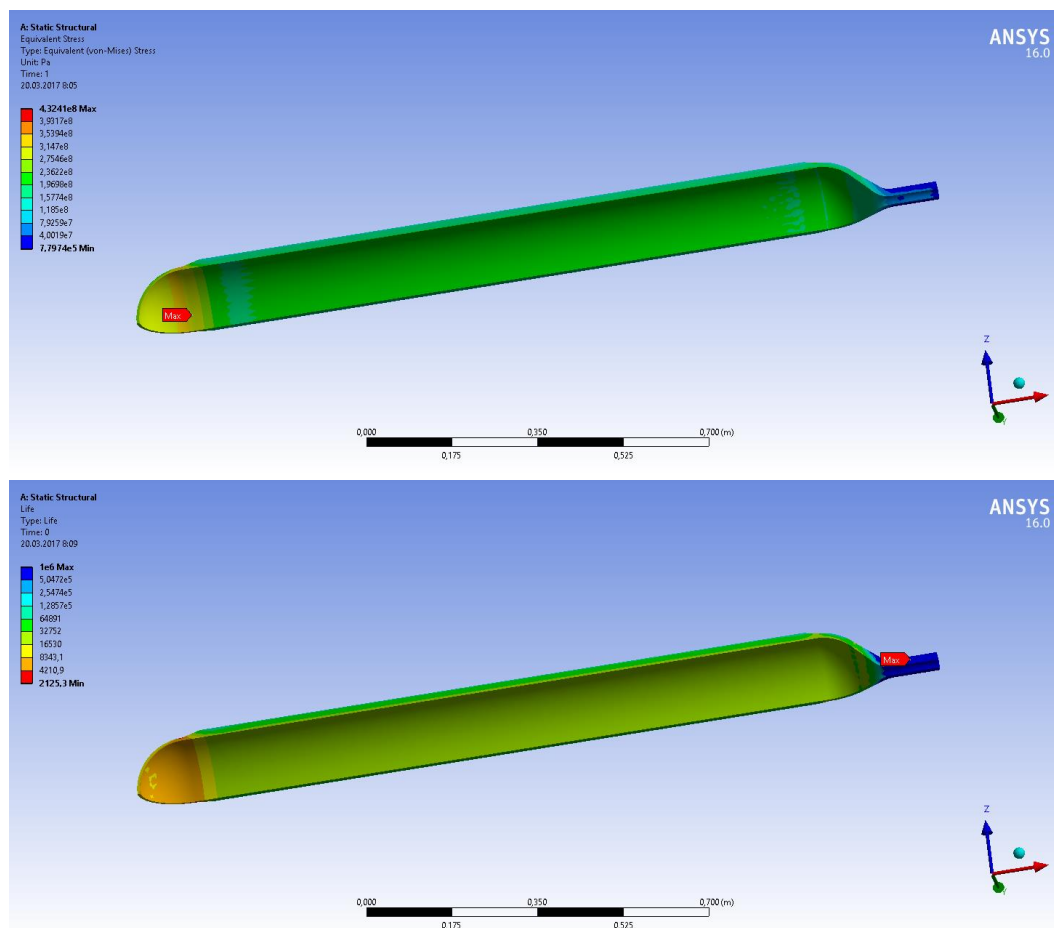


Figura 32 – Simulare în ANSYS pentru vasul de stocare

Ceea ce ne interesează la simularea în ANSYS este analiza tensiunilor, unde sunt propuse două metode (Tresca și von-Mises, von-Mises este ilustrată mai sus). Ambele metode ne permit să vedem că cele mai expuse zone la tensiuni, cu cele mai mari valori, sunt în partea de jos a vasului, în timp ce cele mai mici sunt în partea de sus. Criteriile Von-Mises și Tresca sunt modalități de a determina când un material va ceda din cauza tensiunii multiaxiale. În componentele celor două ecuații ale criteriului se introduce tensiunea normală, care este utilizată pentru a evalua tensiunea generală, iar atunci când cea din urmă este mai mare decât rezistența mecanică la alungire a materialului, acesta va ceda.

Toate aceste valori obținute pentru fiecare criteriu sunt comparate cu tensiunea admisibilă a materialului utilizat, care în acest caz, pentru structura de oțel, este egală cu 207 MPa.

În partea de jos a figurii 32 este prezentată o analiză a ciclului de viață și este ilustrat faptul că sticla tensionată susține cel puțin 3.000 de cicluri de încărcare - descărcare.

9. Optimizarea costului de producție

Trebuie să menționăm că presiunea de admisie a expanderului pentru sistemele CAES existente de presiunea ridicată (45 - 70 bari) este mult mai mare decât echivalentul pentru o turbină cu gaz, deci o turbină cu gaz convențională poate fi utilizată numai cu expander de joasă presiune. Chiar și pe piață, din cunoștințele autorului, expanderele de gaz, motoarele sau turbinele cu aer funcționează la valori de presiune scăzută.

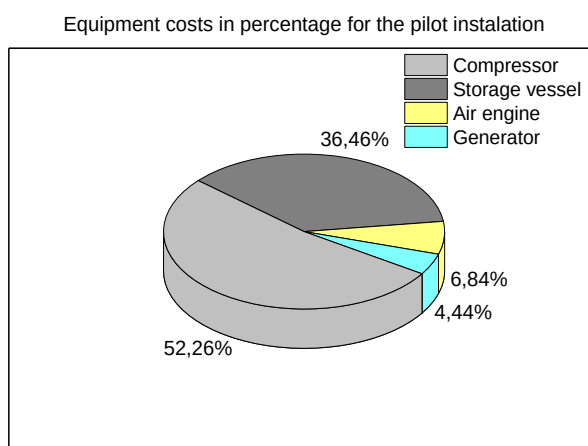


Figura 33 – Costurile echipamentelor pentru instalația pilot, în procente

Pentru evaluarea economică este important de știut cel puțin pentru început care sunt costurile de capital ale echipamentelor. În literatura de specialitate și pe piață există o mulțime de informații care menționează că pentru energia regenerabilă, în special pentru panourile fotovoltaice, costul de instalare este de 2 € / W, în timp ce pentru turbinele eoliene costul variază între 2-3 € / W, în funcție de mărimea turbinei eoliene. În ceea ce privește celelalte echipamente, și anume compresoarele, vasele de stocare, expandoarele și generatoare, informațiile sunt foarte puține în raport cu cerințele noastre. În această situație, pentru analiza economică am luat în considerare un preț mediu al compresoarelor existente pe piață de la producătorii Bauer și Kaesser și am adaptat ușor prețul în funcție de numărului de trepte de compresie, presiuni și debit masic. Am făcut același lucru și în cazul expandoarelor, unde estimăm un preț mediu, având în vedere producătorii precum SPX FLOW Europe Ltd. sau MacScott Bond Ltd. Pentru generatoare, luăm în considerare prețurile următorilor producători: Mafarlane Gerenators, MeccAlte, Stamford, Markon, Newage și Leroy Somer.

Funcția obiectiv (F), pe care o definim aici ca o ecuație matematică, descrie randamentul vizat care corespunde maximizării profitului în raport cu costul investiției. Scopul unei funcții obiectiv este maximizarea profiturilor sau minimizarea pierderilor pe baza unui set de constrângeri și a relației dintre variabilele de decizie. Marea majoritate a constrângerilor se referă la limitările impuse de capacitate, condițiile de mediu, tehnologia de lucru și așa mai departe.

$$F = x \% / E_{ad} (n) + y \% C_{ad} (n) \rightarrow MIN$$

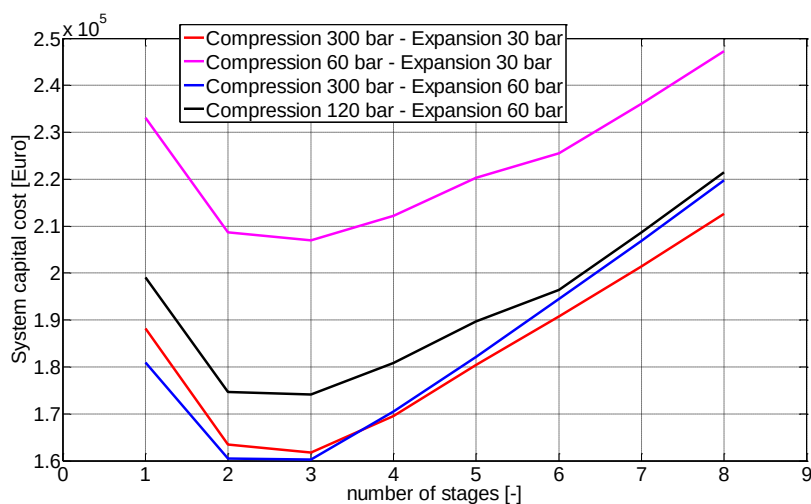


Figura 34 – Costurile de capital ale sistemului

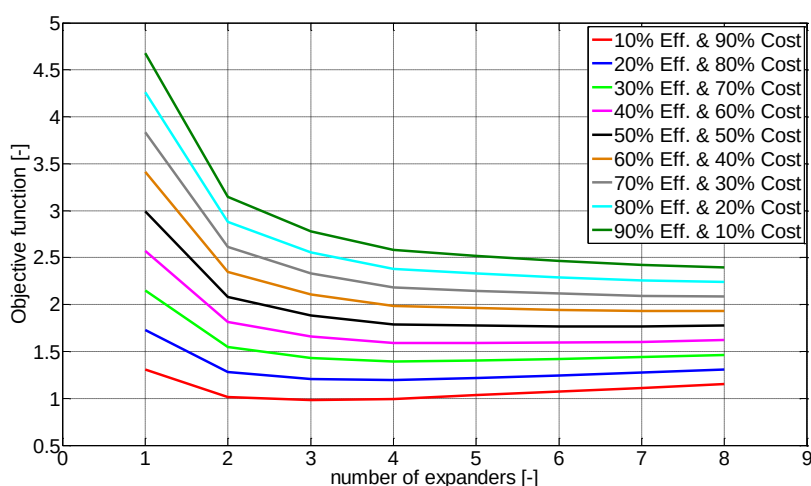


Figura 35 – Determinarea funcției obiectiv pentru a obține 30 kWh de energie, cu aerul comprimat stocat la 300 bari și expandat de la 30 bari, în funcție de numărul de trepte de c/d

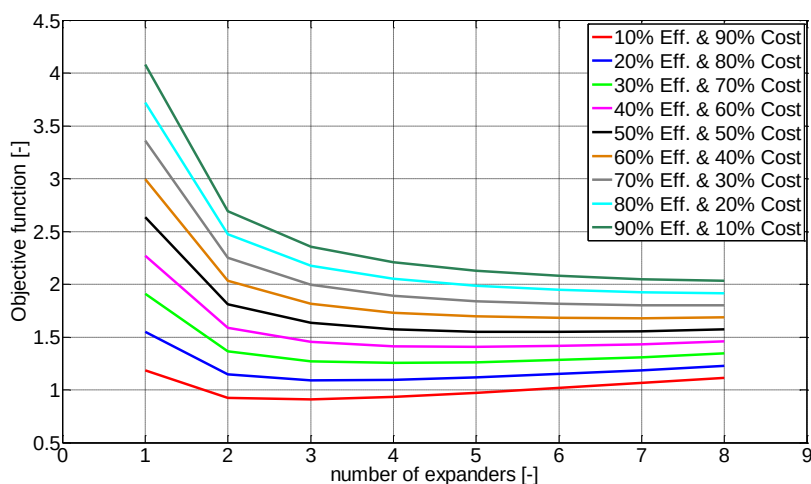


Figura 36 – Determinarea funcției obiectiv pentru a obține 30 kWh de energie, cu aerul comprimat stocat la 300 bari și expandat de la 60 bari, în funcție de numărul de trepte de c/d

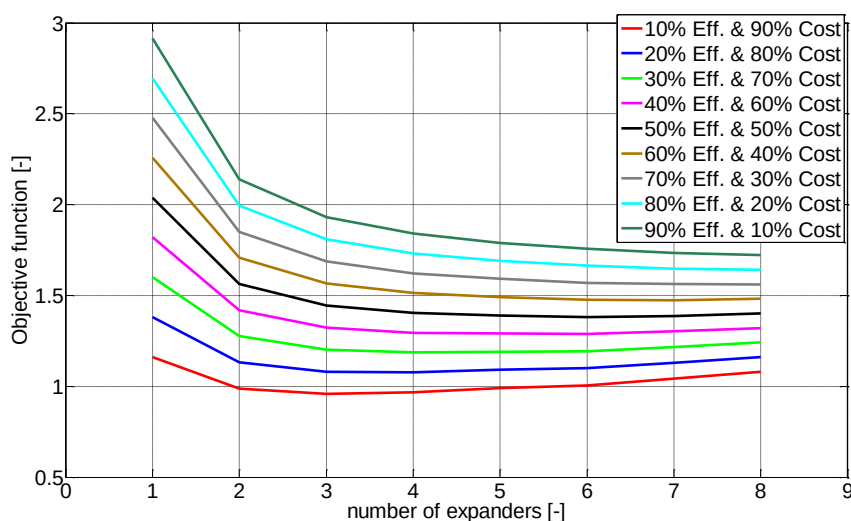


Figura 37 – Determinarea funcției obiectiv pentru a obține 30 kWh de energie, cu aerul comprimat stocat la 60 bari și expandat de la 30 bari, în funcție de numărul de trepte de c/d

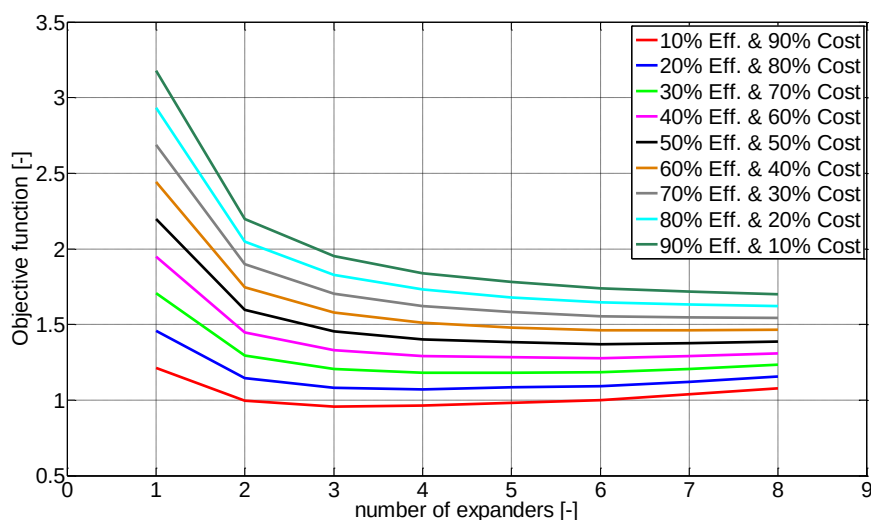


Figura 38 – Determinarea funcției obiectiv pentru a obține 30 kWh de energie, cu aerul comprimat stocat la 120 bari și expandat de la 60 bari, în funcție de numărul de trepte de c/d

Funcția obiectiv prezentată în figurile 35-38 arată că valoarea minimă a costului echipamentului este obținută atunci când valoarea sa este minimă. Se poate observa că pentru o destindere de la 30 bar sau de la 60 bar cu aerul la temperatura ambiantă la intrarea în fiecare treapta de expansiune, costul minim al investiției este obținut pentru un proces cu trei etape de compresie și destindere. Trebuie de asemenea menționat faptul că importanța frigului obținut în timpul unui număr mai mic de trepte de destindere este mai valoroasă datorită faptului că temperatura la care poate fi stocat acest frig este foarte scăzută. Odată cu creșterea numărului de trepte de destindere, crește și temperatura la care poate fi stocat frigul. În concluzie, figurile 35-38 ne arată că a lua mai mult în considerare investiția cu costul echipamentului și mai puțin valoarea eficienței reprezintă o opțiune mai bună în ceea ce privește minimizarea costului investiției.

10. Concluziile tezei și perspective

Stocarea energiei este una dintre soluțiile ce au potențialul de a contribui la creșterea ponderii surselor regenerabile în mixul energetic, având în același timp un impact major în reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră, oferind o mai mare flexibilitate rețelei, în special în ceea ce privește securitatea aprovizionării cu energie.

Principalele rezultate ale tezei cuprind diferite domenii de studiu, unul se bazează pe o analiză termodinamică, iar altul este orientat spre identificarea unui reglaj optim pentru integrarea surselor de energie regenerabilă cu tehnologiile de stocare.

Cuplarea sistemelor hibride de energie regenerabilă, energia eoliană și solară, cu soluții hibride de stocare a energiei, le poate oferi consumatorilor spre utilizare atât energie electrică cât și căldură. Totuși, este esențial ca sistemul care asigură conversia de la un tip de energie la altul să fie unul modular, compresoarele mai mici putând stoca mai multă energie decât un compresor mai mare, datorită puterii de pornire necesare.

Principalele limitări în utilizarea unui sistem CAES apar atunci când este luată în considerare partea de optimizare. Chiar dacă rezultatele teoretice arată cum poate fi îmbunătățită eficiența sistemului și care este direcția care trebuie urmată, ne confruntăm cu limitările tehnice ale compresoarelor, schimbătoarelor de căldură, vasului de stocare, motorului cu aer comprimat / turbinei, în ceea ce privește presiunea și temperatura de lucru. Cea mai mare parte a cavernelor pot rezista la o anumită presiune. În prezent, motoarele cu aer sau turbinele funcționează la presiuni de zeci de bari, astfel încât sunt necesare modele noi care să funcționeze la presiuni și temperaturi mai mari.

Complexitatea sistemelor hibride care au capacitatea de a genera mai multe tipuri de energie face ca acestea să fie de dorit, mai ales atunci când sistemul de management va fi clar definit.

În comparație cu alte tehnologii de stocare, CAES nu este o tehnologie cu răspuns imediat, precum bateriile și ultracondensatorii și nu are un timp redus de descărcare cu un randament ridicat, însă are un mare avantaj că nu există o degradare în timp a capacității. Odată ce sistemul este construit, acesta va continua să stocheze aceeași cantitate de energie atât timp cât există.

Așa cum am văzut deja, problema cu CAES nu este reprezentată în principal de provocările tehnice, ea este reprezentată de barierele vasului de stocare. Cavernele subterane au tendința de a fi destul de poroase, dar nu suficient de impermeabile pentru a permite presurizarea, baloanele subacvatice ar putea fi o opțiune potrivită, atâta timp cât acestea nu implică un cost ridicat.

Din punct de vedere economic, cu siguranță în momentul de față, stocarea energiei este costisitoare, indiferent că vorbim despre stocarea energiei termice sub formă de apă fierbinte, cea mai ieftină soluție posibilă, sau dacă vorbim despre stocarea energiei electrice utilizând oricare dintre tehnologiile existente, cu toate progresele înregistrate în ultimii ani. Tendința actuală de a avea un număr mare de surse de energie intermitente face ca energia suplimentară

să poată fi irosită, deci dacă prețurile energiei electrice sunt destul de ridicate și această tehnologie are un cost mai mic și dacă alternativele sunt prea costisitoare, atunci stocarea energiei în aer comprimat ar putea deveni mai populară.

Rezultatele prezentate arată comportamentul sistemelor CAES și modul în care acestea evoluează în timp, încercând să găsească o soluție optimă din punct de vedere tehnic și economic pentru stocarea energiei. Din considerente economice am constatat că, momentan, stocarea energiei sub formă de aer comprimat nu este o investiție viabilă, luând în considerare contextul francez sau cel românesc, și cu siguranță și altele, deoarece costul tehnologic este unul semnificativ.

Din punct de vedere al mediului, este interesant să observăm că un astfel de sistem, capabil să furnizeze energie prin trigenerare, ar putea aduce beneficii ecologice, fiind o sursă de energie „curată”, jucând un rol important în integrarea la scară largă a surselor regenerabile de energie.

În final este evidențiat în figura 34, costul necesar construirii unui sistem integrat, hibrid, constând în echipamente pentru utilizarea SRE pentru a ajuta la stocarea energiei sub formă de aer comprimat și mai apoi pentru a ajuta la transformarea energiei mecanice a aerului în electricitate.

Contribuții originale

Teza este printre primele studii care leagă stocarea energiei sub formă de aer comprimat de sursele regenerabile de energie și natura lor intermitentă.

În lucrare a fost elaborat un model teoretic pentru stocarea energiei care se referă la transformarea energiei regenerabile în energie mecanică prin intermediul compresoarelor, stocarea acesteia într-o formă de aer comprimat și ulterior utilizarea acesteia în producția de energie electrică.

O stație meteorologică a fost instalată într-o locație selectată aleatoriu, de unde s-au colectat o serie de date în ceea ce privește radiația solară directă, viteza și direcția vântului.

Pentru a găsi o soluție optimă pentru un sistem care implică stocarea energiei, este bine cunoscut faptul că există două soluții optime posibile, unul din punct de vedere energetic, denumit și optim tehnic, altul din punct de vedere economic, și ambele au fost analizate în această teză. Așa cum era de așteptat, un optim energetic este greu de găsit, datorită faptului că există prea mulți factori care interferează, cum ar fi raportul de presiune din vasul de stocare, temperatura, compresorul și numărul de trepte al expanderului, prin urmare trebuie găsit un compromis între cele două optime, cel tehnic și cel economic.

Instalația experimentală a fost concepută și realizată cu obiectivul de a ajuta la validarea rezultatelor teoretice obținute după modelarea matematică. Modul în care a fost gândită partea de automatizare, în ceea ce privește monitorizarea parametrilor și controlul sistemului, îi aparțin autorului.

În urma unei simulări în Matlab, a fost realizată în această teză o pre-dimensionare teoretică a volumului vasului de stocare pentru un sistem de stocare a energiei capabil să îi furnizeze consumatorului final 30 kWh pe parcursul unei perioade de 6 ore, în funcție de parametrii de funcționare, respectiv presiune și temperatură.

În prezent există foarte puține studii care se ocupă de stocarea energiei la scară mică sub formă de aer comprimat. Din cunoștințele autorului, niciuna dintre ele nu se ocupă de analiza economică, ce se dovedește a fi un punct de plecare foarte important în implementarea unor astfel de sisteme.

Bibliography

- [1] "Forbes," [Online]. Available: <http://www.forbes.com/2009/07/24/peak-oil-production-business-energy-nelder.html>. [Accessed 9 April 2015].
- [2] S. Lemofouet-Gatsi, "Investigation and optimisation of hybrid electricity storage based on compressed air and supercapacitors," PhD Thesis - Ecole Polytechnique de Lausanne, 2006.
- [3] Zhang Y, Yang K, Li X, Xu J, "The thermodynamic effect of air storage chamber model on advanced adiabatic compressed air energy storage system," *Renewable Energy*, no. 57, pp. 469-478, 2013.
- [4] 2009/548/EC, "Commission decision of 30 June 2009 - Establishing a template for national renewable energy action plans under directive 2009/2/EC of the European Parliament and of the Council," 2009. [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu>.
- [5] 2012/27/EC, "Directive 2012/27/EC of the European Parliament and the Council of 25 October 2012 on energy efficiency," 2012. [Online].
- [6] Kim YM, Favrat D, "Energy and exergy analysis of a micro-compressed air energy storage and air cycle heating and cooling system," *Energy*, no. 35, pp. 213-220, 2010.
- [7] Evans A, Strezov V, Evans T.J, "Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 16, pp. 4141-4147, 2012.
- [8] Mahila T.M.I, Saktisahdan T.J, Jannifar A, Hasan M.H, Matseelar H.S.C, "A review of available methods and development on energy storage - technology update," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 33, pp. 532-545, 2014.
- [9] "EIA," [Online]. Available: http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=18071#tabs_SpotPriceSlider-2. [Accessed June 2016].
- [10] "System dynamics," [Online]. Available: <http://www.systemdynamics.org/conferences/2013/proceed/papers/P1366.pdf>. [Accessed July 2016].
- [11] "RTE France," [Online]. Available: http://www.rte-france.com/sites/default/files/2015_01_27_pk_rte_2014_french_electricity_report.pdf. [Accessed June 2016].
- [12] "Agerpres," [Online]. Available: : <http://www.agerpres.ro/economie/2016/01/20/anre-a-acreditat-pana-la-31-decembrie-2015-capacitati-de-4-662-mw-de-energie-regenerabila-11-50-41>. [Accessed July 2016].
- [13] Wang S.Y, Yu J.L, "Optimal sizing of the CAES system in a power system with high wind power penetration," *Electrical Power and Energy Systems*, no. 37, pp. 117-125, 2012.
- [14] Marano V, Rizzo G, Tiano F.A, "Application of dynamic programming to the optimal management of a hybrid power plant with wind turbines, photovoltaic panels and compressed air energy storage," *Allied Energy* , no. 97, pp. 849-859.
- [15] Bullough C, Gatzen C, Jakiel C, Koller M, Nowi A, Zunft S, "Advanced adiabatic compressed air energy storage for the integration of wind energy," in *EWEC 2004*, London, November 2004.

- [16] Fiaschi D, Manfrida G, Secchi R, Tempesti , "A versatile system for offshore energy conversion including diversified storage," *Energy*, no. 48, pp. 566-576, 2012.
- [17] *Grid Energy Storage U.S Department of Energy, December 2013. [Performance].*
- [18] Karl Zach, Hans Auer, Hans Lettner, Facilitating energy storage to allow high penetration of intermittent renewable energy - Report summarizing the current Status, Role and Costs of Energy Storage Technology, www.store-project.eu, 2012.
- [19] Zhang Y, Yang K, Li X, Xu J, "The thermodynamic effect of air storage chamber model on Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage System," *Renewable Energy*, no. 57, pp. 469-478, 2013.
- [20] Kim YM, Shin DG, Favrat D, "Operating characteristics of constant-pressure compressed air energy storage (CAES) system combined with pumped hydro storage based on energy and exergy analysis," *Energy*, no. 36, pp. 6220-6233.
- [21] Budny C, Madlener R, Hilgers C, "Economic Feasibility of Pipe Storage and Underground Reservoir Storage Options for Power-to-Gas Load Balancing," *Energy Procedia* 61, pp. 2201-2205, 2014.
- [22] Pimm J. A, Garvery D. S, de Jong M, "Design and testing of energy bags for underwater compressed air energy storage," *Energy*, no. 66, pp. 496-508, 2014.
- [23] Kim YM, Lee JH, Kim SJ, Favrat D, "Potential and evolution of compressed air energy storage: energy and exergy analyses," *Entropy*, no. 14, pp. 1501-1521, 2012.
- [24] Khushairi M.M, Abdullah H, Hazran H, "A study on the Optimization of Control Strategy of a Thermal Energy Storage System for Building Air-Conditioning," *Procedia Engineering*, no. 20, pp. 118-124, 2011.
- [25] Martins M, Villalabos U, Delclos T, Armstrong P, Bergan P, Calvet N, "New concentrating solar power facility for testing high temperature concrete thermal energy storage," *Energy Procedia* 75, pp. 2144-2149, 2015.
- [26] Ercan Ataer O, "Storage of thermal energy," [Online]. Available: <http://www.eolss.net/ebooks/sample%20chapters/c08/e3-14-02-00.pdf>. [Accessed 20 05 2015].
- [27] Hasnain S.M, "Review on sustainable thermal energy storage technologies, part II: cool thermal storage," *Energy Convers Mgmt*, no. 39, pp. 1139-1153, 1998.
- [28] Ibrahim H, Ilinca A, Perron J., "Energy storage systems - Characteristics and comparison," *Renewable and Sustainable Reviews*, vol. 12, 2008.
- [29] Ciocan A, Prisecaru T, Tazerout M, Durastanti J-F, "Thermodynamic evaluation for a small scale compressed air energy storage system by integrating renewable energy sources," in *ICRERA*, Palermo, 2015.



Teză de doctorat:

Contributions to energy storage using hybrid systems from alternative energy sources

Abstract

The thesis entitled «Contributions to energy storage using hybrid systems from alternative energy sources» proposes a study of the energy storage technologies knowing the fact that these are considered one of the options that can facilitate a high penetration of renewable sources. In this context, the presented work aims to understand challenges in terms of energy storage and to develop a general studying model using compressed air as an energy storage medium.

The thesis is structured in ten chapters from which the first four are dedicated to the presentation of the renewable energy sources potential, to the energy sector evolution in the last decades and to the energy storage technologies, especially in the form of compressed air. The other six chapters are dealing with the theoretical thermodynamic calculations as far as that goes in investigating the performances of a hybrid energy storage system and presenting a mathematical model containing the steps taken into account in the renewable energy conversion into mechanical energy, stored in a form of compressed air and later reconverted into electricity. In addition these chapters present experimental data obtained on a laboratory installation which helped in validating the theoretical results obtained following a Matlab simulation, and finally a case study for a small scale application, 30 kWh of energy stored, where is aiming to find an optimal configuration of the whole system in terms of air working pressure, being analyzed from two points of view, technical and economic. The thesis ends with a chapter of general conclusions and indicates that there are still challenges that must be overcome in order to make the energy storage in a form of compressed air a feasible solution from an economic perspective.

Keywords

RES, energy storage, CAES, TES, trigeneration, thermodynamic analysis

Résumé

La thèse intitulée «Contributions aux systèmes de stockage d'énergie en utilisant des systèmes à partir de sources d'énergie alternatives» propose une étude des technologies de stockage d'énergie en sachant qu'elles sont considérées comme l'une des options qui peuvent faciliter une forte pénétration de sources renouvelables. Dans ce contexte, le travail présenté vise à comprendre les défis liés au stockage de l'énergie et à développer un modèle général d'étude utilisant l'air comprimé comme moyen de stockage d'énergie.

La thèse est structurée dans dix chapitres dont les quatre premiers sont consacrés à la présentation potentielle des sources d'énergie renouvelables, à l'évolution du secteur de l'énergie au cours des dernières décennies et aux technologies de stockage d'énergie, notamment sous forme d'air comprimé. Les six autres chapitres concernent les calculs thermodynamiques théoriques dans la mesure où il s'agit d'étudier les performances d'un système de stockage d'énergie hybride et de présenter un modèle mathématique contenant les étapes prises en compte dans la conversion de l'énergie renouvelable en énergie mécanique, stockées dans une forme d'air comprimé et plus tard reconvertis en électricité. De plus, ces chapitres présentent des données expérimentales obtenues sur une installation de laboratoire qui ont contribué à la validation des résultats théoriques obtenus suite à une simulation Matlab, et enfin une étude de cas pour une application à petite échelle, 30 kWh d'énergie stockée, où vise à trouver une configuration optimale. De l'ensemble du système en termes de pression de travail de l'air, analysé sous deux points de vue, technique et économique. La thèse se termine par un chapitre de conclusions générales et nous constatons qu'il reste encore quelques défis à surmonter pour que le stockage de l'énergie sous forme d'air comprimé soit une solution possible d'une perspective économique.

Mots clés

RES, stockage d'énergie, CAES, TES, trigénération, analyse thermodynamique