

Gradu Amaierako Lana

Ingeniaritza Kimikoko Gradua

# Partikula finen jarraipena iturri bilgailudun iturri ohandze konikoetan

Egilea:  
Asier Ossa  
Zuzendaria:  
Martin Olazar

## AURKIBIDEA

LABURPENA .....	III
1. SARRERA .....	1
1.1. ITURRI OHANTZEAREN JATORRIA .....	1
1.2. ITURRI OHANTZEAREN EZAUGARRIAK .....	1
1.3. ITURRI OHANTZEAREN ABANTAILAK ETA DESABANTAILAK .....	3
1.4. ITURRI OHANTZEAREN ERABILERAK .....	4
1.5. ITURRI OHANTZE KONIKOA .....	4
1.6. ITURRI OHANTZEAREN BARNE GAILUAK .....	5
1.6.1. Barne hodia .....	5
1.6.2. Iturri bilgailua .....	7
1.7. ITURRI OHANTZE KONIKOEN HIDRODINAMIKA ETA EGONKORTASUNA ..	9
1.7.1. Karga galerak abiadurarekiko duen eboluzioa .....	10
1.8. GELDART SAILKAPENA .....	11
1.9. SISTEMA OPTIKOA .....	12
1.9.1. PIV metodoa .....	13
1.9.2. Korrelazio gurutzatuaren teknika .....	14
2. HELBURUAK .....	15
3. METODOLOGIA .....	16
3.1. EKIPO PILOTUAREN DESKRIBAPENA .....	16
3.2. SISTEMA OPTIKOA .....	18
3.2.1. Sistema optikoaren deskribapena .....	18
3.2.2. Tratamendurako erabilitako kodigoa .....	19
3.2.3. Neurketa planoaren kalibraketa .....	23

3.2.4. Errorearen kalibraketa .....	24
3.3. BALDINTZA ESPERIMENTALAK .....	25
3.4. MATERIALAREN KARAKTERIZAZIOA .....	27
4. EMAITZAK .....	29
4.1. ABIADURA FLUKTUAZIOAK.....	31
4.2. PROFIL ERRADIALAK .....	32
4.2.1. Hodirik gabe .....	33
4.2.2. Irekiduradun hodia .....	34
4.2.3. Hodi ez-porotsua .....	36
4.3. PROFIL AXIALA.....	37
4.4. ITURRIAREN FORMA .....	39
4.5. EMARIAREN ERAGINA .....	41
4.5.1. Hodirik gabe.....	41
4.5.2. Irekiduradun hodia .....	43
4.5.3. Hodi ez-porotsua .....	44
4.6. KONFIGURAZIOEN ALDERAKETA .....	46
5. ONDORIOAK.....	50
6. NOMENKLATURA .....	52
7. BIBLIOGRAFIA.....	53

## LABURPENA

Lan honen helburua, partikula finen jarraipenaren bidezko iturri bilgailudun iturri ohandze konikoen azterketa hidrodinamikoa burutzea da. Iturri bilgailuak, iturkuntzarako zailak diren materialen operazio egonkorra ahalbidetzen du, eta gainera, ohandzeko partikulen arrastea ekiditen du. Lan honetan zerrautsa erabili da partikula fin moduan.

Iturri bilgailua erabiltzeaz gain, erdiko bi hodi ezberdin erabili dira, irekiduradun hodia eta hodi ez-porotsua. Erdiko hodi hauetaz gain, hoderik gabeko sistemak ere aztertu dira, eta konfigurazio bakoitzean partikula finen portaera zein emariak duen eragina aztertu da. Horregatik, sistema bakoitzerako airearen abiadura minimoaz gain, beste abiadura batzuk erabili dira. Horrela, partikula finak konfigurazio ezberdinetan duten portaera aztertuz.

Partikulen jarraipena burutzeko sistema optikoa erabili da, hau da, kamera bat. Kameraren bidez, kontaktorearen puntu ezberdinetan grabaketak egin dira, eta kodigo egokia erabiliz neurketa posizio bakoitzean abiadura neto puntuala kalkulatu da. Puntu ezberdinetan lortutako abiadurekin, aurretik zehaztutako altueren profil erradialak, ardatzeko profil axiala, konfigurazio ezberdinetarako iturriaren forma eta azkenik, bero mapak egin dira abiadurak interpolatuz, konfigurazio ezberdinen konparaketa hobeto ikusteko. Bestalde, emariaren eragina aztertzeko profil erradiala, axiala eta iturriaren forma emari ezberdinetan neurtu dira.

Azkenik, emaitzak aztertuz ikusi ahal izan den bezala, hoderik gabeko eta irekiduradun hodiaren sistemetan eraztunguneko partikulek abiadura negatibo (beherakor) netoa erakusten dute, baina abiadura negatibo eta positiboa erakutsiz. Hau da, abiadura fluktuazioak lortzen dira. Hodi ez-porotsudun sistemetan ere abiadura fluktuazioak lortzen dira, baina kasu honetan fluktuazioak balore negatiboetan aurkitzen dira (partikulak azeleratuz eta dezeleratuz jaisten dira). Bestalde, erdiko hodiekin gasa iturritik bideratzea ahalbidetzen dute, eraztungunerako perkolazioa txikituz. Ondorioz, eraztunguneko partikulak abiadura txikiagoan jaisten dira eta honek partikula zirkulazio txikitzen du. Egoera hau ez da onuragarria, izan ere, bi faseen arteko kontaktua txikitu egiten da eta ondorioz, aplikazioetako eraginkortasuna ere.

## **1. SARRERA**

### **1.1. ITURRI OHANTZEAREN JATORRIA**

Gaur egun, industria mailan gas-solido prozesu gehienetan erabiltzen diren sistemak ohantze finko eta fluidizatuak dira. Izan ere, sistema hauek, fase solidoaren eta fase jariakorraren arteko kontaktua hobetzen dute, modu honetan, gas-solido interakzioetan oinarritutako erreakzioetarako oso aproposak izanik.

Faseen arteko kontaktua hobetzeko, hau da, erreakzioa eraginkorragoa izateko partikula solidoaren tamaina txikitu daiteke, hala ere, hau ez da posible prozesu guztietan. Ohantze finkoaren kasuan, partikula txikiek karga galera handiagoa izatea dakarte, beraz, haizagailuaren potentzia handiagoa izan behar da, prozesua garestituz. Bestalde, ohantze fluidizatuari dagokionez, nahiz eta Geldart A eta B taldeko solidoak ondo tratatu, arazoak erakusten dituzte partikula lodiekin (Geldart D taldeko solidoekin). Hortaz, iturri ohantzeak dira partikula lodiekin operatzeko gas/solido kontaktu sistema egokiena. Hala ere, metodo honek zenbait muga ditu solidoen ezaugarri fisikoengatik eta gasaren egoitza denborarengatik (Mathur eta Epstein, 1974).

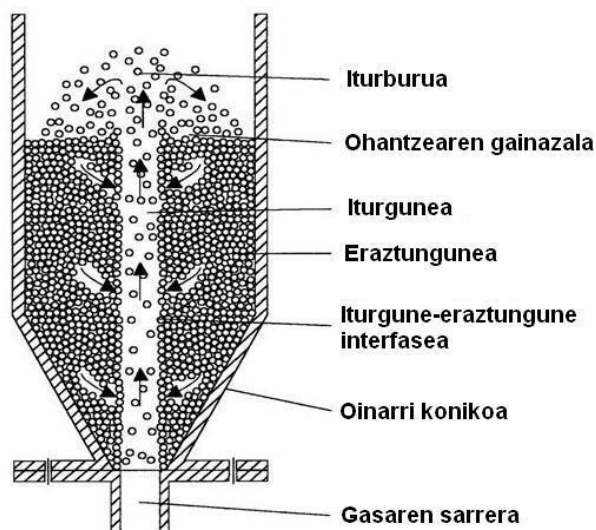
Iturri ohantzea gaur egun oso ezaguna ez den teknologia da, izan ere, ohantze finkoa eta fluidizatua baino berriago den metodoa da eta oraindik ikerketa fasean jarraitzen du. Esan bezala, iturri ohantzea solido jariakin sistema batzuen kontakturako aproposagoa da, solido oso handietarako edo gasen egoitza denbora laburretarako adibidez. Gainera, tamaina oso txikiko ( $d_p \leq 1\text{mm}$ ) edota dentsitate oso altuko solidoak tratatzeko ere aproposa da (barneko hodiak erabiliz).

Iturri ohantze teknologiaren jatorria Mathur eta Gisher ikertzaileek egindako gari aleen fluidizazioan dago. Ikertzaile hauek ikusi zuten, airea erditik bakarrik sartzean partikulek ez zutela zorizko mugimendurik egiten ohantze fluidizatuan bezala, baizik eta mugimendu ziklikoak egiten zituztela. Honen ondorioz, aleak hondatu gabe airearen tenperatura altuagoak erabili ahal ziren eta honek ohantze fluidizatuen etekina hobetzea ekarri zuelarik (Gisher eta Marthur, 1957a, 1957b).

Lehenengo iturri ohantze komertzialak Kanadan 1962. urtean instalatu ziren landare produktuen lehorketarako, hala nola, dilistak, ilar haziak eta abar. Bestalde, teknologia honek arrakasta handia izan zuen ongarrien pikortatze prozesuetarako, solidoek kontaktore barruan duten mugimenduaren ondorioz.

### **1.2. ITURRI OHANTZEAREN EZAUGARRIAK**

Iturri ohantzeak hainbat aldaketa jasan ditu denboran zehar, aipagarrienak hurrengoak izanik: ohantze ez oso sakonak erabiltzea (sekzio konikoaren eta zilindrikoaren bolumenak berdinak izanik), oinarri laua oinarri konikoaz ordezkatzeta (gune hilak ekiditen dira), geometria konikoa bakarrik erabiltzea eta erdiko hodiak erabiltzea. Iturri ohantzearen ezaugarri nagusiak 1.1 Irudian ikus daitezke.



### 1.1. Irudia. Oinarri konikodun iturri ohantze zilindriko baten ezaugarri nagusiak.

Jariakina, normalean gasa, 1.1 Irudian ikusten den bezala, kontaktorearen behealdetik sartu da eta kontaktore osoa zeharkatzean goialdetik irteten da. Jariakinak abiadura minimo bat izan behar du ohantzeak sortzen duen karga galera gainditu eta ohantzean bide preferentzial bat sortzeko, hori dela eta iturgunea deituriko hutsune zilindrikoa sortzen da. Iturgunea oinarritik gainazalera lutzatzen da eta gasak bertatik partikula solidoak arrastatzen ditu.

Bi gune bereiz daitezke (Patrose eta Caram, 1984): alde batetik, gasaren sarrera gunea, non arraste indarrak grabitate indarrak baina handiagoak diren; eta bestetik, gasa sartzen den tokitik gorago (zentimetro gutxira) dagoen gunea, non grabitate indarrek arraste indarrak berdintzen dituzten partikulen dezelerazioa hasiz. Efektu hau, iturgunera sartzen diren partikulengatik eta gasa eraztungunerantz sakabanatzen delako gertatzen da.

Ondoren, arrastatuak izan diren partikulak iturgunetik irteten dira ohantzetik gora, iturburua osatuz. Bertan grabitate indarrek arraste indarrak gainditzen dituzte eta ibilbide aldaketa gertatzen da non partikulak mugimendu parabolikoan ohantzera erortzen diren. Eroritako partikulak ohantzean zehar sakabanatzen dira eta jariakinaren mendean egoteari uzten diote, horrela ohantze beherakor bat sortuz. Partikulak eraztungunetik behera mugitzen dira iturrian berriro sartu arte, ziklo berri bat hasiz.

Beraz, sistemaren gune garrantzitsuenak: iturgunea, iturburua eta eraztungunea dira. Partikula guztiek ibilbide ziklikoak deskribatzen dituzte kontaktorearen barruan, nahiz eta partikula bakoitzak bide ezberdineko zikloak deskribatu. Lehen esan bezala, partikulak iturburutik irten ondoren ohantzearen gainazalean sakabanatzen dira, ondorioz, partikula batzuk kontaktorearen hormatik hurbilago eroriko dira eta beste batzuk, berriz, iturritik hurbilago, azken hauen zikloa besteena baino laburragoa izanik.

Operazioa era jarraituan edo ez-jarraituan burutu daiteke. Era jarraituan lan egiteko nahikoa da elikadura era jarraian sartzea ohantzearen gainetik, eraztungunetik edota jariakinarekin batera, eta altuera jakinean solidoen irteera ezartzea, metaketarik ez gertatzeko.

Momentuz oinarrizko iturri ohantzea aztertu da eta ageri daitezkeen arazoak konpontzeko zenbait aldaketa burutu dira. Adibidez, barne hodiak gehitzea iturriaren eta eraztungunearen artean, bi guneen arteko banaketa hobea izateko edota ohantzea guztiz koniko edo guztiz zilindrikoa erabiltzea.

Gaur egun kontaktore konikoak daramatzen aldaketak solidoaren zirkulazio indartsuago bat (transferentzia prozesuak hobetzeko) lortzera bideratuta daude. Horrela, distribuzio zabaleko partikula tamaina erabiltzea ahalbidetzen da, partikularen tamaina erreakzioarekin batera aldatzen denerako funtsezko ezaugarria dena (Bilbao eta kol., 1987). Gainera, bai solidoaren baita jariakinaren egoitza denbora laburrekin lan egiteko aproposa da ere, albo erreakzio azkarrak ekiditeko (Eng eta kol., 1989).

### 1.3. ITURRI OHANTZEAREN ABANTAILAK ETA DESABANTAILAK

Teknologia guztiak bezala, iturri ohantzeak hainbat abantaila eta desabantaila ditu. Jarraian, iturri ohantzeak, ohantze finko eta ohantze fluidizatuaren arteko konparaketa egin da. (Bridgwater, 1985; San José, 1991; Peñas, 1993; Llamosas, 1996).

- Iturri ohantzearen karga galera ohantze fluidizatuarena baino txikiagoa da. Hau, iturgunearen sortutako indar bertikal baten ondorioz gertatzen da, zeinek eraztunguneko partikulak partzialki eusten dituen.
- Partikula handietarako ( $D_0/dp < 20-30 \mu m$ ) gas-solido kontaktua hobea da iturri ohantzearen kasuan. Izan ere, gasaren frakzio batek eraztungunea zeharkatzen du eta iturritik gora doan gasak iturri-eraztungune interfaseko partikulak desplazatzen ditu, materia eta bero transferentzia hobetuz.
- Iturri ohantzearen erregimena egokia da solido itsaskorren tratamendurako, porotasuna handitzean partikulen arteko eta kontaktorearen hormaren aurkako talken murrizketa ematen delako. Horrela, partikulek energia zinetiko handiagoa dute, aglomerazioa eta fluidizazioaren galera ekidinez (Olazar eta kol., 2004).
- Ohantze fluidizatua ez bezala, iturri ohantzea oso egokia da tamaina ezberdineko solidoen tratamendurako, batez ere tamaina distribuzio diskretuetarako. Berez, iturri ohantzearen operazio abiadura partikula handien arraste abiaduraren gainetik dago, partikula guztien zirkulazioa ziklo osoak izatea ziurtatuz. Gainera, oinarri konikodun kontaktorearen diseinuak gune hilen agerpena saihesten du. Honek, iturri ohantzean ohantze fluidizatuan baino partikula banaketa txikiagoa agertzea dakar.
- Iturri ohantzean ematen den bi faseen kontrakorranteko jarioak solidoaren tenperaturaren aldaketa bortitzak ekiditen ditu, tenperaturarekiko sentikorrek diren materialen prozesatzea erraztuz (elikagaiak, produktu farmazeutikoak, material polimerikoak etab.) eta tenperatura altuagoko airea erabiltzea ahalbidetuz.
- Iturri ohantzearen eraikuntza erraza da, ez baitu ez plaka banatzailerik ezta beste antzerako elementuren ere. Beraz, iturri ohantzea oso moldakorra da eta eskalaz handitzeko erraza da.
- Gasaren eta solidoaren arteko kontaktu biziagoak, solidoen ibilbide zikliko uniformearekin batera, iturri ohantzea sistema aproposa bihurtzen du pikortatze,

kapsulatze eta estaltze prozesuetarako. Honela, produktuek trinkotasun handia eta esferikotasun uniformeak lortzen dute.

- Iturri ohantzearen erregimenak solidoaren elikadura jarraitua ahalbidetzen du, ohantze fluidizatuan ez bezala solidoa eraztungunean edo gasarekin batera sartu daiteke.

Bestalde, iturri ohantze teknologiak 20-30  $\mu\text{m}$  baino tamaina txikiagoko partikulekin lan egiteko zailtasunak izateaz gain, hurrengo mugak ere baditu (Passos 1987a; Bridgwater, 1985):

- Karga galera handiagoa dago iturriaren sarreran.
- Kontaktorearen geometriak eta solidoaren ezaugarriak hainbat muga dituzte.

#### **1.4. ITURRI OHANTZEAREN ERABILERA**

Iturri ohantzeak erabilera asko ditu non bi talde nagusitan bereiz daitezkeen: operazio fisikoak eta operazio kimikoak.

Operazio fisikoaren artean ondorengoak dira aipagarrienak: solidoen nahasketa, material solidoen estaltzea, aerosolen berreskurapena eta adsorbatzaileen birstortzea, birrinketa, ongarrien hoztea, ikatzaren aurreberoketa, pikortatzea eta material pikortsuen eta itsaskorren lehorketa (Pablos eta kol., 2018).

Bestalde, operazio kimikoaren artean: krakeo termikoa, plastikoen pirolisia, biomasaren konbustioa, klinker zementuaren produkzioa, ikatzaren aktibazioa, ikatzaren gasifikazioa, erregai nuklearretako partikulen estaltzea eta pikortatze-erreakzioak.

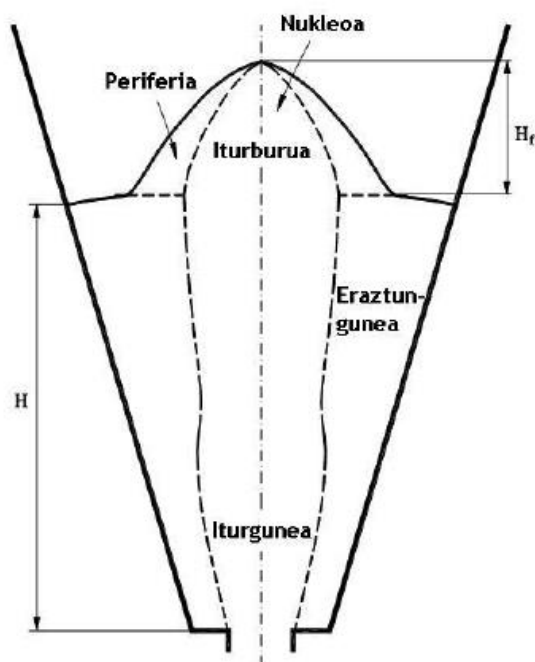
#### **1.5. ITURRI OHANTZE KONIKOA**

Iturri ohantze konikoek, kontaktore zilindrikoen ezaugarriak (mugimendu ziklikoa, karga galera txikia, etab.) eta konikoaren bereziak diren ezaugarriak konbinatzen dituzte, adibidez, operazio egonkorra mantentzeko gaitasuna gas emari desberdinetan (Olazar eta kol., 1992; San José eta kol., 1993; Olazar eta kol., 1999). Egoera honek, tratamendu zaila duten solidoekin lan egitea ahalbidetzen du, solido itsaskorrekin adibidez, eta gunek hilak desagerraraztea ahalbidetzen du. Arrazoi honengatik iturri ohantze konikoak zenbait aplikazio ahalbidetzen ditu polimerizazio katalikoa (Bilbao eta kol., 1987, 1989; Zabala, 1997) eta ikatz bituminosoen gasifikazioa (Uemaki eta Mathur, 1976) eta solidoen enkapsulaketa (Kucharski eta Kmiec, 1989) kasu.

Kontaktore konikoaren beste ezaugarri garrantzitsu bat era egonkorrean operatzeko gaitasuna da, non iturriaren bokleorengatik ohantzearen fluktuazioarik ez dagoen. Horregatik, kontaktore zilindrikoarekin konparatuz, ez dago operatzeko ohantzearen altuera maximo bat, baina badago ohantzearen altuera minimoa, non altuera hortik behera gainazaleko partikula solidoak fluidizatu egiten diren (Olazar eta kol., 2004). Gainera, operazioa gasaren egoitza denbora baxuetan (milisegundoak) eman daiteke iturri ohantze diluitu erregimenean (Olazar eta kol., 1993; Olazar eta kol., 1997).

Ohantzea osatzen duten gunek iturria, iturburua, nukleoa, periferia, iturgunea eta eraztungunea dira. Orokorrean, ohiko iturri ohantzearen gunek bezala daude definituta eta 1.2 Irudian adierazten dira.





**1.2. Irudia.** Iturri ohantze konikoaren gune ezberdinak eta beraien arteko mugak.

Ohantzearen zonalde batzuen bolumena faktore geometrikoen (angeluaren eta sarrerako diametroaren) eta baldintza esperimentalen (partikularen diametroa eta ohantzearen altuera finkoaren) menpean dago, zonalde hauek iturgunea, eraztun-gunea eta iturria izanik (San José eta kol., 2005).

Iturrian partikula solidoak gasaren frakzio nagusiarekin kontaktuan jartzen dira eta zonalde horietatik igotzen dira iturrira heldu arte. Bertan partikulak zein gasa batera igotzen dira eta partikulak eraztun-gunearen zonaldearen gainera erortzen dira, periferiara. Bestalde, eraztun-gunean gas eta partikulen jarioa kontrakorrantean da.

Beraz, iturri ohantze konikoaren erregimenak abantaila handiak aurkezten ditu solido-gas kontakturako eta aukera erakargarria da diseinu konplexuko erreaktoreentarako (Kmiec eta Leschonski, 1991; Gauthier eta kol., 1991; Tamir eta Kitron, 1989).

## 1.6. ITURRI OHANTZEAREN BARNE GAILUAK

Elementu hauek sistemaren portaera hidrodinamikoa hobetzeko erabiltzen dira, egonkortasun handiagoa lortzen eta ondorioz, iturri ohantzearen operazioaren egonkortasun tartea handituz.

Gailu hauen barnean bi nabarmentzen dira: barneko gailuak eta iturri bilgailua.

### 1.6.1. Barne hodia

Barne hodian bi mota aurkitu daitezke, alde batetik, hodi ez-porotsua eta, bestetik, irekiduradun hodia.

Helburua gasa iturri zonaldeetik eraztun-gunera filtratzea ez denean hodi ez-porotsua erabiltzen da. Horrela, gasa gune axialetik gora igotzera behartzen da, eraztun-gunera pasatzeko aukera

eman gabe. Hala ere, gasaren sarreratik eta hodiaren beheko guneko distantziaren artean gasa pasatzen uzten du. Hodi ez-porotsuak, operazio baldintzen malgutasuna dakar, baina, zirkulazioan dauden partikula solidoen proportzioa jaisten da. Bestalde, solidoen zirkulazioa ahalbidetzen du partikulen propietateak eta ohantzearen altueraren mugak alde batera utzita.

Mota honetako hodian abantailen artean hurrengoak daude: iturriko gasaren emari baxuagoa ahalbidetzen dute eta karga galera txikiagoa dute. Desabantailen artean, solidoen zirkulazio txikiagoa dago, etekin globala txikiagoa izanik. Gainera, solidoek hodia tratatzeko arriskua dago eta hodia instalatzearen konplexutasuna.

Bestalde, ohantzearen altuera eta hodiaren altuera berdina izan behar da. Hodiaren altuera ohantzearena baino altuagoa bada solidoen zirkulazio txarragoa lortzen da, solidoek burutu beharreko ibilbidea luzeagoa baita, iturkuntza abiadura minimo handiagoak lortuz, eta alderantziz, ohantzearen altuera hodiaren baino altuagoa bada, iturria ezegonkorra bihurtzen da (Amasorrain, 2005).

Sistemaren metaketa saihesteko eta sistema indartsuagoa izateko irekiduradun hodiak erabiltzen dira. Hauek, gasaren kantitate handiagoa pasarazten uzten dute iturritik eraztungunera ohantzearen altuera osoan, bero transferentzia faboratuz eta sistemaren efizientzia hobetuz. Hodi hauek, solido itsaskorrekin eta metatzen diren solidoekin erabiltzen dira. Beraz, hodi ez-porotsuekin konparatuz, irekiduradun hodiekin, solido-gas kontaktua hobetzen dute eta solidoaren zirkulazio abiadura igotzen dute (Ishikura eta kol., 2003; Wang eta kol., 2010; Nagashima eta kol., 2009).

Irekiduradun hodian funtzionamendu ona lehorketan islatzen da. Izan ere, hainbat esperimentu egin dira eraikuntzarako harearen lehorketaren inguruan eta emaitzek frogatu dute lehorketarako beharrezkoa den denbora irekidura hodia erabiltzean, hodi ez-porotsuaren erdia dela (Altzibar eta kol., 2008).

Irekiduradun hodian, irekidura portzentaia igotzean, hau da, hanken zabalera txikitzean, hodorik gabeko iturri ohantzearen antzeko iturkuntza lortzen da. Izan ere, partikulak eraztungunera pasa daitezke edozein altueratan solidoaren eta gasaren arteko kontaktua hobetuz. Hala ere, iturkuntza abiadura minimoa igotzen da hodorik gabeko sistemekin konparatuz.

Aldiz, irekidura proportzioa txikitzen bada, hodi ez-porotsuen antzekoa izango da, solido-gas kontaktua txarragoa izango da, baina sistema egonkorragoa izango da. Beraz, behar denaren arabera hodi bat edo bestea erabiliko da.



**1.3. Irudia.** Erdiko hodiak, hodi ez-porotsua (a) eta irekiduradun hodia (b).

### 1.6.2. Iturri bilgailua

Partikula finekin lan egitean kontuan hartu behar den faktorea, sistemaren operazio baldintzak mugatzen dituelako, finen arrastea da. Partikula txikiek, energia zinetiko nahikoa lortzen dute erreaktoretik ihes egiteko. Horrek, erabiltzen den ohantzearen murrizketa dakar eta ondoren, sistemaren ezegonkortasuna.

Arazo hori saihesteko, sisteman iturri bilgailua jartzen da. Gailu honek, partikula finen arrastea ekiditeaz gain, iturria egonkortzeko balio du eta gas-solido kontaktua handitzen du. Ondorioz, materia eta bero transferentzia handiagoa da.

Elementua, gorpu zilindrikoa da, non behealdea irekita duen. Bertatik iturrian aurkitzen diren solidoak sartzen dira. Gainera, gailu honek gasari ibilbide luzeago bat egitera bultzatzen du solido-gas kontaktua handituz. Gorpu zilindrikoaz aparte, goialdean kono formazko elementu metalikoa darama, eta bere funtzioa bere gainean erortzen diren partikulak, aldaparengatik berriz ohantzera bideratzea da. Hala ere, egoera hori bakarrik lortzen da aire emari altuetan edo partikula tamaina desberdinekin eraturako ohantzea izatean.

Gailuaren manipulazioa errazteko, sistema ipintzeko momentuan eta bilgailuaren altuera aldatzeko, metalezko hiru barra kokatu dira, non euste funtzioa betetzen duten.

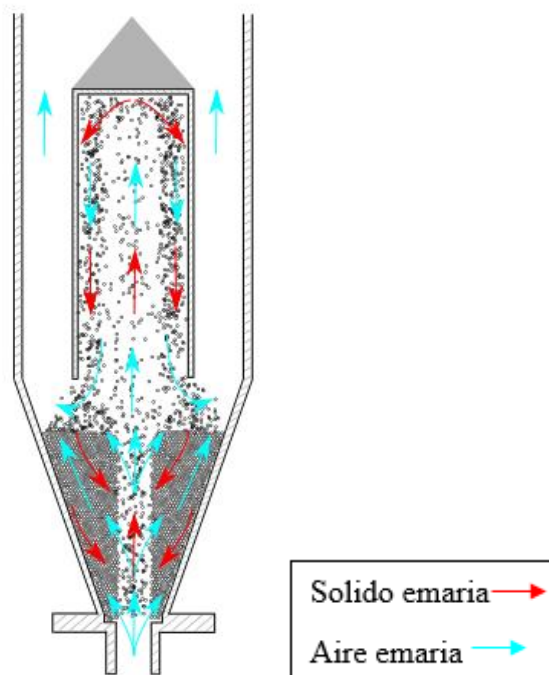


#### **1.4. Irudia.** Iturri bilgailua.

Partikula finen arazo nagusietako bat beraien iturkuntza erregimen egonkorra lortzea da. Hasiera batean, arazoa barne hodiak jartzen konpondu zen, baina konponbide horren desabantaila hurrengoa da: hodiak iturgunearen eta eraztungunearen banaketa eragiten duela eta ondorioz, solido-gas kontaktua murrizten dela. Honek iturri altuak lortzea eragiten du eta solidoaren arrastea ematen da. Elementu honek partikula finen iturkuntza ahalbidetzen du barneko hodia erabili gabe. Izan ere, bi funtzio betetzen ditu, ohandzearen galera ekidin eta iturria egonkortzea.

Iturri bilgailua ohandzearen gainazalarekiko zenbat eta gorago jarri, iturriaren portaera egonkorragoa da. Beraz iturri bilgailuaren behealdearen eta ohandzearen gainazalaren arteko distantzia ( $H_F$ ) iturri bilgailuaren portaera egokirako parametro oso garrantzitsua da (Altzibar, 2011).

1.5 Irudian kontaktorearen barruan dagoen iturri bilgailuaren funtzionamendua erakusten da.



### 1.5. Irudia. Iturri bilgailudun eta erdiko hodidun iturri ohantze konikoaren funtzionamendua.

Iturri bilgailuaren beheko aldearen eta ohantzearen arteko hutsuneak eragin handia du ohantzearen portaeran (Altzibar, 2011), horren arabera operazioa egonkorra izatetik ezegonkorra izatera pasatu ahal delako. Izan ere, iturri bilgailua ohantzearen barnean sartuta badago sortzen den karga galera handia da, eta ekipoaren puzgailua ez da gai iturria irekitzeko, hots, beharrezkoa den aire emaria emateko eta saiakuntza ezin da egin. Horregatik, iturri bilgailua ohantzearen gainazaletik gora kokatu behar da iturri ohantze erregimenak behar bezala funtziona dezan.

Bestalde, bilgailua ohantzearen gainazaletik hurbil kokatzen bada, bilgailua aire abiadura txikietan presurizatzen da eta erregimen ezegonkorak lortzen dira. Oostera, bilgailua distantzia handiagoetara jartzean, airearen abiadura txikietan bilgailuak ez du iturria biltzen eta aire emari handiagoak behar dira iturria bildu eta sistema egonkortu dadin. Hortaz, bilgailuaren eta ohantzearen arteko distantzia optimoa tarteko balio bat da, 0.06 eta 0.08 m artean.

### 1.7. ITURRI OHANTZE KONIKOEN HIDRODINAMIKA ETA EGONKORTASUNA

Sistema hauen operazio egonkorerrako baldintzen determinaziorako analisi ugari burutu dira, baita beirazko bolatxoekin agertutako erregimen desberdinen eboluzioak ere (San José, 1991; Olazar eta kol., 1992). Analisi hauetarako, Mathur eta Gishler-ek (1955b) proposatu bezala, ohantzearen altuera airearen emariarekiko irudikatzen da. Emaitzen interpretaziotik airearen sarreraren diametroak, partikulen diametroak eta kontaktorearen alde konikoaren angeluak egonkortasunean duten eragina aztertu da.

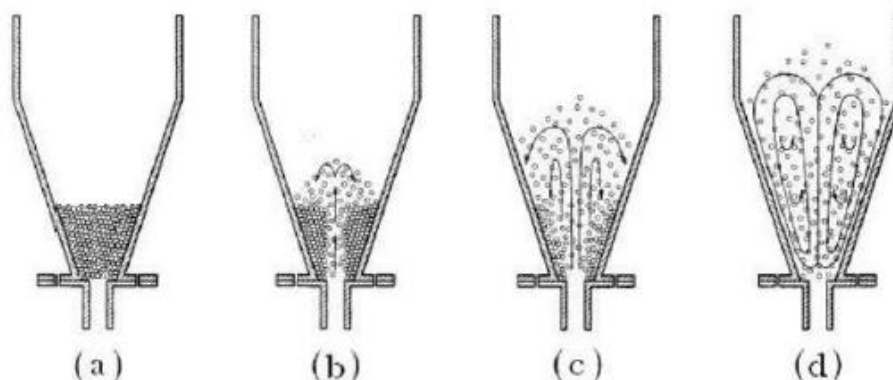
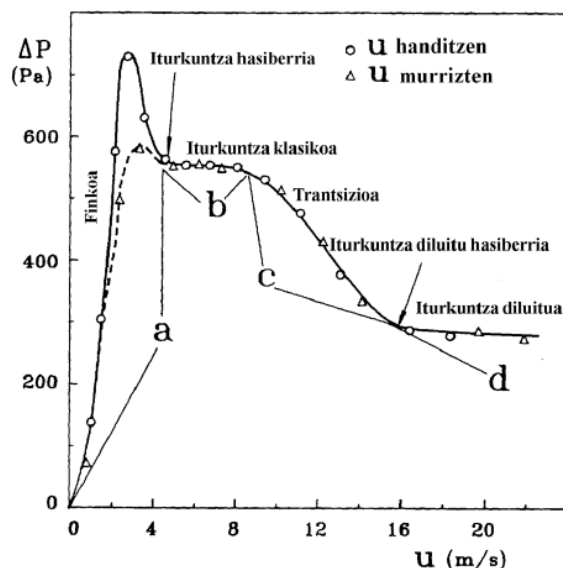
Iturri ohantze erregimena era aproposan lortzeko,  $D_0/D_i$  erlazioa (gasaren sarreraren diametroa/ohantzearen oinarriaren diametroa)  $1/2$  eta  $5/6$  tartean egon behar da (Olazar eta kol., 1992). Behe muga karga galerak eta oinarrian sortzen diren gune hilek ezartzen dute. Bestalde goi mugak, sisteman ageri den iturriaren definizio faltak ezartzen du.

Kontaktorearen angeluak,  $\gamma$ ,  $28^\circ$  baino handiagoa izan behar du, izan ere, angelu txikiagotan ohandzea ezegonkortu egiten da eta  $D_0/D_i$  erlazioa aztertutakoa baino txikiagoa izan behar da ere bai.

Ohiko iturri ohandze kontaktoreetan  $D_0/d_p$  (gasaren sarreraren diametroa/partikularen diametroa) erlazioak 20 ingurukoa izan behar du (Mathur eta Gishler, 1955b; Passos eta kol., 1987). Iturri ohandze konikoetan, aldiz, erlazioaren tarte zabalagoan baldintza egonkorrak lortzen dira,  $<60$  egon litezkeenak (Olazar eta kol., 1992).

### 1.7.1. Karga galerak abiadurarekiko duen eboluzioa

1.6 Irudian airearen abiadurarekiko ematen den karga galeraren aldaketa irudikatzen da, partikulek grafikoa ageri diren tarte bakoitzean duten zirkulazio erregimenaren irudikapenarekin batera.



**1.6. Irudia.** Iturri ohandze konikoan karga galeraren eta partikulen ibilbidearen bilakaera (San José, 1991)

Gasaren abiadura handitzean, karga galera azkar handitzen da ohandze finkoan (a gunea) maximo batera heldu arte, momentu hartan ohandzea hedatu egiten da gasaren igarotzea faboratzeko. Puntu hau, ohandze finkotik iturrirako trantsizio bezala ezagutzen da.

Abiadura gehiago handituz ohantzea zirkularazten hasten da eta karga galera egonkor mantentzen da, baina iturgunea handitzen doa eraztungunea txikitzen den bitartean. Zirkulazio mota hau da iturri ohantzeari dagokiona (b gunea) eta bertan, iturgunearen eta eraztungunearen mugak ondo bereizten dira.

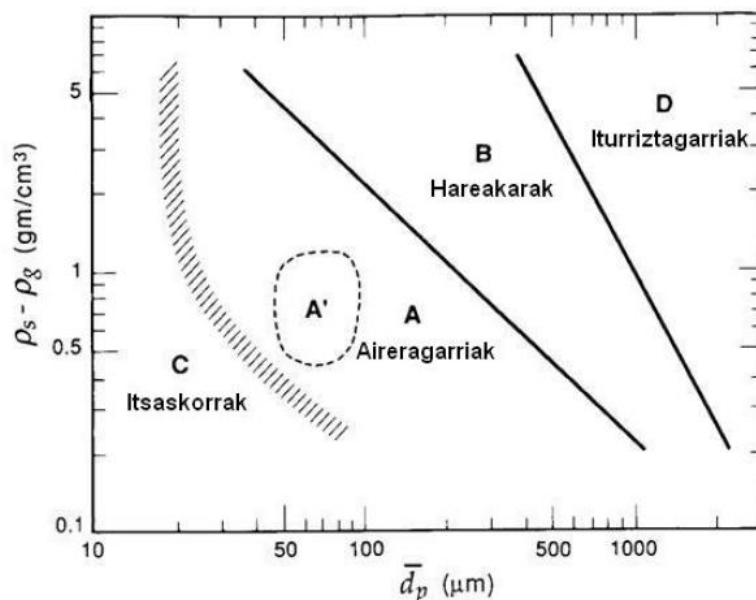
Abiadurak igotzen jarraitzen badu, karga galera jaisten hasten da trantsizio egoera batera helduz (c gunea), non iturgunearen eta eraztungunearen arteko muga nahasiagoa den. Azkenik, karga galera egonkor egiten da iturri ohantze diluitua lortzen delako, eta puntu horretan iturri ohantze diluitu hasiberria lortzen da, ohantzearen zirkulazio biziko erregimena lortuz.

Azkenik, iturri ohantze diluitua lortzen da (d gunea), non iturria, iturburua eta eraztungunea partikulek daramaten norabideari esker identifikatzen diren, ohantzearen porotasunak berdin dirau ohantze osoan eta, 0.8 inguruan (Olazar eta kol., 2004).

## 1.8. GELDART SAILKAPENA

Ohantzea osatzen duten partikula solidoen ezaugarriak oso garrantzitsuak dira, gero, iturri ohantzea egoera egonkor batean lan egiteko.

Partikulak, lau talde desberdinetan sailkatzen dira, inguru tenperaturaren eta presio atmosferikoan iturri fluidizatuan aurkezten duten joeraren arabera (Geldart, 1973). 1.7 Irudian ikusi daitekeen sailkapen honek partikulen dentsitatea eta batezbesteko diametroa erlazionatzen ditu. Beraz, honi esker, bi parametro horien ezagupenaz partikula mota bakoitzak izango duen portaera aurrean daiteke.



## 1.7. Irudia. Geldart-en partikulen sailkapena.

A taldea haizagarriak diren partikulek osotzen dute eta fluidizatzeko oso aproposak dira. Operatzerakoan ohantzea hedatu egiten da, haien artean elkartu edo apurtu daitezkeen burbuilak eratuz eta solidoen nahaste bizia eraginez. Dentsitate baxuko eta diametro txikiko partikulak

barneratzen ditu talde honek. Kasu honetan, burbuila abiadura minimoa fluidizazio abiadura minimoa baino handiagoa da.

B taldea harea-antzeko partikulez osaturik dago. Fluidizatzerako orduan burbuila handiagoak agertzen dira, baina ohantzearen oinarriak burbuilen tamaina erregulatzen eta txiki mantentzen laguntzen du.

C taldearen barnean, solido kohesiboak edo hautsak agertzen dira. Tarte honetan partikulen arteko interakzioak altuak dira eta, ondorioz, aglomeratzeko joera dute. Fluidizazio egokia lortzeko beharrezkoa da tamaina handiagoko partikulekin nahastea.

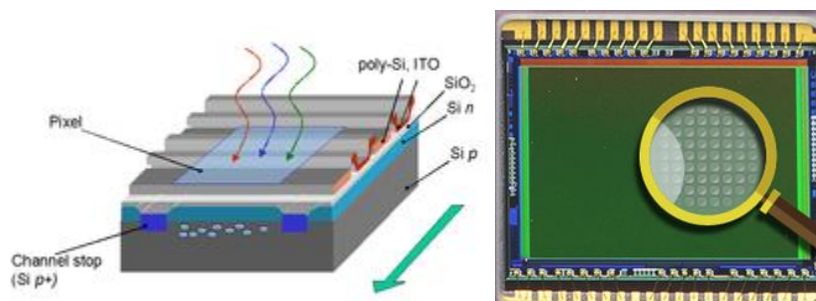
Azkenik D taldea dago, iturri ohantzeetan era egonkorrean operatzeko gaitasuna duten partikulak biltzen dituena. Orokorrean gasaren kanalizazioa gertatzen da eta fluidizazioa lortzeko aire kantitate oso handiak behar dira. Ohantze hauetan burbuilen agerpena oso arrunta da altuera txikikoak direnean eta jariakinaren abiadura fluidizaziorako abiadura minimoa baino txikiagoa denean. *Slugging*-aren agerpena ekiditeko ohantzearen goialdea behealdea baino azalera handiagoa izateko diseinatzen da.

## 1.9. SISTEMA OPTIKOA

Lan honetarako abiadura handiko kamera bat erabili da iturri ohantzearen barnean solidoen jarraipena burutzeko. Gaur egun, kamera hitza erabiltzen dugunean bideo edo argazki kameretaz hitz egiten da, baina kamera bat azken finean sistema optiko bat da eta begiaren funtzionamendu berdina du. Gure inguruko gorputzek argia igortzen dute (islatutakoa) norabide guztietara eta arrazoi honengatik ikus dezakegu. Kanpo edo inguruko argi izpiak gure begietatik sartu eta garunera pasatzen dira, honek informazioa prozesatuz eta irudia sortuz.

Kamerek printzipio bera jarraitzen dute, hau da, kaxa ilun bat dira zeinetan alde bateko zulo batetik argi izpiak sartu eta beste aldean irudia jasotzen duen elementu fotosentikorra duten. Argi kantitatea zuloaren tamaina eta irekita dagoen denboraz kontrolatua dago.

Kamera digitaleko elementu sentikorra argia atzeman eta seinale elektrikoa bihurtzen duten milioika fotodiodo edo fototransistorioz osatua dago, CCD (*Charge-Coupled Device*) edo CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) deituak. Seinale elektriko hauek modu egokian prozesatuak izan ostean, edozein memoria digitalean gorde daitezke.



**1.8. Irudia.** Pixel unitate bat (ezkerra) eta kamera digitalaren elementu sentikorra (eskuma).

1.8 Irudian kamera digitalen sentsore elektrikoa erakusten da eta hau argiari sentikorrak diren hainbat sentsore n̄imiñoz osaturik dago. Hauek pixel izenarekin ezagutzen dira (*picture element*) (1.8 Irudia, ezkerra) eta irudi digitala sortzen duten unitate txikiak dira. Beraz,



kamera digitalek erabiliz lorturiko irudiak pixelez osaturik daude, hau da, kolore homoginoa bat duen hainbat laukiz (pixelak). Pixelak hartzen duen kolorea argiak sentsore horretan duen intentsitatearen arabera izateaz gain, pixelaren bit (digitu bitarren bidez osaturiko informazioa) kopuruaren arabera da ere bai. Hortaz, zenbat eta pixel gehiago eta pixel bakoitzaren bit kopurua handiagoa izan, lorturiko argazkiaren bereizmena edo kalitatea handiagoa izango da.

Bit bat azken finean memoria posizio bat da eta 0 edo 1 balorea har dezake. Kolorearen sakontasuna bitetan zenbat eta handiagoa izan, irudiak kolore-sorta zabalagoa izango du eta pixel batetik besterako kolore aldaketa leunagoa izango da. Pixelak bit batekoak badira irudiak soilik bi kolore izango ditu: 0 kolore beltza eta 1 kolore txuria (gris kolorerik gabe). Ostera, bi bit erabiltzen badira hauen arteko konbinazioak 4 kolore ematen ditu, orokorrenak 00 kolore beltza, 11 kolore txuria eta 01 zein 10 tarteko gris kolore ezberdinak izanik. Beraz, aipatu bezala, pixelen bit kopurua handitzerakoan pixelak har dezakeen kolore kantitatea handiagoa da eta lortzen den irudiaren kalitatea hobea da.

Argia eta elementu sentikorra kontaktuan dauden denborari esposizio denbora deritzo eta faktore oso garrantzitsua da, izan ere, faktore honen arabera lortuko baitira argazki argi eta bereizmen handiagokoak. Argazkia atera nahi den objektuari geldirik badago esposizio denborak argazkiaren argiztapenean soilik izango du eragina, baina objektua mugimenduan badago, argiaren esposizio denbora objektuaren mugimenduaren (pixel batetik besterako mugimendua) baino txikiagoa izan behar da. Hau horrela ez bada, objektua ez da garbi azalduko irudian eta mugimendu efektua azalduko baita, hau da, objektua haloarekin azalduko da eta bereizmena galduko du. Efektu hau ekiditeko bi parametroren balioak alda daitezke: bereizmen denbora edo grabaketa denbora.

Lan honetarako parametro hauen baloreen aukeraketa egokia oso garrantzitsua da, izan ere, iturgunean edo iturrian solidoak abiadura handian desplazatzen dira eta bereizmen handiko edo irudi garbiak lortzeko beharrezkoa da bi parametro hauen balio optimoak aukeratzea.

### **1.9.1. PIV metodoa**

Irudien bidezko partikulen abiadura neurketa (*Particle Image Velocimetry*, PIV) teknikak, jariakinen eta bertan dauden solidoen jarraipena burutzea ahalbidetzen du. Ezaguna den denbora tarte batean, jariakinak daramatzen partikulen desplazamendua neurtzen da frame batetik bestera, horrela abiadura lortuz. Teknika honen bidez, partikula jariakinen abiadura profilak lortu daitezke zeharkako sekzio baten zehar datuak hartuz, eta modu honetan, dagokion sistemaren abiadura aurrezaten duen korrelazioa eraiki.

Bi faktoreek eragiten dute abiadura emaitza zehatzak lortzerako orduan. Alde batetik, erabilitako neurketa sistemak (ekipo esperimentalak, kamera digitalak, argi iturria eta trazatzaile solidoak), eta bestetik, PIV irudien prozesatze teknikak.

PIV irudia prozesatzeko erabili zen lehenengo metodoa Willert metodoa da (Willert eta Gharib, 1991). Bertan, frame bakoitza gelaxka txiki askotan (“*Windows*”) banantzen da. Ondoren, frame bateko gelaxka bat hurrengo frameko gelaxka berdinarekin konparatzen da, batez besteko abiadura lortuz. Metodo honen arazo nagusia, ez duela abiadura gradiente kontuan hartzen, ezta gelaxkatik irten diren partikulak ere (Shi eta kol., 2015).

PIV irudien prozesatzea bi ataletan bana daiteke. Lehenengoa, partikulak identifikatzea eta bigarrena, bikoteak ezartzea. Irudietan partikulen posizioa identifikatzeko hurrengokoa kontuan izan behar da: partikulak atzealdea baino intentsitate handiagoa izatea, partikulak pixel bat baino handiagoak izatea (pixel tamaina txikiagoko partikulak ez dira aintzat hartzen), eta azkenik, atzealdearen intentsitatea ez dela uniforme izaten.

Horregatik, partikulak identifikatzeko metodorik errazena irudiaren binarizazioa egitea da. Horretarako, lehenengo irudia gris eskalara bihurtzen da eta ondoren, pixel bakoitzari intentsitatearen arabera balore bat ematen zaio: 1 intentsitatea muga baino handiagoa bada, eta 0 alderantziz bada. Teknika honen arazo nagusienetako bat partikula ezberdinen pilaketa da, hau da, binarizazioa egiterakoan partikula indibidualak detektatu beharrean partikula erraldoi edo partikula *cluster*-a detektatzen du (partikula multzoa). Eratzungunean dauden solidoekin gertatzen den arazoa da, eta horregatik, zonalde honetan beste teknika bat erabiltzen da, Farneback-en teknika. Hortaz, eratzungunean edo alde dentsoan, Farneback-en metodoa erabiltzen da, eta iturgunean eta iturrian, aldiz, hau da, alde diluituan, orokorrean korrelazio gurutzatuaren teknika. Lan honetan erabilitako kodigo ezberdinak atal esperimentalean azalduko dira zehaztasun handiagoarekin.

### **1.9.2. Korrelazio gurutzatuaren teknika**

Alde diluituan, irudiak grisen eskalara bihurtu ondoren eta binarizazioaren teknikaz kanpo, beste modu bat erabili daiteke partikulak identifikatzeko. Irudi bakoitzean, partikularen posizioaren arabera isladaturiko argiak angelu edo norabide ezberdina izango du eta hortaz, sensorera intentsitate ezberdinarekin iritsiko dira. Arrazoi honengatik, lorturiko irudian partikulak intentsitate edo gris kolore ezberdinekin azaltzen dira, hauen ertza edo hondoarekin duten muga bereiziz.

PIV metodoa jariakinen abiadura neurtzeko sortu zen. Horretarako, jariakinen trazatzaile bezala oso partikula finak erabiltzen dira eta lorturiko irudietan puntu txuriak lortzen dira hauek isladatutako argiagatik. Desplazamendua lortzeko, frame batetik besterako korrelazio gurutzatua erabiltzen da. Kasu honetan ere, frame bakoitza gelaxka txikiagotan banatzen da, ondoren partikulak bata bestearekin batzeko. Bertan gelaxka bakoitzean dagoen partikula distiratsuen aukeratzen da eta hurrengo framean (gelaxkatan banatuta) dauden partikula distiratsuenarekin batzen da, leiho osoarentzat abiadura netoa lortuz. Teknika hau partikulen bidezko jariakinen abiadura lortzeko egokia da, izan ere, partikula tamaina irudiarekiko oso txikia da eta partikula guztiak antzeko abiaduran mugitzen dira. Hala ere, partikula handiagoak erabili edo optika aldatzen bada (irudian lorturiko partikulen tamaina handiagoa izatea) lorturiko irudian partikulen tamaina handiagoa da eta ez da gomendagarria korrelazio gurutzatua erabiltzea, isladapen handiena partikularen gune baten eman baitaiteke. Arazo hori konpontzeko, lan honetan gure ikerketa taldean partikula irregularrak gune diluituan jarraitzeko proposatu den metodoa erabili da.

## 2. HELBURUAK

Proiektu hau iturri ohandze konikoen inguruko ikerketa programa baten barnean aurkitzen da. Ikerketa lana partikula fineko ( $200 - 300 \mu\text{m}$ ) solidoek iturri bilgailuarekin duten portaera hidrodinamikoan zentratu da eta PIV metodoaren bidez partikulen jarraipena egin da. Ikerketa hau M. Tellabide-ren doktoretza tesian dago barneratuta. Hurrengo helburuak bete nahi dira.

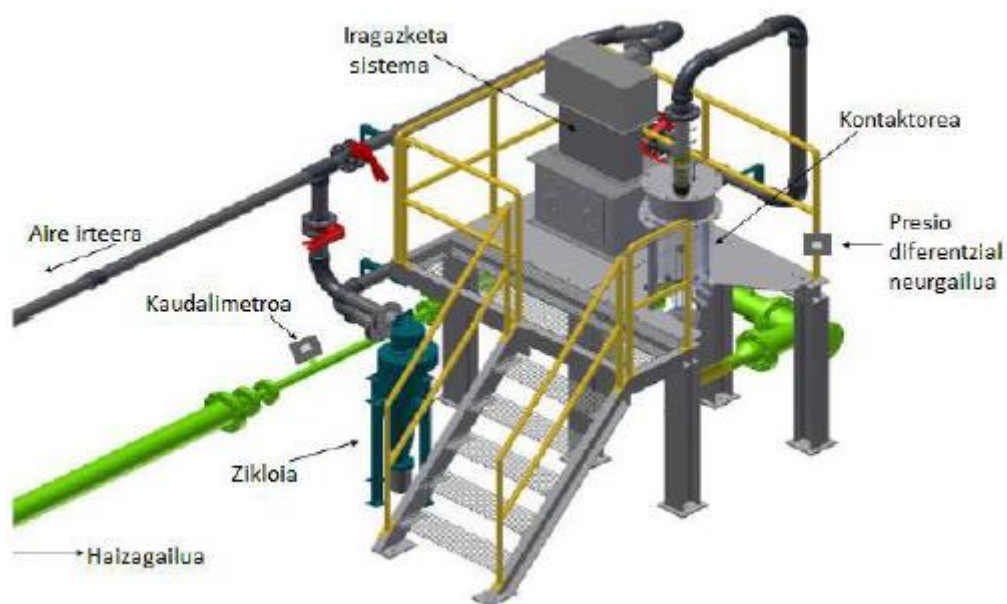
- Partikula finen jarraipena egitea, hodi konfigurazio ezberdinetarako eta sarrerako airearen emari ezberdinetarako. Konfigurazio desberdinak, erdiko hodirik gabe, erdiko irekiduradun hodiarekin eta hodi ez-porotsuarekin dira. Bestalde, emariak hodi konfigurazioaren arabera aukeratu dira, hodirik gaberako ( $u_{\text{min}}$  eta  $2.78u_{\text{min}}$ ) irekiduradun hodiako, ( $u_{\text{min}}$  eta  $2.77 u_{\text{min}}$ ) eta hodi ez-porotsurako ( $u_{\text{min}}$ ,  $2 u_{\text{min}}$  eta  $3 u_{\text{min}}$ ). Datuak kontaktorearen altuera ezberdinetan hartuz partikulen abiaduraren eboluzioa ikus daiteke.
- Zeharkako sekzioen profil erradialak eta ardatzaren profil axiala lortzea, bertan hodiekin eta emariak duten eragina aztertzeko eta beraien arteko konparaketa egiteko.
- Sistema ezberdinen iturria finkatzea eta beraien arteko konparaketa egitea.

### 3. METODOLOGIA

Atal honetan, erabili den ekipoa, baldintza esperimentalak eta iturri ohandzean erabilitako materiala deskribatuko da.

#### 3.1. EKIPO PILOTUAREN DESKRIBAPENA

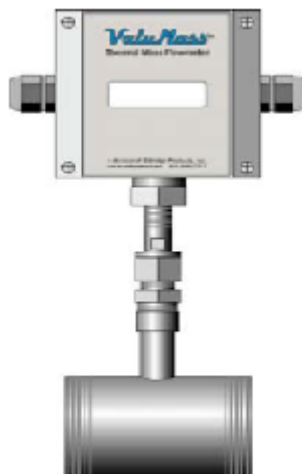
3.1 Irudian esperimentuetan erabilitako ekipu pilotuaren eskema ikus daiteke. Honek haizagailua, kaudalimetroa, presio diferentzial neurgailua, kontaktorea, iragazketa sistema eta zikloia ditu.



**3.1. Irudia.** Pilotu eskalako ekipuaren eskema orokorra.

Haizagailua beheko solairuan aurkitzen da, bere potentzia 5.5 kW-koa da eta bere betebeharra airea sistemara bultzatzea da. Izan ere, esperimentuetan erabilitako jariakin bakarra airea da.

Esperimentuetan partikula finak erabili direnez, zehaztasun handiko emari neurgailua erabili behar da balore txikietarako. Horregatik, emari neurgailu termikoa erabili da, emari txikiak neurtzeko.



### 3.2. Irudia. Ekipoko emari neurgailua.

Presio diferentzia neurgailuak, sisteman jarrita dauden arren ez dira erabili, izan ere, esperimentuetarako ez dira behar izan. Era berean, zikloia eta filtrazio sistema ez dira erabili, izan ere, egindako esperimentuak oso denbora txikikoak izatean eta iturri bilgailua izatean ez da partikulen arrasterik gertatu. Hala ere, uneoro irteerako hodia iragazketa sistemara konektatua izan da.

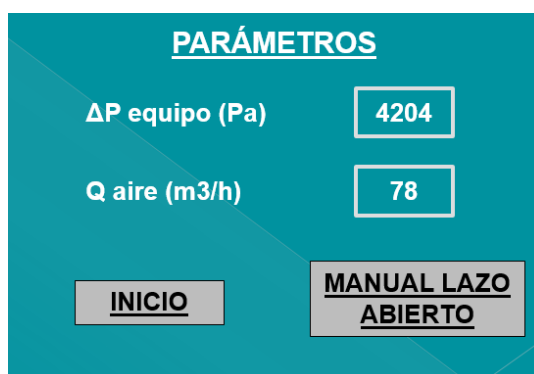
Sistema osoa kontrol panel baten bidez manipulatzeko da. Honen bidez haizagailua piztu edo itzaltzen da, sistemaren sarrerako emaria kontrolatzen da eta neurtutako parametroen informazioa lortzen da. Operatzeko moduak eskuz begizta itxian, eskuz begizta irekian eta automatikoa dira.

3.3 Irudian kontrol panela ikusten da, honek aurkezten dituen aukera ezberdinekin.



### 3.3. Irudia. Kontrol panelaren pantaila nagusia.

3.3 Irudian eskumako behealdean “Parametros” botoia sakatzean pantailan neurtutako aldagaien balioak agertzen dira. Lortutako informazioa 3.4 Irudian ikus daiteke.



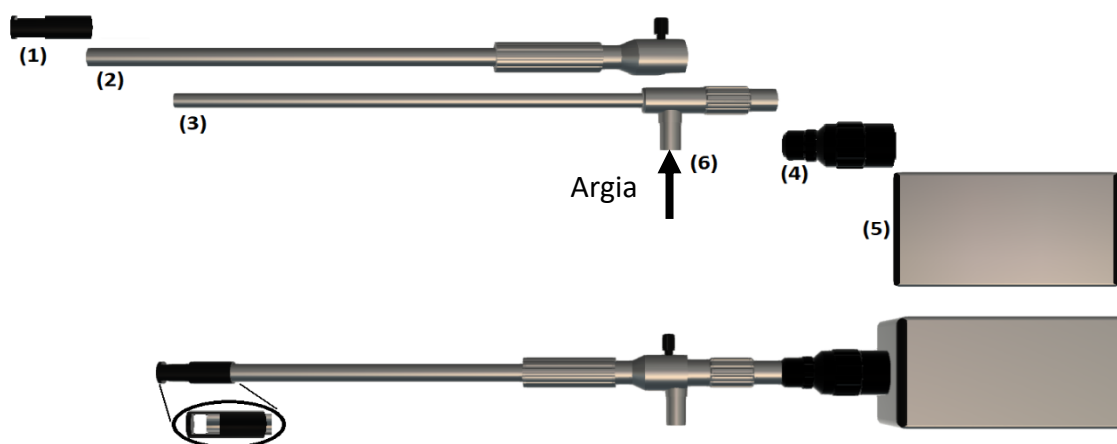
**3.4. Irudia.** Kontrol panelaren “Parametros” pantaila.

### 3.2. SISTEMA OPTIKOA

#### 3.2.1. Sistema optikoaren deskribapena

Honetaz gain, PIV metodoa aplikatu ahal izateko kamerak erabili dira. Kamerak bi teknika ezberdinez erabili daitezke, teknika intrusibo edo teknika ez-intrusiboa. Kontaktoretik kanpo dagoen kamera batek kontaktoreko paretetik jaisten diren partikulak grabatuz gero metodo ez-intrusiboa da, baina endoskopia baten bidez erreaktore barneko partikulak grabatzen badira, intrusiboa da. Kasu honetan metodo intrusiboa erabili da, izan ere, pilotu eskalako dimentsioak oso handiak dira endoskopiaarekin alderatuz eta honek sortzen duen perturbazioa arbuigarria da.

Lan honetan erabilitako kamerak dituen osagaiak 3.5 Irudian ikus daiteke, bertan sistema optikoa sei atalez osatuta dago: kamera, C-armazoi optika egokigailua, endoskopia, babes-hodia, espaziagailua eta argi iturri jarraia. Ondoren, azalduko da atal bakoitza banan-banan.



**3.5. Irudia.** Sistema optikoa osatzen duten atalak: espaziagailua (1), babes-hodia (2), endoskopia (3), C-armazoi optika egokigailua (4), kamera (5) eta argi iturri jarraia (6).

Erabilitako kamera S-PRI+ modeloa da AOS *technologies* AG enpresarena eta kamera honek 900x700 pixeleko gehienezko bereizmena du eta 16500 irudi segundoko gehienezko grabaketa abiadura (bereizmen murriztuan). Bereizmen onargarriko sakonera 0.8 cm-koa da eta endoskopia puntatik 5 mm-tara hasten da.

Kamera argi sentsoare bat da eta argi hori modifikatzeko C-armazoi optika egokigailua erabiltzen da. Hau kamerara harizatzen da eta optika aldatzea baimentzen du. Gainera, grabaketa plano desplazatu daiteke fokuratze sakonera guztian. Oso garrantzitsua da grabaketa plano ondo doitzea partikula solidoak bereizmen egokian grabatzeko, eta horrela, irudien tratamenduan partikulen detekzioa egokia lortzeko.

Bestalde, C-armazoi optika egokigailuari endoskopioa harizatzen zaio honen eginkizun bakarra grabaketa plano kontaktore barrura sartu eta neurtu nahi den zonaldera heltzea da.

Kontaktorean dauden partikula solidoen mugimenduak endoskopioaren lentea ez marratzeko babes hodi bat erabiltzen da, izan ere, endoskopioaren lentea beirazkoa da. Aldiz, babes hodiaren lentea zafirozkoa da.

Azkenik, partikula irregularrez sortutako ohanzeek arazoak ematen dituzte beraien distantzia endoskopioarekiko antzemateko, eta arazo hori konpontzeko espaziagailua erabiltzen da. Espaziagailua babes hodiaren puntan ezartzen da eta bere funtzioa grabaketa eremuaren sakonera mugatzea da.

### 3.2.2. Tratamendurako erabilitako kodigoa

1.8 Atalean azaldu bezala gunearen arabera bi kodigo erabili dira, alde batetik, gune dentsorako Farneback-en kodigoa; eta bestetik, alde diluituan, ikerketa taldeak sorturiko kodigoa gune diluiturako.

#### Gune dentsoa (Farneback)

Bibliografian hainbat metodo edo kodigo ezberdin aurki daitezke sistema optikoen bidezko partikulen jarraipen egiteko, baina gehienak korrelazio gurutzatua edo gune diluituetan erabiltzeko sortuak dira. Hortaz, ez dira baliagarriak eraztungunean behera doazen partikulen jarraipena egiteko, gune honetan solidoak multzoka edo *cluster* forman mugitzen baitira. Hortaz, Farneback-ek proposaturiko metodo matematikoa erabili da, izan ere, gune dentsoetako partikulak jarraitzeko eraiki baitzen.

Norabide lokalaren irudikapen egoki gisa norabide tentsorea erabili daiteke eta hau hiru dimentsiotan estimatzeko Farneback-en metodoa erabili da (Farneback, 2000, 2001). Metodo honen oinarria bigarren mailako polinomio baten seinalea lokalki (pixel auzotera bakoitzean) proiektatzean datza:

$$f(x) \sim x^T A x + b^T x + c \quad (1)$$

non A, b eta c seinalearen ponderatu kuadratikoen minimoen bidez kalkulatu diren, normalean funtzio gaussiana izanik.

Tentsoreen alde isotropikoa kendu ondoren, forma kuadratikoa kalkulatu behar dira:

$$Q_i = S_i^T T_i S_i \quad (2)$$

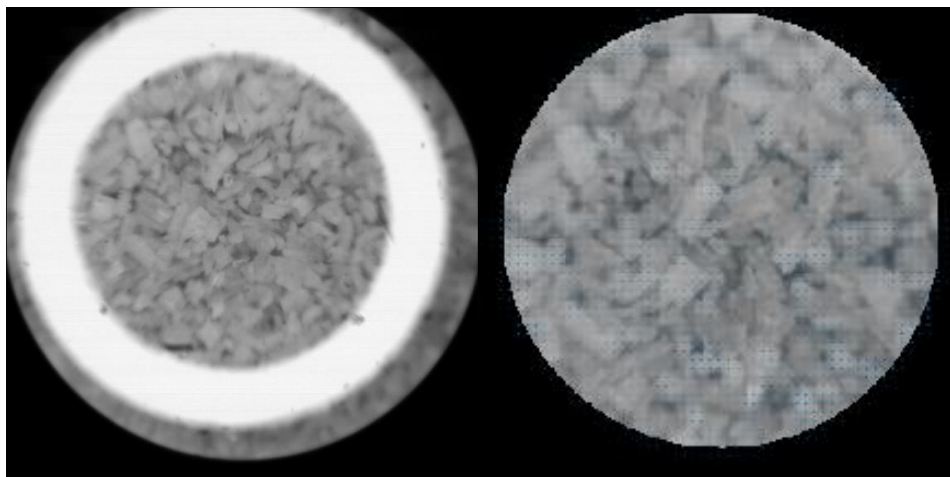
Forma koadratikoei batz besteko normalizatua aplikatzen zaie eta azkenik, abiadura estimaketak kalkulatu dira:

$$v = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_S \underbrace{\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ 1 \end{pmatrix}}_P \quad (3)$$

Jarraian azalduko da gune dentsoko (eraztunguneko) partikulen abiadura lortzeko jarraitu beharreko pausuak.

Aurretik aipatu bezala, eraztunguneko partikulak multzoan jaisten dira, eta hortaz, zafirozko lentearen parean mugitzen dira. Modu honetan, neurketa plano ezaguna da (zafirozko lentea) eta ez da beharrezkoa espaziagailuaren erabilera. 3.6a Irudian erakusten da lorturiko bideoaren frame bat. Bertan ageri den bezala, zafiroak sortzen duen argi isladapena lortzen da eta honen kolore edo intentsitate gradienteagatik ezabatzea komeni da (Farneback-en metodoak abiadura zirkularra dagoela neurtzen du). Hortaz, lorturiko irudi guztiak zafiroaren isladapenaren barruan geratzen den eremura mugatu edo mozten dira (3.6b Irudia).

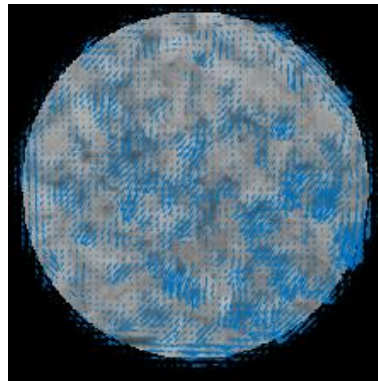
Behin frame guztiak prest daudelarik, Farnebacken kodigoa aplikatzen zaie eta kodigoa amaitutakoan trataturiko bideoeko partikulen batezbesteko abiadura itzultzen du. 3.7 Irudian erakusten da Farneback-en kodigoak frame baten kalkulatoriko partikula multzoen abiadura bektoreak.



**3.6. Irudia.** Frame gordina (a), argi isladapena kenduta eta errekorrea eginda (b)

Irudi sekuentzia bateko fotogramak pilatzerakoan bi espazio eta denborazko dimentsio bat duen espazio-denboradun irudi bolumen bat lortzen da eta irudi sekuentziako mugimenduak zenbait orientaziodun estrukturak eragiten ditu bolumenean. Adibidez, translazio puntu bat zuzen batean bihurtzen da, eta zuzenak bolumenean duen norabidea bere abiadurarekin bat dator.





**3.7. Irudia.** Farneback metodoa erabiliz lorturiko abiadura bektoreak.

### Gune diluitua

Bestalde, aurretik aipatu bezala, literaturan aurki daitezkeen PIV metodo guztiak ez dira egokiak gune diluituko partikulak jarraitzeko, izan ere, erabilitako optikagatik partikulen tamaina handia da lorturiko irudietan. Gainera, Farneback-en metodoa ere ez da baliagarria gune honetarako, partikula eta atzealdearen arteko intentsitate gradienteagatik abiadura okerrak estimatzen baititu. Hortaz, gune diluituan partikulak jarraitu ahal izateko ikerketa taldeak kodigo berri bat garatu du (Atxutegi eta kol., 2019).

3.8a Irudian erakusten da gune diluituan lorturiko bideoen frame bat adibide gisa. Lehendabizi, lortutako irudiko partikulei itxura edo morfologia biribila ematen zaie ondorengo pausu baten partikulak hobeto detektatzeko. Horretarako, disko formako matrize edo filtro bat sortzen da eta irudi gordinari aplikatzen zaio pixel bakoitzean. Lorturiko emaitza 3.8b Irudian erakusten da. Hurrengo pausuan ertzak topatu behar dira eta horretarako *edge* komandoa erabiltzen da. Honek, lehendabizi, gauss formako filtro bat pasarazten du irudiaren kontrastea handitzeko, hau da, intentsitate edo kolore gradienteak handitzeko. Hala ere, aukeratutako gauss kanpaiaren formaren arabera zarata sortuko da irudian. Behin kontrastea handiturik, ertzak edo kolore gradienteak aurkitzen dira *canny* komandoa erabiliz, baina *threshold* (muga) baxuak aukeratu behar dira solik kolore gradiente handienak topatzeko (partikula eta atzealdearen arteko kolore gradienteak dira interesatzen direnak). 3.8c Irudian ikus daitezkeen bezala, partikula eta atzealdearen arteko ertzak ez ezik beste hainbat ertz gutxi batzuk ere detektatzen dituela, azken hauek beharrezkoak ez direlarik. Orokorrean partikularen inguru guztia ez da ertz bezala detektatzen eta itxi gabeko partikula edo gorputzak lortzen dira. Horretarako, hasieran erabili den disko formako filtroa erabiltzen da irekita geratu diren ertzak ixteko (3.8d Irudia).



**3.8. Irudia.** Gune diluituko frame gordina (a), morfologia aldaketa (b), ertzen detekzioa (c) eta lorturiko eremu itxiak (d).

Behin partikulen ertzak detektatu eta eremu itxiak daudelarik, *bwboundaries* komandoa erabiltzen da eremu hauek detektatzeko. Komando honek aurkituriko eremu itxien azalera eta bakoitzaren zentroaren posizioa duen bektoreak ematen ditu. Hala ere, detektaturiko eremuak/partikulak egokiak direla ziurtatzeko azalera tarte bat finkatzen da eta tarte honetan dauden eremuak hartzen dira soilik kontuan.

Orain arte aipaturiko irudiaren tratamendu guztia lehengo bi frame-eri aplikatzen zaie eta behin bi frame-tan lorturiko partikulen posizioak jakinak direla bikoteak osatu behar dira, hau da, partikula bakoitza bi frame-tan zein den jakin behar da. Grabaketa abiadura oso handia denez partikulen mugimendua frame batetik bestera oso txikia da, eta hortaz, buruturiko desplazamendua ere. Hori dela eta, partikula bakoitzarentzat aurreko frame-ko partikula bakoitzarekin duen distantzia minimizatu behar da:

$$d = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4)$$

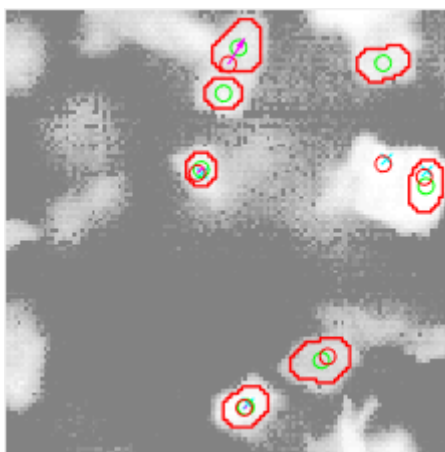
non,  $x$  eta  $y$  partikularen zentroaren posizioa diren.

Hortaz, partikula bat frame batetik bestera burutu duen distantzia jakinda (denbora grabaketa abiaduratik lor daiteke) abiadura kalkulatu da. Hala ere, kasu batzuetan gerta daiteke partikula bat ez detektatzea hurrengo irudian, edo alderantziz, eta kasu hauetan kodigoak partikula ezberdinak parekatzea. Kasu hauetan, lorturiko abiadura bektorea ez da egokia (errealitatean denaren baino handiagoa da) eta hau ekiditeko distantzia balore maximo bat esleitzen da.

Hortaz, behin partikulen posizioa eta abiadura jakinda, hirugarren frame-an izango duten posizioa estimatzen da eta detektaturikoen posizioarekin duten distantzia kalkulatu da. Modu honetan, bikoteak egiteko prozesua optimizatzen da, izan ere, estimazio honekin parekatu ez direnak lehen komentaturiko prozesuaren bidez parekatzen dira. Hori dela ete, beste distantzia maximo balore bat esleitzen da, baina kasu honetan aurrekoarena baino txikiagoa (auresandako partikularen posizioa detektaturikoarengandik oso hurbil aurkitzen baita).

Azkenik, gune diluituan abiadura aldaketa bortitzak ematen dira (eratzunguneko fluktuazioak bezala) eta bikoteak egiteko bi prozesuen distantzia maximoa aldaketa hauetara egokitzeko partikulen azelerazioa erabiltzen da. Horretarako, hamargarren frame-tik aurrera azelerazioaren batezbestekoa kalkulatu da eta honen arabera aipaturiko distantzia maximoen balioak aldatzen joaten dira.

Hortaz, orain arte aipaturiko irudien tratamendu eta buruturiko kalkuluak bideoaren frame guztietara aplikatzen dira eta frame bakoitzean lorturiko partikula guztien abiaduraren batezbestekoa egiten da frame bakoitzaren abiadura lortuz. Behin frame bakoitzaren abiadura jakina dela, frame guztien batezbestekoa egiten da (gune diluituan 41250 eta dentsuan 8100 frame) bideoko partikulen abiadura netoa lortuz. Hala ere, neurketa posizio bakoitzean hiru bideo grabatzen dira, eta hortaz, hiru bideoen batezbestekoa egiten da iturri ohandaren posizio bakoitzeko abiadura netoa lortuz. 3.9 Irudian erakusten da 3.8a Irudiko frame-ko partikulek duten abiadura eta buruturiko desplazamendua aurreko frame-arekiko.



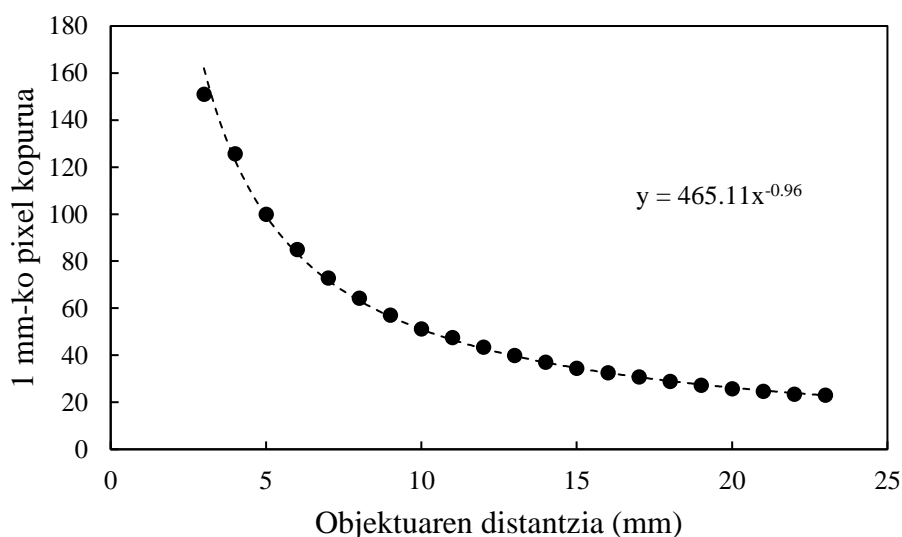
**3.9. Irudia.** Frame baten parekatze prozesua.

non, borobil gorri handiak detektaturiko partikulak, borobil berdeak partikulen zentro aktualak, borobil gorri txikiak aurreko frame-ko partikulen zentroak, ixa urdinak auresandako partikulen zentroak eta geziak abiadura bektoreak diren.

### 3.2.3. Neurketa planoaren kalibraketa

Esperimentuak burutzen diren momentuan erabiliko diren elementuen funtzionamendu egokia ziurtatu behar da. Horregatik, lan honetan neurketa planoaren kalibraketa burutu da.

Kamerarekin bereizmen desberdina lortu daiteke C-armazoa erabiliz. Bereizmen egokiena zein den finkatzeko hainbat proba egin dira objektuaren hainbat distantzia ezberdinetara 1 mm-ren pixel kopurua neurtuz. 3.10 Irudian erakusten dira neurketa hauetan lortutako emaitza.



**3.10. Irudia.** 1 mm-ren pixel kopurua neurketa plano ezberdinetarako.

3.10 Irudian ikusten den moduan, neurketa plano zenbat eta hurbilago izan pixel kopurua handiagoa izango da, eta oster, hurrentzen den heinean pixel kopurua txikitzen da. Zafiroak sortutako isladapenaren azalera irudian eta partikulen tamaina egokiaren arabera, distantzia

egokiena 7 mm da, 1 mm-rako pixel kopurua 73 izanik. Garrantzitsua da aipatutako distantzia mantentzea esperimentu guztietan zehar, gero irudiak prozesatzerako orduan errorerik ez emateko, izan ere, erabilitako algoritmoak finkatuta dauka pixel kopurua eta bere tamaina.

### 3.2.4. Errorearen kalibraketa

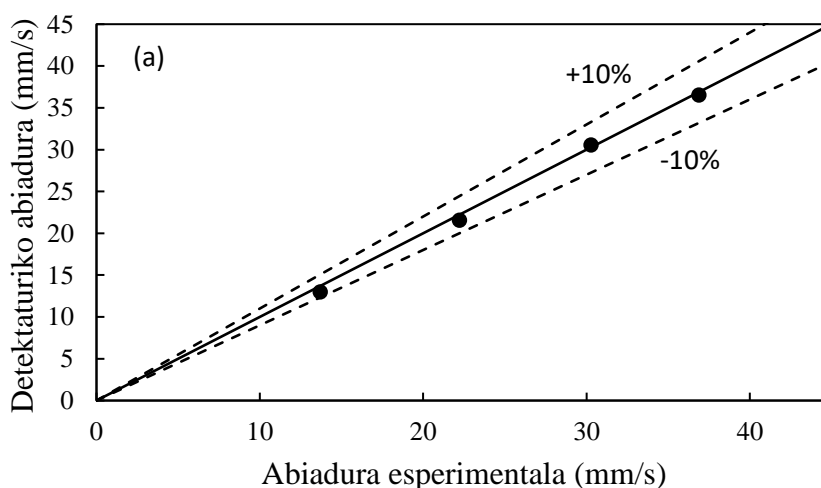
Partikulen tratamendurako bi kodigo ezberdin erabili dira, bat alde dentsorako eta bestea alde diluiturako. Hortaz, emaitzak aurkeztu aurretik garrantzitsua da bi kodigoen funtzionamendu egokia ziurtatzea eta dagokien errorea neurtzea.

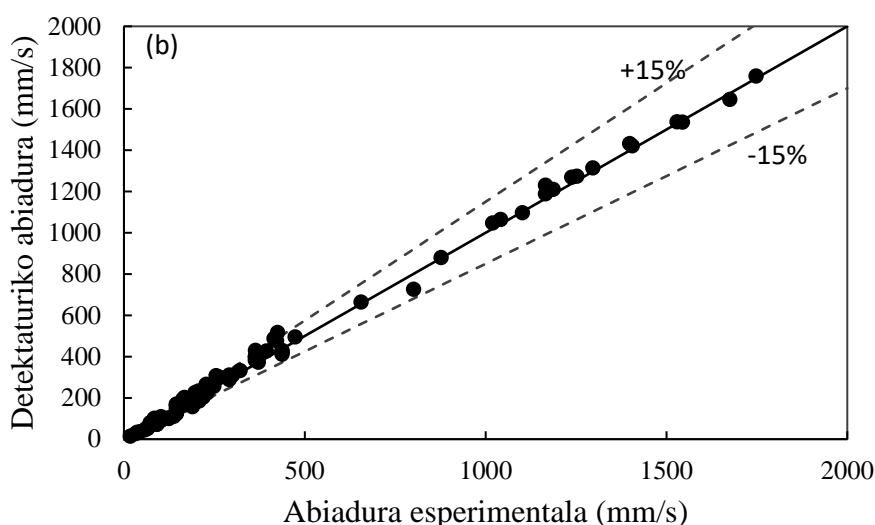
Alde dentsorako partikula multzo batek duen jaitsiera abiadura neurtzen da. Horretarako, beheko irteera itxita duen hodi bertikal bat zerrautsaz betetzen da eta beheko irteera irekitzean partikulen jaitsiera grabatzen da hodiaren azpiko zatian. Partikulak azeleratu egiten dira hasierako unean, baina ondoren abiadura konstante batean jaisten dira. Jaitsiera abiadura aldatzeko irteerako 4 diametro ezberdin erabili dira.

Behin bideoak grabaturik, bakoitzean hainbat partikula jarraitzen dira eskuz (distantzia pixedetan eta denbora frame-tan) eta abiadura hauen batezbestekoa kodigoak ematen duenarekin alderatzen da. 3.11a Irudian erakusten da 4 grabaketen emaitzak..

Alde diluituaren kasuan, errorea modu ezberdinean lortzen da. Hasteko, kodigoak ematen digun bataz besteko abiadura ezagutzeko tratamendua frame batetik bestera egiten da, frame bakoitzean partikulen posizioa eta beraien abiadura jakinda. Ondoren, bideo originalak hartuz, *Matlab*-ek erabilitako frame berdinetan partikula berdinen abiadurak kalkulatu dira eskuz. Horretarako frame batetik bestera egindako distantzia kontuan hartzen da, hau da, mugitu diren pixel kopurua.

Horrela, kodigo bakoitzean pixel bakoitzaren distantzia erreala milimetrotan jakinda eta frame batetik bestera igarotako denbora ezaguna delarik, abiadura lortzen da. 3.11 Irudian bi guneen kodigoaren errorea erakusten da.





**3.11. Irudia.** Partikula finentzako erabilitako kodigoen errorearen kalibraketa, gune dentso (a) eta diluiturako (b).

3.11 Irudian erakusten den bezala, gune dentsorako Farneback-en metodoak modu egokian neurtzen du partikulen abiadura, izan ere, errorea % 10 baino txikiagoa baita.

Bestalde, alde diluituan, abiadura altuetan kodigoa zehatza den arren, abiadura txikietan errorea handitzen da. Horren, arrazoi nagusia partikulen errotazioa da, izan ere, partikulak gune diluituan errotazio mugimendua erakusten dute eta honek zentroaren desplazamendua sortzen du, benetakoak ez diren desplazamenduak sortuz. Hala ere, lorturiko errorea %15 baino txikiagoa da.

### 3.3. BALDINTZA ESPERIMENTALAK

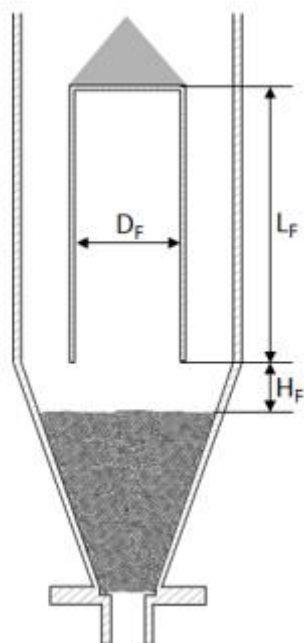
Burututako esperimentuetan kontaktore bakarria erabili dira, bere ezaugarriak eta dimentsioak 3.1 taulan ikusten direlarik.

**3.1. Taula.** Esperimentuetarako erabili diren aldagaiak eta hauen balioak.

Aldagaia	Balioa
$\gamma$ (°)	36
$H_0$ (m)	0.2
$D_F$ (m)	0.2
Barne hodia	HG, IH, HEP
$D_0$ (m)	0.04
$D_i$ (m)	0.062
$H_C$ (m)	0.45
$D_C$ (m)	0.36
$H_F$ (m)	0.06
$L_F$ (m)	0.5

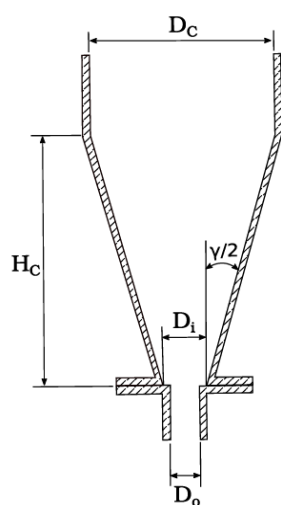
non,  $\gamma$  kontaktorearen angelua,  $H_0$  ohandzearen altuera,  $D_F$  iturri bilgailuaren diametroa, HG hodirik gabeko sistema, IH irekiduradun hodidun sistema, HEP hodi ez-porotsudun sistema,  $D_0$  airearen sarrerako diametroa,  $D_i$  kontaktorearen oinarriaren diametroa,  $H_C$  kontaktorearen zati konikoaren altuera,  $D_C$  zati zilindrikoaren diametroa,  $H_F$  iturri bilgailuaren behealdearen eta ohandzearen gainazalaren arteko distantzia da eta  $L_F$  bilgailuaren luzera diren.

3.12 Irudian iturri bilgailuaren faktore geometriko garrantzitsuenak ikus daitezke.



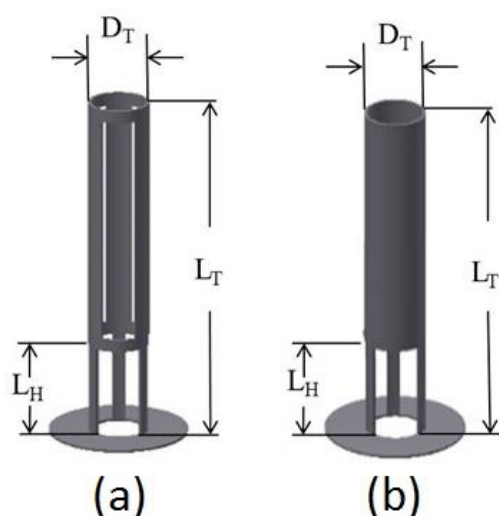
**3.12. Irudia.** Iturri bilgailuaren faktore geometrikoak.

3.13 Irudiak erabilitako kontaktorearen faktore geometriko desberdinak aurkezten ditu.



**3.13. Irudiak.** Kontaktorearen faktore geometrikoak.

Esperimentuetan erabilitako hodian ezaugarriak 3.14 Irudian ikusten dira.



**3.14. Irudia.** Irekiduradun hodia (a) eta hodi ez-porotsuaren (b) faktore geometrikoak.

Hurrengo 3.2 Taulan erabilitako hodiaren ezaugarriak aurkezten dira.

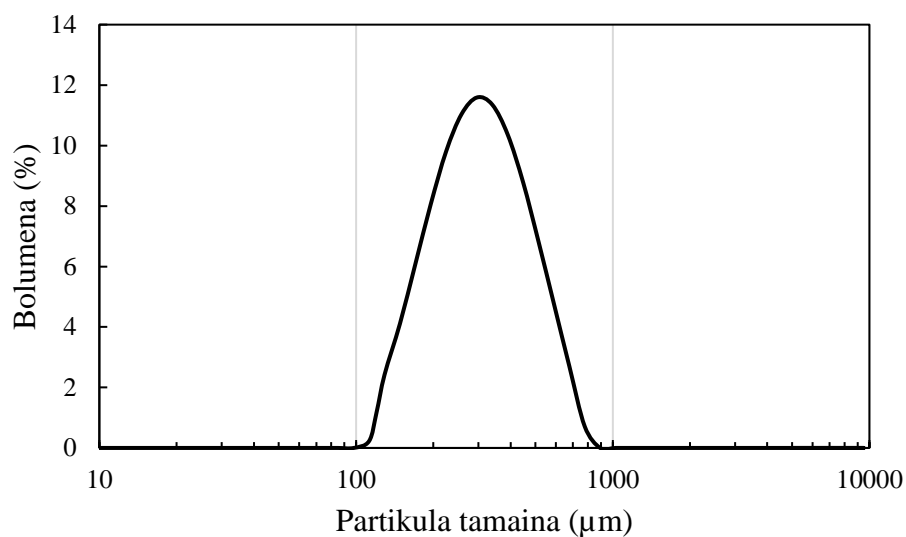
**3.2. Taula.** Erdiko hodiaren ezaugarriak.

Faktore geometrikoa	Irekiduradun hodia	Hodi ez-porotsua
$L_T$ (m)	0.2	0.2
$D_T$ (m)	0.04	0.04
$L_H$ (m)	0.07	0.07
IP (%)	57	-

non  $L_T$  barne hodiaren altuera,  $D_T$  hodiaren diametroa,  $L_H$  hankaren altuera, eta IP hodiaren irekidura portzentaia izango den, ehunekoetan adierazita.

### 3.4. MATERIALAREN KARAKTERIZAZIOA

Lan honetan erabilitako materiala pinu zerratsa izan da, lorturiko pinu zerratsak tamaina distribuzio oso zabala zuen eta bibrazio bidezko bahegailua erabiliz 0.2-0.3 mm-ko frakzioa aukeratu da. Frakzio honi dagokion partikula tamaina distribuzioa 3.15 Irudian erakusten da. Zerratsaren partikulak oso irregularrak dira eta gainera, zuntz itxurakoak dira. Hori dela eta, Mastersizer 2000 ekipoa erabiliz lorturiko distribuzioa oso zabala da eta honek kalkulaturiko batez besteko partikula tamaina  $344.096 \mu\text{m}$ -koa da.



**3.15. Irudia.** 0.2-0.3 mm zerrautsa frakzioaren partikula tamaina distribuzioa Mastersizer 2000 ekipoaren bidez.

Bestalde, zerrautsaren dentsitate erreala neurtzeko Micrometrics-en ASAP 2010 ekipo bolumetrikoa erabili da. Lorturiko emaitza  $496 \text{ kg/m}^3$  izan da. Honekin batera ohantzearen dentsitatea ere neurtu da, hau da, solidoek eta poroek duten bolumena kontuan hartuz. Horretarako, probeta batean zerrautsak bolumen jakin batean duen masa neurtu da,  $331 \text{ kg/m}^3$ -ko ohantze dentsitatea lortuz. Bi datu hauek jakinda posible da ohantzearen porositatea neurtzea, kasu honetan 0.8-ko balorea lortuz. Zerrautsaren partikula tamaina eta dentsitatea jakinda Geldart-en A sailkapenari dagokiola ondorioztatzen da.



#### 4. EMAITZAK

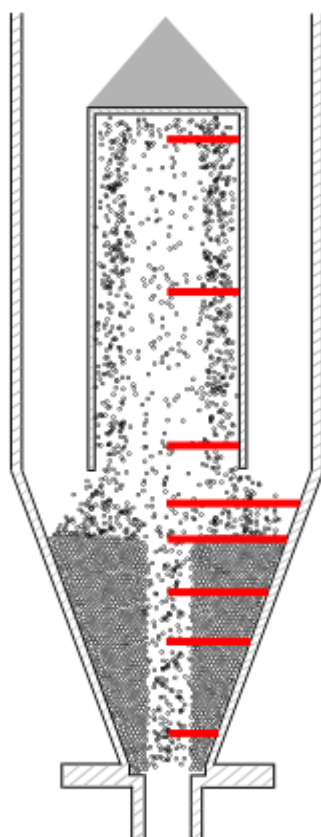
Gradu amaierako lan honetan, gas-solido kontaktua eskaintzen duten ekipoetan partikula finen jarraipena egin da PIV metodoa erabiliz. Horretarako, sisteman bilgailua erabili da eta barne hodian konfigurazio ezberdina erabili da, hau da, hodiрик gabe (HG), irekiduradun hodia (IH) eta hodi ez-porotsua (HEP). Partikula fin moduan pinu zerrautsa erabili da 0.2-0.3 mm-ko diametroa duena.

Esperimentu guztietan erabilitako kontaktorea 36°koa izan da eta ohandzearen altuera 0.2 m-koa. Bestalde, kameraren kalibraketan 7 mm-ko distantzia aukeratu da, bere pixel kopurua 73 izanik.

Lehendabizi, konfigurazio ezberdinen abiadura fluktuazioa aztertu da eta jarraian profil erradialak eta axialak. Ondoren, iturriaren forma eta profil erradialen eboluzioa eta emariaren eragina ere ikusi da. Azkenik, hiru konfigurazioen konparaketa egin da bero mapak erabiliz.

Esperimentuak burutu ahal izateko erabilitako emariak desberdinak izan dira konfigurazio bakoitzerako. Hodiрик gabeko kasuan, abiadura minimoa, hau da, iturria sortzeko behar den airearen abiadura minimoa,  $Q=11.5 \text{ m}^3/\text{h}$  da. Bestalde, emari altua  $Q=32 \text{ m}^3/\text{h}$  erabili da. Bestetik, irekiduradun hodiaren kasuan, abiadura minimoa,  $Q=6.5 \text{ m}^3/\text{h}$  da eta emari altua  $Q=18 \text{ m}^3/\text{h}$  da. Azkenik, hodi ez-porotsuen kasuan, abiadura minimoa  $Q=6 \text{ m}^3/\text{h}$  da eta kasu honetan bi emari altu erabili dira,  $Q=12 \text{ m}^3/\text{h}$ -koa eta bestea,  $Q=18 \text{ m}^3/\text{h}$ -koa.

Lortutako datuak kontaktorearen altuera zehatzetan egin dira. Altuerak, 0.030 m, 0.113 m, 0.155 m, 0.200 m, 0.305 m, 0.530 m eta 0.730 m izan dira eta datuak, orokorrean, zentimetroka hartu dira. Hau da, altuera batean paretatik ardatzeko distantziara arte zentimetroka datuak hartu dira, horrela profil ezberdinak lortuz. 4.1 Irudian neurtutako posizioak ikus daitezke.



#### 4.1. Irudia. Kamerarekin iturri ohantzean neurturiko posizioak.

Aurreko ataletan azaldu den bezala, oso garrantzitsua da bereizmen egokia aukeratzea, gero partikulak ondo ikusteko eta prozesaketa egokia izateko. Horregatik, kameraren parametro ezberdinak erabiltzen dira neurtu beharreko gunearen arabera, hau da, gune dentsoa edo eraztungunea, edota, gune diluitua edo iturgunea eta iturria. Kasu batetik bestera hurrengo parametroak aldatzen dira: irudiaren neurriak (pizeletan), grabaketa abiadura (irudi/segundo) eta sentsorearen esposizio denbora edo *shutter time* (segundotan).

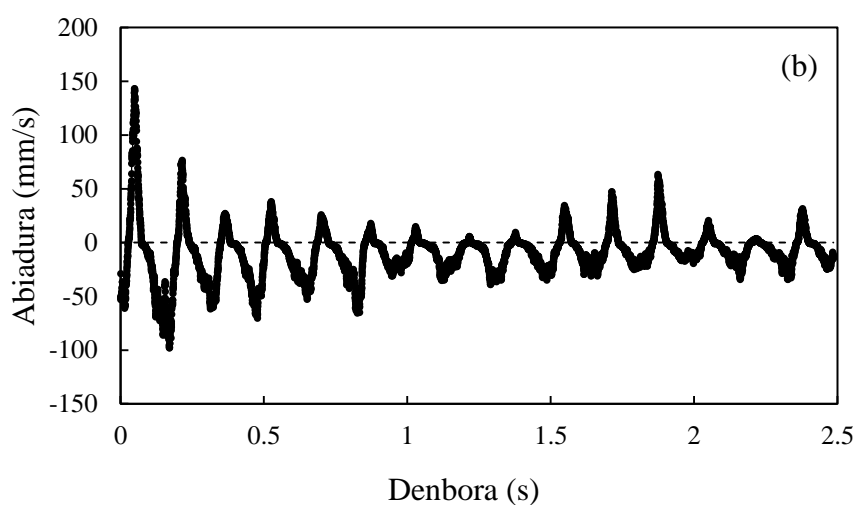
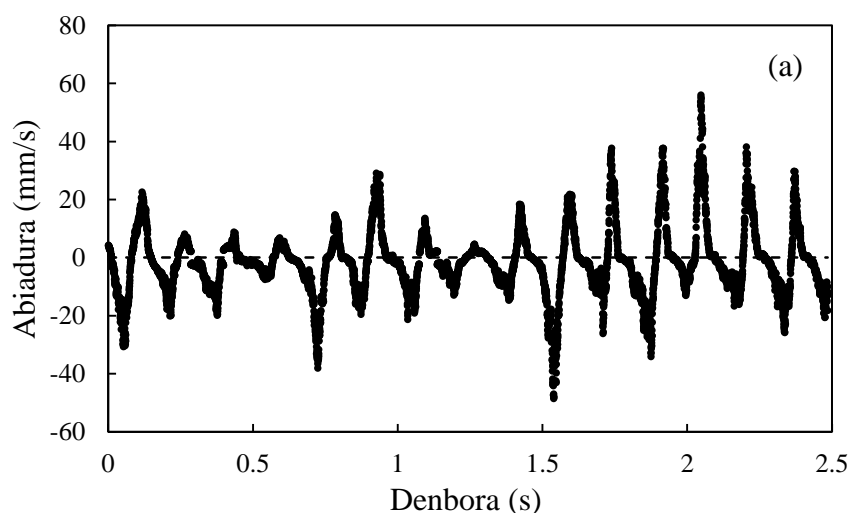
Eraztunguneko porositatea oso txikia da eta solidoak multzo handi batean jaisten dira, guztiak abiadura berdinean jaitsiz. Hori dela eta, iturri ohantzearen zonalde honetan solidoek abiadura txikia erakusten dute (milimetro gutxi batzuk segundoko) eta ez da beharrezkoa grabaketa abiadura oso handia erabiltzea. Kasu honetan erabiltzen den grabaketa abiadura 3259 irudi segundokoa da eta 400x400 pizeleko irudi tamaina erabiltzen da, 105  $\mu$ s-ko shutter denbora erabiliz.

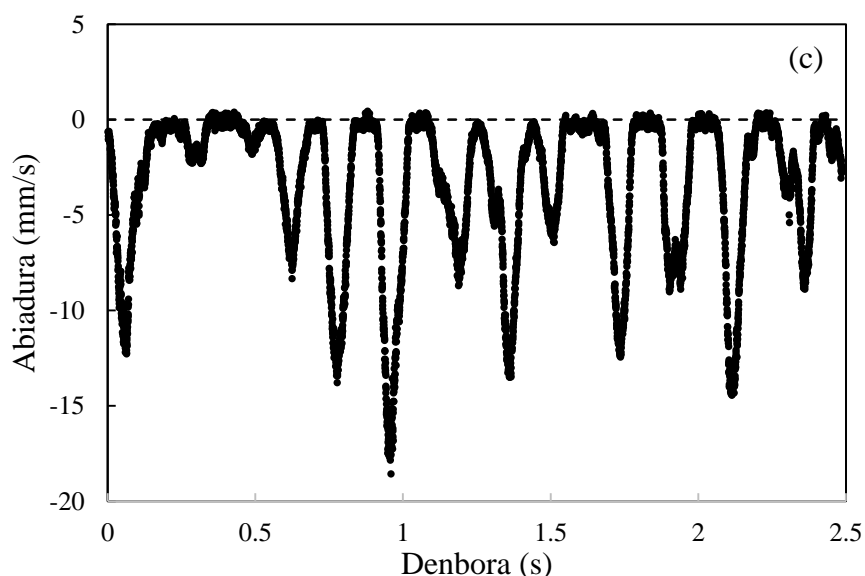
Bestalde, iturgune edo iturriko solidoen abiadura neurtu nahi bada parametroen balioak aldatu behar dira. Iturri ohantzearen gune hauetan partikulak, orokorrean, indibidualki mugitzen dira eta ondorioz, partikulen abiadura askoz handiagoa da (metro gutxi batzuk segundoko), eta baita porositatea ere. Hortaz, zonalde hauetan guztiz beharrezkoa da grabaketa abiadura handiena erabiltzea, hau da, 16500 irudi segundoko. Kasu honetan, 125x125 pizeleko irudiak erabili dira eta 30  $\mu$ s-ko shutter denbora. Gainera, bi kasuetan grabaketa denbora 2.5 segundokoa izan da.

Behin neurketak buruturik, bideo guztiak avi formatura bihurtu behar dira partikulen jarraipenerako tratamenduan erabiliak izateko.

#### 4.1. ABIADURA FLUKTUAZIOAK

Sarreran azaldu bezala, iturri ohandze konikoko partikulek mugimendu ziklikoa erakusten dute. Kontaktorean gasa sartzean, partikulak hedatu egiten dira eta iturria sortzen da. Bertan partikulak igo egiten dira eta iturburura heltzean forma parabolikoan ohandzera erortzen dira. Horrela, partikulak ohandzean zehar jaitsiko dira eta gero, berriro iturrian sartuko dira zikloa burutuz. Horregatik, ohandzea osatzen duten partikulek eraztungunean joera beherakor uniforme dutela pentsa daiteke, baina praktikan hori ez da horrela gertatzen. 4.2 Irudian ikus daitekeen moduan, partikulek gora-beherako joera beherakorra egiten dute (hodi ez-porotsudun sistemetan izan ezik). Izan ere, 4.2 Irudian erakusten den bezala, iturri ohandzeek ez dute jarraian operatzen, hau da, maiztasun handiko pultsotan baizik. Horren adierazle garbia abiadura fluktuazioak dira, eraztunguneko partikulek ez baitute abiadura konstantea erakusten, hau da, eraztungunean behera azeleratuz eta dezeleratuz doaz. Jarraian, lortutako datuak emaria minimoa den kasuan lortu da.





**4.2. Irudia.** Abiadura fluktuazioa hodirik gabe (a), irekiduradun hodia (b) eta hodi ez-porotsua (c) erabiliz.

Orokorrean, ikus daiteke hodirik gabeko eta irekiduradun hodietan ohantzearen joera ez dela bakarrik beherakorra, baizik eta gorakor joera duela ere (nahiz eta abiadura netoa kasu guztietan negatiboa izan). Joera hori oso esanguratsua da hodirik gabeko konfigurazioan, izan ere, bertan lortutako balioak handiak dira eta gainera, balio positibo esanguratsuak dira, nahiz eta azkenean, abiadura netoa negatiboa izan. Bertan, abiadura pausa txiki bat duela ikusten da eta joera honen arrazoi nagusia, perkolazioa da. Bertan, airea ohantzeko partikulen zehar zabaltzen da eta partikulak laxatzen ditu, beraien mugimendua erraztuz. Perkolazioa handia bada, mugimendua handiagoa da eta horrek, bero-transferentzia eta solido-gas transferentzia errazten du. Beraz, perkolazioa komenigarria da, erreakzioaren efizientzia hobetzeko.

Irekiduradun hodia aztertuz, ikusten da balio positiboak ere lortzen direla, eta bertan lortzen diren abiadurak hodirik gabeko sistemaren antzekoak dira.

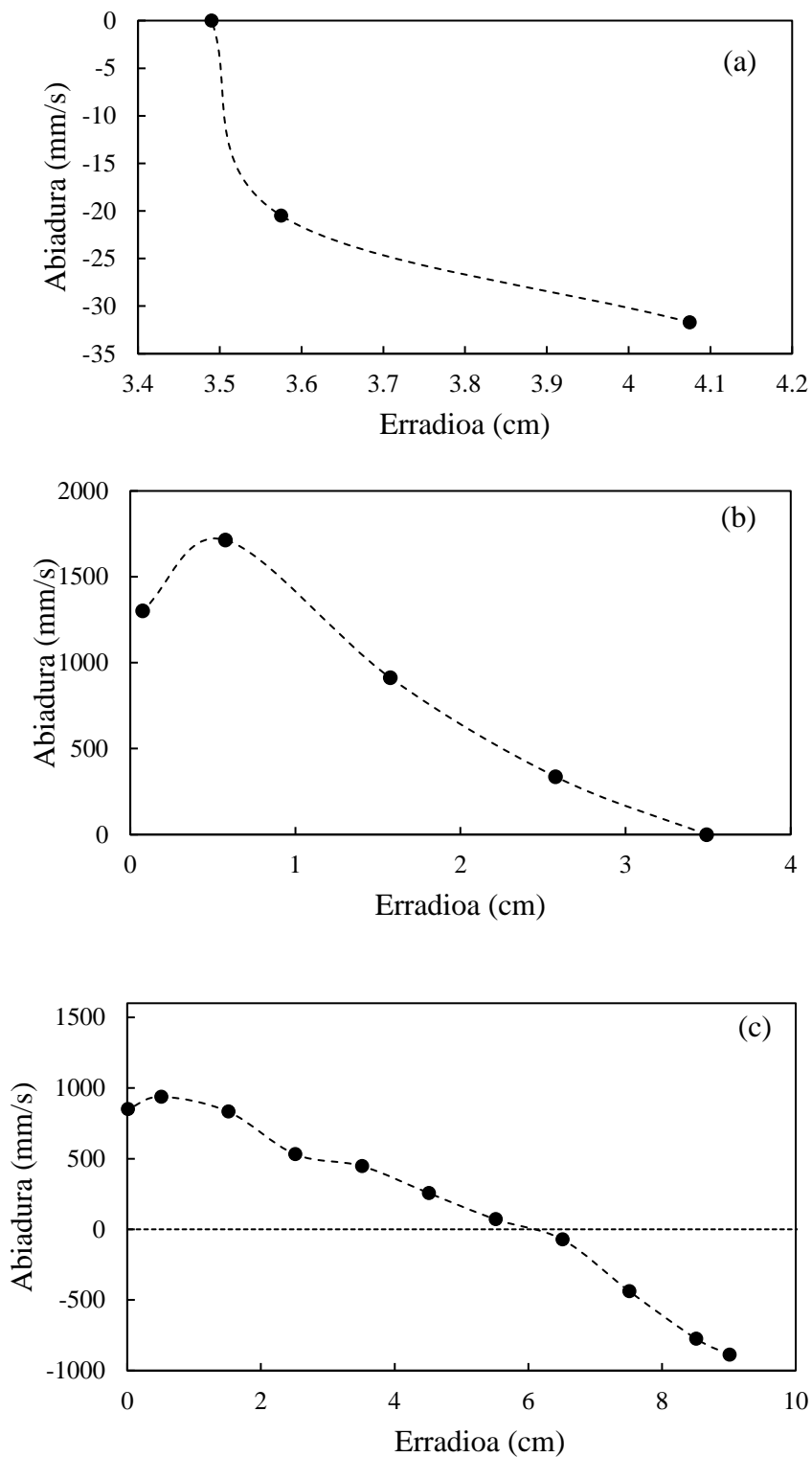
Hodi ez-porotsuak erabiliz, ez dira balio positiborik lortzen eta gainera, lortutako balio negatiboak txikiak dira. Hodi ez-porotsuak, irekiduradun hodia baino hobeto bideratzen du airea, hortaz, perkolazioa txikiagoa da eta mugimendua ere bai. Izan ere, konfigurazio honetan airearen frakzio gehiena iturgunetik igotzen da eta eraztungunera sartzeko dena oso txikia da. Hori dela eta, eraztungunera sartzeko den airea ez da gai partikulak arrastatzeko (horregatik ez dute abiadura gorakorrik). Horren arazoa da, bero-transferentzia eta solido-gas transferentzia txikiagoa dela beste konfigurazioekin konparatuz.

#### 4.2. PROFIL ERRADIALAK

Abiadura profilak eraikitzeke, aurretik komentatutako altueratan zentimetroka abiaduren datuak hartuz egin dira. Nahiz eta neurketak konfigurazio eta emari ezberdinetarako burutu diren, konfigurazio eta profil bakoitzerako (eraztungune, iturgune eta iturrirako) altuera bat irudikatu da adibide gisa. Adibide bezala jarritako profilak abiadura minimoan kalkulaturakoak izan dira hiru konfigurazioetan eta eraztungunea zein iturgunea 0.030 m-ko altuerari dagokiona, eta iturria 0.305 m-ko altuerari dagokiona. Beraz, hiru irudi erakusten dira konfigurazio bakoitzerako, bat eraztungunea, bestea iturgunea eta azkenik, iturria.

### 4.2.1. Hodirik gabe

4.3 Irudian hodirik gabeko konfigurazioaren eraztunguneko, iturguneko eta iturriko profil erradialak ikus daitezke.



**4.3. Irudia.** 0.030 m altuerako eraztungunea (a), iturgunea (b) eta 0.305 m altuerako iturriko (c) abiadura profil erradialak.

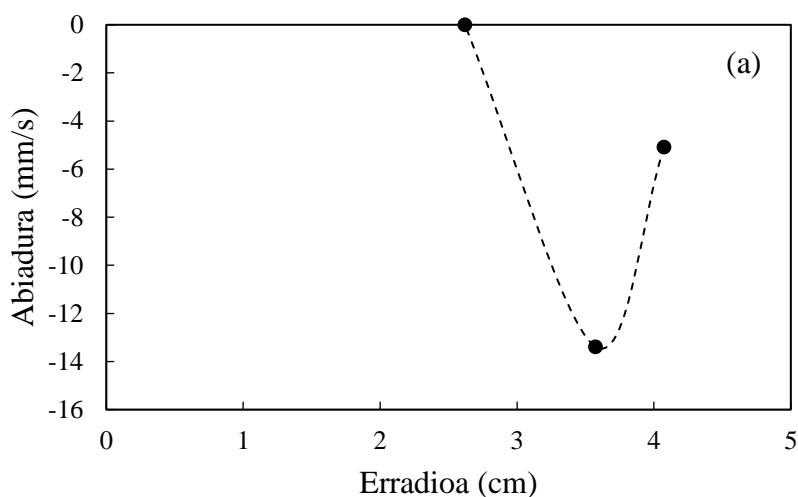
Hasteko, eraztungunearen kasuan (4.3a Irudia), ikusten da kontaktorearen paretan abiadura negatibo handiena dagoela eta ardatzerantz hurbildu ahala abiadura negatiboa txikitu egiten dela. Hodirik gabeko sistemetan airearen perkolazio handia ematen da eraztungunean zehar eta kontaktorearen paretarantz hurbildu ahala iturriaren eragina eraztungunean txikiagoa da. Hori dela eta, kontaktorearen paretatik hurbil lortzen da abiadura negatibo handiena. Bestalde, eraztungunean ardatzerantz hurbiltzen goazen heinean balio negatiboak txikiagoak dira.

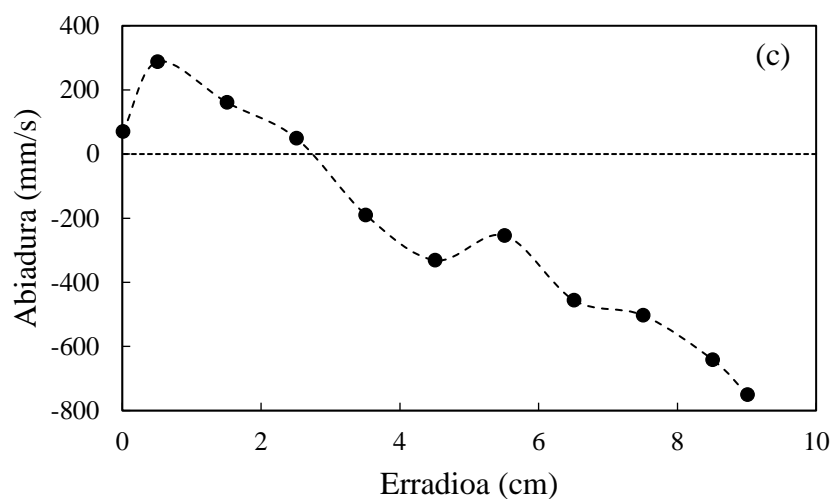
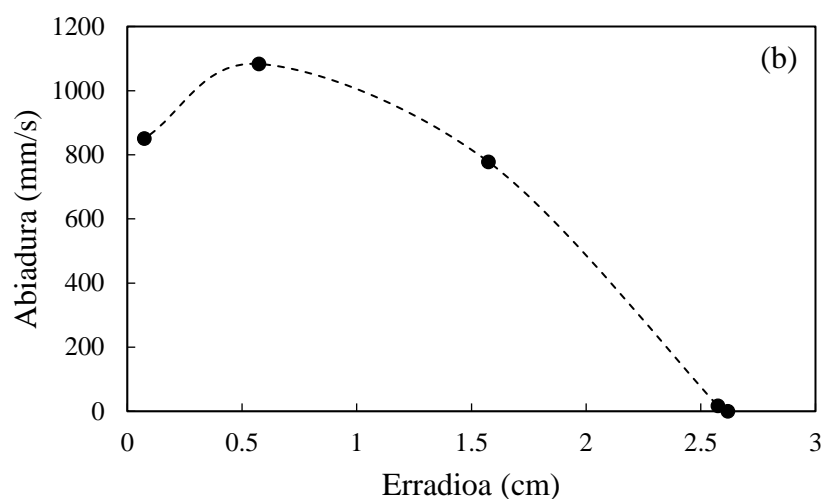
Iturgunearen kasuan, ardatzera hurbiltzen garen heinean abiadura handituz doa, hala ere, 4.3b Irudian azaltzen den bezala, abiadura balio handiena ez da kontaktorearen ardatzean lortzen, baizik eta 5 mm-tora. Joera berdina lortzen du He-k eta kol. (He eta kol., 1994).

Iturrian oster (4.3c Irudia), nahiko joera lineala lortzen da. Bilgailuaren paretean solidoek mugimendu beherakorra dute balio maximoa erakutsiz, eta ardatzerantz hurbildu ahala abiadura negatibo txikiagoak erakusten dute. Ardatzetik 65 mm ingurura iturri periferiaren trantsizioa aurkitzen da, bertan abiadura netoa nulua baita eta ardatzerantz hurbiltzen jarraituz gero solidoek abiadura positiboa erakusten hasten dira. Abiadura positiboa handituz doa ardatzetik 5 mm inguru arte, bertan abiadura positibo maximoa lortzen delarik, ardatzean abiadura pixka bat txikituz.

#### 4.2.2. Irekiduradun hodia

4.4 Irudian irekiduradun hodi konfigurazioaren eraztunguneko, iturguneko eta iturriko profil erradialak erakusten dira





**4.4. Irudia.** 0.030 m altuerako eraztungunea (a), iturgunea (b) eta 0.305 m altuerako iturriko (c) abiadura profil erradialak.

Hodirik gabeko sistemetan ez bezala, irekiduradun hodiak erabiltzean abiadura negatibodun maximoa bat lortzen da eraztunguneko abiadura profilean. Kasu honetan, erdiko hodiak ohantzeak eragiten duen presioa partzialki jasaten du eta irekidura portzentaia dela eta, airearen perkolazioa eraztungunean hodirik gabeko sistemetan baino txikiagoa da. Hortaz, kontaktorearen paretatik hurbil abiadura negatibo txikiak lortzen dira, baina ardatzerantz hurbildu ahala (eta perkolazioaren eraginaz) solidoen abiadura negatiboa handituz joaten da maximo bat lortu arte. Hala ere, iturgunean gora doazen solidoen eraginagatik interfasetik hurbil dauden eraztunguneko solidoen abiadura txikituz joaten da ardatzerantz hurbildu ahala. Bestalde, 4.4a eta 4.3a Irudiak alderatuz gero, argi geratzen da hodirik gabeko sistemek abiadura handiagoak erakusten dutela, honen arrazoi nagusia perkolazioa delarik.

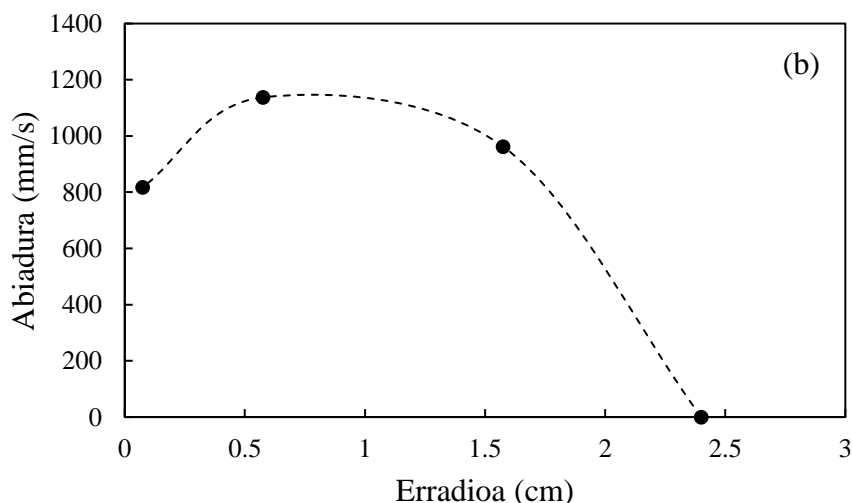
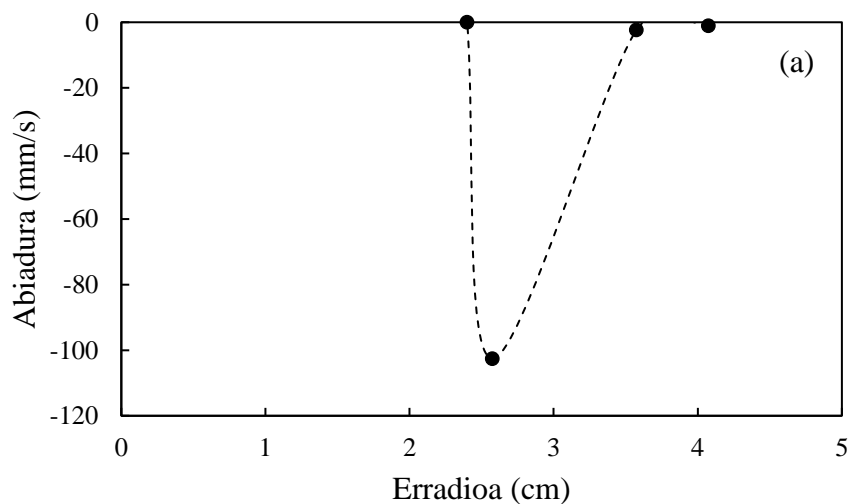
4b Irudian erakusten den bezala, iturgunean lortzen den profila hodirik gabeko (4.3b Irudia) sistemen antzekoa da. Hau da, interfasetik ardatzerantz hurbildu ahala solidoen abiadura (positiboa) handituz doa maximo bat lortu arte, eta hortaz, ardatzean abiadura pixka bat txikitzen da. Bestalde, bi sistemek erakusten dute abiadura maximo antzekoak (hodirik gabeko

sistemek apur bat handiagoa izanik), baina hodirik gabeko sistemek abiaduraren igoera zorrotzagoa erakusten dute. Hau da, irekiduradun hodiaren sistemetan iturgunean lortzen diren abiadurak orokorrean hodirik gabekoaren baino handiagoak dira (kurbaren beheko azalera handiagoa da irekiduradun sistemetan). Honen arrazoia perkolazioan datza, izan ere, irekiduradun sistemetan kontaktorerara sartzen den airearen frakzio handia bat iturgunetik igotzen da eta profil erradial osoan orokorrean solidoaren abiadura handiagoak lortzen dira.

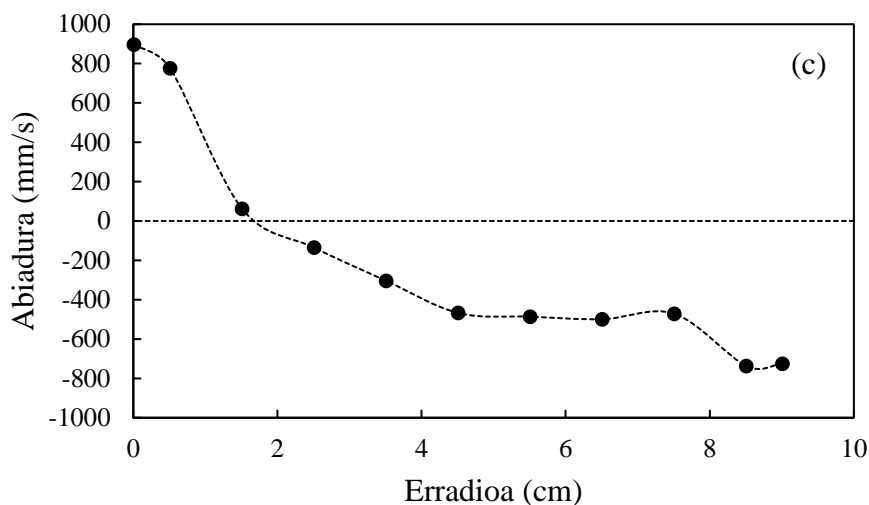
Azkenik, 4.4c Irudian ageri den bezala, iturriko abiadura profila oso lineala da, nahiz eta ardatzetik 55 mm-tara dagoen neurria joeratik kanpo egon. Hodirik gabeko sistemetan bezala, ardatzetik 5 mm-tara abiadura maximo positiboa lortzen da, baina iturriaren periferiaren trantsizioa ardatzetik hurbilago dago irekiduradun sistemetan (25 mm irekiduradun hodiarekin eta 60 mm hodirik gabe). Izan ere, aurretik aipatu bezala, irekiduradun hodiak ohantzea jasaten du partzialki eta honek eragiten du hodiak iturgunearen forma portzentaia baten mugatzea. Hori dela eta, lorturiko iturria estuagoa eta altuagoa izango da irekiduradun hodietan.

### 4.2.3. Hodi ez-porotsua

Profil erradialekin bukatzeko, 4.5 Irudian hodi ez-porotsudun konfigurazioaren eraztunguneko, iturguneko eta iturriko profil erradialak erakusten dira.







**4.5. Irudia.** 0.030 m altuerako eraztungunea (a), iturgunea (b) eta 0.305 m altuerako iturriko (c) abiadura profil erradialak.

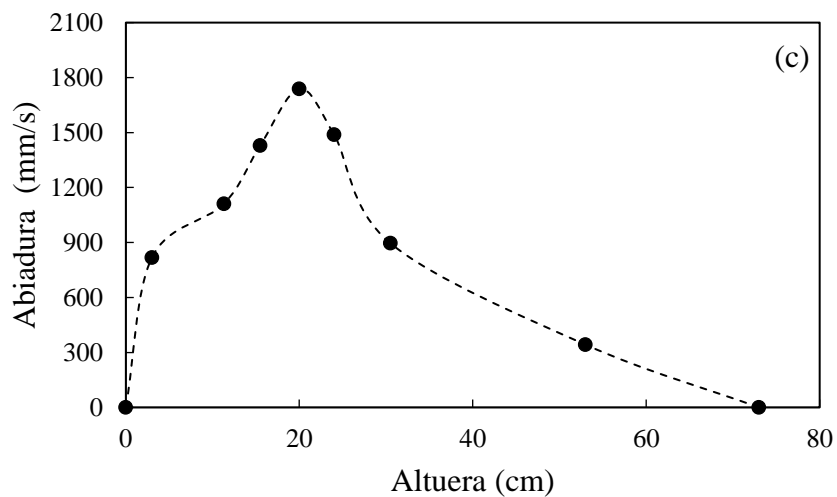
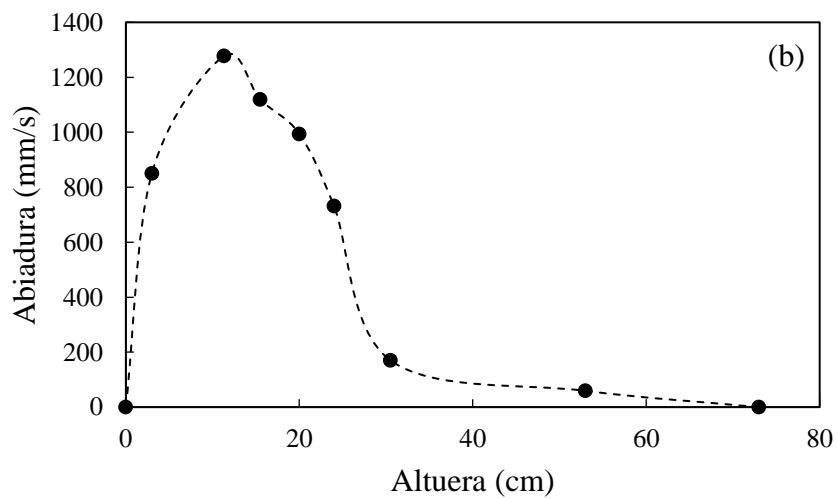
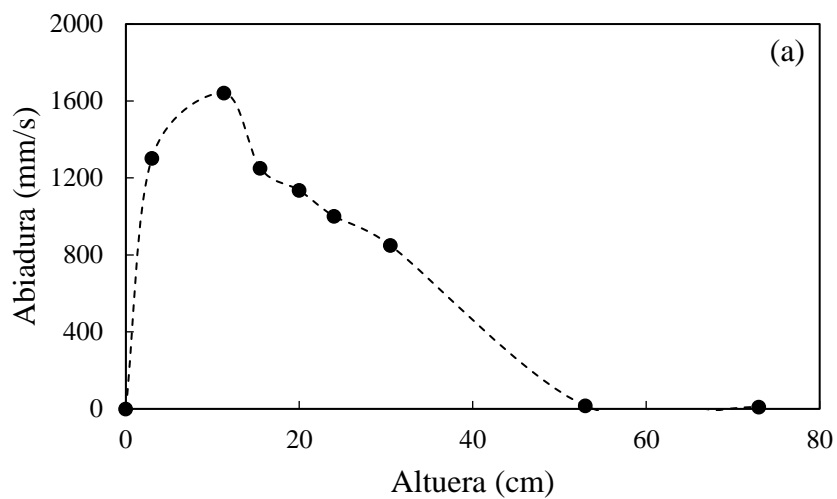
Hodi ez-porotsuak erabiltzerakoan, irekiduradun hodiekin bezala, eraztungunean abiadura negatiboko maximo bat lortzen da. Kasu honetan, erdiko hodiak ohandzeak eragiten duen ia presio guztia jasaten du ( $L_H$ -ren altuera izan ezik) eta hortaz, eraztungunera perkolatzen den aire frakzioa oso txikia da. Hori dela eta, kontaktorearen paretatik gertu solidoaren abiadura negatiboak oso txikiak dira eta erdiko hoditik gertu laxatzen da ohandzea, bertan abiadura negatibo maximoa lortuz (gune honetako partikulak izango dira iturgunera gehien sartzen diren partikulak). Hala ere, erdiko hodiaren paretatik efektua dela eta, erdiko hoditik hurbil jaisten diren solidoak abiadura txikiarekin jaisten dira. Bertan erdiko hodiko paretatik efektua gertatzen da, non airea hodiaren albotik igotzean zonaldea laxatzen duen eta abiadura negatibo handiena lortzen den. Gainera, gune horretako partikulak izango dira iturgunera sartuko direnak.

Iturguneari erraparatzuz, irekiduradun hodiarekin alderatuz antzeko profila lortzen da, ezberdintasun nagusia lortutako abiadura izanik, hau da, hodi ez-porotsuak erabiliz abiadura handiagoak lorzen dira. Hala ere, kasu honetan iturguneko erradioan zehar lorturiko abiadurak orokorrean beste bi konfigurazioena baino handiagoa da, hau da, kurbaren azpiko azalera handiagoa da.

Iturriari dagokionez, abiadura negatiboek tendentzia lineala izaten jarraitzen dute, baina kasu honetan, malda txikiagoa da beste konfigurazioekin konparatuz, hau da, itxura zapalagoa dauka profilak gune horretan. Gainera, iturriaren periferiaren interfasea beste biak baino gertuago du ardatzarekiko, eta kasu honetan, iturrian abiadura maximoa ardatzean aurkitzen da, perkolazioa txikia delako.

### 4.3. PROFIL AXIALA

Abiadura profil axialak eraikitzeko, altuera desberdinen ardatzeko abiadura erabili da. Hau da, abiadura axiala, ardatzeko profila da. Erabilitako datuak abiadura minimoarenak dira konfigurazio guztietan eta abiadurak altuerarekiko irudikatu dira, 4.6 Irudian erakusten den bezala.



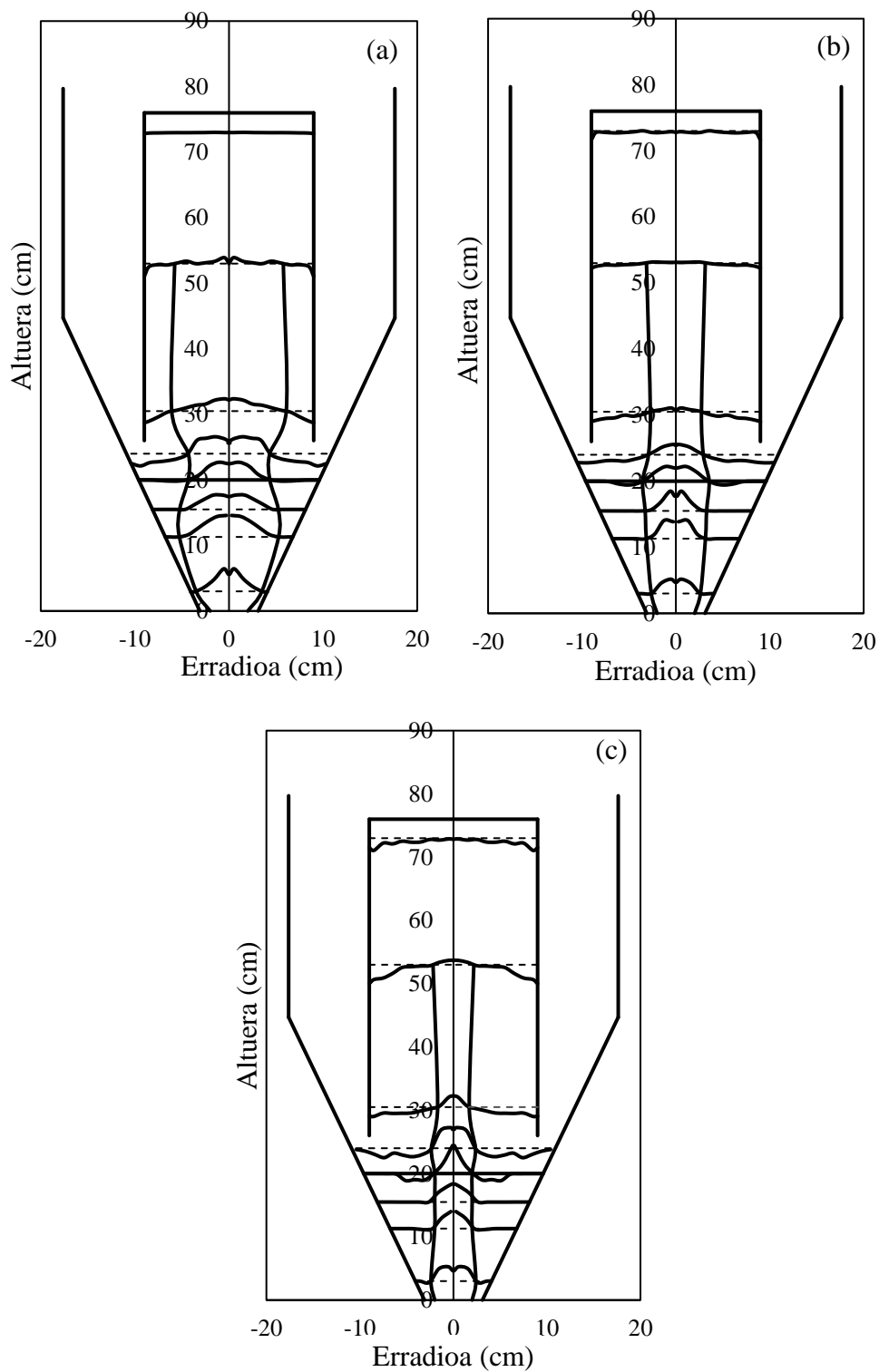
**4.6. Irudia.** Hodirik gabe (a), irekiduradun hodia (b) eta hodi ez-porotsua (c) erabiliz lorturiko ardatzeko profil axialak.

Hodirik gabe eta irekiduradun hodiaren kasuan, partikulak azeleratu egiten dira ohantzearen erdira arte, hau da, 0.113 m-ra arte, gero hortik gora partikulek dezeleratu egiten dute nahiz eta gora jarraitu. Hodi ez-porotsuan aldiz, partikulek iturgune osoan zehar azeleratzen dute eta gero iturrian dezeleratzen dira. Gainera, 0.030-0.113 m altuera tartean, malda aldaketa bat gertatzen da. Hodia, 0.070 m-ra hasten da eta bertan airea bideratu egiten duenez, malda aldatu egiten da eta horregatik, ohantze altuera osoan zehar azeleratu egiten da.

Iturriari dagokionez, hodi ez-porotsudun sistemak iturri altuena du eta estuena du, beraz, konfigurazio honek erakusten du abiadura balio handienak. Bestalde, irekiduradun hodiaren sistemetan iturri txikiagoak eta dentsuagoak lortzen dira, hori dela eta, iturrian lorturiko solidoen abiadurak hodi ez-porotsudun sistemen baino txikiagoak dira. Azkenik, hodirik gabeko kasuan, iturkuntza abiadura minimoan iturria ez da heltzen bilgailuaren erdiraino (530 mm), hori dela eta, goiko bi neurrietan ez da balorerik lortu. Izan ere, kontaktorerara sartzen den aireak ohantzeak eragiten duen presio guztia gainditu behar du eta iturguneko zein iturriko solidoen abiadurak txikiagoak dira. Hala ere, kontuan izan behar da hodirik gabeko sistemen iturkuntza abiadura minimoa beste bi konfigurazien ia bikoitza dela.

#### **4.4. ITURRIAREN FORMA**

Kontaktorean iturriak duen forma jakiteko erradioan zehar non hasten den jakin behar da. Iturgunea eta eraztungunearen arteko interfasean solidoen noranzkoa aldatzen da, hortaz, profil erradialean abiadura nulua lortzen den distantziari dagokio interfasea, hau da, iturriaren hasiera. Datu hori lortzeko, altuera ezberdinetan lorturiko profil erradialetan zero abiadura non den ikusi da. Iturriaren formaz gain, profilen eboluzioa ere aztertuko da 4.7 Irudian. Bertan lortutako datuak konfigurazio bakoitzaren iturkuntza abiadura minimoari dagozkie.



**4.7. Irudia.** Hodirik gabeko (a), irekiduradun hodiko (b) eta hodi ez-porotsuko (c) iturgune/iturriaren forma eta altuera ezberdinen profil erradiala iturkuntza abiadura minimoan.

4.7 Irudian azaltzen den bezala, iturriaren formari dagokionez, hodirik gabeko sistemek erakusten dute iturgune/iturri zabalak eta edozein motako erdiko hodiak erabiltzerakoan iturgunea/iturria estutu egiten da. Bi hodi ezberdinen konfigurazioen artean hodi ez-porotsuarekin lortzen da iturgune/iturri estuena, izan ere, hodiak mugatzen baitu iturgunearen

forma eta iturriak zabalera txikia jasaten du. Bestalde, hodirik gabeko sistemetan, airea ohandzearen gune zabal batean hedatzen da eta ondorioz iturri zabalak lortzen dira. Gainera, hodirik gabeko itxurari jarraituz, ukalondo itxura lortzen da San José eta kol.ek lortzen duten iturgune formaren antzekoa (San José eta kol., 2005).

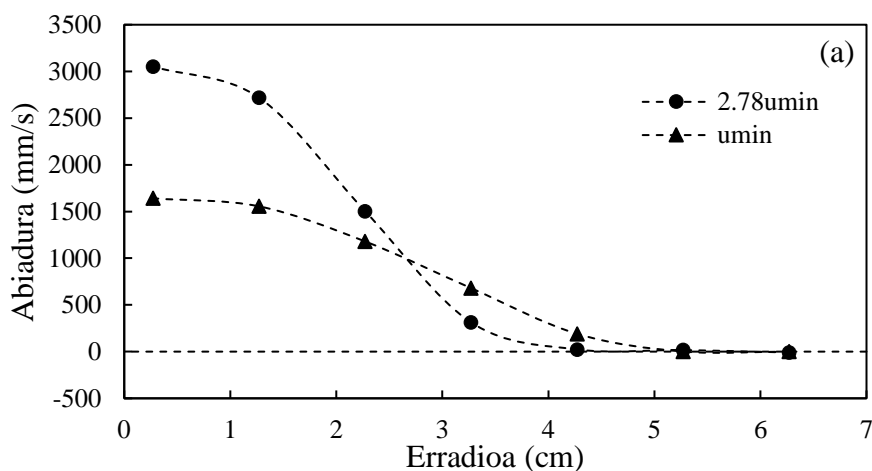
4.7 Irudian erakusten den bezala, konfigurazio guztietan iturkuntza abiadura minimoan lan egitean iturria ez da bilgailuaren goiko gunera heltzen eta hori dela eta, 0.530 mm altuerako profil erradialeko abiadurak nuluak dira. Arrazoi honengatik, iturriaren periferiaren interfasea 0.530 mm-ko altueraraino irudikatu da.

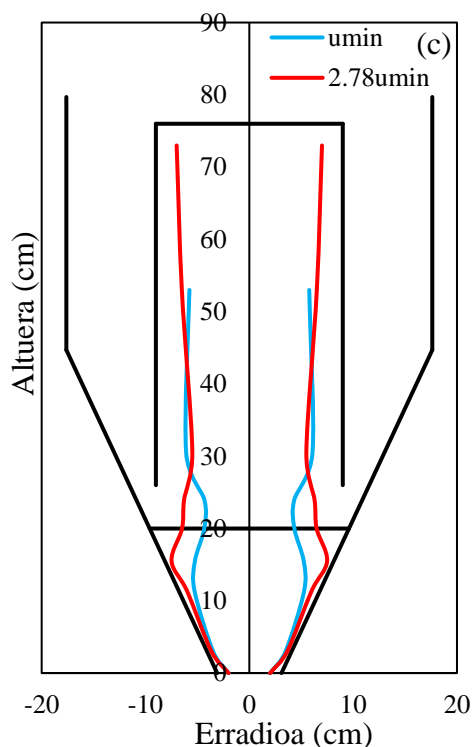
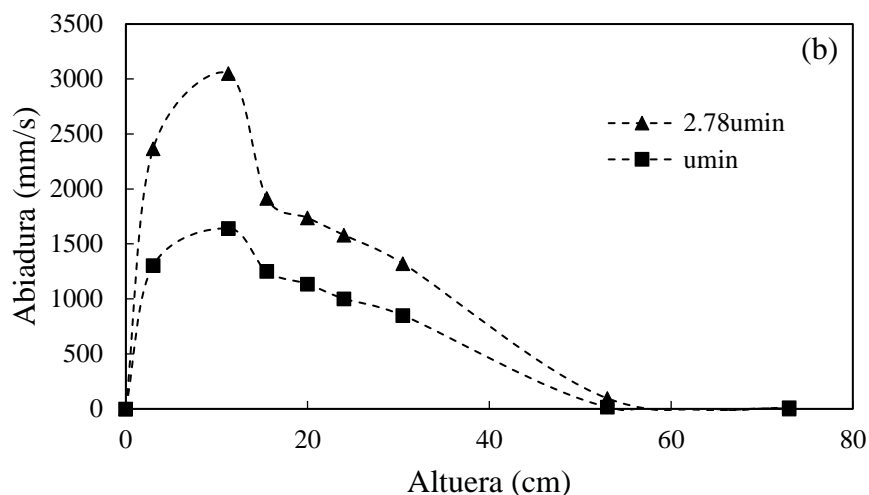
#### 4.5. EMARIAREN ERAGINA

Emariaren eragina aztertzeko, profil erradialak, axialak eta iturriaren forma alderatu dira. Horretarako, aurreko atalen prozesu bera jarraitu da emari eta konfigurazio ezberdinekin.

##### 4.5.1. Hodirik gabe

Hodirik gabeko konfigurazioan, iturkuntza abiadura minimoa erabiltzeaz gain ( $11.5 \text{ m}^3/\text{h}$ )  $2.78u_{\min}$  ( $32 \text{ m}^3/\text{h}$ ) abiadura ere erabili da emariaren eragina aztertzeko. 4.8 Irudian ikus daitezke konparaketak.





**4.8. Irudia.** Aire emariaren eragina 0.113 m-ko altueraren profil erradialean (a), ardatzeko profil axialean (b) eta iturgune/iturriaren geometrian (c).

4.8a Irudian ikus daitekeen bezala, airearen emaria handitzerakoan solidoen abiadura iturgunean handiagoa da ardatzetik hurbil igotzen direnean, baina interfaseruntz hurbiltzean solidoen abiadura malda handiarekin txikitzen da, iturkuntza abiadura minimoko solidoen abiadura handiagoa da. Izan ere, airearen emaria handitzerakoan airearen frakzio txikiagoa perkolatzen da ohantzean eta gehien bat ardatzetik igotzen da. Bestalde, eraztungunean lorturiko abiadurak oso txikiak dira iturgunean lortzen direnekin konparatuz.

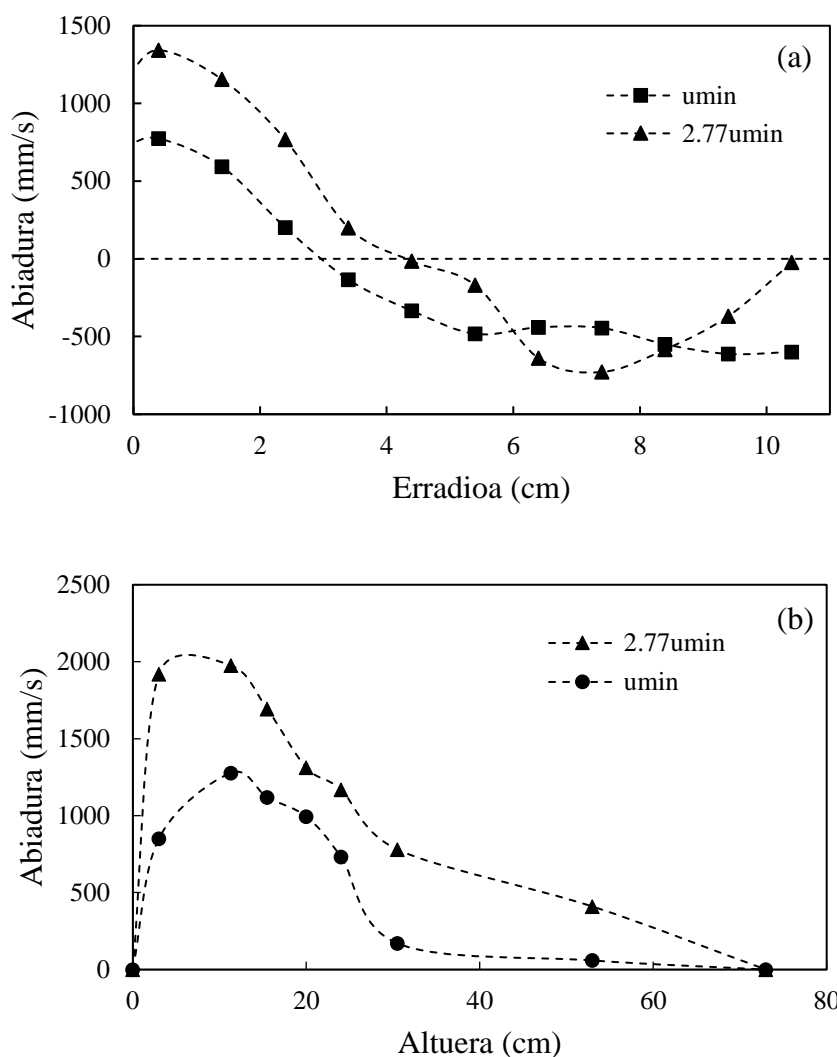
Bestalde, 4.8b Irudian erakusten den bezala, airearen emaria handitzerakoan joera berdina duen profil axiala lortzen da. Hau da, bi emari ezberdinetan partikulak ohantzearen erdiraino

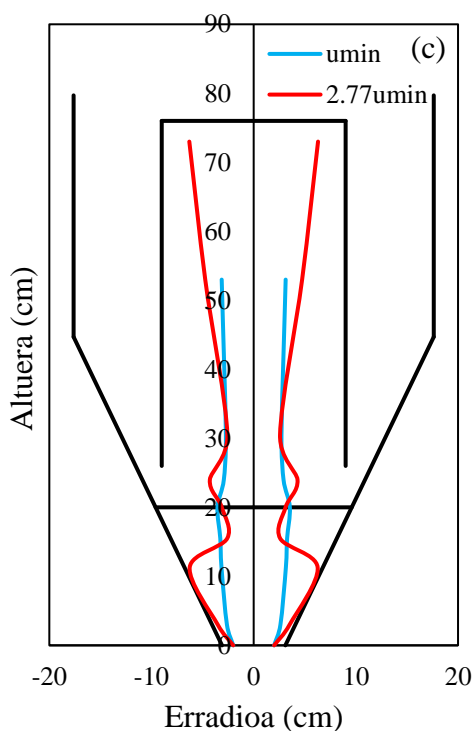
azeleratzen dira eta hemendik gora dezeleratuz doaz. Hala ere, emari handian uneoro abiadura handiagoak lortzen dira, eta baita iturri altuagoa ere (nahiz eta bilgailuaren goiko zatian solidoen abiadura netoa ia nuloa izan).

Azkenik, 4.8c Irudian iturgune eta iturriaren geometriaren alderaketa erakusten da. Iturriaren kasuan, emaria handitzerakoan iturria zabaldu egiten da, baina ezberdintasuna gehien bat ohantzearen goiko erdialdean ematen da, izan ere, emaria handitzerakoan iturgunea ia kontaktorearen paretaraino heltzen baita. Bestalde, iturriaren kasuan, ezberdintasun nabarmenena ohantzearen gainazala eta bilgailuaren arteko hutsunean aurkitzen da, bertan emaria handitzerakoan asko zabaltzen baita iturria. Honetaz gain, bilgailuaren barnealdean ez da ezberdintasun handirik erakusten, bi emarietan lorturiko iturria nahiko antzerakoa baita.

#### 4.5.2. Irekiduradun hodia

Irekiduradun hodidun konfigurazioan, iturkuntza abiadura minimoa ( $6.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) erabiltzeaz gain  $2.77u_{\min}$  ( $18 \text{ m}^3/\text{h}$ ) erabili da. 4.9 Irudian ikus daitezke ezberdintasunak.





**4.9. Irudia.** Aire emariaren eragina 0.240 m-ko altueraren profil erradialean (a), ardatzeko profil axialean (b) eta iturgune/iturriaren geometrian (c).

4.9a Irudian ikus daiteke irekiduradun sistemetan emaria handitzerakoan ardatzetik gertu igotzen diren solidoek abiadura handiagoa dela (hodirik gabeko sistemetan bezala) eta baita iturriaren periferiatik jaisten diren solidoek abiadura negatibo handiagoan jaisten direla. Bestalde, emaria handitzerakoan iturriaren nukleoa zabaldu egiten da, eta hortaz, bilgailu barnean solido gorakorren bolumena handiagoa da. Azkenik, emaria handitzerakoan iturriaren periferiako profil erradialean maximo negatibo bat lortzen da, baina emari txikietan profila lauagoa da.

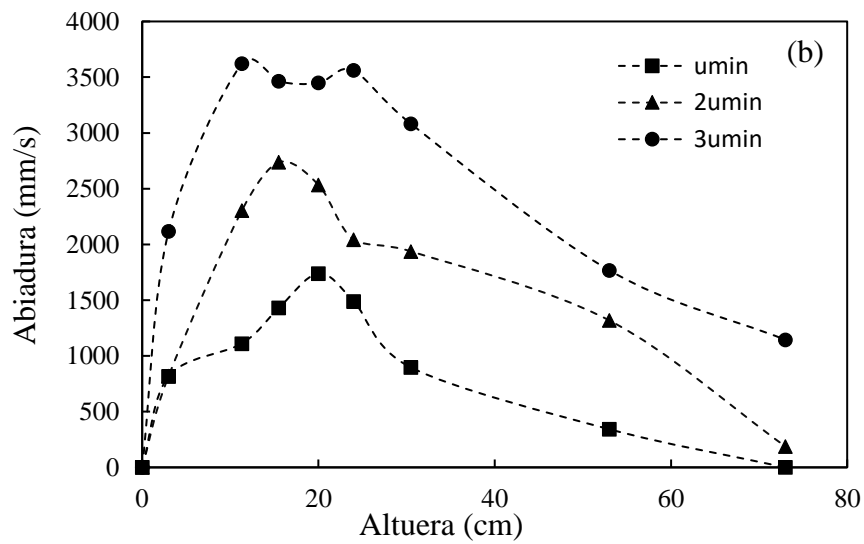
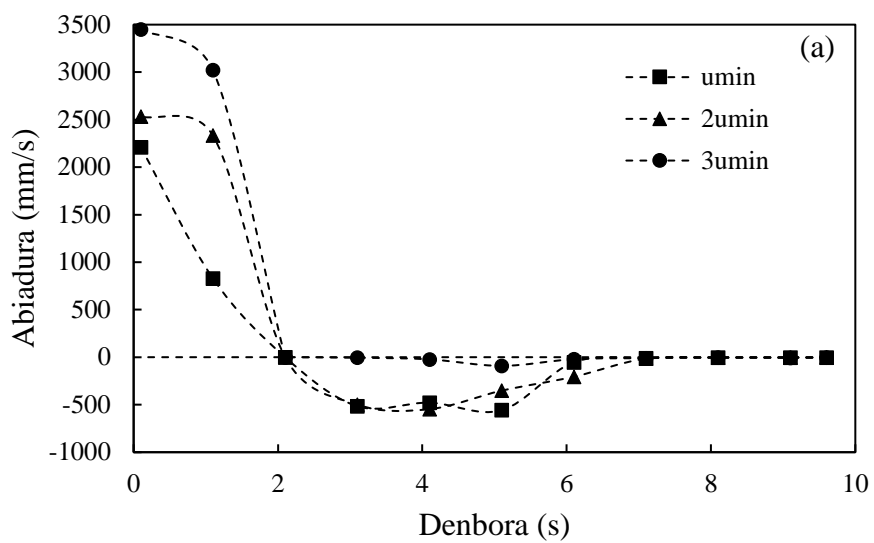
Profil axialaren kasuan (4.9 Irudia), emaria handitzean, nahiz eta altuera txikietan solidoen abiadura handiagoak lortu, emari txikiarekin alderatuz altuera txikiagotan hasten dira solidoak dezeleratzen. Bestalde, emaria handitzerakoan iturri altuagoak lortzen dira, eta beraz, iturrian zeharreko solidoen abiadurak ere bai.

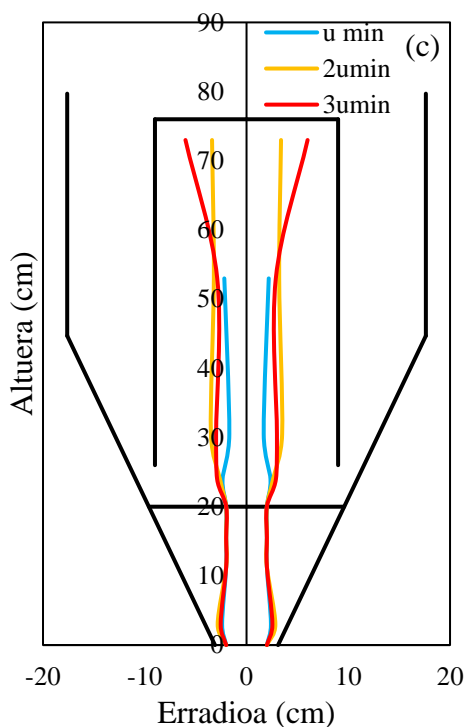
Azkenik, emaria handitzerakoan ohanzearen beheko erdian iturgunea zabaltzen da (4.9c Irudia), baina ohanzearen goiko erdian estutu eta bilgailuaren beheko zatiraino konstante mantentzen da. Bilgailuaren gainontzeko altueretan iturria zabalduz doa altuera handitzerakoan.

#### 4.5.3. Hodi ez-porotsua

Hodi ez-porotsudun konfigurazioan, iturkuntza abiadura minimoa ( $6 \text{ m}^3/\text{h}$ ) erabiltzeaz gain  $2u_{\min}$  ( $12 \text{ m}^3/\text{h}$ ) eta  $3u_{\min}$  ( $18 \text{ m}^3/\text{h}$ ) emariak erabili dira. 4.10 Irudian ikus daitezke emari hauen alderaketak.







**4.10. Irudia.** Aire emariaren eragina 0.200 m-ko altueraren profil erradialean (a), ardatzeko profil axialean (b) eta iturgune/iturriaren geometrian (c).

4.10a Irudian erakusten den bezala, profil erradialari dagokionez, ardatz axialeko abiadura emariarekin batera handitzen da beste konfigurazioetan bezala, baina abiaduraren handitzea ez da emariarekiko proportzionala. Bestalde, nahiz eta hiru emaritan abiadura maximoa ardatz axialean egon, emaria handitu ahala abiadura igoera ardatzerantz ez da hain zorrotza. Eratzunguneari dagokionez,  $u_{\min}$  eta  $2u_{\min}$ -ri dagozkien emariek antzeko profila dute, baina emaria  $3u_{\min}$  handitzerakoan profileko abiadurak nabarmen txikitzen dira. Izan ere, hodi ezporotsuetan emari oso altuak erabiltzerakoan iturguneari hutsa sortzen da eta eratzungunetik iturgunera sartzen diren solido kantitatea murriztu egiten da, eratzunguneko solido fluxua txikituz antzeko profila dute,  $3u_{\min}$  profilak aldiz, abiadura geldoa dauka, beste bi emariekin konparatuz.

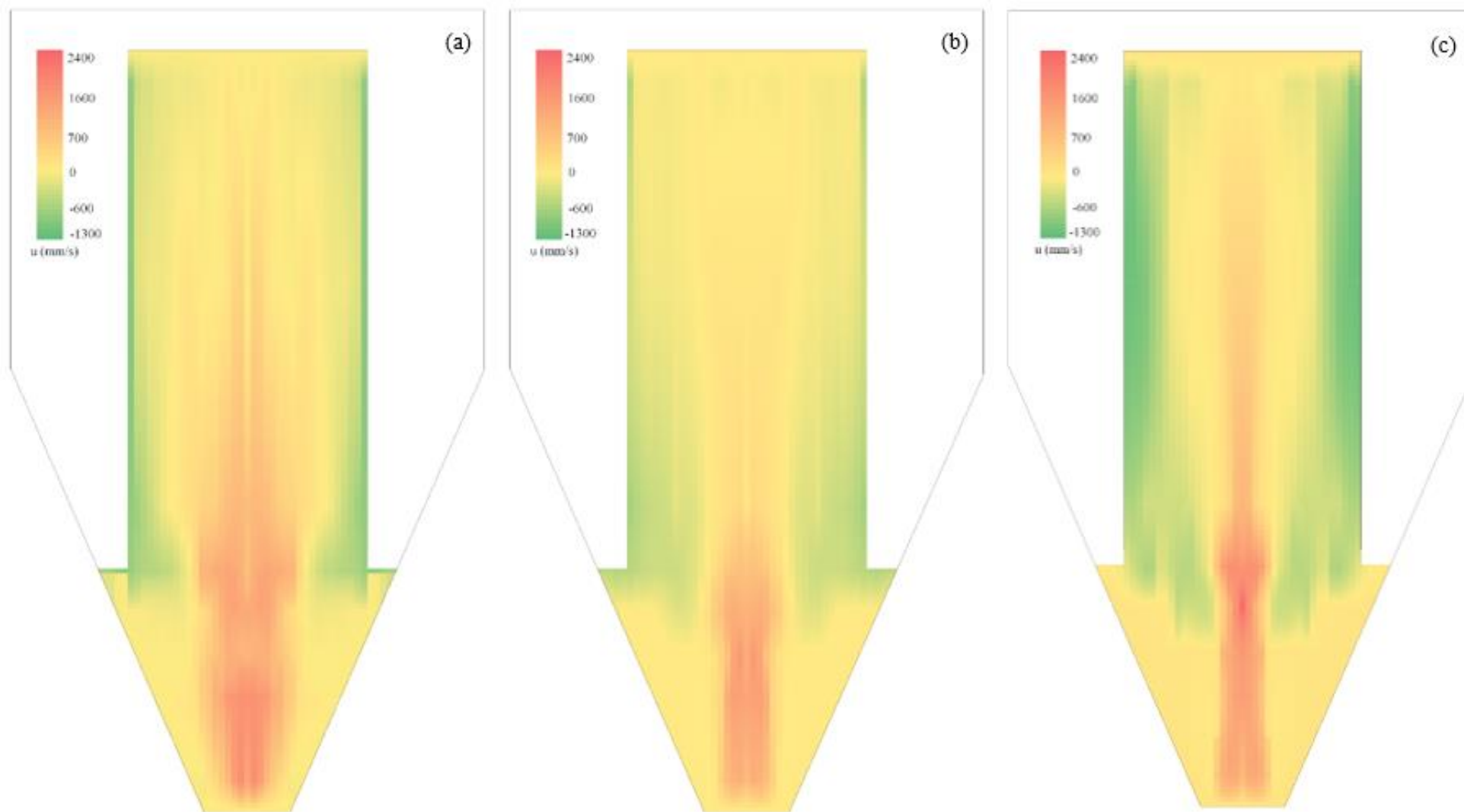
Profil axialei dagokienez, 4.10b Irudia, emaria handitu ahala partikulen dezelerazioa iturguneko altuera txikiagoetan ematen da. Honen arrazoi nagusienetako bat solidoen multzoak (*cluster*) sortzea da, hau da, emaria handitzerakoan solidoak multzoetan pilatzen dira hauen masa handiagoa delarik eta dezelerazioa sortuz.

Iturriaren formari dagokionez (4.10c Irudia), iturgunea berdina da emari ezberdinetan, izan ere, barneko hodiak mugatzen baitu iturgune/eratzungune interfasea. Baina, iturrian zehar igo ahala emaria handituz gero iturria zabaldu egiten da.

#### 4.6. KONFIGURAZIOEN ALDERAKETA

Atal hau hiru konfigurazio ezberdinen alderaketa hobeto aztertzeke erabili da. Horretarako, hiru konfigurazioen bero mapak abiadura minimoan egin dira. Esperimentuetan lortutako datuak 0.030, 0.113, 0.155, 0.200, 0.240, 0.305, 0.530 eta 0.730 m altueratan lortu dira, kontaktorea

zein bilgailuko paretatik ardatzera zentimetroka neurriak hartuz, neurri bakoitzean lorturiko emaitzak erabili dira bero mapak eraikitzeko, baina tarteko puntu guztiak interpolaketa polinomikoen bidez lortu dira. Lehendabizi, bero mapetako tartekak 5 mm-koak direnez eta neurriak 10 mm-ka hartu direnez, neurrien arteko balioak lortzeko interpolaketak erradioan zehar burutu dira. Profil erradialak lortu ostean, profil axialak interpolatuz lortu dira gainerako datuak. 4.11 Irudian hiru sistemen bero mapak ikus daitezke.



**4.11. Irudia.** Hodirik gabe (a), irekiduradun hodia (b) eta hodi ez-porotsua (c) konfigurazioen bero mapak.

4.11 Irudian erakusten den bezala, beraien artean aipagarriak diren zenbait desberdintasun ageri dira. Hasteko, hodirik gabeko bero mapan (4.11a Irudia), abiadura handiko partikulek hartzen duten bolumena beste bi konfigurazioena baino handiagoa da. Gainera, 4.4 azpiataleko 4.7a Irudian erakusten den bezala, iturgunearen ukolondo forma antzematen da. Bestalde, iturrian goranzko partikulen bolumena beheranzkoena baino handiagoa da.

Irekiduradun hodiari dagokionez (4.11b Irudia), iturgunea estutu eta abiadura txikitu egiten da, bai bolumen kantitatean baita abiadura netoan ere, hodirik gabeko sistemarekin alderatuz. Hau da, alde batetik, partikula gutxiago daude zirkulazioan eta gainera, iturguneko partikulen abiadura txikiagoa da.

Hodi ez-porotsuan (4.11c Irudia), iturgunea gehiago estutzen da beste bi sistemekin konparatuz. Bestalde, sistema honetan lortzen da abiadura handiena nahiz eta, abiadura altuak oso kontzentratuta egotean iturriaren bolumena txikiagoa izango den. Iturriaren periferian, hau da, iturri bilgailuaren gunean paretaren ondotik jaisten ari diren partikulen bolumena handiagoa da eta beraien abiadura beherakorra handiagoa da beste konfigurazioekin konparatuz.

Azkenik, biomasazko ohantzeak erabiltzean ohantzearen gainazalean kraterak sortzen dira (gasaren benturi efektua ematen da bilgailutik ateratzerakoan duen azalera murrizketagatik). Hau da, partikulak arrastatuak izaten dira kontaktorearen paretara eta ondorioz, krater itxura hartzen du ohantzeak. Egoera hori, hodi ez-porotsuaren kasuan ondo antzematen da, izan ere, bertan ematen da kraterrik handiena. Bertan, airea bideratuta dagoenez, partikulak ohantzearen paretaren ondotik jaisten dira.

## 5. ONDORIOAK

Lan honetan lortutako emaitzetatik atera daitezkeen ondorio garrantzitsuenak hurrengoak dira atal bakoitzaren arabera sailkatuta.

- Abiadura fluktuazioa:
  - Hodirik gabe eta irekiduradun hodiko sistemetan partikulek gora-beherako mugimendua egiten dute, nahiz eta, azkenean abiadura netoa negatiboa izan. Komenigarria da mugimendu hori ematea, izan ere, modu honetan, erreakzioaren efizientzia handitu egiten baita. Bestalde, hodi ez-porotsudun sistemaren kasuan, partikulek ez dute abiadura positiborik lortzen hodiak airea bideratzen duelako, horregatik, bertako efizientzia txikiagoa izango da.
- Profil erradiala:
  - Hodirik gabe: eraztungunean, abiadura beherakor handiena kontaktorearen paretan dago eta kontaktorearen erdira hurbiltzen den heinean abiadura negatiboak txikituz doaz. Bestalde iturgunean eta iturrian, abiadura maximoa ardatzetik gertu ematen da.
  - Irekiduradun hodia: abiadura negatibo maximoa ez da kontaktorearen paretan aurkitzen hodirik gabeko kasuan bezala, maximoa, paretatik hurbil aurkitzen da eta gero ardatzera hurbildu ahala jaitsi egiten da. Kasu honetan ere, iturgunearen eta iturriaren abiadura maximoa ez da ardatzean aurkitzen, gertu baizik. Bestalde, iturriak nahiko joera lineala dauka, hau da, kontaktorearen paretan solidoen abiadura negatibo maximoa lortzen da eta ardatzerantz hurbildu ahala solidoen abiadura negatiboa txikituz eta positiboa handituz doa. Gainera, hodiak airea partzialki bideratzen duenez, kasu honetan, interfasea, hodirik gabeko sisteman baino ardatzetik hurbilago dago.
  - Hodi ez-porotsua: eraztungunean, pareta efektua gertatzen da, hau da, airea erdiko hodiaren ondotik igotzean partikulak laxatzen ditu, horregatik bertan abiadura negatiboak handiagoak dira. Iturgunean, abiadura handienak interfasean aurkitzen dira beste bi sistemekin konparatuz. Azkenik, hodi ez-porotsuak airea irekiduradun hodiak baino hobeto bideratzen duenez interfasea hodiak berak mugatzen du. Gainera, beste kasuetan ez bezala, iturriko abiadura maximoak ardatzean aurkitzen dira.
- Profil axiala:
  - Hodirik gabe eta irekiduradun hodiaren kasuan partikulak azeleratu egiten dira ohantze erdira arte, eta hemendik aurreara dezeleratzen hasten dira. Hodi ez-porotsuan aldiz, kontaktorerara sartzen den ia aire gehiena hodiaren barnetik bideratzen denez, iturguneko partikulak iturgune osoan azeleratzen dira.. Gainera, malda aldaketa bat ikusten da, horren arrazoia hodiaren hasiera izanik. Bestalde, hodi ez-porotsudun sistemek iturri altuena eta estuena dute bertako abiadurak handienak izanik. Azkenik, hodirik gabeko kasuan, lorturiko iturriak ez dira bilgailuaren erdiraino heltzen..

- Iturriaren forma:
  - Hodirik gabeko sistema da iturri zabalena duena eta ukalondo itxura erakusten du. Bestalde, edozein motako erdiko hodiak erabiltzean, sarrerako airea bideratzen dute eta ondorioz, lorturiko iturguneak estuagoak dira. Gainera, profilen eboluzioari dagokionez, hodirik gabe eta irekiduradun hodiko kasuetan abiadura maximoa ez da ardatzean aurkitzen, bestalde, hodi ez-porotsuan, abiadura maximoa 0.030 m altueran dago bakarrik desplazatuta, beste altueran abiadura maximoa ardatzean aurkitzen delarik.
  
- Emariaren eragina:
  - Hodirik gabe: profil erradialean, ardatzeko abiadurari dagokionez, emaria handitu ahala ardatzeko abiadura igo egiten da. Bestalde profil axialean, emaria handitzerakoan solidoen abiadura handitu egiten da, nahiz eta joera berdina izan emari ezberdinetarako. Bestalde, iturriaren formari dagokionez, emari altuarekin iturria gehiago zabalitzen da.
  - Irekiduradun hodia: Profil erradialean, hodirik gabeko sistemetan bezala, abiadura maximoak ardatzetik gertu aurkitzen dira. Bestalde profil axialean, partikulak arinago dezeleratzen dute, nahiz eta lortutako abiadurak handiagoak izan. Iturriaren formari dagokionez, ohanzearen beheko erdiraino iturgunea zabaldu egiten da, eta gainontzeko ohanzearen altueretan emari txikian lorturiko iturgunearen zabalera berdina lortzen da. Azkenik, emaria handitzerakoan iturria zabalagoak lortzen dira.
  - Hodi ez-porotsua: Profil erradialean, aurreko konfigurazioetan bezala, emaria handitzerakoan solidoen abiadura handitzen da. Hala ere, emari altuetan eraztunguneko solidoen jaitsiera abiadura txikitu egiten da. Bestalde, profil axialean, emaria handitu ahala partikulak altuera txikiagoan dezeleratzen dira, izan ere, partikula multzoak sortzen baitira.. Bestalde, iturriaren formari dagokionez, erdiko hodiak mugatzen duenez iturgunea, emaria handitzerakoan iturgune berdina lortzen da, baina iturria zabaldu egiten da emaria handitzerakoan.
  
- Konfigurazioen alderaketa:
  - Hodirik gabeko sisteman abiadura handiko partikulek beste bi konfigurazioetan baino bolumen handiago hartzen dute, bestalde irekiduradun hodia jartzean, iturgunea estutu egiten da, bolumena eta abiadura jaitsiz. Hodi ez-porotsuak erabiliz, iturgunea gehiago estutzen da eta abiadura oso altuak lortzen dira iturgunean, hala ere, bertako bolumena ere txikia da. Horregatik, kontuan izanda iturgunean partikulen eta airearen kontaktua handiagoa dela, hodirik gabeko sisteman, lehorketa prozesuetarako aukera ona izan daiteke, nahiz eta, sistema honen karga galera handiagoa den. Bestalde, hodi ez-porotsuak abiadura handiak dituzenez flash-pirolisi prozesuetarako egokia da, izan ere, pirolisian, gasaren erresidentzia denbora txikia da, erreakzioak alboko erreakzio eta produktuak izan ez dezan.

## 6. NOMENKLATURA

$d_p$	Partikularen diametroa, $\mu\text{m}$ .
$D_0$	Gasaren sarrerako diametroa, m.
$D_C$	Kontaktorearen gune zilindrikoaren diametroa, m.
$D_i$	Kontaktorearen oinarriaren diametroa, m.
$D_F$	Bilgailuaren diametroa, m.
$D_T$	Barne hodiaren diametroa, m.
$H_0$	Ohantzearen altuera, m.
$H_C$	Kontaktorearen zati konikoaren altuera, m.
$H_F$	Ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren beheko aldearen arteko hutsunearen altuera, m.
HG	Barne hodirik gabeko sistemak.
HEP	Hodi ez-porotsuz osaturiko sistemak.
IH	Irekiduradun hodiz osaturiko sistemak.
IP	Irekidura portzentaia, %.
$L_F$	Bilgailuaren altuera, m.
$L_H$	Barne hodiaren hanken altuera, m.
$L_T$	Barne hodiaren altuera, m.
Q	Airearen emaria, $\text{m}^3/\text{h}$ .
$Q_i$	Forma koadratikoaren positibo semidefinitua.
T	Mugimendu tentsore matrizea.
$u_{\min}$	Airearen abiadura minimoa, m/s.
v	abiadura bektorea
<b>Sinboloak</b>	
$\gamma$	Kontaktorearen angelua, $^\circ$ .



## 7. BIBLIOGRAFIA

Altzibar, H., Lopez, G., Álvarez, S., San José, M. J., Barona, A., Olazar, M. A draft-tube conical spouted bed for drying fine particles. *Drying Technology.*, 26, 308-314 (2008).

Altzibar, H. Erdiko hodi ezberdinez hornituriko iturri ohantze konikoen ikerketa hidrodinamikoa eta beraien aplikazioa lehorketan. Doktorego Tesia, UPV/EHU (2011).

Altzibar, H., Lopez, G., Olazar, M., Bilbao, J. Effect of temperature on fine particle drying in a draft-tube conical spouted bed. *Chem. Eng. Technol.*, 34, (7) 1130 (2011).

Amasorrain, A. Eraikuntzarako materialen lehorketarako iturri-ohantze koniko aldatua. Ikerketa hidrodinamikoa. Gradu amaierako lana, UPV/EHU (2005).

Atxutegi, A. Tellabide, M. Lopez, G. Aguado, R. Bilbao J. Olazar, M. Implementation of a borescopic technique in a conical spouted bed for tracking spherical and irregular particles, *Dep. Che. Eng.* 374, 39-48 (2019).

Bilbao, J., Olazar, M., Romero, A., Arandes, J.M., Design and operation of a jet spouted bed reactor with continuous catalyst feed in the benzyl alcohol polymerization. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 26(7), 1297-1304 (1987).

Bridgwater, J. Spouted Beds. In J.F. Davidson, R., Clift, D. Harrison, *Fluidization, vol II* (p.201). London: Academic Press (1985).

Eng, J.H., Svrcek, W.Y., William, Y., Behie, L.A. Dynamic modeling of a spouted bed reactor with a draft tube. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 28, (12), 1778-1785 (1989).

Estiati, I. Ohantzea egonkortzeko gailuz hornitutako iturri ohantze konikoen hidrodinamika. Doktorego Tesia, UPV/EHU (2017).

Farneback, G. Fast and accuracy motion estimation using orientation tensors and parametric motion models, *Department of electrical engineering*, SE-581 83 (2000).

Farneback, G. Very high accuracy velocity estimation using oriental tensors, parametric motions, and simultaneous segmentation of the motion field, *Department of electrical engineering*, SE-581 83 (2001).

Gauthier, T. A., Briens, C. L., Bergougnou, M. A., Galtier, P. A., "*Recent Progrés en Génie de Procédés. La Fluidisation*", C. Laguerie, P. Guigon (Eds.), Lavoisier-Technique et Documentation, Paris, 185 (1991).

Geldart, D. Types of Gas Fluidization. *Powder Technology*, 7(5), 285-292 (1973).

Gishler, P.E., Mathur, K.B. Patente U.S.A. n° 2786280 (1957 a).

Gishler, P.E., Mathur, K.B. Patente G.B. n° 801315 (1957 b).

He, Y.-L., Qin, S.-Z., Lim, C. J., Grace, J. R. Particle velocity profiles and solid flow patterns in spouted beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 72 (4), 561-568 (1994).

Ishikura, T., Nagashima, H., Ide, M., Hydrodynamics of a Spouted Bed with a Porous Draft Tube Containing a Small Amount of Finer Particles. *Powder Technol.*, 131, 56-65 (2003).

Kmiec, A., Leschonski, K., Analysis of two-phase flows in gas – solids injectors, *Chem. Eng. J.*, 45, 137 (1991).

Kucharski, J., Kmiec, A. Kinetics of granulation process during coating of tablets in a spouted bed. *Chem. Eng. Sci.*, 44, 1627-1636 (1989).

Llamosas, R. Estudio de Propiedades Locales en Spouted Beds. Aplicación al Tratamiento de Serrín y Residuos de Madera. Tesis doctoral, UPV/EHU, 1996.

Mathur, K.B., Gishler, P.E., A study of the application of the spouted bed technique to wheat drying, *J. Appl. Chem.*, 5, 624 (1955 a).

Mathur, K.B., Gishler, P.E., A technique for contacting gases with coarse solid particles, *AIChE J.*, 1, 157 (1955 b).

Mathur, K.B., Epstein, N. Dynamics of Spouted Beds. *Adv. Chem. Eng.*, 9, 111 (1974).

Nagashima, H., Ishikura, T., Ide, M. Effect of the tube shape on gas and particle flow in spouted beds with a porous draft tube. *Can. J. Chem. Eng.*, 87, 228–236 (2009).

Olazar, M., San José, M. J., Aguayo, A. T., Arandes, J. M., Bilbao, J. Stable operation conditions for gas-solid contact regimes in conical spouted beds. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 31, 1784-1791 (1992).

Olazar, M., San José, M. J., Peñas, F. J., Aguayo, A. T., Arandes, J. M., Bilbao, J. A model for gas flow in jet spouted beds. *Can. J. Chem. Eng.*, 71, 189-194 (1993).

Olazar, M., Arandes, J. M., Zabala, G., Aguayo, A. T., Bilbao, J. Design and operation of a catalytic polymerization reactor in a dilute spouted bed regime. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 36, 1637-1643 (1997).

Olazar, M., San José, M.J., Aguado, R., Gaisán, B., Bilbao, J. Bed voidage in conical sawdust beds in the transition regime between spouting and jet spouting. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 38, 4120-4122 (1999).

Olazar, M., San José, M.J., Alvarez, S., Morales, A., Bilbao, J. Design of conical spouted beds for the handling of low-density solids. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 43, 655-661 (2004).

Passos, M.L., Mujumdar, A.S., Raghavan, V.G.S. Spouted beds for drying: Principles and Design Considerations. *Advances in Drying*, Ed. A.S. Mujumdar, Vol. 4, p. 359, *Hemisphere Publishing Corp.* Washington (1987).

Patrose, B., Caram, H. S., The mechanics of particle motion in a grid jet, *AIChE J. Symposium Series*, 80, 48 (1984).

Peñas, F. J., Contribución al Modelado del Flujo en "Spouted Bed" Cónicos. Aplicación al Tratamiento de Mezclas y Estudio de la Segregación, Tesis doctoral, UPV/EHU, Bilbao, 1993.

- San José, M.J. Regímenes de operación en spouted beds cónicos. Condiciones de estabilidad y fluidodinámica. Tesis doctoral, UPV/EHU (1991).
- San José, M.J., Olazar, M., Aguayo, A. T., Arandes, J. M., Bilbao, J. Expansion of spouted beds in conical contactors. *Chem. Eng. J.*, 51, 45-52 (1993).
- San José, M.J., Alvarez, S., Ortiz de Salazar, A., Olazar, M., Bilbao, J. Influence of the particle diameter and density in the gas velocity in jet spouted beds. *Chemical Engineering and Processing*, 44, 153-157 (2005).
- San José, M.J. Olazar, M., Alvarez, S., Morales, A., Bilbao, J. Spout and fountain geometry in conical spouted beds consisting of solids of varying density. *Chemical Engineering and Processing*, 44, 193-200 (2005).
- Shi, B., Wei, J., Pang, M. A modified cross-correlation algorithm for PIV image processing of particle-fluid two-phase flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, 45, 105–117 (2015).
- Tamir, A., Kitron, Y., Vertical impinging-stream and spouted-bed dryers. *Drying Technol.*, 7, 183 (1989).
- Uemaki, O., Mathur, K.B., Granulation of Ammonium Sulfate Fertilizer in a Spouted Bed. *Ind. Eng. Chem.*, 15, 504 (1976).
- Wang, S., Liu, Y., Liu, Y., Wei, L., Dong, Q., Wang, C., Simulations of flow behavior of gas and particles in spouted bed with a porous draft tube. *Powder Technol.*, 199, 238 (2010).
- Willert, C.E. & Gharib, M. Digital particle image velocimetry. *Experiments in Fluids* (1991).
- Zabala, G., Polimerización Catalítica en Spouted Bed Cónico, Tesis doctoral, UPV/EHU (1997).