UNIVERSITATEA NAŢIONALĂ DE ŞTIINŢĂ ŞI TEHNOLOGIE

POLITEHNICA BUCUREŞTI

ŞCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE ELECTRICĂ

REZUMAT EXTINS
TEZĂ DE DOCTORAT

METODE ELECTROMAGNETICE ÎN TEHNOLOGIILE DE EXTRACŢIE PENTRU UNELE SUBSTANŢE ORGANICE

Doctorand:

Ing. Florin SĂFTOIU

Conducător ştiinţific:

Prof. Dr. Ing. Alexandru-Mihail MOREGA

BUCUREŞTI
2025

Cuprins

Introducere 4

1.1 Prezentarea temei tezei de doctorat 4

1.2 Scopul tezei de doctorat 4

1.3 Conținutul tezei de doctorat 4

Cadrul actual și direcții de cercetare 5

2.1. Concluzii 5

Principii de separare 6

3.1 Principii de separare clasice 6

3.1.1 Separarea prin sedimentare 6

3.1.2 Separarea prin centrifugare 7

3.1.3 Separarea prin distilare cu abur 7

3.1.4 Separarea fluid – fluid 7

3.2 Metode de separare actuale 7

3.2.1 Câmp electric pulsatoriu 7

3.2.2 Câmp electric microunde 7

3.2.3 Ultrasunete 8

3.3 Concluzii 8

Sursa de putere fotovoltaică 9

4.1 Conversia fotovoltaică 9

4.2 Iradianța solară ca sursă de putere 9

4.3 Convertorul fotovoltaic 10

4.4 Utilizarea iradianței termice în exploatarea panourilor fotovoltaice 10

4.4.1 O estimare analitică a influxului termic la nivelul panoului 10

4.4.2 Modelarea panoului fotovoltaic 10

4.4.2.1 Model matematic: problemă de transfer termic 10

4.4.2.2 Soluția S_0 – răcire prin convecție naturală 11

4.4.3 Soluția S_1 – schimbător de căldură cu un singur curent 11

4.4.4 Soluția S_2 – schimbător de căldură în contracurent 11

4.5 Optimizarea sistemului de extracție a puterii termice 11

4.6 Răcirea prin convecție forțată, în pulsuri 11

4.7 Concluzii 12

Extracția în câmp electric pulsatoriu 13

5.1 Electropermeabilizarea și aplicațiile sale 13

5.2 Electropermeabilizarea la nivel celular 13

5.3 Electropermeabilizarea în câmp electric pulsatoriu 13

5.4 Modelul pentru electropermeabilizare în câmp electric 14

5.5 Proprietățile electrice pentru lavandă în procesul de EP 14

5.5.1 La nivel de celulă 14

5.5.2 Elecropermeabilizarea la nivel de volum de material organic 15

5.6 Modelarea numerică a electropermeabilizării 15
5.6.1 Dimensionarea unui aparat de electropermeabilizare 15
5.6.2 Conductivitatea electrică în procesul de electropermeabilizare 16
5.6.3 Modelarea numerică a celulei de electropermeabilizare în pulsuri PWM 16
5.6.4 Celulă de electropermeabilizare circulară 17
5.6.5 Celulă de electropermeabilizare eliptică 18
5.6.6 Celulă de electropermeabilizare, rotativă 19
5.6.7 Concluzii 20
Extracția în câmp de ultrasunete 21
6.1 Surse US utilizate în procesul de extracție 21
6.1.1 Efectul piezoelectric 21
6.1.2 Convertorul piezoelectric 22
6.1.3 Convertorul magnetostrictiv 23
6.2 Utilizarea undelor US în procesul de extracție 23
6.3 Procesul de extracție asistat de US 24
6.3.1 Sursa piezoelectrică de unde US 24
6.3.2 Analiza sonotronului 25
6.3.3 Integrarea sonotronului cu celula de extracție 25
6.3.3 Integrarea sonotronului cu celula de extracţie 26
6.3.4 Modelarea proceselor care au loc în celula de extracție US 27
6.4 Concluzii 28
Concluzii 30
7.1 Rezultate obținute 30
7.2 Contribuții originale 31
7.3 Direcții de dezvoltare 31
7.4 Lista lucrărilor publicate 32
7.5 Concluzie finală 32
Bibliografie selectivă 33

Capitolul 1
Introducere

Activitățile de cercetare și dezvoltare reprezintă motorul progresului tehnologic și al diferențierii pe pieţele actuale, depășind rolul de generare de cunoștințe și orientându-se spre inovarea produselor și serviciilor, perfecționarea proceselor și optimizarea resurselor. Prin integrarea rezultatelor în strategii aplicate, R&D crește competitivitatea, reduce costurile și susține soluții sustenabile, devenind un catalizator al transformării industriale și al poziționării pe termen lung într-un ecosistem economic dinamic.

1.1 Prezentarea temei tezei de doctorat

Lucrarea prezintă cercetări în domeniul ingineriei electrică într-un cadru multidisciplinar (inginerie electrică, biologie, tehnologie, economie) aplicat procedurilor şi proceselor de extracție pentru cafea de specialitate și uleiuri esențiale. Accentul cade pe metode electromagnetice moderne care oferă control fin al parametrilor de proces, cea ce poate conduce la crește eficiența extracției, păstrarea integrităţii compușilor aromatici și reducerea costurilor energetice. Demersul consideră atât mecanismele de permeabilizare celulară și particularitățile fiziologice ale materiilor prime vegetale, cât și implicațiile economice și de sustenabilitate ale implementării industriale.

1.2 Scopul tezei de doctorat

Lucrarea urmărește definirea și evaluarea unor procese de extracție performante, scalabile și ecologic responsabile, bazate pe tehnologii electromagnetice și electromecanice, alimentate și optimizate energetic, care pot conserva calitatea compușilor și pot reduce semnificativ costurile energetice, cu asigurarea independenţei energetice a instalaţiei de extracţie.

1.3 Conținutul tezei de doctorat

Capitolul 1 prezintă cadrul general actual, contextul multidisciplinar și direcțiile de cercetare.

Capitolul 2 argumentează necesitatea modernizării extracției și poziționează tehnologiile bazate pe câmpuri electromagnetice drept rute viabile, promiţătoare, față de metodele convenționale.

Capitolul 3 expune principiile și criteriile separării din matrice vegetale, indicatorii de performanță și ferestrele operaționale, cu studii de caz pe lavandă și cafea, și stabilește baza fizico-matematică pentru modelarea ulterioară.

Având ca obiectiv asigurarea independenței energetice a unei instalații de extracție, Capitolul 4 propune un convertor fotovoltaic ca sursă de putere, care valorifică atât iradianța, cât și pierderile Joule (căldura generată) din sistem.

Capitolul 5 modelează electopermeabilizarea în câmp electric pulsatoriu, într-o celulă electrică de extracţie.

Capitolul 6 abordează extracția cu ultrasunete folosind un dispozitiv sonotron, piezoelectric.

Capitolul 7 sintetizează concluziile, contribuțiile originale și direcțiile de dezvoltare.

În toate cazurile, implementarea are două elemente cheie: sursa de putere și instalația tehnologică adecvată principiului de conversie utilizat.

Capitolul 2
Cadrul actual și direcții de cercetare

În contextul dezvoltării durabile și al cererii pentru produse naturale de înaltă calitate, optimizarea extracției compușilor bioactivi din materii prime vegetale devine prioritară. Metodele convenționale sunt „energofage", lente și pot induce degradări ale compușilor sensibili. Tehnologiile emergente bazate pe câmpuri electrice și electromagnetice – câmp electromagnetic pulsatoriu / PEF, extracția asistată de microunde / MAE și extracția asistată de ultrasunete / UAE - promit intensificarea transferului de masă cu amprentă energetică redusă.

Literatura de specialitate confirmă eficiența PEF / MAE / UAE în diverse matrice vegetale (inclusiv cafea și *Lamiaceae*), dar relevanța transferului către scară industrială rămâne încă limitată. Persistă un decalaj între rezultate de laborator și implementare pe fluxuri reale, ceea ce justifică abordări integrate de modelare și validare experimentală.

Uleiul esențial de lavandă (Lavandula angustifolia) este dominat de acetat de linalil (25 % - 45 %) și linalool (25 % - 38%), cu camfor scăzut (0,5 % - 1%), criterii cheie de calitate conform standardelor ISO [1]. Variabilitatea compozițională în funcție de soi / origine / tehnologie este bine documentată. Distilarea cu abur este referința industrială, dar tehnicile „verzi" (MAE / UAE) pot reduce timpii și consumul energetic, menținând profiluri aromatice comparabile [2].

Cafeaua este un produs global strategic ce cuprinde o industrie extinsă, iar compoziția chimică complexă cu peste 1000 de compuși bioactivi precum cafeina și acizii clorogenici o fac un produs de studiu interdisciplinar. Sectorul este afectat de schimbări climatice, volatilitatea prețurilor și vulnerabilitatea micilor producători. Răspunsuri de tip „Fair Trade" / organic, diversitatea metodelor de preparare și mișcarea „Third Wave" au consolidat orientarea spre calitate și trasabilitate [3].

Evoluțiile recente ale prețului cafelei arabica indică volatilitate accentuată, corelată cu condiții agroclimatice nefavorabile (2024). În paralel, lanțurile circulare de valorificare pentru lavandă (ulei, hidrolat, fenoli din biomasă, compost/energie) oferă rute sustenabile. Schimbările climatice degradează calitatea materiei prime, ceea ce impune procese de separare flexibile și robuste. Piața uleiurilor esențiale este în creștere accelerată până în 2030, cerând capacități locale scalabile. Aceste realități se încadrează în principiile dezvoltării durabile [4].

Lucrarea investighează metode electrotehnice (PEF, MAE, UAE) pentru: (i) optimizarea extracției compușilor activi din cafea și (ii) intensificarea recuperării uleiurilor / compușilor valoroși din plante aromatice (ex. lavandă), cu menținerea integrității compușilor sensibili și reducerea energiei specifice.

2.1. Concluzii

Necesitatea tranziției de la metode convenționale către tehnologii emergente bazate pe câmpuri electrice și electromagnetice este demonstrată. PEF / MAE / UAE au suficientă maturitate pentru testare ca soluții industriale cu impact direct asupra eficienței și calității. Alegerea lavandei și cafelei ca matrice model este justificată economic și tehnologic. Direcția de cercetare se centrează pe cuplarea modelării multifizice cu validarea experimentală și pe integrarea într-o schemă circulară de valorificare, cu comparație sistematică între rezultate numerice și fizice.

Capitolul 3
Principii de separare

În acest capitol este prezentat studiul mecanismelor de separare a elementelor combinate din natură sub acțiunea forțelor mecanice, termice, electrice sau magnetice. Tehnicile utilizate includ efectul termic, ultrasunetele, microundele și electroporarea / electropermeabilizarea. Unele procese combină etape (de exemplu, distilare termică asistată de ultrasunete ori separare ultrasonică asistată de microunde) [5].

Necesitatea separării a apărut din dorința de a conserva și valorifica componentele biologic active ale unui amestec sau material, utile în medicină, farmaceutică, nutriție și cosmetică. Metodele convenționale, precum macerarea în apă, sunt lente, consumatoare de material și energie și pot degrada calitatea compușilor. *Ultrasunetele* scurtează durata separării prin cavitație și spargerea membranelor celulare, conservând calitatea. Au fost propuse alternative bazate pe curent electric: câmp electric moderat și încălzire ohmică. Prima favorizează permeabilizarea membranei, a doua crește eficiența încălzirii. *Electroporarea* poate fi reversibilă sau ireversibilă în funcție de parametrii câmpului, iar efectele se evaluează prin fluxul de compuși prin membrană, conductivitate și impedanță. Încălzirea ohmică poate reduce semnificativ timpul de proces.

În extracția asistată de ultrasunete s-au folosit rapoarte solid–lichid uzuale, puteri moderate și temperaturi controlate, cu sonde imersate în mediu pentru o cuplare eficientă a energiei.

Cadrul comun de analiză utilizat în capitol include: fenomene de transport (difuzie, convecție, migrație în câmp electric), echilibre fază–fază, interacțiuni solvent–matrice și indicatori de performanță (randament, selectivitate, energie specifică, productivitate, păstrarea compușilor sensibili). Sunt comparate metodele clasice (sedimentare, centrifugare, distilare cu abur, separare fluid–fluid) cu tehnologiile moderne bazate pe principii electrice și electromagnetice (CEP / PEF, EAM / MAE, EAU / UAE), utilizate aici ca metode de extracție, nu ca pretratări. Focusul aplicativ rămâne pe lavandă (ulei esențial, hidrolat, compuși fenolici) și pe cafea măcinată (extract „cold brew”), iar selecția metodei urmărește simultan eficiența, calitatea, sustenabilitatea și scalabilitatea industrială. Capitolul se încheie cu indicatori și considerații de proiectare folosiți ulterior la modelarea și optimizarea EAU și CEP.

3.1 Principii de separare clasice

Tehnologiile clasice se bazează pe diferențe de proprietăți fizice: densitate (sedimentare), forțe inerțiale (centrifugare), volatilitate și presiuni parțiale (distilare cu abur), respectiv imiscibilitate și densitate (separare fluid – fluid). Sunt robuste, bine înțelese și ușor de implementat, dar pot implica timpi mari și consum energetic ridicat, cu riscuri de degradare a compușilor sensibili. Alegerea procedeului depinde de ferestre operaționale (temperatură, presiune, vâscozitate, raport solid - lichid), distribuția granulometrică și obiectivele de calitate. La scalare, echipamentele standardizate ajută, dar optimizarea energetică atinge rapid un plafon, motiv pentru care se caută intensificarea transferului de masă prin tehnologii moderne.

3.1.1 Separarea prin sedimentare

Sedimentarea se bazează pe diferența de densitate dintre fazele unui amestec; sub acțiunea gravitației, particulele mai grele se depun, iar faza lichidă rămâne deasupra. Este folosită frecvent în pretratarea lichidelor vegetale și în decantare. Viteza de separare crește odată cu mărimea particulelor și diferența de densitate și scade cu vâscozitatea mediului.

3.1.2 Separarea prin centrifugare

Centrifugarea accelerează sedimentarea prin aplicarea unei forțe centrifuge generate de echipamente rotative. Este eficientă pentru separări lichid – solid sau lichid - lichid, utile la purificarea extractelor ori separarea uleiurilor brute. Creșterea accelerației efective față de gravitație face procesul mult mai rapid, cu costul unei energii de acționare superioare.

3.1.3 Separarea prin distilare cu abur

Distilarea cu abur extrage compușii volatili (uleiuri esențiale) fără a atinge temperaturile ridicate ale fierberii directe. Amestecul abur - volatil fierbe la temperatură mai joasă decât fiecare component, ceea ce reduce degradarea termică. O instalație tipică include generator de abur, cameră de extracție, condensator și separator de faze. Randamentul se raportează la masa de ulei extrasă raportată la masa materialului vegetal, iar necesarul de abur se poate estima energetic.

3.1.4 Separarea fluid – fluid

Vasul florentin permite separarea gravitațională a două lichide imiscibile (de regulă ulei esențial și hidrolat). Faza mai densă se acumulează la bază, iar cea mai ușoară deasupra; evacuarea se face pe trasee distincte. Metoda este simplă, eficientă și nu necesită energie suplimentară.

3.2 Metode de separare actuale

În lucrare sunt analizate trei metode moderne care folosesc principii electromagnetice pentru a îmbunătăți eliberarea compușilor bioactivi din matrice vegetală: câmpuri electrice pulsate (CEP), extracție asistată de microunde (EAM) și extracție asistată de ultrasunete (EAU). Ele se remarcă prin eficiență ridicată, timpi de proces scurți și conservarea compușilor sensibili.

3.2.1 Câmp electric pulsatoriu

CEP presupune aplicarea unor impulsuri de înaltă tensiune direct asupra probei aflate între electrozi, în prezența solventului alimentar. Câmpul electromagnetic electropermeabilizează membranele celulare, reduce rezistența la transfer și crește difuzia intracelulară în solvent. Parametrii critici includ intensitatea câmpului, durata/numărul impulsurilor, energia specifică, conductivitatea mediului, temperatura și raportul solid–lichid. Beneficiile constau în timpi reduși de extracție, consum mai mic de solvent și energie și conservarea compușilor termosensibili. Limitările apar la conductivități scăzute, neuniformități de câmp/încălzire și necesități stricte de proiectare și control termic. Pentru lavandă și cafea, metoda este promițătoare condiționat de optimizarea energiei specifice și a geometriei celulei.

3.2.2 Câmp electric microunde

EAM folosește încălzirea dielectrică a apei și a solvenților polari, realizând încălzire volumică rapidă, creșterea presiunii intracelulare și expulzarea conținutului celular în solvent, concomitent cu extracția. Variante precum extragerea fără solvent sau hidrodifuzia cu gravitație sunt răspândite pentru uleiuri esențiale și reduc semnificativ timpii față de distilarea clasică, menținând profilul aromatic. Este esențial controlul puterii pentru a evita punctele fierbinți și degradările locale. Randamentul depinde de solvent, raportul solid–lichid, putere, timp și temperatură; solvenții polari absorb eficient energia. În aplicațiile pe lavandă și cafea, EAM obține randamente comparabile cu metodele convenționale în intervale de timp mult mai scurte.

3.2.3 Ultrasunete

EAU utilizează unde ultrasonice care induc cavitație, generând microjeturi și forfecări locale, apariția fenomenului de cavitație, care contribuie la fragmentarea pereților celulari și amplifică procesul de transfer de masă și căldură. Parametrii de control sunt puterea/amplitudinea și frecvența US, temperatura, raportul solid–lichid și designul (geometria) sondei/băii. Avantaje: timpi scurți, solvent mai puțin, temperaturi moderate și protejarea compușilor sensibili. Limitări: risc de oxidare sau izomerizare sub cavitație intensă și apariția de zone locale supraîncălzite; sunt necesare control termic și, la nevoie, atmosferă inertă. Pe lavandă și cafea, EAU reduce timpul de proces de la ore la minute, cu performanțe comparabile convenționalului.

3.3 Concluzii

Acest capitolul a prezentat cadrul comun de analiză pentru tehnologiile de separare aplicabile matricei vegetale, echilibrând robustețea metodelor clasice cu viteza și eficiența tehnologiilor bazate pe câmpuri. Sedimentarea, centrifugarea, distilarea cu abur și separarea fluid–fluid rămân etape de bază, scalabile, dar cu timpi și costuri energetice adesea ridicate și cu riscuri pentru compușii sensibili. În schimb, câmpul electric pulsatoriu, microundele și ultrasunetele reduc barierele de transfer la nivel celular prin electroporare (electropermeabilizare), încălzire dielectrică și cavitație indusă acustic, accelerând eliberarea compușilor, scurtând duratele și reducând frecvent consumul de solvent și energie, în condiţiile conservării calităţii produşilor de extracţie. Limitările specifice fiecărei tehnologii impun control fin al puterii aplicate, designului reactorului/celulei și asigurarea stabilităţii termice.

Pentru lavandă și cafea, rezultatele susțin rute moderne sau hibride în care operațiile clasice rămân post-tratamente (condensare, decantare), iar eliberarea, respectiv transferul, este intensificat prin acţiunea câmpurilor electromagnetice sau ultrasonice. Alegerea metodei depinde de produsul țintă, proprietățile matricei și solventului și constrângerile operaționale admise. Analiza comparativă justifică utilizarea modelării numerice pentru CEP și EAU, procese multidisciplinare, „multifizice” sensibile la distribuția spațio-temporală a energiei și la detaliile geometriei tehnologice, reducând ciclurile experimentale și riscurile de degradare a compușilor.

Capitolul 4
Sursa de putere fotovoltaică

În contextul proceselor de extracție asistate electric (de ex., câmp electric pulsatoriu, CEP, extracție asistată cu ultrasunete, EAU), sursa de alimentare joacă un rol esențial în portabilitatea, sustenabilitatea și controlul energetic al instalației. Conversia fotovoltaică oferă o soluție directă pentru alimentarea generatoarelor electrice utilizate în extracție, permițând eliminarea dependenţei totale de rețelele clasice și integrarea procesului într-o arhitectură energetică autonomă. Mai mult, natura electromagnetică a conversiei PV este compatibilă conceptual cu procesele de extracție studiate, în care câmpurile electrice și energia furnizată controlează permeabilizarea matricei, transferul de masă și randamentul de extracție. Astfel, sursa fotovoltaică nu este tratată doar ca element de alimentare, ci ca parte integrantă a unui lanț energetic coerent, orientat spre procese de extracție sustenabile, scalabile și cu amprentă energetică redusă.

4.1 Conversia fotovoltaică

Energia solară este o resursă regenerabilă cu potențial ridicat de substituire sau completare a surselor convenționale. Tehnologiile fotovoltaice (PV) transformă direct energia solară în energie electrică prin efectul fotovoltaic. Un sistem PV include panouri solare (celule din siliciu mono / poli / amorf sau tehnologii „strat subţire” (thin-film)), invertor, controler de încărcare (P_{MPP}), baterii, structuri de montaj şi cablaj.

În contextul schimbărilor climatice și tranziției spre surse „verzi”, sursele PV sunt relevante atât pentru aplicații la scară mare, cât și pentru sisteme mobile, sau de laborator (senzori, dispozitive portabile, echipamente de extracție și procesare).

Avantajele sunt reprezentate de independența energetică, reducerea amprentei de carbon, operare în zone izolate și alimentarea sustenabilă a echipamentelor cu consum redus. În această lucrare, sursele PV sunt analizate ca soluții de alimentare pentru echipamente de extracție (ex. CEP / EAU), vizând procese sustenabile, mobile și scalabile.

Dimensionarea se corelează cu puterea consumatorului (generator US 200 W [19]), durata zilnică de funcționare, iradiența locală, nevoia de stocare / autonomie și eficiențele invertorului și controlului.

4.2 Iradiența solară ca sursă de putere

Radiația electromagnetică, este unul dintre cele trei mecanisme de transfer de căldură și reprezintă sursa primară pentru panourile fotovoltaice. Spre deosebire de conducție și convecție, radiația nu necesită un mediu de propagare material, ceea ce face posibil transferul energetic Soare – Pământ.

Descrierea fenomenului se poate face atât în cadrul electromagnetismului clasic (al mediilor continue, ipoteza ondulatorie a câmpului electromagnetic), cât și în cadrul teoriei cuantice (ipoteza corpusculară, a „pachetelor” discrete de energie, fotoni). Domeniul vizibil din spectrul electromagnetic este relevant pentru conversia PV, dar componenta infraroșie (IR), contribuie la supraîncălzirea celulelor PV. Există însă și celule termofotovoltaice, dedicate conversiei IR [24].

În conversia PV, emisivitatea, absorbanța, reflexivitatea și transmisivitatea câmpului electromagetic caracterizează interacțiunile câmp electromagnetic – celulă (matrie) [6].

Iradianţa solară incidentă este atenuată atmosferic, iar evaluarea fluxurilor utile (iradianţele directă şi reflectată) ține cont de geometria solară (azimut, înălțime / zenit) și de poziția şi orientarea panoului. Pentru determinarea unghiurilor solare se poate utiliza un

algoritm de poziționare solară de înaltă precizie. Aceste elemente fundamentează modelele analitice / numerice folosite ulterior [7].

4.3 Convertorul fotovoltaic

Conversia fotovoltaică transformă direct unda electromagnetică (fotonii) în energie electrică la nivelul interfeţei p-n a celulei PV. Stratul superficial exterior antireflex, contactele transparente / conductoare și materialul semiconductor (mono-Si, poli-Si, a-Si, CdTe, CIGS etc.) influențează semnificativ randamentul conversiei.

Parametrii de circuit electric uzuali sunt tensiunea și curentul la punctul de putere maximă (V_{mp}, I_{mp}), puterea maximă (P_{MPP}), factorul de umplere (FF) și randamentul (η).

Temperatura este un factor critic: pe măsură ce panoul se încălzește (IR + efect Joule, în sarcină + mediu), eficiența scade.

Metodele de răcire pot fi implementate folosind soluții pasive (vase ceramice, efect termosifon) și active (circuit hidraulic cu pompă, colector termic cu porți I/O controlabile, țevi/serpentine pe spate, curgere în contracurent). Performanța depinde de geometrie, debit, distribuția curgerii și integrarea energetică [8].

În acest subcapitol sunt analizate atât efectele încărcării termice, cât și modalități de valorificare a căldurii eventual extrase într-un circuit secundar, de conversie energetică (configurații PV/T).

4.4 Utilizarea iradianței termice în exploatarea panourilor fotovoltaice

4.4.1 O estimare analitică a influxului termic la nivelul panoului

Panoul este modelat, aici, ca o placă încălzită de iradianța solară standard și răcită prin convecție naturală faţă de mediul ambiant, aer. Se consideră condiţii de funcţionare izoterme / izoflux (putere termică) pentru fața expusă a panoului PV și se analizează efectul înclinării panoului asupra răcirii [9]: la unghiuri mari (față de verticală), coeficientul de transfer de căldură prin convecţie scade, iar răcirea naturală se reduce.

Rezultatele analitice prezentate oferă ordine de mărime pentru temperatura de operare și pentru coeficientul de transfer de căldură prin convecție. Acestea date pot servi pentru pred-dimensionarea termică a convertorului PV, şi sunt ulterior verificate şi confirmate prin modelare numerică. Concluzia: poziționarea optimă a panoului (unghiul) îmbunătățește răcirea pasivă, dar, pentru sarcini termice specifice, este necesară prevederea unei scheme de răcire activă.

4.4.2 Modelarea panoului fotovoltaic

Analiza întrprinsă indică faptul că prin implementarea unui sistem de răcire cu apă, în curgere forţată, se poate extrage o putere termică utilizabilă, eventual într-un ciclu termodinamic suplimentar, menținând, în acelaşi timp, temperatura de funcționare în limite optime și crescând, astfel, randamentul energetic global (configurație PV/T) [10].

4.4.2.1 Model matematic: problemă de transfer termic

Sunt propuse şi analizate două familii de soluții de răcire pentru menţinerea stabilităţii termice a panoului PV: convecție naturală (stabilitate termică pasivă) și convecție forțată (stabilitate + extracție de putere termică pentru un ciclu secundar), folosind apa ca fluid de lucru. Pentru convecția forțată se compară eficienţa utilizării unei singure serpentină (un curent) cu eficienţa utilizării unui sistem de răcire cu o arhitectură în contracurent.

Curgerea în schimbătorul prevăzut pe spatele panoului este presupusă staționară, vâscoasă, incompresibilă, laminară sau turbulentă, monofazică (sub punctul de fierbere) – modelul Navier Stokes (conservearea impulsului şi conservarea masei) pentru un fluid cu reologie Newton. Modelul fizico-matematic este completat cu condiții la limită de tip profil de viteză la intrare, presiune la ieșire și curgere la pereți fără alunecare. Pentru problema de transfer de căldură este utilizată ecuaţia energiei (primul principiu al Termodinamicii). Sursa de căldură internă este efectul Joule (panoul funcționează în sarcină) şi echivalentul căldurii primita ca iradianţă IR. Condiţiile la limită sunt flux de căldură (putere) convectiv pe spatele panoului, izolație termică pe ramă; temperatura de intrare a agentului de răcire este impusă [10]. Ambele modele sunt formulate, aici, în regim staţionar.

4.4.2.2 Soluția S_0 – răcire prin convecție naturală

Considerând răcirea naturală (fără sistem de răcire în curgere forţată), distribuția temperaturii în panoul PV este cvasi-uniformă, dar la niveluri ridicate. Răcirea pasivă depinde de unghiul de înclinare: coeficientul convectiv scade la unghiuri mari, iar sarcina termică crește cu puterea extrasă electric. Rezultatele nnumerice conformă predicţiile analitice, obţinute anterior. Concluzie: convecția naturală singulară nu este suficientă pentru menținerea randamentului PV în regim real [10].

4.4.3 Soluția S_1 – schimbător de căldură cu un singur curent

Cu o singură serpentină și curgere forțată, panoul devine aproape izoterm, la temperaturi mai scăzute. Creșterea debitului (viteza la intrare) amplifică răcirea panoului, respectiv, scade temperatura panoului. Analizând eficienţa globală (inclusiv puterea necesară funcţionării sistemului hidraulic), la debite mari randamentul are o tendinţă descrescătoare la viteze de curgere relativ mari (cost hidraulic mai mare). Această soluție propusă este, în fapt, un compromis bun între răcire, puterea termică extrasă și lucrul mecanic al pompei care asigură curgerea forţată [10].

4.4.4 Soluția S_2 – schimbător de căldură în contracurent

Arhitectura în contracurent uniformizează suplimentar câmpul termic și maximizează extracția de căldură, obținând cele mai mici temperaturi ale panoului și un ușor plus la P_{MPP} față de S_1. Prețul îl reprezintă efortul dublu de pompare comparativ cu o singură serpentină [11].

4.5 Optimizarea sistemului de extracție a puterii termice

Dacă obiectivul principal este eficiența electrică maximă și valorificarea căldurii, se recomandă soluţia S_2 (contracurent). Dacă se urmărește reducerea puterii auxiliare, cu răcire activă moderată, soluţia S_1 oferă performanțe apropiate cu consum energetic aproximativ la jumătate față de S_2. Alegerea depinde de integrarea termică, constrângerile de pompare, masă / volum și condițiile de operare.

4.6 Răcirea prin convecție forțată, în pulsuri

Pentru situațiile în care energia agentului de răcire nu este valorificată în mod continuu, se propune un regim „în pulsuri” derivat din soluţia S_1, controlat de două praguri de temperatură ale panoului care sunt utilizate pentru pornirea şi oprire pompării [11]. Modelarea numerică consideră formularea nestaţionară a ecuaţiei energiei.

Temperatura fluidului (volum de fluid „proaspăt” termic) influențează ciclul de răcire: panoul are inerție termică mare, astfel că pe durata fiecărui puls (până la înlocuirea pachetului

cu unul nou) fluidul acumulează căldură. Acest regim pulsatoriu reduce puterea de pompare la nivel de ore, păstrează panoul la temperaturi mai ridicate, dar asigură o extracţie mai mică de căldură. Această soluție devine utilă când prioritatea este simplificarea și consumul auxiliar minim, nu optimizarea randamentului PV/T [11].

Regimul continuu (soluţia S_2) menține panoul rece și maximizează căldura extrasă, cu un cost de pompare ridicat, soluţia S_1 este un compromis, iar „Puls” reduce drastic energia auxiliară, însă cu penalizare electrică și termică, sub aspect energetic [11].

4.7 Concluzii

Acest capitol a urmărit analiza unor soluții, fie existente fie propuse, pentru integrarea conversiei fotovoltaice ca sursă de alimentare pentru echipamentele de extracție este fezabilă, cu condiția gestionării sarcinii termice și asigurării stabilității termice a convertorului (panoului) PV. Panoul funcționează ca generator electric și „placă caldă”; creșterea temperaturii scade eficiența, deci arhitectura trebuie tratată ca sistem PV/T.

Răcirea naturală contribuie, dar este insuficientă pentru regimuri reale. Răcirea forțată cu o singură serpentină (S_1) oferă un compromis bun între performanță și consum auxiliar; contracurentul (S_2) maximizează performanța globală când căldura este valorificată. Regimul în pulsuri minimizează energia de pompare, dar penalizează P_{MPP} și recuperarea termică.

În practică, dimensionarea pornește de la cererea echipamentelor (de ex., 200 W EAU), iradianța locală și autonomia, iar strategia de răcire se alege în funcție de utilizarea căldurii extrase și constrângerile energetice ale sistemului.

Capitolul 5
Extracția în câmp electric pulsatoriu

În acest capitol se prezintă extracția asistată de câmp electric pulsatoriu (CEP) prin aplicațiile sale, electropermeabilizarea (EP) la nivel celular, electropermeabilizarea (EP) în câmp electric pulsatoriu, modelul matematic, proprietățile electrice pentru lavandă în procesul EP, modelarea numerică și concluziile.

5.1 Electropermeabilizarea și aplicațiile sale

Electropermeabilizarea (EP) creează pori transmembranari care măresc permeabilitatea membranei celulare, facilitând eliberarea compușilor intracelulari.

Tehnologiile moderne de extracție, precum PEF, UAE și MAE se bazează pe introducerea unei forme de energie direcționată în sistem, cu scopul de a intensifica transferul de masă prin modificarea directă a barierei celulare. În cazul PEF, impulsurile provoacă permeabilizarea membranei celulare. În cazul UAE, undele ultrasonice generează cavitație acustică, inducând stres mecanic și turbulențe locale. În cazul MAE, radiațiile electromagnetice la frecvențe de microunde produc încălzire volumetrică a materiei, crescând presiunea internă și determinând ruptura pereților celulari. Astfel, fiecare metodă acționează printr-un mecanism fizic diferit, dar converg spre același obiectiv: eliberarea rapidă și eficientă a compușilor de interes, cu minimă afectare a proprietăților organoleptice și funcționale.

Aplicațiile EP includ: transformare genetică, inactivare microbiană și pasteurizare la temperaturi joase, electroextragere de biomolecule (ADN, proteine, lipide). În schema tehnologiilor moderne de extracție, PEF (câmp electric pulsatoriu) acționează direct asupra barierei celulare, complementar ultrasunetelor (cavitație) și microundelor (încălzire volumică) [12].

5.2 Electropermeabilizarea la nivel celular

Tensiunea superficială de la nivelul membranei joacă un rol important în procesul EP. Cu cât numărul și diametrul porilor crește, cu atât căderea tensiunii membranare scade [136]. Distribuția porilor membranari este direct proporțională cu căderea de tensiune membranară corespunzătoare prezenţei câmpului electric, de la 80 mV în stare refractară, la 0 mV în cca. 1 μs - 2 μs [30]. În același timp, resigilarea porilor se face aproape instant odată cu oprirea procesului de electroporare.

Impactul formei pulsului electric asupra permeabilizării membranei celulare reprezintă un proces esențial pentru introducerea moleculelor în celule prin EP. Tipul de puls - unipolar, bipolar, sinusoidal, sau triunghiular - și durata în care amplitudinea pulsului depășește un anumit prag critic, sunt cruciale pentru eficiența permeabilizării [31]. Rezultatele arată că pulsurile bipolare dreptunghiulare sunt cele mai eficiente în permeabilizarea membranei celulare la amplitudini mai mici ale câmpului electric, în timp ce forma dinamică a pulsului, precum timpul de creștere și descreștere, nu are un impact semnificativ. Această concluzie susține teoria conform căreia permeabilizarea se bazează pe formarea de pori în membrana celulară, dependentă de durata și intensitatea câmpului electric aplicat.

5.3 Electropermeabilizarea în câmp electric pulsatoriu

Electroporarea, sau electropermeabilizarea, apare sub acțiunea unui câmp electric atunci când tensiunea electrică transmembranară a celulei depășește un prag critic, corespunzător unei valori limite a intensității câmpului electric. Apariția electroporării depinde

de distribuția câmpului electric, care la rândul său depinde de proprietățile electrice ale materialului.

Un fenomen asociat prezenţei unui câmp electric într-un mediu conductor este efectul Joule, care determină încălzirea membranei celulare, favorizând formarea porilor. Aplicarea unui câmp electric pulsatoriu - a pulsurilor sau perechilor de pulsuri („burst") cu o anumită frecvență, modifică starea termică a celulei. S-a observat prin simulări numerice, faptul că până la un anumit punct, frecvența și temperatura sunt direct proporționale, dar depășind o anumită frecvență, temperatura scade, așadar funcția frecvență - temperatură în cazul electroporării în perechi de pulsuri nu este monotonă [13].

5.4 Modelul pentru electropermeabilizare în câmp electric

Modelarea procesului EP este o problemă de regim dinamic, difuzie nestaționară, descrisă de legile câmpului electromagnetic,

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \text{legea inducției electromagnetice,} \quad (1)$$

$$\text{div}\mathbf{J} = 0, \quad \text{legea conservării sarcinii electrice,} \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E})\mathbf{E}, \quad \text{legea conducției electrice,} \quad (3)$$

$$\text{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J} + \mathbf{J}_d, \quad \text{legea circuitului magnetic,} \quad (4)$$

$$\text{div}\mathbf{B} = 0, \quad \text{legea fluxului magnetic,} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0\mathbf{H}, \mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E} \quad \text{legi de material, câmp magnetic respectiv electric.} \quad (6)$$

unde **E** [V/m] este intensitatea câmpului electric, **B** [T] este inducția magnetică, **J** [A/m^2] este densitatea curentului electric de conducție, $\mathbf{J}_d = -\partial\mathbf{D}/\partial t$ este densitatea de curent de deplasare, σ(**E**) [S/m] este conductivitatea electrică, **H** [A/m] este intensitatea câmpului magnetic, μ_0 [H/m] este permeabilitatea magnetică, iar ε [F/m] este permitivitatea electrică. Permitivitatea electrică și conductivitatea electrică sunt presupuse invariante, dependente însă de faza materiei organice – permeabilizată sau nu. Există un prag al intensității câmpului electric (al gradientului potențialului electric), E_{critic}, peste care conductivitatea electrică înregistrează un salt.

În condițiile date, la frecvența de lucru, curentul electric de deplasare este neglijabil de mic în comparație cu densitatea curentului electric de conducție, astfel încât modelul matematic al EP în câmp electric pulsat, descris de ec. (1) - (6), este dat de ecuația cu derivate parțiale [22]

$$-\nabla \cdot \left(\varepsilon \frac{\partial V}{\partial t}\right) - \nabla \cdot [\sigma(-\nabla V)\nabla V] = 0. \quad (7)$$

unde V [V] este potențialul electric.

5.5 Proprietățile electrice pentru lavandă în procesul de EP

5.5.1 La nivel de celulă

Pentru o celulă vegetală (lavandă), diametrul este de ~20 μm până la 100 μm, grosimea membranei este de ~5 nm până la 8 nm, iar grosimea peretelui celular de ~0,1 μm până la 1 μm [29]. Pentru EP reversibilă, U_{critic} este de 0,2 V până la 0,5 V, căderea de tensiune critică pe membrană, ~1 V, iar valoarea critică a intensităţii câmpului electric, $E_{critic} = 10^6$ V/m până la 10^7 V/m [29].

În modelele de tip mediu continuu la nivel de membrană, deschiderea porilor crește conductivitatea locală și reduce permitivitatea efectivă, iar citoplasma rămâne puternic polarizabilă. Uleiul esențial are permitivitate relativă mică [29].

5.5.2 Elecropermeabilizarea la nivel de volum de material organic

Modelarea proprietăților materialelor la nivel de mediu continuu, de la nanomateriale până la sisteme biologice precum celulele sau solurile, unde interfețele separă regiuni cu caracteristici electrice distincte, se poate realiza utilizând un model de tip Maxwell-Wagner [14],

$$\varepsilon_{efectiv} = \varepsilon_m \left[1 + 2\varphi \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_m}{\varepsilon_p + 2\varepsilon_m}\right] \Big/ \left[1 - \varphi \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_m}{\varepsilon_p + 2\varepsilon_m}\right],$$
$$\sigma_{efectiv} = \frac{\sigma_i \varepsilon_m \sigma_i \varepsilon_m + \sigma_m \varepsilon_p}{\varepsilon_p + \varepsilon_m}, \quad (8)$$

unde φ este fracţia volumetrică a incluziunilor (celule de lavandă), ε_m este permitivitatea mediului înconjurător și ε_p este permitivitatea incluziunii (celulei, particulei).

După EP, conductivitatea efectivă crește, iar permitivitatea electrică efectivă scade, reflectând pierderea caracterului capacitiv al membranei. Pragul de câmp critic la nivel de celulă de lucru depinde de geometrie, distanța dintre electrozi, frecvență și proprietăți [28].

Tensiunea critică este

$$U_{critic} \approx A\varepsilon_r{}^{\alpha} \left(\frac{D}{d}\right)^{\beta}, \quad (9)$$

unde, $A \approx 15$ kV este o constantă de material, $\alpha \approx 0{,}3$, $\beta \approx 0{,}8$ sunt exponenţi stabiliţi empiric.

5.6 Modelarea numerică a electropermeabilizării

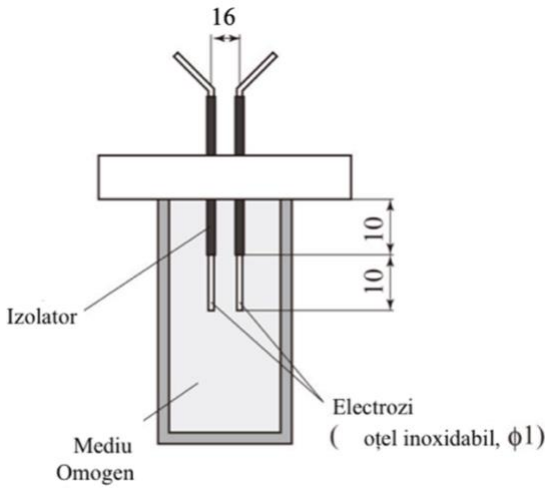


Fig. 5.9 - Celula de lucru utilizată în modelarea numerică [25].

În continuare sunt analizate două etape fundamentale ale electropermeabilizării: procesul de permeabilizare, desfășurat în prezența câmpului electric și etapa de închidere a porilor, care are loc odată cu suprimarea câmpului electric. Domeniul de calcul reprezintă un volum de masă biologică, presupus ca un mediu eterogen, omogen pe porțiuni, corespunzător celor două faze - permeabilizată și nepermeabilizată [25].

Celula de lucru este o un vas prevăzut cu o pereche de electrozi, Fig. 5.9.

Predimensionarea celulei EP este realizată pentru distanta între electrozi $d \approx 16$ mm, undă dreptunghiulară PWM de tensiune, $V \approx 6$ V ($E_{critic} = V/d = 375$ V/m), perioada PWM 5 ms, durata pulsului 50 μs, $\sigma_{initial} = 0{,}01$ S/m (starea inițială, nepermeabilizat), $\sigma_{max} = 0{,}2$ S/m (starea finală, permeabilizat).

5.6.1 Dimensionarea unui aparat de electropermeabilizare

Cele două faze, permeabilizată respectiv nepermeabilizată, prezintă proprietăți electrice diferite [154]. Considerând starea finală, când tot materialul organic este permeabilizat, volumul de lucru poate fi considerat ca mediu conductor, un rezistor R_c

$$R = \frac{L}{A\sigma_{ef}} \quad (10)$$

care închide galvanic circuitul dintre cei doi electrozi. Aici, indicele *c* reprezintă amestecul, soluția sau materia organică, *L* [m] este distanța dintre electrozi, *A* [m^2] este aria electrodului și σ_{ef} [S/m] este conductivitatea electrică a materiei organice. În regim staţionar (electrocinetic, curent continuu) conductivitatea electrică efectivă a materialului organic este dată de

$$\sigma_{ef} = \frac{I}{U}\frac{L}{A}, \tag{11}$$

unde *I* [A] este intensitatea curentului electric, *U* [V] este tensiunea aplicată la bornele celor doi electrozi, iar *A* [m^2] este zona de contact în secțiunea dintre soluția de amestec a materiei organice și electrod.

5.6.2 Conductivitatea electrică în procesul de electropermeabilizare

Evoluția procesului de EP oscilează, cu viteze de porare (mari) și sigilare (mici) diferite, între permeabilizarea materialului, pe durata „on" a semnalului PWM, dacă este îndeplinită condiția locală de prag $E > E_{critic}$, și închiderea porilor, pe durata „off" a perioadei undei semnalului PWM, când nu mai este îndeplinită condiția de prag.

Pentru a modela acest efect, conductivitatea electrică este definită prin,

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = [k_{deschidere}(\sigma_{max} - \sigma)\theta(E - E_{crtic}) - k_{inchidere}(\sigma - \sigma_{initial})], \tag{12}$$

unde $k_{deschidere}$ viteza de formare a porilor (0,1 s^{-1}), $k_{inchidere}$ este viteza de reînchidere a porilor (0,05 s^{-1}), iar θ este funcția Heaviside.

Durata procesului EP este aliniată cu evoluția conductivității electrice, al cărei comportament asimptotic, exponențial este dat de

$$\sigma(t) = \sigma_{max} + (\sigma_{initial} - \sigma_{max})e^{-\frac{k_{deschidere}+k_{inchidere}}{t}}, \tag{13}$$

5.6.3 Modelarea numerică a celulei de electropermeabilizare în pulsuri PWM

Modelarea numerică a celulei de electropermeabilizare în pulsuri PWM se referă la o secțiune plan - paralelă a ansamblului și rezolvă simultan, prin metoda elementului finit, câmpul electric cu potențiale impuse pe electrozi (semnal PWM, incinta la masă). Evoluția conductivității masei biologice este dependentă de valoarea critică a intensităţii câmpului electric (produce, respectiv sigilează pori). Este considerat şi transferul de căldură cu sursă internă Joule, în ipoteza unui mediu liniar, omogen și izotrop [26].

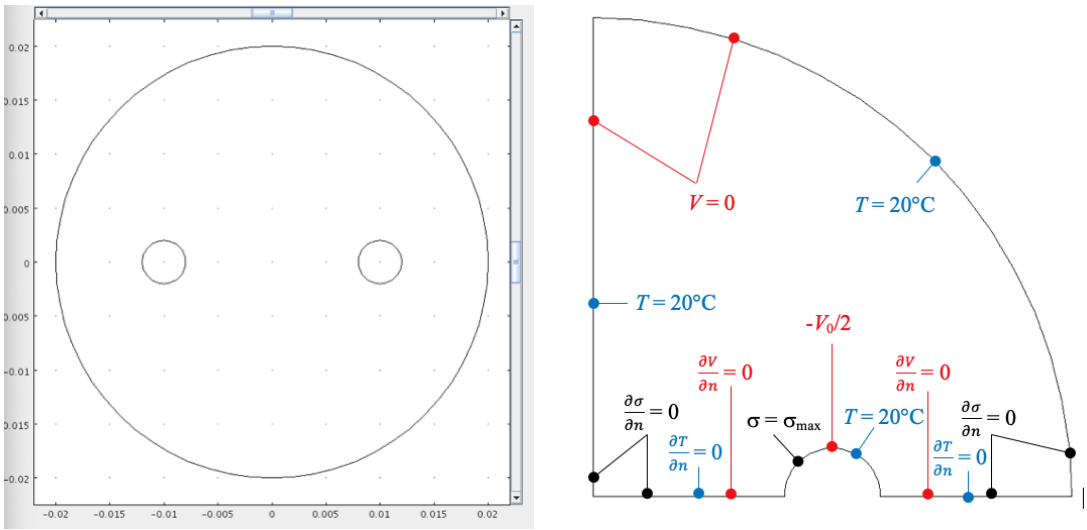


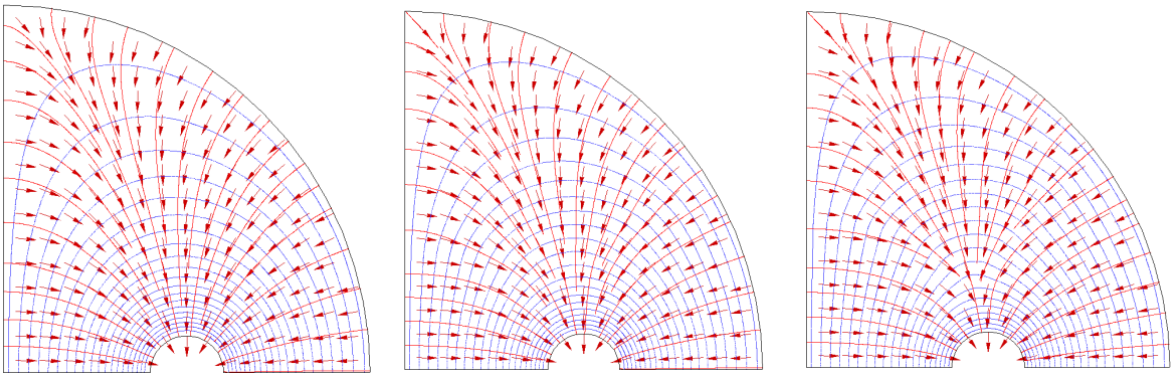
Fig. 5.10 - Condiţiile la limită pentru problema de câmp electromagnetic.

Se presupune că electrozii şi peretele celulei sunt în contact cu un termostat, care menține temperatura la 20 °C. O soluție poate fi utilizarea unor elemente Peltier, care pot asigura evacuarea căldurii produse prin EP. Starea termică inițială este $T = 20$ °C.

Rezolvarea celor trei „fizici” cuplate, câmpul electric, variația conductivității electrice în funcție de intensitatea câmpului electric, încălzirea, este realizată simultan folosind un solver segregat [27].

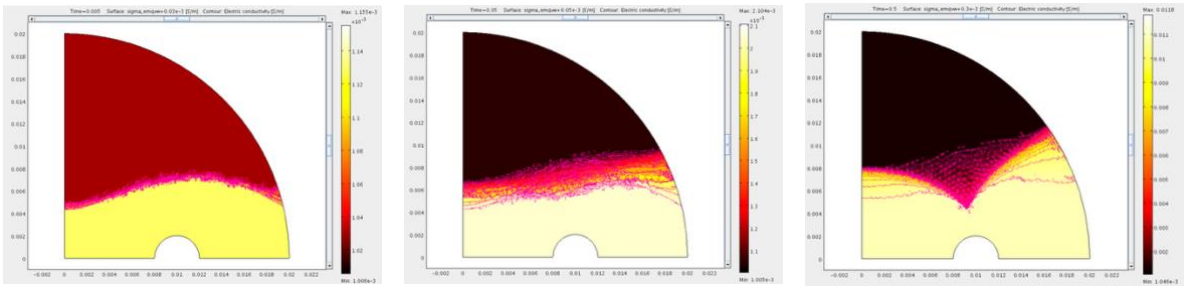
5.6.4 Celulă de electropermeabilizare circulară

Câmpul electric prezintă zone persistente „sub prag” care nu se permeabilizează pentru parametrii aleși, creșterea tensiunii ar putea reduce aceste zone, dar crește încălzirea Joule. Cu răcire stabilizată, regimul termic rămâne aproape izoterm la temperaturi joase [15].



$t = 0{,}005$ s. $t = 0{,}05$ s. $t = 0{,}5$ s.

Fig. 5.12 - Rezultate de simulare numerică, câmpul electric reprezentat prin linii de câmp şi vectori (normalizaţi) (intensitatea câmpului electric) şi curbe echipotenţiale. Celula circulară.



$t = 0{,}005$ s. $t = 0{,}05$ s. $t = 0{,}5$ s.

Fig. 5.13 - Rezultate de simulare numerică, distribuţia conductivităţii electrice (harta de culoare). Pragul EP este de 200 V/m.

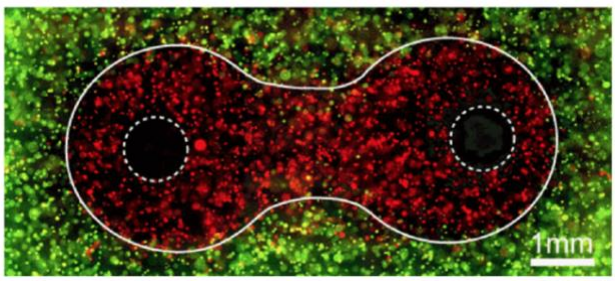
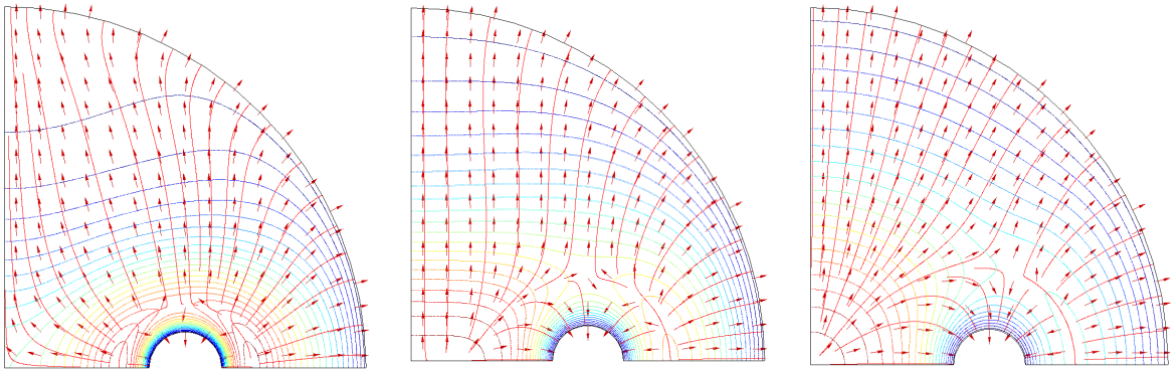


Fig. 5.14 - Distribuția celulelor după aplicarea a 45 de pulsuri. Roșu - celule electropermeabilizate, Verde - celule nepermeabilizate [25].

Distribuția conductivității electrice permite compararea rezultatelor numerice cu rezultate experimentale cunoscute în literatură (Fig. 5.14). Conturul trasat cu alb, aici, marchează interfața dintre cele două regiuni, permeabilizate și respectiv nepermeabilizate încă.

Corelând harta conductivității electrice (Fig. 5.13) cu harta distribuției câmpului electric (Fig. 5.12), se poate observa persistența unei zone în care, pe

durata simulării, nu are loc permeabilizarea. În regiunea respectivă, intensitatea câmpului electric, în parametrii de modelare numerică stabiliți, nu depășește pragul EP.



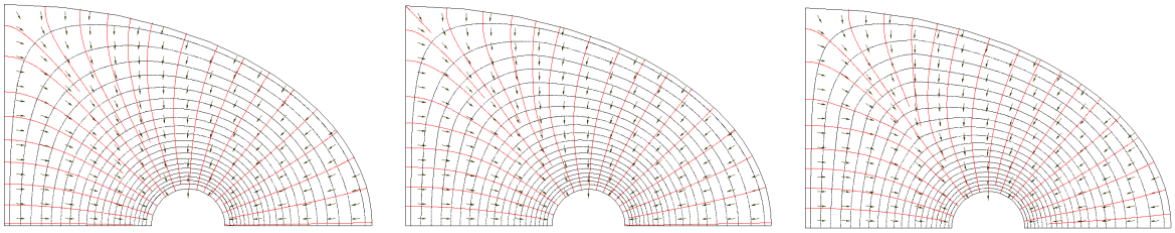
t = 0,005 s. t = 0,05 s. t = 0,5 s.

Fig. 5.15 - Rezultate de simulare numerică, starea termică a celulei: curbe izoterme, linii de câmp şi vectori (normalizați) pentru densitatea de fluxul de căldură (putere termică).

După 0,5 s celula este practic izotermă, în intervalul 20 °C - 20.3 °C, ceea ce sugerează că răcirea prevăzută prin termostatare asigură o bună funcționare.

5.6.5 Celulă de electropermeabilizare eliptică

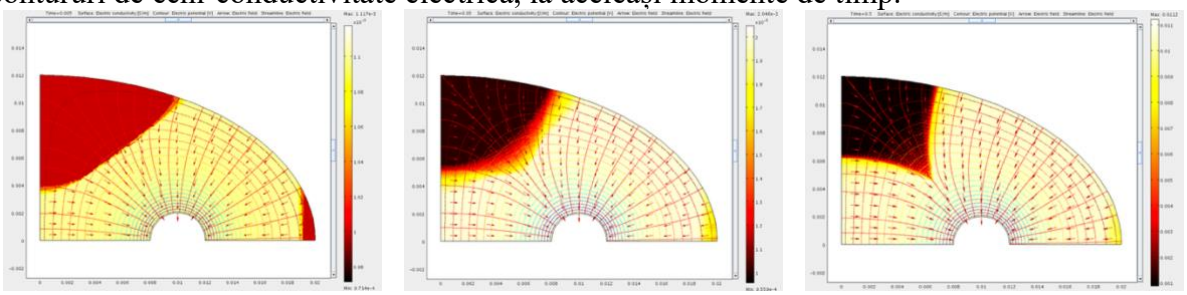
Modificarea secțiunii către eliptic distribuie mai favorabil câmpul și reduce zonele „sub prag", crescând volumul util permeabilizat fără efecte termice nedorite [15].



t = 0,005 s. t = 0,05 s. t = 0,5 s.

Fig. 5.16 - Rezultate de simulare numerică, câmpul electric reprezentat prin linii de câmp şi vectori (normalizaţi) (intensitatea câmpului electric) şi curbe echipotenţiale. Celula eliptică.

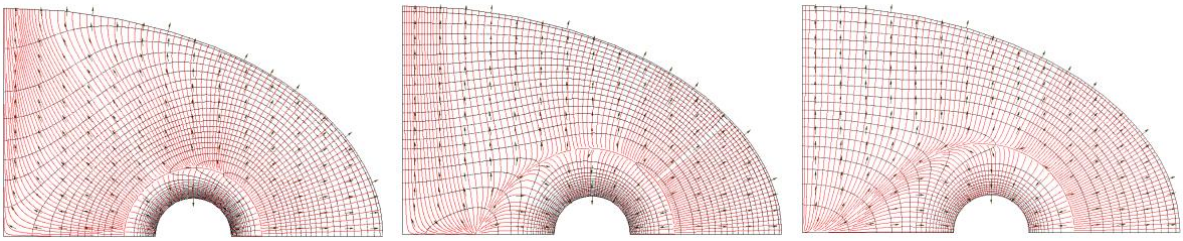
Valoarea de prag a intensității câmpului electric de la care are loc EP este de 200 V/m. Figura 5.17 redă dinamica conductivității electrice, prin reprezentarea în hartă de culoare și contururi de echi-conductivitate electrică, la aceleași momente de timp.



t = 0,005 s. t = 0,05 s. t = 0,5 s.

Fig. 5.17 - Rezultate de simulare numerică, distribuţia conductivităţii electrice (harta de culoare). Pragul EP este stabilit la 200 V/m.

Starea termică a celulei este redată în Fig. 5.18. După 0,5 s celula este, practic, izotermă, în intervalul 20 °C - 20.8 °C

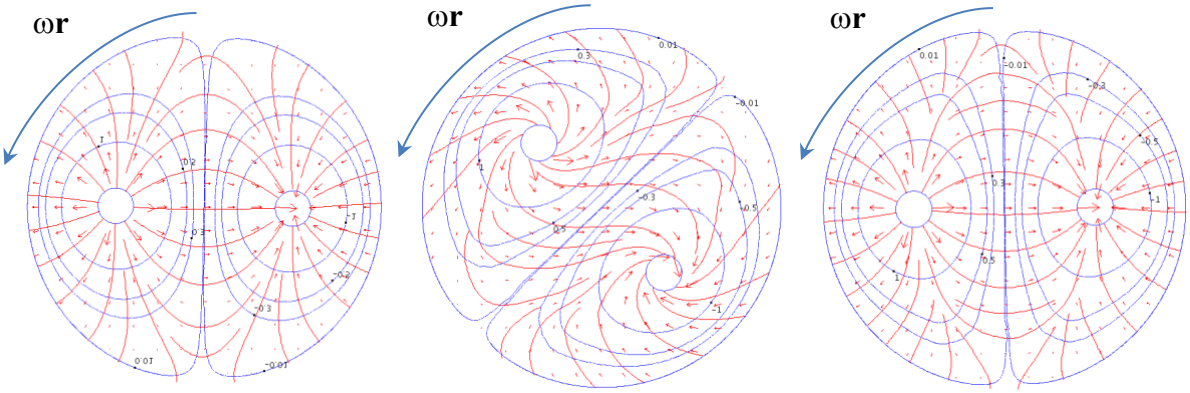


t = 0,005 s. t = 0,05 s. t = 0,5 s.

Fig. 5.18 - Rezultate de simulare numerică, starea termică a celulei: curbe izoterme, linii de câmp şi vectori (normalizaţi) pentru densitatea de fluxul de căldură (putere termică).

5.6.6 Celulă de electropermeabilizare, rotativă

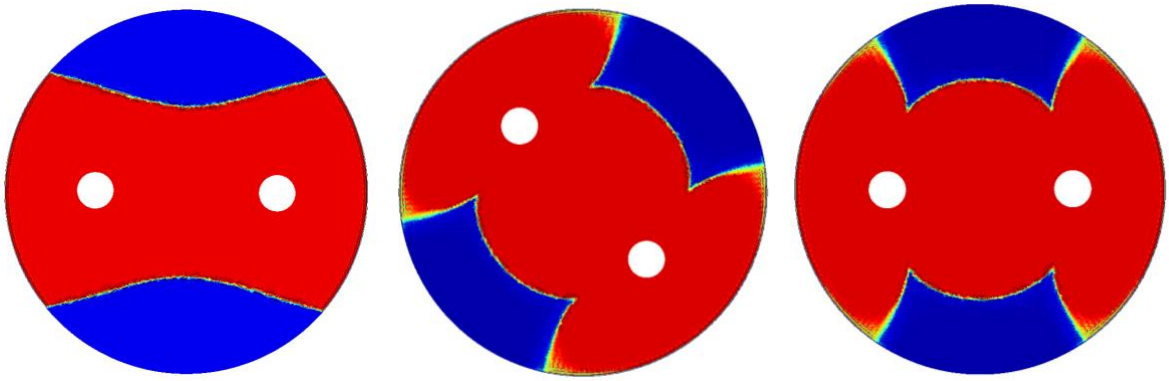
În modelul conceptual prezentat în continuare frecvența de rotire este de 1,3 Hz, în sens antiorar. Rotirea electrozilor uniformizează în timp expunerea la câmp, micșorând semnificativ regiunile nepermeabilizate și accelerând atingerea stării țintă, cu efect termic controlat [15].



t = 0 s. t = 9,9 s. t = 10 s.

Fig. 5.19 - Rezultate de simulare numerică, câmpul electric reprezentat prin linii de câmp și vectori (normalizați) (intensitatea câmpului electric) şi curbe echipotențiale. Celula circulară rotativă.

Figura 5.19 prezintă câmpul electric pentru celula rotativă, la diferite momente de timp. De la momentul inițial, când liniile de câmp sunt simetrice în raport cu cele două planuri de simetrie geometrică, până la t = 10 s când redobândește același aspect, structura sa se modifică, păstrând doar centro-simetrie.



t = 0,005 s; σ_{max} = 0,001 S/m. t = 1 s; σ_{max} = 0,119 S/m. t = 10 s; σ_{max} = 0,129 S/m.

Fig. 5.20 - Rezultate de simulare numerică, gradientul conductivității electrice, unde zona roșie – permeabilizată, iar cea albastră - nepermeabilizată. Celula circulară rotativă.

Figura 5.20 prezintă conductivitatea electrică, pentru celula rotativă, la diferite momente de timp. Se poate observa cum, progresiv, zona încă nepermeabilizată se reduce semnificativ, pe măsură ce pragul EP este atins.

5.6.7 Concluzii

Extracția asistată de câmp electric pulsatoriu (CEP) se bazează pe electroporare, fenomen prin care depășirea unui prag critic al tensiunii transmembranare induce formarea porilor și scadearea barierei de difuzie. Consecința este accelerarea transferului de masă la temperaturi scăzute, cu protejarea compușilor volatili și termosensibili. În funcție de amplitudinea câmpului, electroporarea poate fi reversibilă sau ireversibilă, oferind o fereastră operațională continuă de la intensificarea permeabilității până la disrupție celulară completă.

Eficiența permeabilizării este determinată de parametrii impulsului electric și de proprietățile electrice și geometrice ale matricei. Rezultatele sintetizate arată că pulsurile dreptunghiulare bipolare ating aceeași permeabilizare la amplitudini mai mici ale câmpului, confirmând rolul timpului efectiv peste prag și al inversării câmpului în reducerea efectelor nedorite. Încălzirea prin efect Joule poate fi controlată prin regimuri PWM cu ciclu de lucru scăzut și răcire activă, însă în regim „burst” dependența frecvență - temperatură este neliniară, necesitând optimizare fină pentru prevenirea acumulării termice.

Simulările cuplate câmp electric, conductivitate variabilă, transfer termic evidențiază persistența unor zone sub prag, a căror reducere prin creșterea tensiunii este limitată de pragurile de degradare ale matricei. În acest context, geometria celulei și arhitectura electrozilor devin determinante. Secțiunea eliptică și rotația electrozilor îmbunătățesc uniformitatea câmpului util, diminuând regiunile nepermeabilizate fără impact termic semnificativ.

Ipotezele simplificatoare ale modelului, mediu liniar, omogen pe porțiuni, proprietăți constante în fiecare fază și neglijarea convecției termice induse, nu alterează concluzia generală. Proiectarea CEP trebuie realizată pe trei axe, validate experimental pe matricea reală. Acestea includ optimizarea formei de undă, a geometriei sistemului și a managementului termic.

În concluzie, CEP este o tehnologie de intensificare robustă și selectivă pentru extracție: prin controlul formei și parametrilor impulsului, combinat cu optimizarea geometrică și managementul termic, se obțin permeabilizări uniforme la câmpuri mai puțin intense.

Capitolul 6
Extracția în câmp de ultrasunete

În acest capitol se prezintă extracția asistată de ultrasunete și sursele US utilizate. Sunt descrise principiile de funcționare ale convertoarelor piezoelectrice și magnetostrictive, cu accent pe efectul piezoelectric și eficiența conversiei energetice.

Capitolul detaliază rolul sonotronului în transferul și focalizarea energiei în mediul lichid, precum și parametrii care controlează permeabilizarea și transferul de masă.

În final, este prezentată modelarea și analiza numerică a ansamblului.

6.1 Surse US utilizate în procesul de extracție

Sunetul este o undă mecanică ce se propagă în medii solide, lichide sau gazoase. Urechea umană percepe frecvențe în intervalul 16 Hz - 16 kHz și intensități între 10^{-12} W/m^2 și 10^{+2} W/m^2 [32], undele a căror frecvență depășește limita superioară a sunetelor se numesc *ultrasunete* (US), iar peste 10^{10} Hz, hipersunete (HS).

US prezintă următoarele caracteristici: Energiile transmise sunt mai mari decât în cazul sunetelor; Absorbția și difuzia US este mai pronunțată în comparație cu sunetele în același mediu de referință; Transmisia US este direct proporțională cu densitatea mediului de propagare; Accelerație mare de propagare.

Propagarea US într-un mediu lichid este însoțită de apariția fenomenului de cavitație (formarea rapidă și colapsul violent al bulelor umplute cu vapori, în lichid). În funcție de frecvența US, comportamentul bulelor de vapori este diferit. Viteza de propagare a undei sonore depinde de proprietățile mediului (densitate, compresibilitate) [33].

$$C = \sqrt{\frac{1}{\rho\beta}}, \tag{55}$$

unde β [m^3/Pa] este compresibilitatea la temperatură constantă.

Undele pot fi longitudinale (deplasare în direcția propagării) sau transversale (în solide, deplasare perpendiculară).

Ultrasunetele sunt utilizate în numeroase domenii (medicină, chimie, știința materialelor, inginerie). În practică, frecvențele joase (zeci de kHz) sunt comune pentru curățire, sudare, prelucrări, iar frecvențele medii (sute de kHz – MHz) pentru emulsii și defectoscopie [16].

6.1.1 Efectul piezoelectric

Acest subcapitol prezintă dispozitivul cu ultrasunete, structura cristalului de siliciu în echilibru și cu dipol, parametrii electrici, mecanici și termici, precum și ecuațiile ce descriu efectele piezoelectrice.

Figura 6.1 prezintă componența unui aparat cu ultrasunete care poate fi utilizat în permeabilizarea US a membranelor celulare pentru medii organice [34].

Dispozitivul transmite semnale electrice traductorului piezoelectric care produce US și prin intermediul sonotronului se propagă în mediul fluid în care este imersat. Frecvența, amplitudinea și durata semnalelor electrice sunt parametri de proces, controlabili. Funcționarea traductorului piezoelectric se bazează pe efectul piezoelectric, o proprietate a materialelor dielectrice de a se deforma atunci când asupra lor se exercită un câmp electric. Efectul este reversibil, materialele piezoelectrice produc câmp electric sub acțiunea unor forțe mecanice [174].

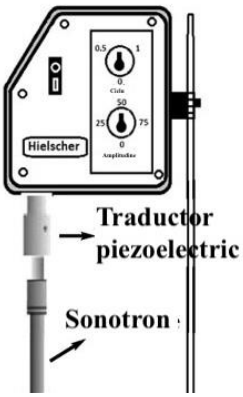


Fig. 6.1 - Schema dispozitivului cu ultrasunete UP200S (200 W, 24 kHz) [34].

Piezoelectricitatea este generată de anumite materiale dielectrice (cuarț, piezoceramice PZT).

Într-o interpretare calitativă a stării de polarizare electrică, în starea de repaos (neexcitat electric sau mecanic), atomii cristalului piezoelectric formează două triunghiuri echilaterale, cu centre comune ($Q^- = Q^+$). Atunci când cristalul este acționat mecanic (întindere sau compresiune), centrele celor doua triunghiuri se distanțează unul față de celălalt ($Q^- \neq Q^+$). Acest fenomen este echivalent producerii unui dipol electric, deci a unui gradient (variație spațială) de potențial electric [16].

Parametrii electrici: constanta relativă dielectrică [-], coeficientul de solicitare piezoelectric [m/V], coeficientul de tensiune piezoelectric [V·m/N], coeficientul de cuplare [-], câmpul electric de polarizare [V/m], câmpul electric coercitiv [V/m].

Parametrii mecanici: densitatea de masă [kg/m^3], modulul de elasticitate [N/m^2], forța de comprimare [N/m^2], forța de întindere [N/m^2].

Parametrii termici: coeficientul de dilatare termică [1/K], căldura specifică [J/kg·K].

$$\mathbf{P} = d\boldsymbol{\sigma}, \tag{56}$$

$$\mathbf{x} = g\mathbf{P}. \tag{57}$$

Ecuația (56) leagă polarizaţia electrică, **P** [C/m^2], efortul mecanic normal, **σ** [N/m^2], introducând factorul de proporționalitate, *d* [C/N], și caracterizează efectul piezoelectric direct.

Ecuația (57) leagă deformarea elastică, **x** [-], de polarizare utilizând coeficientul piezoelectric, *g* [m^3/C], și reprezintă efectul piezoelectric invers.

Polarizaţia electrică temporară este dată de legea constitutivă **D**,**E**,**P**, în forma

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)\mathbf{E}, \tag{58}$$

unde **D** [C/m^2] este inducţia electrică, **E** [V/m] este intensitatea câmpului electric, ε_r [-] este permitivitatea electrică relativă, ε_0 [F/m] este permitivitatea electrică a vidului (aerului)

Ecuația (58) devine:

$$\mathbf{x} = g\mathbf{P} = g\varepsilon_0(\varepsilon - 1)\mathbf{E} = d\mathbf{E}. \tag{59}$$

6.1.2 Convertorul piezoelectric

Un element piezoelectric alimentat la tensiune electrică alternativă asigură, în principal, conversia energiei din formă electrică în formă mecanică (vibrații mecanice). Randamentul conversiei depinde de pierderile interne / externe și de acordul cu rezonanța mecanică a ansamblului. În apropierea frecvenței de rezonanță, deplasările materiale cresc semnificativ, iar mult peste frecvența de rezonanță, scad rapid. Materialele uzuale (PZT, AlN, PVDF) oferă compromisuri între robustețe, cost și procesabilitate. Piezoceramicele au, în general, eficiență globală superioară și stabilitate termică mai bună decât soluţiile alternative magnetostrictive pentru aceeași putere acustică [17].

Procesul de formare a cavitației acustice în mediul de lucru fluid începe cu generatorul electric, care trebuie sincronizat cu frecvența de rezonanţă (mecanică) a domeniului de lucru dorit, iar frecvența generatorului se sincronizează cu frecvența fundamentală a materialului piezoelectric [17]. Funcționarea sub frecvența de rezonanță, produce o deformare elementului piezoelectric aproape independentă de frecvență și proporțională cu forța aplicată. În apropierea frecvenței de rezonanță, valoarea deformării se dublează față de cea normală (Fig.

6.6). Un material piezoceramic nu trebuie lăsat să se deformeze mai mult de 500×10^{-6} m/m [17].

Coeficientul de cuplaj electromecanic al elementului piezoelectric este dată de [16]

$$k = (E_m/E_e)^{1/2}. \tag{61}$$

unde E_m este energia mecanică,

$$E_m = \frac{1}{2} Y S^2 V, \tag{62}$$

E_e este energia electrică

$$E_e = \frac{1}{2} C U^2, \tag{63}$$

iar S [-] este deformarea, V [m^3] este volumul elementului piezoelectric, Y [Pa] este modulul lui Young, C [F] este capacitatea electrică, iar U [V] tensiunea electrică la borne.

6.1.3 Convertorul magnetostrictiv

Convertoarele magnetostrictive folosesc un miez feromagnetic excitat de o bobină, unde câmpul magnetic variabil induce deplasări rectilinii periodice (magnetostricțiune) care generează unda acustică. Din cauza lanțului de conversie (electric – magnetic – mecanic - acustic) și a pierderilor Joule, eficiența globală este de regulă mai mică decât la convertoarele piezoelectrice, la puteri comparabile [18].

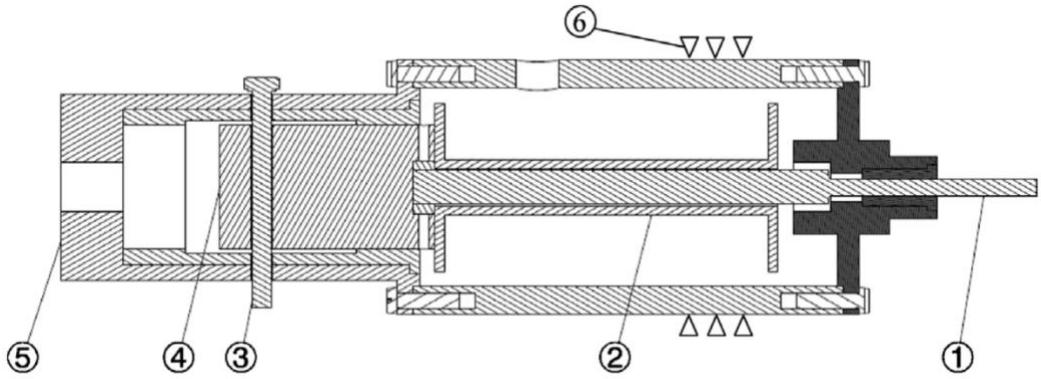


Fig. 6.9 - Convertor magnetostrictiv: 1 - tijă, 2 - bobină, 3 - șurub de prindere, 4 - suport, 5 - carcasă aluminiu, 6 - suport de prindere [18].

Calculul vibrației elementului translație este date de [18]

$$\frac{\partial M}{\partial z} dz = I \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}, \tag{64}$$

unde M [Nm] este cuplul, I [kg·m^2] este momentul de inerție, $\varphi(z, t)$ [rad] este deplasarea unghiulară, și t [s] este timpul.

6.2 Utilizarea undelor US în procesul de extracție

Sonotronul (elementul mecanic) transferă și focalizează vibrațiile mecanice prin interacțiunea US - lichid ce produce cavitație, încălzire și presiune, necesare permeabilizării și ruperii matricei vegetale. Materialele folosite pentru realizarea unui sonotron (oțel de scule, titan) și acoperirile antiuzură (nitrură de titan) sunt alese pentru a rezista solicitărilor mecanice și termice. Forma vârfului sonotronului (plat, cilindric, în trepte) și dimensiunile sale controlează cuplarea acustică și distribuția energiei.

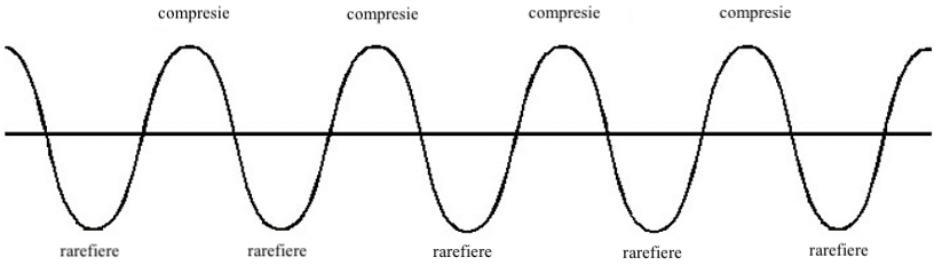


Fig. 6.12 - Procesul de formare al micro cavitațiilor într-un lichid [35].

Cavitația – de considerat într-o etapă ulterioară de cercetare – este generată de undele US ce comprimă (creşte densitatea) și rarefiază (scade densitatea) mediul în care se propagă, este prezentată, calitativ, în Fig. 6.12. Propagarea undei US are loc în mediul lichid, în cazul propus se folosesc proprietățile apei ca agent de lucru.

Membranele celulelor organice pot prezenta o cădere de tensiune transmembranară refractară între 50 mV și 200 mV, cu potențial electric negativ în interior. Plecând de la aceste date, se poate stabili ordinul de mărime al rezistenței electrice a membranei:

$$U_M = E_G + IR, \tag{66}$$

unde U_M [mV] este căderea de tensiune electrică transmembranară, E_G [mV] este căderea de tensiune electrică de echilibru Goldman, I [nA] este curentul electric transmembrană, iar R [kΩ] este rezistența electrică a membranei, $R = 2{,}1$ [$k\Omega$] pentru membrana celulară [36].

6.3 Procesul de extracție asistat de US

Acest subcapitol prezintă analiza numerică a sursei piezoelectrice de US, împreună cu modelul fizic și domeniul de calcul, atât pentru obținerea frecvențelor proprii cât și a celor de rezonanță. Cele patru probleme cuplate: (1) structurală / piezoelectrică (sonotron); (2) propagare US (mediul fluid din celulă); (3) curgerea forţată în fluidul de lucru (celulă), şi (4) transferul de căldură, sunt integrate numeric în trei etape: (a) problema structurală / piezoelectrică (sonotron); (b) propagarea US (celulă), respectiv (c) mișcarea și transferul de căldură (celulă).

Din punct de vedere electric, celulele au o diferență de potențial transmembranar refractară (zeci, sute de mV). Mecanic, permeabilizarea apare când forțele locale depășesc pragul de rezistență al membranei. În practică, controlul frecvenței, amplitudinii și timpului de sonicare este esențial pentru a livra forța acustică necesară fără degradări termice.

6.3.1 Sursa piezoelectrică de unde US

Sonotronul funcționează ca element convertor, de cuplare: un capăt este atașat de traductorul cu ultrasunete, iar celălalt este introdus în mediul de lucru [19].

După prezentarea lanțului de conversie electromecanic și a adaptării impedanței, trecerea firească este către analiza interacțiunii US – mediul de extracție: la ~26 kHz și amplitudini adecvate, câmpul acustic induce cavitație, a cărei intensitate depinde de proprietățile solventului (tensiune superficială, vâscozitate, presiune de vapori), temperatură și încărcarea solidă (granulometrie). Aceste variabile controlează densitatea și dinamica bulelor, iar colapsul lor generează microjeturi și unde de șoc ce rup matricea, subțiază stratul limită difuziv și accelerează transferul de masă. Distribuția efectelor este dictată de geometria vasului, acordul acustic al ansamblului și distanța vârf - perete, putând apărea unde staționare și zone „moarte”.

În analiza numerică efectuată, permeabilizarea US este divizată, urmărind decuplarea clar două fenomene fizice: microfenomenele (locale) neliniare, de la interfața US - mediu de extracție și distribuția câmpului ultrasonic în vas. Această abordare reduce efortul numeric și costul de calcul (rezoluţia reţelei de discretizare și pași de timp foarte diferiți), asigură convergenţa şi stabilitatea rezultatelor numerice, permite calibrarea şi validarea pe seturi de date specifice fiecărui tip de fenomen fizic.

6.3.2 Analiza sonotronului

Acest subcapitol prezintă modelarea numerică și răspunsul electromecanic al traductorului (câmp electric, deformații), identificând frecvențele proprii și rezonanța relevante pentru extracție. S-a utilizat un model axial-simetric, conectarea straturilor PZT în paralel și un circuit echivalent rezistență - capacitate.

Considerarea masei sonotronului conduce la scăderea frecvențele naturale și a deplasărilor maxime. Regimul tranzitoriu de stabilizare pentru alimentarea sinusoidală la rezonanță (ordinul zecilor de kHz) durează câteva sute de perioade. Amplitudinea tensiunii aplicate necesită ajustare pentru a rămâne în limitele deformației admise [20-22].

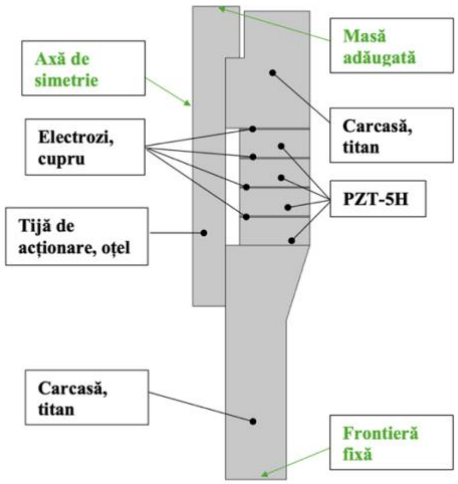


Fig. 6.16 - Domeniul de calcul simplificat, axial-simetric și componentele dispozitivului piezoelectric [37].

6.3.3 Integrarea sonotronului cu celula de extracție

În acest subcapitol se prezintă motorul liniar piezoelectric și vasul cu amestec (solvent + suspensie vegetală). Analiza este etapizată: (1) răspunsul structural / piezoelectric al sonotronului; (2) propagarea US în celulă (regim armonic staționar); (3) curgerea indusă acustic (Navier - Stokes, regim dinamic) și transferul de căldură. Presiunea de la sonotron devine condiție la limită pentru domeniul acustic, iar intensitatea acustică se transformă în sursă de impuls pentru fluid [23].

Calculul numeric se efectuează pe baza relațiilor piezoelectrice constitutive, în formularea solicitare mecanică – tensiune [37],

$$\begin{cases} \mathbf{T} = \mathbf{c}_{\mathrm{d}}\mathbf{S} - \mathbf{q}^{\mathrm{T}}\mathbf{D}, \\ \mathbf{E} = -\mathbf{q}\mathbf{S} + \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{S}}^{-1}\mathbf{D}', \end{cases} \tag{67}$$

unde $\mathbf{T}$ [N/m^2] este vectorul solicitării mecanice, $\mathbf{c}_{\mathrm{d}}$ [N/m^2] reprezintă matricea rigidității mecanice, $\mathbf{S}$ este vectorul deformării mecanice, $\mathbf{q}^{\mathbf{T}}$ [N/C] reprezintă matricei coeficienților piezoelectrici de cuplare, $\mathbf{D}$ [C/m^2] este inducția electrică, $\mathbf{E}$ [V/m] este intensitatea câmpului electric, iar $\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{s}}$ [F/m] este permitivitatea electrică la deformare constantă.

Modelul matematic este completat de legile câmpului electromagnetic [37],

Legea conservării sarcinii electrice $\nabla \cdot \mathbf{J} = \mathbf{0}$, (68)

Legea conducției electrice $\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E}$, (69)

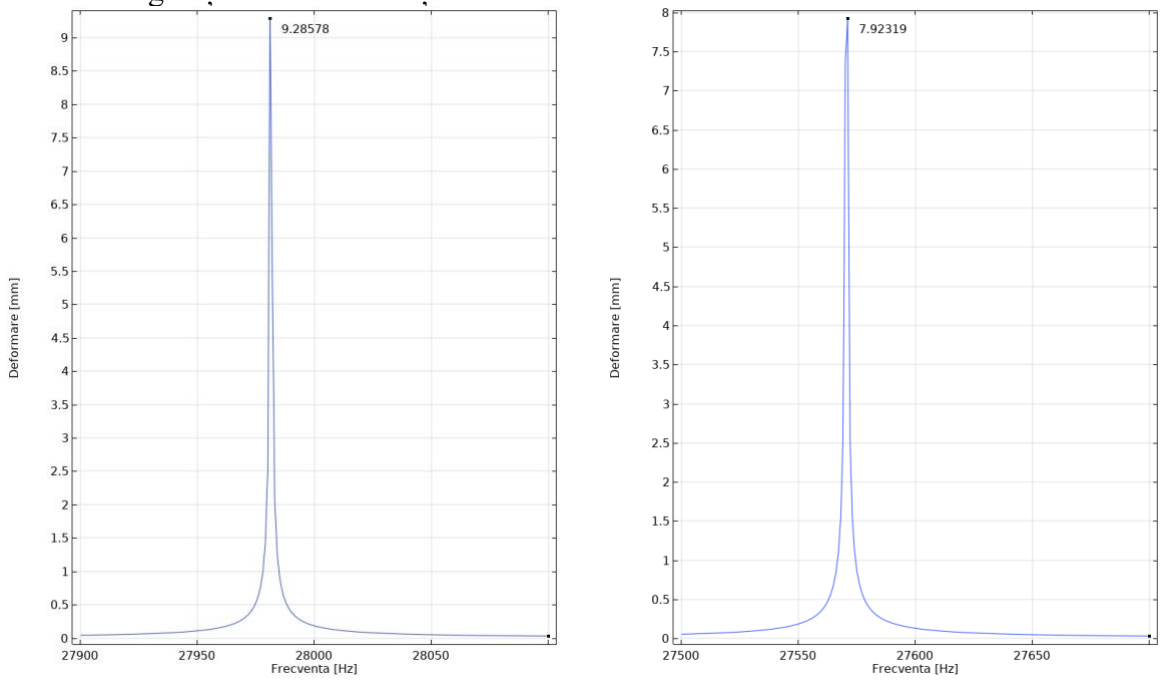
Legea fluxului electric $\boldsymbol{\nabla} \cdot \mathbf{D} = \rho_v$, (70)

Consecință a legii inducției electromagnetice $\mathbf{E} = -\nabla\mathbf{V}$, (71)

Legea de material $\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E} + \mathbf{P}$, (72)

unde **J** [A/m^2] este densitatea curentului electric, σ [S/m] este conductivitatea electrică, ρ_v [C/m^3] este densitatea de volum a sarcinii electrice, V [V] reprezintă potențialul electric, iar **P** [C/m^2] este polarizaţia electrică.

Figura 6.19 ilustrează variația deplasării tijei de acționare în funcție de frecvență, pentru ambele configurații analizate - cu și fără includerea masei sonotronului.



a. fără masa sonotronului, d_{max} = 9,29 mm. b. cu masa sonotronului, d_{max} = 7,92 mm.

Fig. 6.19 - Deplasarea axială maximă a tijei de acționare în funcție de frecvență [37].

6.3.3 Integrarea sonotronului cu celula de extracţie

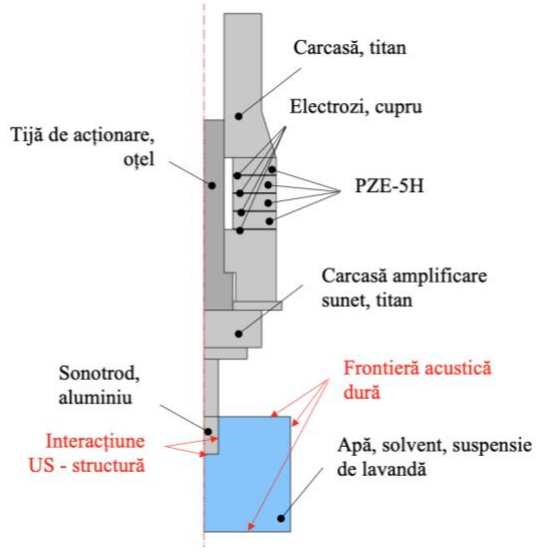


Fig. 6.21 - Motorul liniar PZE US și vasul de lucru [22].

Acest subcapitol prezintă domeniul de calcul bidimensional (2D) cu simetrie axială al ansamblului, alcătuit din motorul liniar și vasul de lucru ce conține amestecul de apă, solvent și suspensia de flori de lavandă. Sunt evidențiate toate componentele constructive ale ansamblului, precum și condițiile la limită (marcate prin săgeți roșii) corespunzătoare problemei care descrie interacțiunea dintre câmpul ultrasonic și fluidul de lucru.

Analiza numerică se face în regim armonic staționar pentru problema presiunii acustice și a cuplajului piezoelectric, iar în regim dinamic pentru curgerea din vasul de lucru. Se determină frecvențele naturale și, în special, frecvența de rezonanță a dispozitivului. La această frecvență se adoptă regimul armonic staționar și se evaluează funcționarea motorului din punct de vedere acustic, transmiterea undei US și mișcarea indusă a fluidului din vasul de lucru.

6.3.4 Modelarea proceselor care au loc în celula de extracție US

Acest subcapitol prezintă rezultatele obținute în urma cuplării celor trei fizici, propagarea US, mișcarea și transferul de căldură, în celulă.

Modelul matematic care descrie funcționarea motorului liniar piezoelectric cu ultrasunete în regim armonic permanent este exprimat [22]

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0}\nabla p\right) - \frac{\omega^2 p}{\rho_0 c_s^2} = 0, \tag{73}$$

unde p [Pa] este presiunea sunetului, c_s [m/s] este viteza sunetului în mediul fluid, ρ_0 [kg/m^3] este densitatea de masă, iar ω [rad/s] este pulsația undei de sunet. Condițiile la limită pentru această problemă cvasi-staţionară sunt prezentate în Fig. 6.21 (notat în roşu).

Problema de curgere a fluidului din vasul de lucru este descrisă prin ecuațiile Navier–Stokes (fluid Newtonian, curgere incompresibilă, regim dinamic), corespunzătoare conservării impulsului și conservării masei:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u}\cdot\nabla)\mathbf{u} = -\nabla p + \mu\Delta\mathbf{u} + \mathbf{f}, \tag{75}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \tag{76}$$

unde $\mathbf{u}$ [m/s] este viteza fluidului din vasul de lucru, μ [Pa·s] este vâscozitatea dinamică, p [Pa] este presiune, iar $\mathbf{f}$ [N/m^3] este densitatea de forţă imprimată de intensitatea undei US,

$$\mathbf{f} = \frac{2\alpha}{c_s}\mathbf{I}, \tag{77}$$

unde α [Np/m] este coeficientul de atenuare pentru mediul lichid și $\mathbf{I}$ [W/m^2] este intensitatea (puterea) undei US.

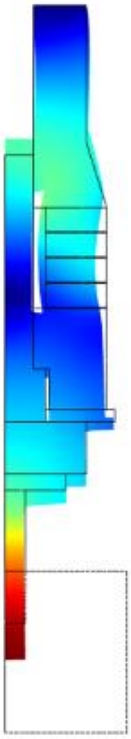


Fig. 6.22 - Deformarea motorului PZE de US, f_{r3} = 28,520 kHz [22].

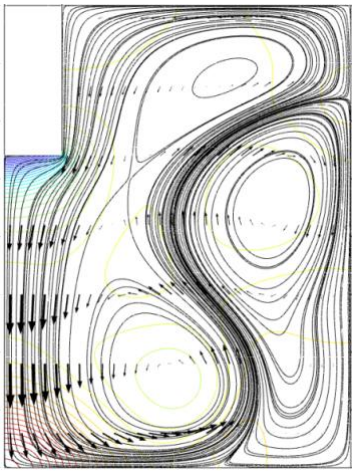


Fig. 6.23 - Spectrul de curgere, izobare și linii de curgere, t = 900 s [22].

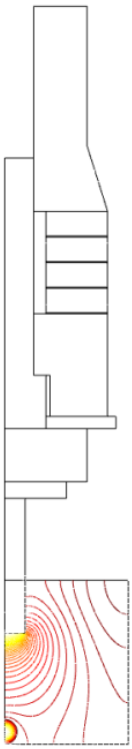


Fig. 6.24 - Distribuția temperaturii la t = 900 s [22].

Figura 6.22 ilustrează câmpul de deformare al motorului piezoelectric liniar US pentru frecvența de rezonanță fr3 = 28,520 kHz. Dintre valorile obținute, este selectată frecvența de rezonanță cea mai ridicată, întrucât aceasta permite obținerea unui proces de extracție mai eficient și de calitate superioară, prin conservarea unui număr mai mare de componente volatile, chiar dacă implică o durată mai mare a extracției [22].

Figura 6.23 prezintă liniile de curgere din interiorul vasului de lucru, corespunzătoare unui moment de timp. Se constată că intervalul de timp final considerat pentru procesul de extracție nu este suficient pentru a permite stabilizarea curgerii și atingerea unui regim staționar în cazul problemei Navier–Stokes asociate fluidului din vasul de lucru.

Odată cu evoluția în timp structura curgerii devine mai bine definite, iar distribuția izobarelor evidențiază procesul de stabilizare progresivă a fluidului.

Analiza termică a procesului de extracție US necesită rezolvarea ecuației energiei,

$$\rho_0 C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathrm{T}\right) = k\nabla^2\mathrm{T} + \dot{Q}, \tag{78}$$

unde C_p [J/kg·K] este căldura specifică, k [W/m^2·K] este conductivitatea termică, iar $\dot{Q}$ [W/m^3] este sursa de căldură US.

Condițiile la limită sunt izolat pentru toate laturile domeniului de calcul. Starea inițială este izotermă (20 °C).

Figura 6.24 evidențiază evoluția distribuției izotermelor în celulă la momentul de timp t = 900 s, unde, distribuția temperaturii indică gradienți mai importanți, dar sistemul este în ansamblu izoterm (la 40°C).

6.4 Concluzii

Eficiența extracției asistate de ultrasunete este modulată de fenomenele asociate propagării undei de sunet în medii lichide: cavitația și de rezonanța acustică. Dinamica bulelor de gaz (vapori) – instabile sub frecvența de rezonanță și oscilatorii peste aceasta – generează microjeturi și unde de șoc capabile să rupă matricea, să reducă stratul limită difuziv și să accelereze transferul de masă. Geometria vasului, sincronizarea acustică a ansamblului și distanța vârfului sonotronului (dispozitivul care asigura generarea US) față de pereți dictează distribuția câmpului ultrasonic; pot apărea unde staționare și zone „moarte” care reduc randamentul local și impun optimizări de arhitectură.

Pentru aplicațiile de extracție, convertorul piezoelectric este preferabil celui magnetostrictiv, prin eficiență globală superioară, pierderi Joule mai mici și capacitate de acord fin al frecvenței și amplitudinii. Exploatarea sigură cere respectarea limitelor de deformație ale materialelor piezoceramice (ordinul 5×10^{-4} m/m) și funcționarea în proximitatea, dar nu peste, frecvenței de rezonanță mecanică, pentru a maximiza transferul energetic fără compromiterea integrității traductorului.

Motorul liniar piezoelectric cu ultrasunete este alcătuit dintr-o carcasă pentru amplificarea undei ultrasonice și un sonotron utilizat la focalizarea acesteia. Dispozitivul este în contact cu celula de lucru ce conține un amestec de apă, solvent și o suspensie de flori de lavandă. Agregatul este considerat mediu liniar, omogen, izotrop, sub aspectele de propagare a US, mișcare indusă de US și transferul căldurii produsă de US.

Sonotronul – realizat uzual din oțel sau titan – asigură adaptarea impedanței și amplificarea mecanică între traductor și mediu. Forma și amplitudinea acționării trebuie proiectate astfel încât să maximizeze densitatea de putere mecanică în zona activă și să limiteze formarea de regiuni cu energie scăzută, cu validare experimentală prin cartografiere acustică.

Sunt investigate interacțiunea dintre câmpul acustic și câmpul piezoelectric, rezolvată în regim armonic staționar, respectiv curgerea fluidului, descrisă prin ecuațiile Navier-Stokes și analizată în regim dinamic. Mișcarea fluidului din vas este indusă de intensitatea undei ultrasonice.

Cele patru probleme cuplate: (1) structurală / piezoelectrică (sonotron); (2) propagare US (mediul fluid din celulă); (3) curgerea forţată în fluidul de lucru (celulă), şi (4) transferul de căldură, sunt integrate numeric în trei etape: (a) problema structurală / piezoelectrică (sonotron); (b) propagarea US (celulă), respectiv (c) mișcarea și transferul de căldură (celulă). Etapa (a) produce condiția la limită (presiune) utilizată în etapa (b) pentru analiza propagării US. La rândul său, etapa (b) produce sursa de mișcare utilizată în etapa (c) pentru studiul curgerii fluidului de lucru și analiza transferului de căldură difuziv-convectiv din celulă.

Rezultatele evidențiază o scădere a frecvenței de rezonanță și a deformării maxime a tijei de acționare atunci când se consideră masa sonotronului atașată la capătul superior al convertorului piezoelectric. Deformările obținute sunt de ordinul milimetrilor, iar în regim cvasi-staționar se remarcă necesitatea ajustării amplitudinii tensiunii de excitație aplicate straturilor piezoelectrice. În toate cazurile studiate, s-a utilizat o amplitudine constantă de 400 V.

În studiul sonotronului este utilizat un model bidimensional, axial-simetric. Analiza modală a urmărit determinarea frecvențelor proprii (naturale) ale sistemului piezoelectric, si a fost urmată de un studiu în domeniul frecvență (regim armonic permanent), în vederea identificării frecvenței de rezonanță, la care este recomandată cuplarea cu vasul de lucru.

Referitor la analiza dinamicii fluidului de lucru din celulă, modelul formulat prezintă o serie de limitări, de exemplu mediul organic păstrează aceleași proprietăți, corespunzătoare fazei permeabilizate, pe toată durata analizată. Relaxarea lor constituie o etapă de dezvoltare următoare.

În sinteză, utilizarea unui traductor piezoelectric (de tip PZT-5H) acordat în jurul a ~28,5 kHz, cu feedback de frecvență și control fin al amplitudinii, combinat cu un sonotron optimizat pentru potrivire de impedanță și focalizarea energiei, permite obținerea unui proces de extracție selectiv, rapid și reproductibil, cu păstrarea calității fracțiilor volatile. Completarea cu timp de proces adecvat (eventual agitație auxiliară), monitorizare termică și respectarea limitelor mecanice / electrice ale ansamblului oferă cadrul tehnico-științific necesar pentru scalarea industrială.

Capitolul 7
Concluzii

În acest capitol se prezintă rezultatele obținute, contribuțiile originale, direcțiile de dezvoltare, lista lucrărilor publicate în perioada studiilor doctorale și concluziile tezei.

Teza a urmărit trecerea de la motivația științifică și industrială a intensificării extracției compușilor bioactivi la fundamentarea teoretică, modelarea numerică multifizică și integrarea energetică a instalațiilor de extracție, cu demonstrarea alimentării fotovoltaice și a managementului termic.

Tehnologiile moderne (câmpuri electrice pulsatorii - CEP, microunde - EAM, ultrasunete - EAU) pot funcționa ca metode directe de extracție, cu scurtarea semnificativă a timpilor și îmbunătățirea calității produselor față de metodele convenționale.

Factorul decisiv nu este doar energia introdusă, ci distribuția spațio - temporală a acesteia și evacuarea energiei nedorite (control termic).

Integrarea PV/T poate susține autonom instalații de laborator și pilot, cu recuperare utilă de căldură și îmbunătățirea performanței electrice a panourilor.

S-a motivat trecerea la tehnologii electromagnetice și electromecanice prin prisma timpilor, energiei specifice și calității. Matricile studiate (Cafea și Lavandă) sunt relevante economic și sensibile la regimurile de proces.

7.1 Rezultate obținute

Metodele clasice de separare (sedimentare, centrifugare, distilare cu abur, separare lichid - lichid) ating rapid limite de productivitate. CEP, EAM, EAU, ca procese de extracție, oferă timpi reduși la randamente cel puțin similare. Pentru lavandă, EAM atinge randamente comparabile cu hidrodistilarea în minute (vs. zeci de minute), iar pentru cafea reduce durate din ore la minute. EAU + solvenți polari crește fluxul de masă cu controlul cavitației.

Pentru modelarea numerică a CEP au fost cuplate câmpul electric dependent de proprietățile mediului (σ, ε), evoluția conductivității (deschiderea și resigilarea porilor) și transferul de căldură Joule, inclusiv rețele FEM deformabile. S-au identificat zone sub prag ($E < E_{critic}$) ce persistă astfel încât s-au dezvoltat două soluții eficiente: utilizarea unei geometrii eliptice a celulei, care favorizează redistribuția câmpului electric, și rotația electrozilor, prin care volumul este expus progresiv la valori ale câmpului $E > E_{critic}$. Totodată, termostatatea adecvată păstrează regimul aproape izoterm.

Am evaluat integrarea energetică PV/T pentru trei configurații: (S_0) convecție naturală, (S_1) răcire activă cu o singură serpentină și (S_2) schimbător în contracurent. În regim de convecție naturală, panoul atinge temperaturi de aproximativ 99 °C, nefavorabile conversiei electrice. Soluția (S_1) reduce temperatura panoului spre 23 °C, cu un efort de pompare moderat, în timp ce (S_2) maximizează evacuarea termică și eficiența electrică, la prețul unui cost hidraulic crescut. Regimul de funcționare în pulsuri minimizează consumul auxiliar, menținând temperaturi intermediare ale panoului 56 °C - 57 °C. Aceste rezultate indică faptul că arhitectura PV/T poate susține alimentarea echipamentelor mobile sau autonome de tip CEP, EAU și EAM.

Simulările ultrasonice pentru cuplajul piezoelectric - câmp acustic - curgere - transfer termic confirmă că atașarea sonotronului determină scăderea frecvenței de rezonanță și a amplitudinii deformației, impunând un reglaj fin al tensiunii de excitație. Din punct de vedere termic, sistemul rămâne aproape izoterm sub condiții de termostatare, însă necesită un management atent al izolării termice.

Tranziția către soluții industriale reproductibile este condiționată de o proiectare multifizică coerentă, de controlul distribuției energiei în probă și de integrarea energetică a subsistemelor. În acest context, liniile modulare CEP și EAU alimentate prin sisteme PV/T se dovedesc fezabile din punct de vedere tehnic.

7.2 Contribuții originale

Arhitectură energetică PV „off-grid" [10,11], cu criterii de dimensionare ce corelează consumul (CEP / EAU) [20-23], iradianța locală, stocarea și randamentele P_{MPP} / invertor într-un flux decizional.

Model analitic pentru încărcarea termică a panoului PV: legături Nu - Ra cu geometria solară, diagrame $Nu_L(Ra_L^*, \varphi)$ și curbe $h(\varphi)$ pentru inițializare CFD și optimizări pasive (înclinare) [10-11].

Model numeric 3D (FEM) termo - hidrodinamic al PV/T cu schimbător posterior ce include scenariile S_0, S_1, S_2 și hărțile $\dot{Q}$, T_{PV}, $\dot{W}$, ReD precum și pragurile de tranziție și compromisurile $\dot{Q}/\dot{W}$ [10,11].

Strategie de răcire „în pulsuri" (T_{start}, T_{stop}) ce reduce drastic timpul de funcționare al pompei, menținând panoul PV în intervalul termic [11].

Ghid tehnico - economic S_1 vs. S_2 (eficiență PV maximă vs. Cost / hidraulică) + indicatori unificați $\eta(T_{PV})$, $\dot{Q}/\dot{W}$ pentru scalare / optimizare [10,11].

Cuplare electromagnetism - termică prin proprietăți dependente de câmp, tratarea pragului E_{critic} în dinamica $\sigma(x,t)$ și includerea mișcării rotaționale împreună cu analiza regimului termic în celulă [15].

7.3 Direcții de dezvoltare

Control avansat: coordonare P_{MPP} cu răcirea (continuă / puls) prin strategii predictive (limite termice, minimizarea energiei auxiliare, prognoza de iradianță).

Cuplaj la sarcini utile (preîncălzire solvent, sanitizare, uscare) sau micro-Stirling.

Suprafețe funcționale: straturi selective IR, emisivitate controlată, interfețe termice optimizate, evaluare impact asupra η și durabilității.

„Digital twin" integrat termo - electro - hidraulici + extracție; optimizare multi-obiectiv (CAPEX / OPEX, $\dot{Q}/\dot{W}$, P_{MPP}, LCA / CO_2-eq) și hărți de proiectare adaptate latitudinii / scenariilor.

Pentru CEP, forme de undă bipolare/trapezoidale, „bursts", electrozi anti-depuneri, monitorizare impedanță / temperatură cu reglaj adaptiv.

Pentru EAU, rețele multi-frecvență (20 - 40 - 80 kHz), management al cavitației, potrivire acustică dinamică, corelarea puterii acustice cu randamentul pe matrice diverse.

Secvențele hibride (CEP - EAU, EAM - EAU) pentru a combina permeabilizarea rapidă cu desprinderea mecanică.

Standardizare și conformitate: EMC / EMI, electro-siguranță, GMP / HACCP.

Integrare energetică la scară: microrețele DC, stocare electrică / termică, managementul vârfurilor.

LCA / TCO complete, amprenta de apă / solvent, valorificarea biomasei reziduale, scenarii de economie circulară.

7.4 Lista lucrărilor publicate

1. F. SĂFTOIU, A. M. MOREGA, Cooling System for Photovoltaic Panels, Revue Roumaine des Sciences Techniques – Série Électrotechnique et Énergétique, vol. 67, nr. 3, pp. 343–348, 2022. ISSN: 0035-4066; Editor: Romanian Academy. WOS: 000870731700020.
2. F. SĂFTOIU, A. M. MOREGA, Pulsed Cooling System for Photovoltaic Panels, The 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE 2023), Bucharest, Romania, 23–25 Mar. 2023, pp. 1–5.
3. Y. VELI, F. SĂFTOIU, A. M. MOREGA, ANALIZA NUMERICĂ A UNUI TRADUCTOR PIEZOELECTRIC DE ULTRASUNET, Actualități și Perspective în Domeniul Mașinilor Electrice (APME/SME), Vol. 19, nr. 1, pp. 52–57, 2023. ISSN: 1843-5912; DOI: 10.36801/apme.2023.1.7.
4. Y. VELI, F. SĂFTOIU, A. M. MOREGA, PREDIMENSIONAREA UNUI TRADUCTOR PIEZOELECTRIC DE ULTRASUNET, Actualități și Perspective în Domeniul Mașinilor Electrice (APME/SME), București, 2023. (SME 663).
5. Y. VELI, F. SĂFTOIU, A. M. MOREGA, Interaction of Ultrasonic and Heat Flow in Essential Oil Extraction – A Constructal Glimpse, 14th Constructal Law Conference – Design in Nature and Evolution, Bucharest, 10 - 11 Oct. 2024, pp. 175–178. DOI: 10.59277/CLC.2024.44, ISSN: 3061-6239, ISBN: 978-973-27-3918-1.
6. F. SĂFTOIU, Y. VELI, A. M. MOREGA, ELECTROPERMEABILIZATION FOR ORGANIC MATERIAL – NUMERICAL MODELING, Revue Roumaine des Sciences Techniques - Série Électrotechnique et Énergétique, nr. 4, Editor: Romanian Academy, vol. 70, pp. 603–608, Nov. 2025, doi: 10.59277/RRST-EE.2025.4.28. WOS: 001627001400026.
7. Y. VELI, F. SĂFTOIU, A. M. MOREGA, Structural optimization of a piezoelectric ultrasonic Transducer for permeabilization of organic materials, The 14th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE 2025), Bucharest, Romania.

7.5 Concluzie finală

Lucrarea demonstrează că triada proiectare multifizică - control fin al distribuției energiei - integrare energetică permite transformarea tehnologiilor CEP, EAM și EAU din soluții de laborator în procese robuste, scalabile și sustenabile. Se conturează astfel linii modulare de extracție pentru aplicații precum lavanda și cafeaua, alimentate fotovoltaic, în care stațiile CEP, EAM și EAU operează la eficiență maximă și sunt susținute de un management termic activ. Următorul pas constă în validarea la scară pilot, în regim continuu, cu monitorizarea simultană a bilanțului energetic, a compoziției extractelor și a stabilității operaționale, ca premisă necesară pentru transferul industrial.

Bibliografie selectivă

[1] K. Rusanov, P. Vassileva, M. Rusanova, I. Atanassov, "Identification of QTL controlling the ratio of linalool to linalyl acetate in the flowers of Lavandula angustifolia Mill var. Hemus", Biotechnology & Biotechnological Equipment, vol. 37, no. 1, 2023.

[2] M. A. Vian, X. Fernandez, F. Visinoni, F. Chemat, "Microwave hydrodiffusion and gravity, a new technique for extraction of essential oils", J. Chromatogr. A, vol. 1190, no. 1–2, pp. 14–17, 2008

[3] C. M. Tucker, "Coffee Culture: Local Experiences", Global Connections, Routledge, 2017.

[4] UN. Secretary – General, World Commission on Environment and Development, "Report of the World Commission on Environment and Development: Note / by the Secretary-General", New York, 1987.

[5] W. G. García-Villalba, R. Rodríguez-Herrera, L. A. Ochoa-Martínez, O. M. Rutiaga-Quinones, M. G. Lopez, J. A. Gallegos-Infante, G. Bermúdez-Quinonesa, S. M. Gonzalez-Herrera, "Comparative study of four extraction methods of fructans (agavins) from Agave durangensis: Heat treatment, ultrasound, microwave and simultaneous ultrasound-microwave", 2023.

[6] J. H. Lienhard, V. Lienhard IV, "A Heat Transfer Textbook", 5th ed. Cambridge MA: Phlogiston Press, 2020.

[7] J. Nou, R. Chauvin, S. Thil, S. Grieu, "A new approach to the real-time assessment of the clear-sky direct normal irradiance", Appl. Math. Model., vol. 40, 2016, doi: 10.1016/j.apm.2016.03.022.

[8] S. A. Saada, I. Kecili, R. Nebbali, "Preliminary study of a water cooled PV system", in Proc. 2018 Int. Conf. Commun. Electr. Eng. (ICCEE), 2018, pp. 1–4.

[9] H.T. Lin, W.S. Yu, S.L Yang, "Free convection on an arbitrarily inclined plate with uniform surface heat flux", Wärme und Stofffübertragung, 24, pp.183-190, 1989.

[10] F. Săftoiu, A. M. Morega, "Cooling System for Photovoltaic Panels", Revue Roumaine des Sciences Techniques – Série Électrotechnique et Énergétique, vol. 67, nr. 3, pp. 343–348, 2022. ISSN: 0035-4066; Editor: Romanian Academy.

[11] F. Săftoiu, A. M. Morega, "Pulsed Cooling System for Photovoltaic Panels", The 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE 2023), Bucharest, Romania, 23–25 Mar. 2023, pp. 1–5.

[12] T. Kotnik, W. Frey, M. Sack, S. Haberl Meglič, M. Peterka, D. Miklavčič, "Electroporation-based applications in biotechnology", Trends Biotechnol., vol. 33, no. 8, pp. 480–488, Aug. 2015.

[13] F. Guo, X. Nie, J. Hong, Y. Zhang, J. Sun, "Influence of Joule heating during single-cell electroporation simulation under IRE and H-FIRE pulses", Materials Today Communications, vol. 33, p. 104358, 2023.

[14] A. Çınar , K. Ateş , L.N.Ö. Polat , S. Elmasulu , I.K. Oğuz , O. Çınar, Ş. Özen, "Adulteration control of lavender essential oil by using its electrical properties in the low-frequency range", Measurement science review, 25, 3, pp. 141-147 (2025).

[15] F. Săftoiu, Y. Veli, A. M. Morega, ”Electropermeabilization for organic material – numerical modeling”, Revue Roumaine des Sciences Techniques - Série Électrotechnique et Énergétique, nr. 4, Editor: Romanian Academy.

[16] M. Scheffel, P. Știuca, ”Dispozitive cu ultrasunete. Ultrasunete. Caracteristici generale”, vol. I. Bucharest, Romania: Editura Tehnică, 1989.

[17] R. Carter, R. Kensley, ”Introduction to Piezoelectric Transducers”, Midé Technology Corp., Woburn, MA, USA, 2020.

[18] M. R. Karafi, Y. Hojjat, F. Sassani, M. Ghodsi, “A novel magnetostrictive torsional resonant transducer”, Sensors and Actuators A: Physical, vol. 195, pp. 71–78, 2013.

[19] https://www.hielscher.com/200ht_p.htm

[20] Y. Veli, F. Săftoiu, A. M. Morega, ”Analiza numerică a unui traductor piezoelectric de ultrasunet”, Actualități și Perspective în Domeniul Mașinilor Electrice (APME/SME), Vol. 19, nr. 1, pp. 52–57, 2023. ISSN: 1843-5912; DOI: 10.36801/apme.2023.1.7.

[21] Y. Veli, F. Săftoiu, A. M. Morega, ”Predimensionarea unui traductor piezoelectric de ultrasunet”, Actualități și Perspective în Domeniul Mașinilor Electrice (APME/SME), București, 2023. (SME 663).

[22] Y. Veli, F. Săftoiu, A. M. Morega, ”Interaction of Ultrasonic and Heat Flow in Essential Oil Extraction – A Constructal Glimpse”, 14th Constructal Law Conference – Design in Nature and Evolution, Bucharest, 10 - 11 Oct. 2024, pp. 175–178. DOI: 10.59277/CLC.2024.44.

[23] Y. Veli, F. Săftoiu, A. M. Morega, ”Structural optimization of a piezoelectric ultrasonic Transducer”, The 14th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE 2025), Bucharest, Romania.

[24] A. LaPotin, K. L. Schulte, M. A. Steiner, K. Buznitsky, C. C. Kelsall, D. J. Friedman, E. J. Tervo, R. M. France, M. R. Young, A. Rohskopf, S. Verma, E. N. Wang, A. Henry, “Thermophotovoltaic efficiency of 40%”, Nature, vol. 604, no. 7905, pp. 287–291, Apr. 2022. doi: 10.1038/s41586-022-04473-y. [Online]. Available: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9007744

[25] K. Kurata, M. Matsushita, T. Yoshii, T. Fukunaga, și H. Takamatsu, “Effect of irreversible electroporation on three-dimensional cell culture model,” in *Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. (EMBC)*, San Diego, CA, USA, 2012, pp. 179–182, doi: 10.1109/EMBC.2012.6345900.

[26] S. Najafian, *The effect of time and temperature on the shelf life of essential oils of Lavandula officinalis*, J. of Essential Oil Research, 28, 5, pp. 413-420 (2016).

[27] Comsol Multiphysics v. 5.6a, Release Notes (2021).

[28] E. Vorobiev, N. Lebovka, Pulsed-Electric-Fields-Induced Effects in Plant Tissues: Fundamental Aspects and Perspectives of Applications. In Electrotechnologies for extraction from food plants and biomaterials, Springer, New York, pp. 39-81, NY(2008).

[29] W. Milestone, Q. Hu, A. M. Loveless, A. L. Garner, R. P. Joshi, „Modeling coupledsingle cell electroporation and thermal effects from nanosecond electric pulse trains”, J. of Applied Physics, 132 (2022), 094701.

[30] K. A. DeBruin and W. Krassowska, “Modeling electroporation in a single cell: Effects of field strength and rest potential,” Biophys. J., vol. 77, no. 3, pp. 1213–1224, Sep. 1999. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/S0006-3495(99)76973-0.

[31] T. Kotnik, G. Pucihar, M. Rebersek, D. Miklavčič, and L. M. Mir, “Role of pulse shape in cell membrane electropermeabilization,” Biochim. Biophys. Acta, vol. 1614, no. 2, pp. 193–200, Aug. 2003. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/s0005-2736(03)00173-1.

[32] D. Purves, G. J. Augustine, D. Fitzpatrick, *et al.*, Eds., “The audible spectrum,” in *Neuroscience*, 2nd ed. Sunderland, MA, USA: Sinauer Associates, 2001.

[33] D. A. Ghersgal, V. M. Fridman, „Aparate cu ultrasunete.”, Bucharest, Romania: Editura Tehnică, 1962.

[34] T. Polachini, G. Carvalho, and J. Telis-Romero, “Determination of acoustic fields in acidic suspensions of peanut shell during pretreatment with high-intensity ultrasound,” Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol. 34, pp. 385–394, 2017, doi: 10.1590/0104-6632.20170342s20150549.

[35] https://www.hielscher.com/ultrasonic-cavitation-in-liquids-2.html.

[36] M. Kates and L. A. Manson, Membrane Fluidity, Biomembranes, vol. 12. New York, NY: Plenum Press, 1984.

[37] **F. Săftoiu, A. M. Morega, Y. Veli, "Numerical analysis of a piezoelectric ultrasound transducer," Act. Perspect. Mach. Elect., vol. 19, no. 1, pp. 52–57, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.36801.**