

Treball de Fi de Màster
Màster Universitari en Enginyeria Industrial

Simulació del nivell d'ultra-buit del Microtró de la UPC

MEMÒRIA

Autora: Anna Viladomiu Cusí
Tutor: Francesc Xavier Escaler Puigoriol
Convocatòria: Gener 2017



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

L'objectiu d'aquest treball és calcular mitjançant simulacions numèriques el nivell d'ultra-buit del Microtró que s'està desenvolupant a l'Institut de Tècniques Energètiques (INTE) de la UPC. Concretament es pretén analitzar la sensibilitat del model davant diferents paràmetres de càlcul, així com determinar el nivell de pressió a l'interior dels imants i a l'interior de l'estructura d'acceleració pel fet de ser punts crítics del sistema per on circula el feix d'electrons.

Per aconseguir l'objectiu es fan prediccions del flux molecular a l'interior de la cambra de buit i del tub de bombeig mitjançant el software Molflow+. Aquest programa està basat en el mètode Monte Carlo i permet calcular la pressió d'equilibri en una geometria arbitrària sotmesa als efectes d'una o diverses bombes de buit.

Es parteix d'un model simplificat on únicament es consideren la cambra de buit i el tub de bombeig i s'hi van afegint de forma progressiva els imants i l'estructura d'acceleració. Durant el procés d'estudi es determina la sensibilitat dels resultats de les pressions a diferents paràmetres com són la taxa de desorció de les parets internes dels contorns sòlids i la velocitat de bombeig de les bombes de buit.

A partir del model complet on s'han introduït els imants i l'estructura d'acceleració es calcula la pressió a la secció on hi haurà instal·lat un sensor, a l'interior dels imants i a l'interior de l'estructura d'acceleració. En primer lloc, s'observa que, tot i l'asimetria de la geometria, la pressió a l'interior dels dos imants és igual. En segon lloc, es determina la pressió en condicions nominals i la seva dependència vers la velocitat de bombeig. A més, també es troba una constant de proporcionalitat entre la variació de pressió i la variació del nivell de desorció dels contorns sòlids. Com a mesura d'interès per operar el Microtró, es determina la diferència entre el valor de la pressió al sensor i la pressió tant als imants com a l'estructura d'acceleració per qualsevol velocitat de bombeig. Per últim, en comparar els diferents models, es conclou que la principal implicació d'afegir més components fa augmentar la superfície dels contorns i per tant també el nivell de pressió de forma proporcional.

Aquesta investigació requereix un treball futur que millori el model i que tingui en compte paràmetres que surten de l'abast d'aquest treball com pot ser, per exemple, la diferent temperatura d'alguns components.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	5
1. GLOSSARI	7
1.1. Nomenclatura	7
1.2. Abreviatures	8
2. PREFACI	9
2.1. Origen del projecte	9
2.2. Motivació	9
2.3. Desenvolupament	10
3. INTRODUCCIÓ	11
3.1. Objectius del projecte	11
3.2. Abast del projecte	11
4. ESTAT DE L'ART	13
5. MARC TEÒRIC	15
5.1. Conceptes teòrics	15
5.2. Microtró	22
5.3. Tecnologia del buit	24
5.4. MolFlow+	29
6. CÀLCULS PRELIMINARS	33
6.1. Estudi de sensibilitat	33
6.2. Simulació de les bombes	41
7. SIMULACIONS	49
7.1. Model parcial	49
7.2. Model complet	53
7.3. Comparativa entre models	60
8. PLANIFICACIÓ TEMPORAL	63
9. PRESSUPOST	65
10. IMPACTE MEDI AMBIENTAL	67
CONCLUSIONS	69

AGRAÏMENTS	71
BIBLIOGRAFIA	73
Referències bibliogràfiques	73

1. Glossari

Constant d'Avogadro: representa el nombre de partícules elementals en un mol d'una substància qualsevol; normalment es representa pels símbols L o N_A .

Constant de Boltzmann: és la constant que relaciona la temperatura absoluta i l'energia i té un valor de $1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K.

Desorció (*outgassing*): és el despreniment de molècules de gas des d'una superfície i quan han estat exposades a l'atmosfera. Aquest fenomen és funció del tipus de molècules de gas, el tipus de material, la superfície del material, el tractament superficial, la temperatura de la superfície i el temps d'exposició al buit.

Difusió: partícules de gas presents en les parets d'un contenidor a l'inici i que s'alliberen durant el règim de funcionament. D'acord amb la llei de Fick, s'introdueixen partícules al sistema a causa del gradient de pressió, en moure's aquestes des de regions de major concentració a regions de menys concentració.

Flux revers: és el moviment del fluid bombejat que retorna a la cambra, és a dir, molècules que intenten invertir el curs i anar en direcció del flux de gas oposada a la desitjada.

Fugues reals: es donen quan una font de gas externa a la cambra de buit introdueix càrrega de gas de manera indesitjable. Per exemple, a causa de fissures, esquerdes o qualsevol orifici que ho permeti.

Fugues virtuals: introducció de molècules al sistema causades per acumulacions de gas, que tot i no provenir de l'exterior té la mateixa repercussió en ser una font de gas continua.

Permeació: migració de partícules de gas al recinte, a través de les parets d'aquest, a causa de la permeabilitat del material.

1.1. Nomenclatura

a: dimensió característica d'un recinte [m]

A₂: superfície d'impacte de les molècules [m²]

A₁: àrea d'entrada a la bomba [m²]

C: conductància [m³/s]

ct: constant [-]

Kn: nombre de Knudsen [-]

l: camí lliure mitjà [m]

m: pendent de la recta [$s \cdot m^2/m^3$]

p: pressió [Pa]

Q: càrrega de gas [$Pa \cdot m^3/s \cdot m^2$]

Re: nombre de Reynolds [-]

S: velocitat de bombeig [m^3/s]

T: temperatura [K]

V: volum [m^3]

ω : velocitat de rotació [rad/s]

1.2. Abreviatures

CERN: Organització Europea per a la Investigació Nuclear

Linac: estructura d'acceleració (*LINear ACcelerator*)

INTE: Institut de Tècniques Energètiques

RTM: microtró de pista (*Race Track Microtron*)

UPC: Universitat Politècnica de Catalunya

2. Prefaci

Aquest treball s'ha desenvolupat en el marc de la investigació que s'està duent a terme a l'Institut de Tècniques Energètiques (INTE) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) sobre el comportament del Microtró.

2.1. Origen del projecte

Actualment, s'està desenvolupant un Microtró a la UPC. Aquest projecte s'està desenvolupant en col·laboració amb l'Institut Skobeltsyn de Física Nuclear de la Universitat de Moscou. En aquest marc, s'han realitzat diferents projectes, com per exemple l'estudi del sistema de refrigeració, i ara es vol estudiar la capacitat que té el sistema de produir buit. Fins aquest moment els estudis realitzats han tingut únicament caràcter experimental, és per això que, és necessari un desenvolupament en l'àmbit teòric per descriure i analitzar el comportament del Microtró així com estudiar el nivell d'ultra-buit que és capaç d'assolir el sistema en diferents escenaris.

En aquest context, l'INTE proposa desenvolupar un projecte que permeti conèixer el comportament del Microtró des d'un punt de vista teòric així com conèixer el nivell d'ultra-buit que s'aconsegueix en diferents situacions plantejades.

2.2. Motivació

Quan em va ser proposat col·laborar en aquest estudi com a treball final de màster, en un primer moment, el que més em va motivar va ser tenir l'oportunitat de fer un treball d'investigació dins del departament de Mecànica de Fluids i treballar en col·laboració amb els investigadors de la universitat.

L'estudi del buit és un camp molt recent on encara queda molt per estudiar i descobrir. Així, he tingut l'oportunitat de desenvolupar un projecte col·laborant en una investigació pionera, en el camp dels acceleradors de partícules, on encara hi ha molt per desenvolupar. Ha estat veritablement motivador ser conscient que estava, encara que en una mínima part, col·laborant a documentar coneixement sobre una tecnologia molt innovadora.

L'estudi realitzat en el present treball és únicament un inici d'una línia d'estudi que caldrà continuar en un futur. Això permet que tot el treball realitzat sigui d'utilitat més endavant i que sigui un punt de partida per posteriors investigacions.

2.3. Desenvolupament

Aquest treball està format per 3 parts. En ser un projecte sobre un àmbit poc conegut, la primera part és una introducció teòrica en la qual s'expliquen conceptes i fonaments importants per a la posterior comprensió del treball.

A continuació, es desenvolupen les simulacions numèriques que s'han realitzat i els resultats obtinguts.

En la darrera part es presenta un pressupost del projecte juntament amb la planificació d'aquest, a continuació es desenvolupa una anàlisi de l'impacte ambiental i, per últim, s'exposen les conclusions obtingudes dels estudis descrits.

3. Introducció

3.1. Objectius del projecte

El principal objectiu d'aquest treball és calcular el nivell d'ultra-buit que s'assoleix en el Microtró que s'està desenvolupant a l'Institut de Tècniques Energètiques (INTE) de la UPC. Els objectius específics són els següents:

- ✓ Conèixer els conceptes bàsics sobre l'ultra-buit.
- ✓ Entendre el funcionament del Microtró i dels seus elements principals.
- ✓ Aprendre a utilitzar un software per calcular el nivell d'ultra-buit.
- ✓ Analitzar la sensibilitat del model davant diferents paràmetres de simulació.
- ✓ Calcular l'efecte de la velocitat de bombeig i de la desorció sobre el nivell de pressió.
- ✓ Determinar l'efecte combinat de dues bombes segons la configuració actual del Microtró.
- ✓ Calcular el nivell de pressió a l'interior dels imants i a l'interior de l'estructura d'acceleració així com la seva desviació respecte la zona on està situat el captador de pressió.

3.2. Abast del projecte

Aquest projecte parteix únicament de la geometria del Microtró coneguda, i sense cap estudi previ del nivell de buit assolible.

Tot i partir de diverses hipòtesis, com els resultats són desconeguts, es va estudiant el comportament del Microtró a poc a poc a mesura que s'introdueixen elements. Aquest és un inici per a conèixer el comportament i les característiques del Microtró objecte d'estudi.

En ser el software utilitzat el Molflow+ i únicament permetre estudiar la pressió d'equilibri del sistema, durant el treball no es té en compte el temps necessari per assolir-la. Una futura

línia d'investigació seria, a partir dels resultats obtinguts en aquest treball i amb la utilització del software Synrad, estudiar els temps necessaris per aconseguir les diferents pressions d'equilibri.

El present treball espera ser un punt de partida per un pròxim projecte que continuï la investigació on acaba aquest.

4. Estat de l'art

El buit és l'estat privat de matèria; és un volum d'espai que està buit de matèria, tal que la seva pressió és molt més baixa que la pressió atmosfèrica. El buit pròpiament consisteix en l'extracció d'aire o qualsevol altre gas que conté un espai mitjançant una bomba d'aire o altre mitjà artificial. En la naturalesa no existeix un espai el qual es trobi completament sense matèria.

En el cas que concerneix aquest treball, la creació d'aquest espai privat de matèria s'utilitza per aconseguir que les partícules es moguin en l'espai d'una manera determinada.

La història de la tecnologia de buit s'inicia a la Grècia antiga on el filòsof Democritus (460-375 aC) va formular que el món estava format per partícules indivisibles de mida molt reduïda denominades àtoms [1]. No obstant això, va ser Aristòtil (384-322 aC) qui va negar l'existència del buit, ja que entrava en conflicte amb la idea que l'univers es compon d'un sens fi de partícules individuals.

Torricelli (1600-1643) va realitzar el primer intent amb èxit de produir buit, convencent a la comunitat científica de la seva existència.

El 1879, Thomas Edison (1847-1931) va començar utilitzant tecnologia de buit per produir les primeres llums.

En l'actualitat, tot i que el buit es considera una aplicació limitada o desconeguda en l'àmbit industrial, cada vegada està més present. A continuació es mostren alguns dels camps d'utilització de la tecnologia de buit:

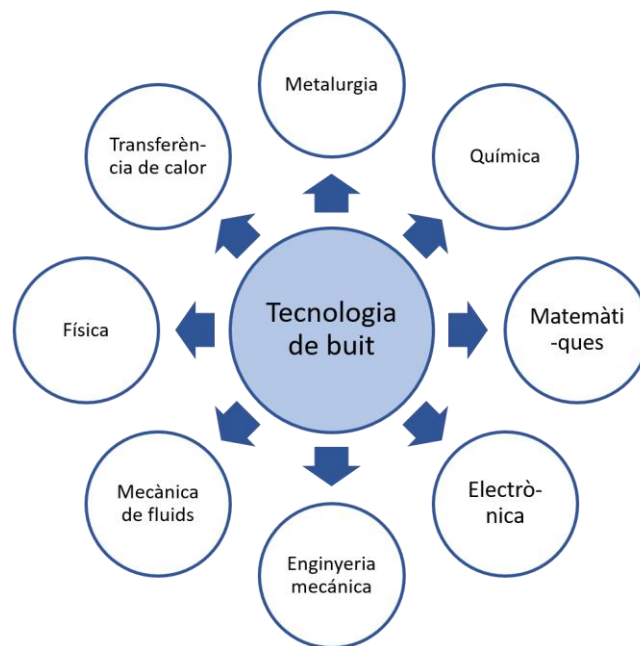


Figura 1. Camps d'utilització del buit [2].

Pel que fa als microtrons, la història s'inicia el 1944 quan V.I. Veksler va proposar la seva idea i el principi del seu funcionament. La primera màquina va ser construïda el 1948 a Canadà [3].

A mitjans de la dècada del 1960 la tecnologia del microtró va aconseguir un estat de desenvolupament pròxim, o inclús superior, a la resta d'acceleradors de partícules d'energies fins a 30 MeV. A causa de la seva simplicitat inherent, al ser de fàcil construcció i tenir un cost reduït, es va desenvolupar al món en un ampli rang d'aplicacions científiques i tecnològiques.

Des de llavors s'ha continuat desenvolupant la tecnologia en molts laboratoris i hi ha construïts molts acceleradors d'aquest tipus.

5. Marc teòric

5.1. Conceptes teòrics

En aquest apartat es presenten diferents conceptes teòrics sobre el buit als quals es fa referència al llarg del treball per així facilitar la seva comprensió.

5.1.1. Tipus de buit

Des de la pressió atmosfèrica fins a aconseguir el nivell de buit que exigeix el sistema estudiat (ultra-buit) es passa per diferents rangs. Aquesta classificació, mostrada a continuació, es basa en la tecnologia necessària per aconseguir el nivell de buit o la necessària per mesurar-lo.

Taula 1. Classificació del nivell de buit segons pressió [4].

Nivell de buit	Pressió
Baix buit	Pa - 10^{-1} Pa
Buit mitjà	10^{-1} - 10^{-4} Pa
Alt buit	10^{-4} - 10^{-7} Pa
Ultra-buit	10^{-7} - 10^{-9} Pa
Buit extrem	$< 10^{-9}$ Pa

En ser l'objectiu simular l'ultra-buit, els nivells de pressió amb els quals es treballa estan compresos entre els 10^{-7} i els 10^{-9} Pa, tal com s'observa en la taula anterior.

Les principals característiques d'aquest nivell de buit [4] són que:

- Els gasos s'originen des de les parets o des de les superfícies, i no des de l'atmosfera com passa amb el baix buit.
- El flux que regeix els gasos és el flux molecular, concepte explicat en aquest mateix capítol.
- La pressió i el temps de bombeig vénen determinats per l'àrea de la superfície, el material, la velocitat de bombeig i la temperatura.
- La font principal de gas és l' H_2 .

Que la font principal de gas sigui l' H_2 ve causat perquè aquest és el principal element que es troba a l'ultra-buit, tal com s'observa a continuació.

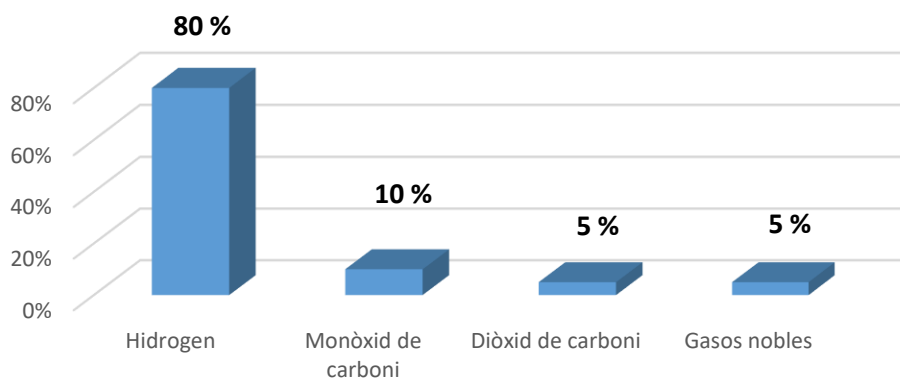


Figura 2. Percentatge en volum de molècules a l'ultra-buit [4].

5.1.2. Camí lliure mitjà

El camí lliure mitjà (l) és la distància mitjana que una molècula de gas es desplaça abans de col·lidir amb una altra molècula de gas [4].

En disminuir la pressió en la cambra de buit, la quantitat d'espai entre molècules augmenta i, per tant, les partícules xoquen amb una freqüència inferior. En conseqüència, el camí lliure mitjà augmenta.

En la següent figura es representa gràficament aquesta disminució de partícules des del baix buit fins a l'ultra-buit, passant per l'alt buit, per tal de comprendre millor el concepte de camí lliure mitjà.

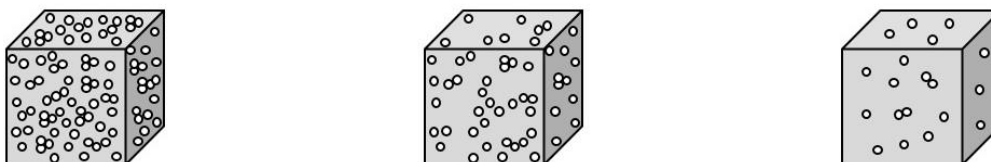


Figura 3. Nivells de buit d'esquerra a dreta: baix, alt i ultra-buit [5].

Tal com es pot observar, la probabilitat d'impactar amb una altra molècula quan s'està en condicions d'ultra-buit és molt inferior que en el cas del baix buit a causa de la densitat de les partícules en un mateix recinte.

A partir d'aquest concepte es defineixen els diferents fluxos de gas, explicats a continuació.

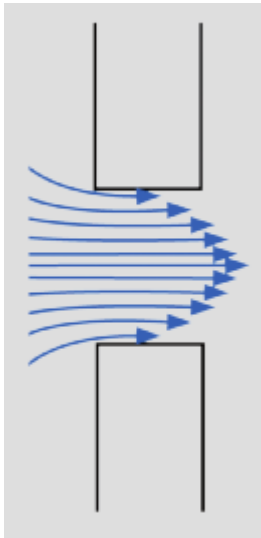
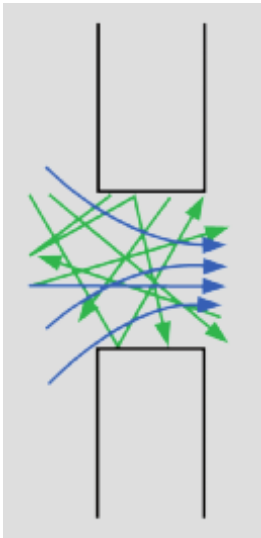
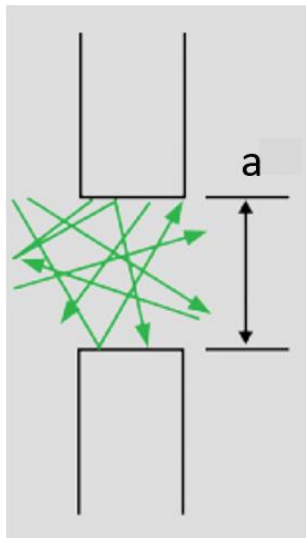
5.1.3. Fluxos de gas

De la mateixa manera que en la transició entre pressió atmosfèrica i ultra-buit es passa per diferents nivells de buit, també es passa per tres règims de flux [6]. Aquests defineixen les propietats del flux en cada interval i estan caracteritzats per valors específics d'un paràmetre adimensional denominat el nombre de Knudsen (Eq. 1), K_n . Aquest nombre es defineix com la proporció entre la longitud del camí lliure mitjà molecular (l) i la dimensió característica del recinte (a):

$$K_n = \frac{l}{a} \quad (\text{Eq. 1})$$

Segons el valor del nombre de Knudsen es determina si les equacions clàssiques de la dinàmica de fluids poden aplicar-se. Els tres règims mencionats són els següents:

Taula 2. Diferents règims de flux i les seves característiques [7].

Flux viscos	Flux de transició	Flux molecular
$K_n < 0,01$ Baix buit	$0,01 < K_n < 1$ Buit mitjà/alt	$K_n > 1$ Ultra-buit
		

En el flux viscos, o flux continu, hi ha col·lisions contínues entre les partícules de gas i amb una freqüència baixa contra les parets del recinte. En aquest cas, es defineix un altre nombre adimensional, el nombre de Reynolds (Eq. 2), a partir del qual es diferencien dos estats: laminar i turbulent.

$$Re = \frac{d v \rho}{\mu} \quad , \quad (Eq. 2)$$

on d és la distància característica del recinte, v és la velocitat, ρ la densitat i μ la viscositat.

- Règim laminar ($Re < 2100$): les partícules de gas es troben distribuïdes en capes que són constantment paral·leles entre elles.
- Règim turbulent ($Re > 4000$): en augmentar la velocitat s'arriba a aquest flux on les capes es trenquen i les partícules col·lideixen entre elles de manera aleatòria.

Per altra banda, si el valor del nombre de Knudsen és igual o superior a 1, el camí lliure mitjà és comparable amb la dimensió característica (Eq. 1) i la hipòtesi de mecànica de fluids ja no és una bona aproximació. Aquest és el cas que concerneix en general als acceleradors de partícules i, en particular, a aquest treball i es denomina règim molecular.

En el règim molecular dominen les col·lisions entre les partícules de gas i les parets; les molècules de gas col·lideixen entre elles en un baix percentatge. A més, una molècula aïllada té la mateixa probabilitat d'anar en qualsevol direcció, independentment de la direcció d'incidència.

En la següent figura es representa per una geometria arbitrària i unes condicions determinades, les col·lisions que hi ha entre les partícules i les parets en un moment concret de la simulació:

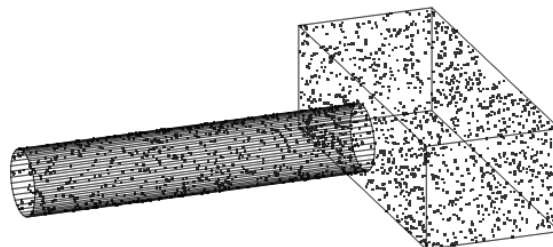


Figura 4. Representació de col·lisions entre molècules i parets en un instant concret.

5.1.4. Càrrega de gas

La càrrega de gas (*gas load*), Q en $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, és la quantitat de gas entrant al volum del sistema per unitat de temps. Aquesta càrrega està formada per la suma de diferents fonts i la seva existència és el motiu pel qual no es pot aconseguir el buit absolut, en estar el buit limitat a un valor de pressió [8]. Aquest valor es denomina pressió última (*ultimate pressure*) i és el límit inferior de pressió que es pot aconseguir en aquell sistema per a aquelles condicions determinades. La pressió última és funció de la càrrega de gas total i de la

velocitat de bombeig efectiva.

Com no és possible eliminar per complet les diferents càrregues de gas, l'objectiu és mantenir-les amb un valor tan petit com sigui possible perquè el sistema de bombeig sigui capaç d'aconseguir el buit desitjat amb una quantitat de temps raonable i mantenir aquest nivell durant el procés.

Les càrregues [4] poden aparèixer com a resultat de:

- Les condicions de superfície: desorció.
- Els materials: difusió i permeació.
- Fugues: reals i internes o virtuals.
- Les bombes: flux revers.

A continuació es mostra de manera gràfica les diferents càrregues de gas que poden aparèixer en el sistema:

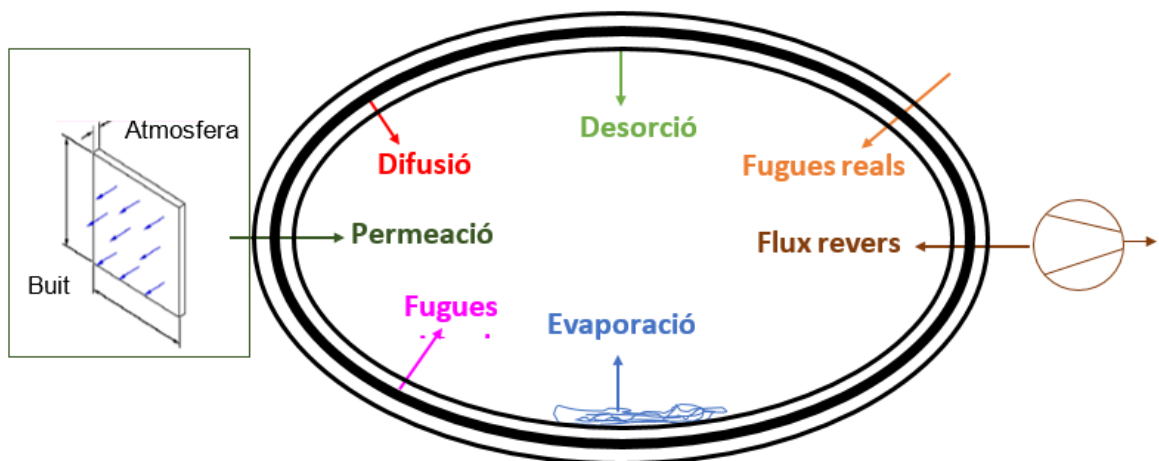


Figura 5. Fonts de càrregues de gas en un sistema de buit [6].

Les següents fonts de càrrega [4] poden ser erradicades: fugues reals, fugues virtuals, flux revers i evaporació. Per altra banda, les següents són inevitables: permeació, difusió, desorció (*outgassing*).

La desorció és un dels principals problemes de treballar en pressions d'ultra-buit perquè dificulta tant aconseguir aquest nivell de pressió com mantenir-lo. És per aquest motiu que s'estudia detingudament durant aquest treball.

5.1.5. Pressió

La pressió (p) en un sistema de buit (Eq. 3) es defineix com la mitjana de la força (F) que les

molècules apliquen sobre una superfície (A_1) en impactar contra aquesta [6]. La pressió es defineix com:

$$p = \frac{F}{A_1} \quad (\text{Eq. 3})$$

Segons la llei dels gasos ideals definida per Boyle i Mariotte, el volum (V) d'una quantitat de gas a temperatura constant és inversament proporcional a la pressió, sent:

$$P \cdot V = ct$$

Més endavant es va definir la llei de Gay-Lussac, que enuncia que per un mateix gas a una pressió constant, si el volum del recinte disminueix, la temperatura també disminuirà:

$$\frac{V}{T} = ct$$

La combinació de les dues lleis proporciona una relació entre el volum, la temperatura i la pressió per un mateix gas:

$$\frac{V \cdot p}{T} = ct$$

A partir d'aquí es troba la coneguda llei ideal dels gasos

(Eq. 4):

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (\text{Eq. 4})$$

sent n el nombre de mols i R la constant universal dels gasos.

Per tal de conèixer el nombre de molècules a partir de la llei ideal dels gasos, es relaciona l'equació anterior

(Eq. 4) amb la constant d'Avogadro ($N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$):

$$p \cdot V = \frac{N}{N_A} \cdot R \cdot T = N \cdot k \cdot T \quad (\text{Eq. 5})$$

on N és el nombre de partícules i k la constant de Boltzmann ($k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$).

Tal com es pot observar en l'equació anterior (Eq. 5) la pressió depèn directament del nombre de molècules. És per aquest motiu que no és possible aconseguir el buit mentre existeixi càrrega de gas en el sistema.

5.1.6. Conductància

Generalment, les cambres de buit estan connectades a les bombes a través d'una canonada [7]. Com és lògic, existeix una resistència a l'avanç com a conseqüència de la fricció externa entre les molècules de gas i la superfície de les parets i una fricció interna entre les mateixes molècules de gas (viscositat). Aquesta resistència es manifesta amb diferències de pressió i amb pèrdues de velocitat de bombeig. En sistemes de buit aquest fenomen es denomina conductància (C , en m^3/s) i es defineix com el valor que determina la facilitat amb la qual un volum de gas passa d'una banda a una altra en un sistema de buit

(Eq. 6). Aquest valor és específic per a un gas i per a una geometria.

Per a una càrrega de gas Q , la conductància es defineix com:

$$Q = C \cdot (\Delta p) \quad (\text{Eq. 6})$$

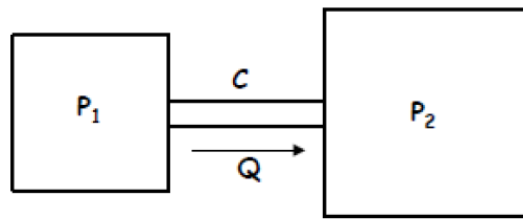


Figura 6. Geometria d'exemple d'aplicació de l'equació de la conductància [4].

En el cas de la figura, es té:

$$Q = C \cdot (p_2 - p_1) \quad (\text{Eq. 7})$$

Quan el camí lliure mitjà del sistema és inferior a la dimensió característica, és a dir, en el règim viscos, la conductància depèn de la pressió. Per altra banda, en el cas del règim molecular, el valor de C és independent de la pressió.

En el cas d'una geometria més complexa que en l'exemple anterior, per determinar la conductància equivalent en configuracions sèrie (Eq. 8) o paral·lel (Eq. 9) hi ha una analogia amb el càlcul de capacitàncies en circuits elèctrics:

$$\text{Sèrie:} \quad \frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_1} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$\text{Paral·lel:} \quad C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (\text{Eq. 9})$$

Tot i que existeixen diferents fórmules empíriques per determinar C , en dependre de

diversos paràmetres, com són temperatura, massa molecular i geometria, no existeix una expressió teòrica exacta.

5.1.7. Velocitat de bombeig

La velocitat de bombeig (S , en m^3/s) indica la quantitat de volum de gas que és extret per la bomba per unitat de temps [6] i s'expressa com:

$$S = \frac{Q}{p} \quad (\text{Eq. 10})$$

Si es compara l'equació de la conductància

(Eq. 6) i la de la velocitat de bombeig (Eq. 10) s'observa que aquests dos paràmetres són iguals independentment de la resta de paràmetres o de les característiques de la geometria. Això és degut a l'equilibri existent en el sistema, on segons la resistència del sistema la bomba s'adapta i extreu un volum o altre de cabal.

El valor que acostuma a proporcionar el fabricant és S . Si es tenen en compte les pèrdues, s'obté la velocitat de bombeig efectiva (S_{ef}), que es determinaria de la següent manera:

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{S} \quad (\text{Eq. 11})$$

5.2. Microtró

Un microtró és un tipus d'accelerador de partícules en el qual l'augment de l'energia de les partícules s'aconsegueix a partir d'una estructura d'acceleració, concepte que s'explica en el següent apartat. La física que governa els microtrons està basada en la mecànica clàssica relativista, les lleis físiques que descriuen el moviment de les partícules properes a la velocitat de la llum [9].

Tot i haver-hi dos tipus de microtrons (els circulars o clàssics i els de pista) en aquest treball únicament s'expliquen els de pista (*race-track microtron*, *RTM*). Aquest tipus es considera com un microtró circular separat en dues meitats, que conté una estructura d'acceleració col·locada al tram recte entre els dos imants dipolars i és capaç de guanyar molta més energia que l'altre tipus.

A continuació es mostra un microtró de pista i s'explica en termes generals el seu funcionament:

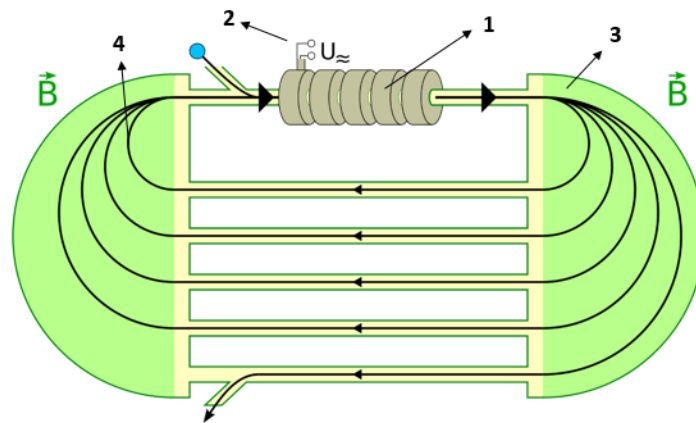


Figura 7. Dibuix d'un microtró de pista amb les seves parts indicades [10].

Tal com s'observa en la figura anterior, el feix d'electrons injeccionat és accelerat a l'accelerador lineal (1), per un camp electromagnètic d'alta freqüència (2). Després de sortir de la cavitat, els electrons segueixen una trajectòria rectilínia fins a arribar a l'espai sota la influència d'un camp magnètic (3) que corba el feix d'electrons 180°. Aquest camp el dirigeix en sentit contrari fins a un altre camp magnètic simètric a l'anterior, que torna a corbar el feix 180° cap a la cavitat de l'accelerador (4). Amb cada pas per l'accelerador, els electrons tenen cada vegada més energia amb una proporció constant.

En concret, el Microtró de la UPC pren la forma mostrada en les següents figures:

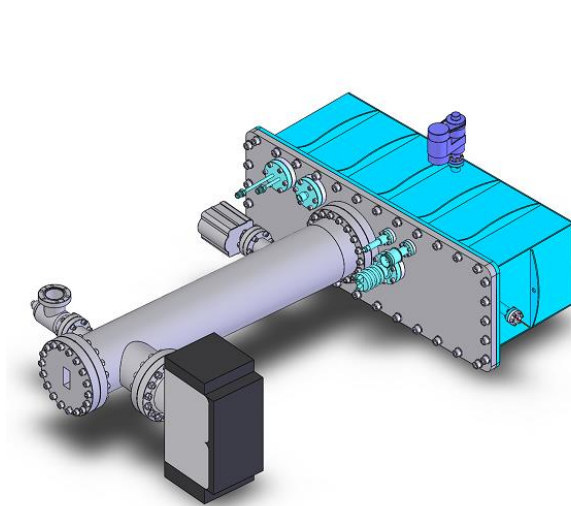


Figura 8. Representació del Microtró objecte d'estudi.

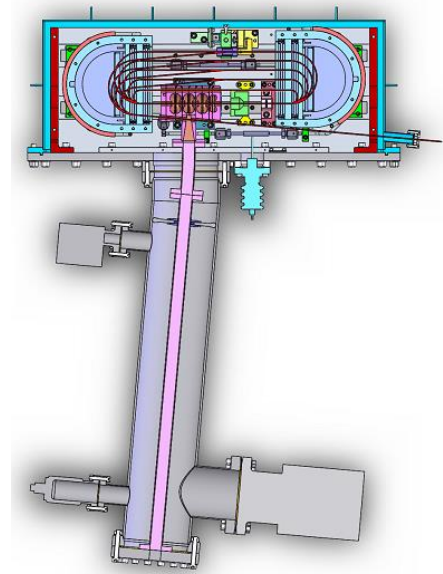


Figura 9. Vista de la secció en planta del Microtró objecte d'estudi i els seus components.

5.3. Tecnologia del buit

5.3.1. Bomba turbomolecular

La bomba turbomolecular és una bomba mecànica que es basa en la transferència d'impulsos ocasionada per la col·lisió de les molècules amb les pales, les quals tenen una ràpida rotació (velocitat superior a 42.000 rad/s) [11], [12]. Amb aquesta col·lisió s'obté un component de velocitat en la direcció del moviment.

La velocitat de bombeig (Eq. 12) d'aquest tipus de bombes és proporcional a la mencionada velocitat de rotació (ω) i a l'àrea de l'entrada a la bomba (A_2).

$$S \propto \omega \cdot A_2 \quad (\text{Eq. 12})$$

El principal paràmetre en aquest tipus de bombes és la compressió (Eq. 13) que s'aconsegueix, definida com la ràtio entre la pressió de sortida i la pressió d'entrada:

$$K = \frac{p_{\text{sortida}}}{p_{\text{entrada}}}, \quad (\text{Eq. 13})$$

on K és una funció exponencial que depèn del pes molecular i de la velocitat de rotació. Les ràtios de compressió comercials van des de 10^3 per a l' H_2 fins a 10^9 per al N_2 .

Actualment, pel Microtró d'estudi, s'utilitza una bomba turbomolecular del model Mini-Task AG81. A continuació s'especifiquen els principals valors de la bomba i es mostra una representació d'aquesta:

Taula 3. Valors principals de la bomba turbomolecular del Microtró d'estudi [13].

Paràmetre	Valor	
Velocitat de bombeig [m^3/s]	N_2	0,040
	H_2	0,036
	He	0,045
Pressió base [Pa]	$2 \cdot 10^{-5}$	
Temperatura de funcionament [$^{\circ}\text{C}$]	5 a 35	

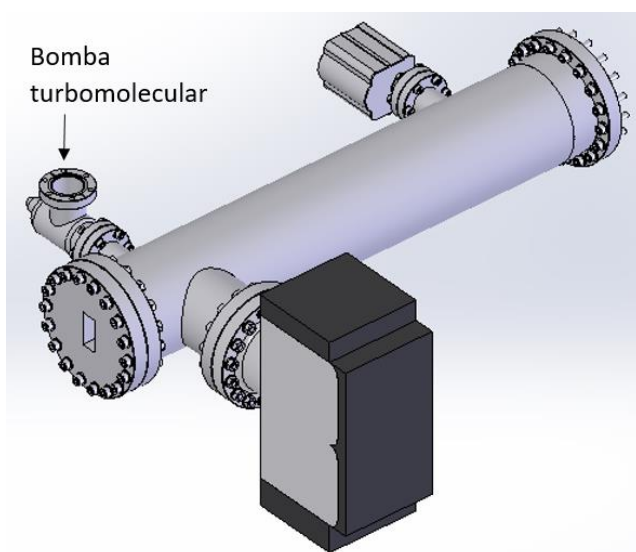


Figura 10. Ubicació de la bomba turbomolecular.

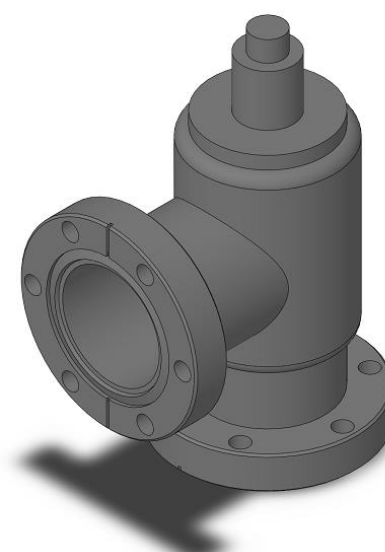


Figura 11. Representació de la bomba turbomolecular Mini-Task AG81.

5.3.2. Bomba iònica

Una bomba iònica és un tipus de bomba de buit capaç d'aconseguir pressions de l'ordre de 10^{-9} Pa [4].

La bomba iònica corresponent al Microtró d'estudi és la Vaclon Plus 75 StarCell, que té les següents especificacions tècniques:

Taula 4. Valors principals de la bomba iònica del Microtró d'estudi [14].

Paràmetre	Valor
Velocitat de bombeig per Nitrogen [m^3/s]	0,065
Vida útil a $1 \cdot 10^{-4}$ Pa [s]	$28,8 \cdot 10^7$ (80.000 hores)
Pressió inicial màxima [Pa]	≤ 5
Pressió última [Pa]	$\leq 5 \cdot 10^{-9}$
Màxima temperatura de funcionament [$^{\circ}\text{C}$]	350
Massa [kg]	19

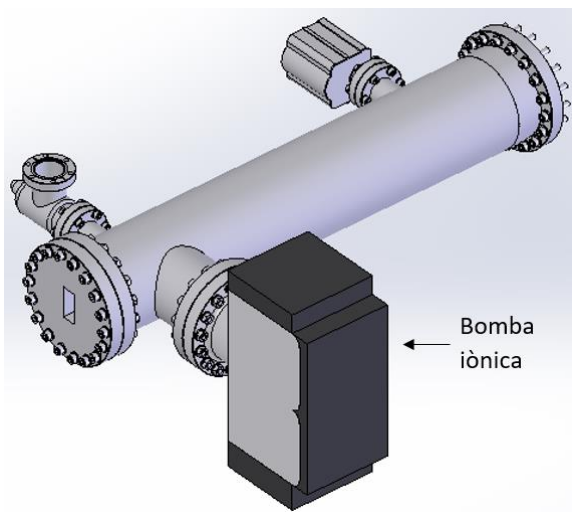


Figura 12. Ubicació de la bomba iònica.

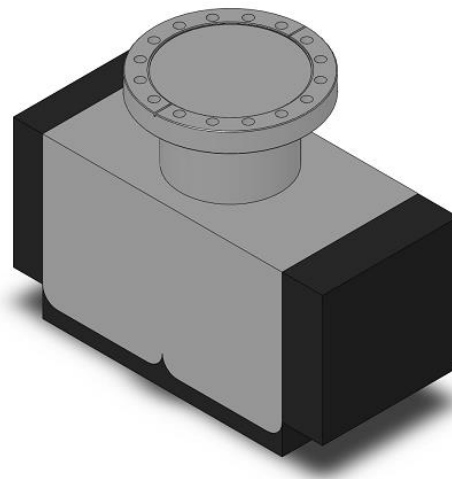


Figura 13. Representació de la bomba iònica Vaclon Plus 75 StarCell.

5.3.3. Cambra de buit

Una cambra de buit és un recipient del qual s'extreu l'aire i la resta de gasos amb l'ajuda d'una o diverses bombes de buit. D'aquesta manera s'aconsegueix un espai de baixa pressió que permet dur a terme experiments físics o provar la funcionalitat de certs components. Per l'interior d'aquesta cambra se situen diferents components com els imants o l'estructura d'acceleració; a més, és per on passa el feix d'electrons.

Tant la cambra de buit del Microtró objecte d'estudi com el tub de buit estan fabricats amb acer inoxidable AISI 304L.

5.3.4. Estructura d'acceleració

Una estructura d'acceleració o linac (*linear accelerator*) és un dispositiu que accelera partícules subatòmiques en passar per un tub fins a altes velocitats [15], [16].

Aquest està constituït per un tub llarg format per quatre cavitats ressonants, disposades successivament, tal com s'observa a la següent figura:

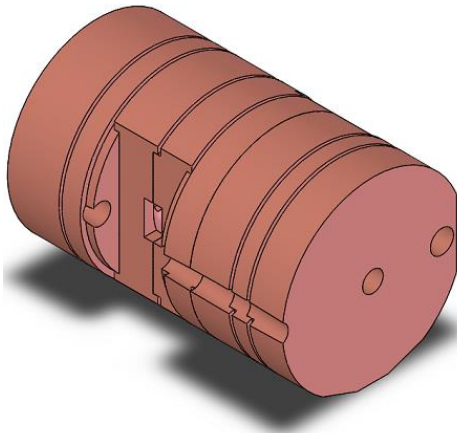


Figura 14. Representació del linac.

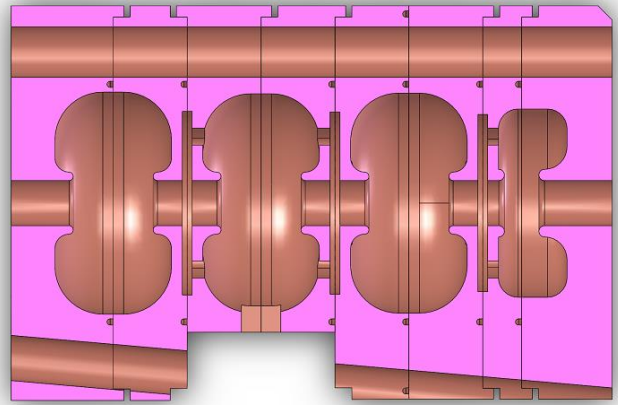


Figura 15. Vista de la secció en planta de les 4 cavitats per on passa el feix d'electrons.

A més s'introdueix una guia d'ona electromagnètica que és un tub de secció rectangular que passa per l'interior del tub de bombeig i acaba a l'interior d'una de les cavitats anteriorment representades.

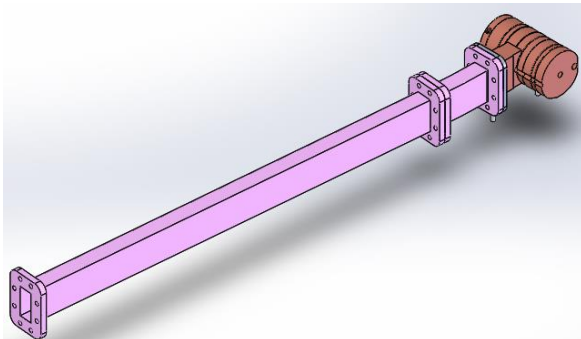


Figura 16. Representació del conjunt del linac.

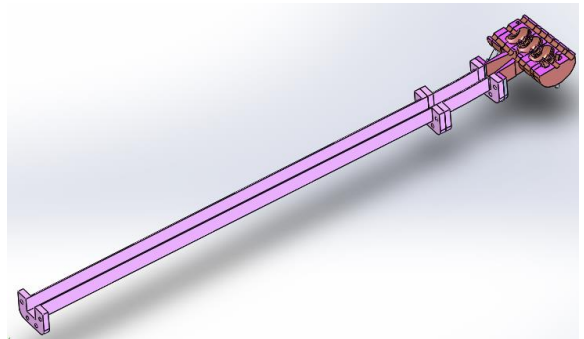


Figura 17. Vista de la secció en planta de tota l'estructura d'acceleració.

El conjunt de l'estructura d'acceleració està fet de coure.

5.3.5. Imants

En el Microtró que concerneix aquest treball, per tal de guiar i corbar el feix d'electrons s'utilitzen dos imants dipolars, anomenats imants corbadors (*bending magnets*) [17]. Aquests imants presenten un radi de curvatura (com s'observa a la Figura 19), gràcies al qual s'aconsegueix desviar la trajectòria del feix d'electrons.

Els imants són permanents i és per aquest motiu que estan disposats a l'interior de la cambra de buit.

Els imants en estar compostos per diferents parts, també estan compostos per diferents materials. Tot i això, en ser la major part d'acer inoxidable AISI 304L, aquest és el material amb el qual es treballa.

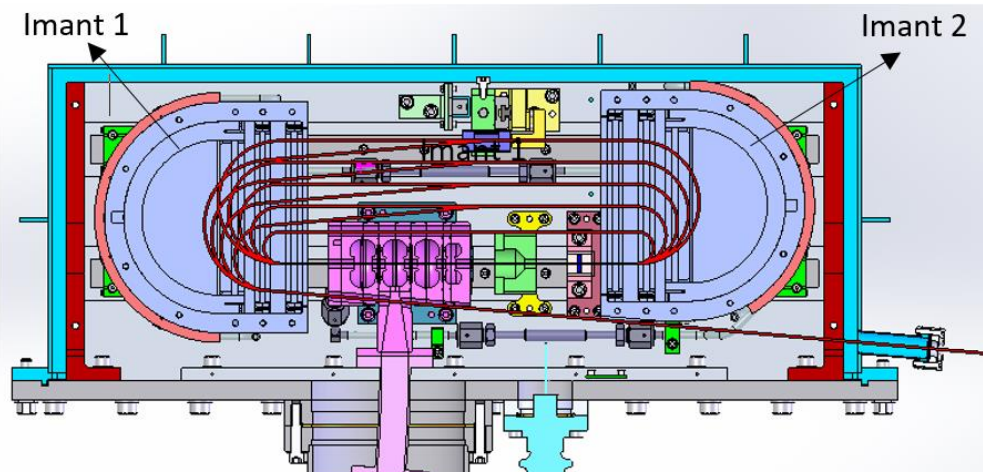


Figura 18. Ubicació dels dos imants en la vista de secció en planta detallada.

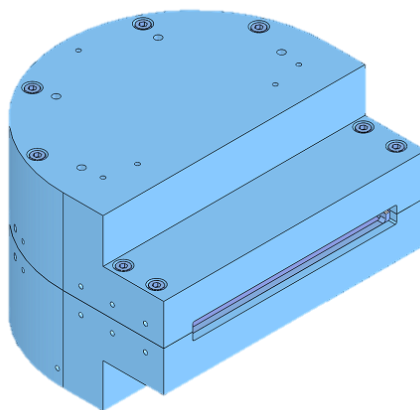


Figura 19. Representació d'un dels dos imants.

5.3.6. Sensor

Per tal de mesurar la pressió del Microtró hi ha situat en el tub de buit un sensor de pressió.

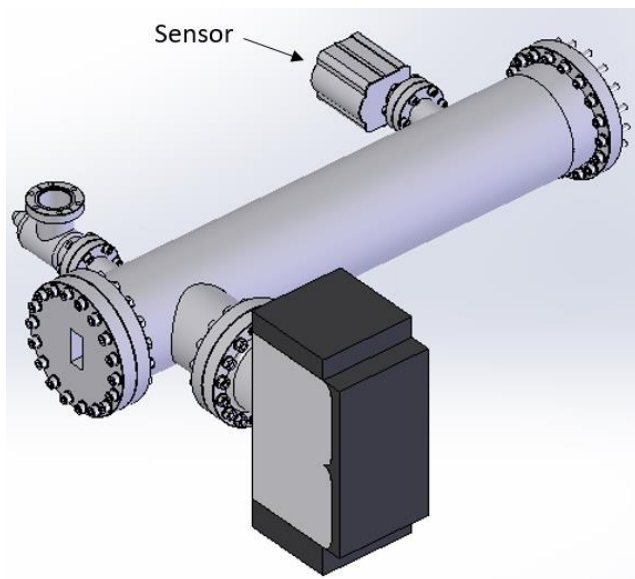


Figura 20. Ubicació del sensor en el Microtró.

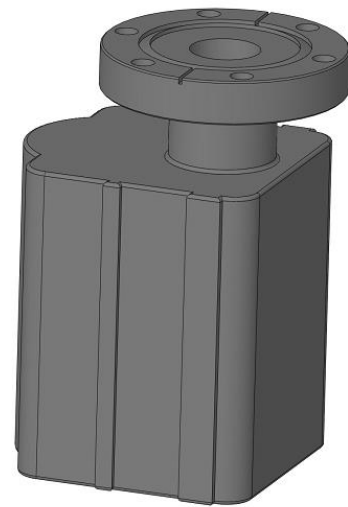


Figura 21. Representació del sensor del Microtró de la UPC.

El material del sensor també és acer inoxidable AISI 304L.

5.4. MolFlow+

MolFlow+ és un simulador per a sistemes d'ultra-buit, desenvolupat al CERN (Organització Europea per a la Investigació Nuclear), que permet calcular la pressió d'equilibri en una geometria arbitrària quan es dóna la condició d'ultra-buit [18]. El nom prové de *Molecular Flow* (flux molecular), la condició que es dóna quan el recorregut lliure de les molècules és tan llarg que en comparació amb la mida de la geometria es poden negligir les col·lisions. És en aquest cas, quan les partícules es mouen lliurement, que s'aplica el mètode de Monte Carlo per a les simulacions.

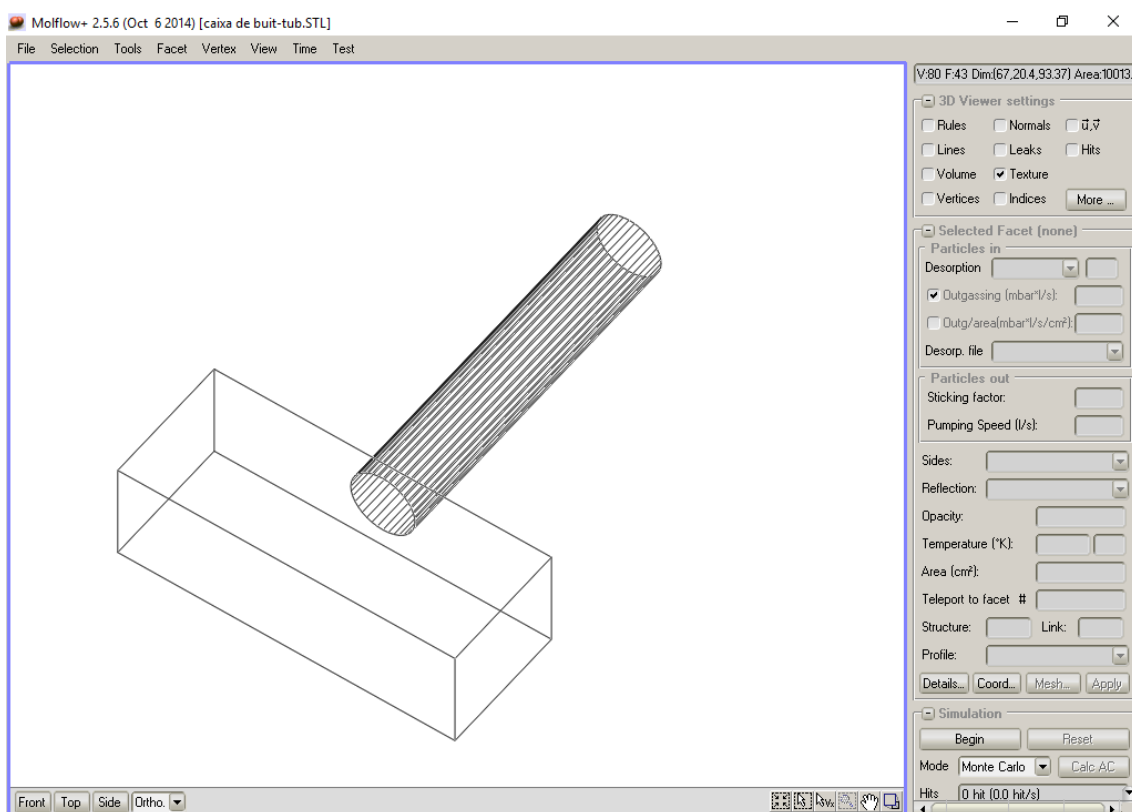


Figura 22. Interfície del Molflow+.

El mètode de Monte Carlo és un mètode estocàstic que s'utilitza per aproximar la solució de problemes físics i matemàtics complexos mitjançant la simulació de variables aleatòries [19]. La importància actual d'aquest mètode es basa en l'existència de problemes que tenen difícil solució mitjançant mètodes exclusivament analítics o numèrics, però que depenen de factors aleatoris o que poden ser associats a un model probabilístic artificial.

Actualment, en el Molflow+, les geometries utilitzades es poden importar de molts programes CAD; en particular aquells que són compatibles amb el format STL. Pel present treball s'ha utilitzat el SolidWorks per a dissenyar la geometria i s'ha importat al Molflow+ per tal de realitzar les simulacions.

5.4.1. Càlcul de la pressió

Per descriure la velocitat de les partícules en un sistema de buit en equilibri (Eq. 14) s'utilitza el model de Maxwell-Boltzmann, ja que les partícules es mouen lliurement dins d'un recipient sense interacció entre elles [20]. Aquesta velocitat mitjana (\bar{v}) es defineix com:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad , \quad (\text{Eq. 14})$$

on R és la constant ideal dels gasos, T és la temperatura en Kelvins i M és la massa molecular del gas en kg/mol.

Tal com s'observa, la velocitat mitjana de les molècules és independent de la pressió del gas, i depèn únicament del pes molecular del gas i de la temperatura absoluta.

El mateix programa, a partir de la capacitat de bombeig de la bomba i del valor de desorció que s'introdueix, simula amb la velocitat de bombeig efectiva (Eq. 11).

5.4.2. Funcionament del Molflow+

Les geometries en el Molflow+ són un conjunt de cares (*Facets*) i vèrtexs (*Vertex*). Les cares indiquen en quin dels costats està present el buit i estan unides a la següent mitjançant els vèrtexs. En aquest treball s'ha realitzat un model simplificat que únicament inclou aquelles parts de la geometria que estan en contacte amb el buit. D'aquesta manera s'elimina l'excés de cares que es poden generar en importar la geometria. Així, elements circulars es fan poligonals i s'eliminen elements no necessaris com cargols, brides o rosques. Gràcies a aquestes simplificacions es redueix considerablement el nombre de cares i, consegüentment, el temps de càlcul.

Per tal de conèixer la pressió en una superfície desitjada cal indicar al software quina és aquesta superfície, sense limitació de mida, i en quin eix es vol calcular (únicament és possible en un dels dos en cada simulació).

Molflow+ divideix aquesta superfície en 100 parts o cel·les i calcula la pressió mitjana en cada una d'aquestes superfícies. Per tant, el que s'obté són 100 valors de pressió al llarg de l'eix que s'ha indicat.

Quan es malla una superfície (*mesh*) el valor donat és la quantitat de vegades que es divideix cada una de les 100 cel·les.

6. CÀLCULS PRELIMINARS

6.1. Estudi de sensibilitat

Amb l'objectiu de valorar com funciona el model, observar les diferències segons el cas estudiat i analitzar la sensibilitat de la geometria davant determinats paràmetres, es realitzen simulacions prèvies a les pròpies del Microtró. Aquestes consisteixen en una geometria més simple on únicament hi ha la cambra de buit, el tub de bombeig i una bomba.

La geometria de la qual es parteix és la següent:

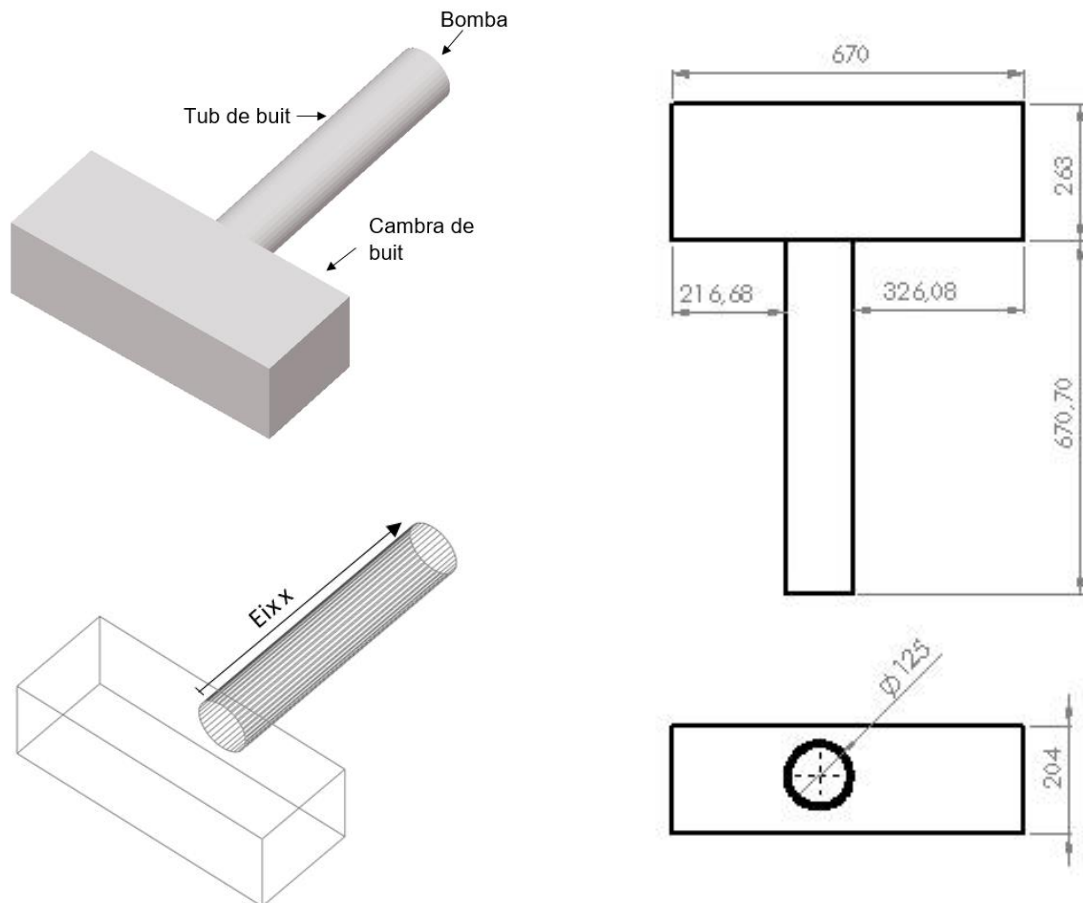


Figura 23. Geometria bàsica per estudiar la sensibilitat i funcionament del Molflow+, cotes en mm.

6.1.1. Estudi de la malla

En primer lloc, es busca quin mallat mínim òptim cal utilitzar quan es vol determinar un perfil de pressió.

Quan es malla una superfície el que s'està fent és dividir aquella mateixa superfície en cel·les on la pressió es calcula individualment per a cada una d'elles. En el cas del Molflow+ cada cel·la és un quadrat de mida arbitrària. En calcular la pressió en cada cel·la és evident que com més s'augmenti la malla i, conseqüentment, el nombre de divisions, més precís és el resultat. El que s'estudia en aquesta primera part preliminar és la necessitat real d'aquesta precisió, observant la diferència de resultats obtinguts segons el mallat utilitzat.

Per l'anteriorment exposat, es realitzen simulacions numèriques amb diferents valors de malles per a aquesta geometria i per uns valors donats de desorció, temperatura i velocitat de bombeig, especificats a continuació:

Taula 5. Paràmetres i valors utilitzats per a l'estudi de la malla.

Paràmetre	Valor
Massa molecular (H₂)	2·10 ⁻³ kg/mol
Desorció/àrea (acer inoxidable)	6,7·10 ⁻¹⁰ Pa·m ³ /s·m ²
Temperatura	23 °C
Velocitat de bombeig	0,065 m ³ /s

La massa molecular utilitzada és l'hidrogen perquè, com s'ha explicat anteriorment (pàg.15), a l'ultra-buit aproximadament el 80% en volum de molècules són d'aquest element. Per altra banda, la desorció emprada correspon al material de la cambra i del tub de buit, però és un valor que pot canviar en gran mesura, tal com es veu més endavant. Pel que fa a la temperatura, la sala on es troba el Microtró està aproximadament a 23 °C, valor que se suposa constant per a totes les simulacions. Per últim, la velocitat de bombeig de 0,065 m³/s és la velocitat de bombeig nominal facilitada pel fabricant, tal com ja s'ha vist.

Per aquest primer cas, s'ha anat modificant el valor de la malla des de 100 mostra/m (malla gruixuda) fins a 800 mostres/m (malla més fina), passant per 200, 400 i 600 mostres/m.

Per tal d'estudiar l'evolució de la pressió des de la bomba de bombeig fins a la cambra de buit es crea una paret transparent longitudinal entre aquests dos punts. Es crea transparent per tal que les molècules travessin aquesta paret per les dues bandes, és a dir, que no rebotin com seria el cas d'una paret física. A més, s'especifica opacitat nul·la per la mateixa raó. El valor retornat pel programa és la quantitat de molècules que travessen la superfície creada.

A continuació es mostra el gradient de pressions per la mostra més gruixuda que s'ha simulat així com la superfície estudiada:

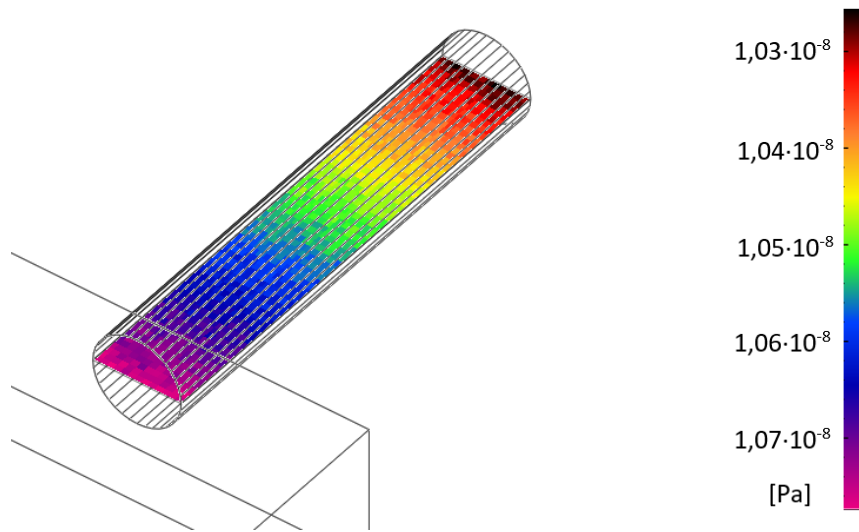


Figura 24. Representació del gradient de pressions amb una malla de 100 mostres/m.

En la següent gràfica es mostren els resultats obtinguts en les 5 simulacions:

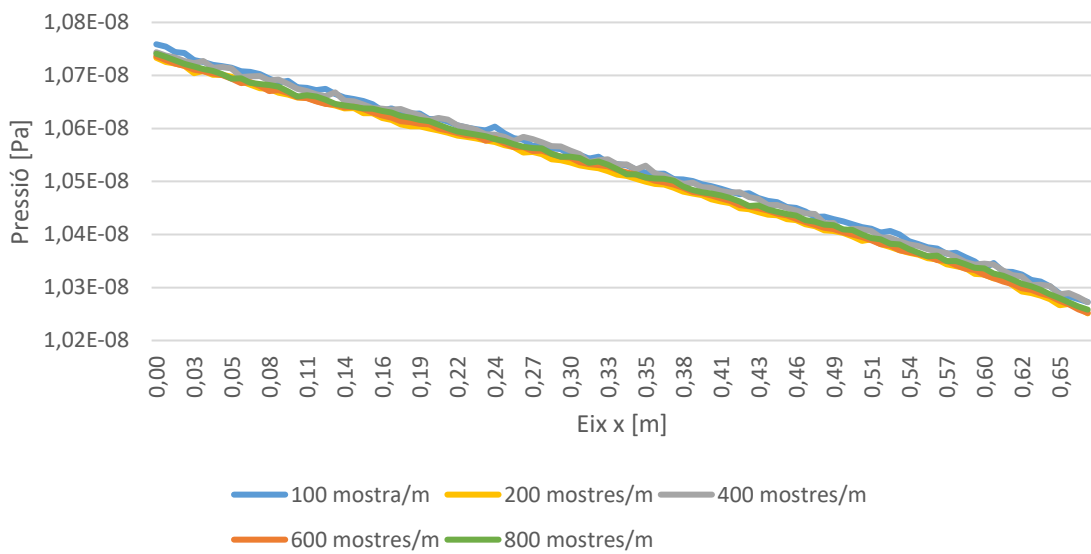


Figura 25. Perfil de pressions en una geometria donada per diferents malles.

L'eix d'abscisses de la gràfica anterior és l'eix longitudinal de la paret transparent des de la cambra de buit fins a la bomba de bombeig (Figura 23).

En ser un perfil de pressions molt semblant per les diferents malles, per facilitar la comprensió de la figura anterior, es representa únicament el perfil de pressions amb la malla més fina i amb la més gruixuda:

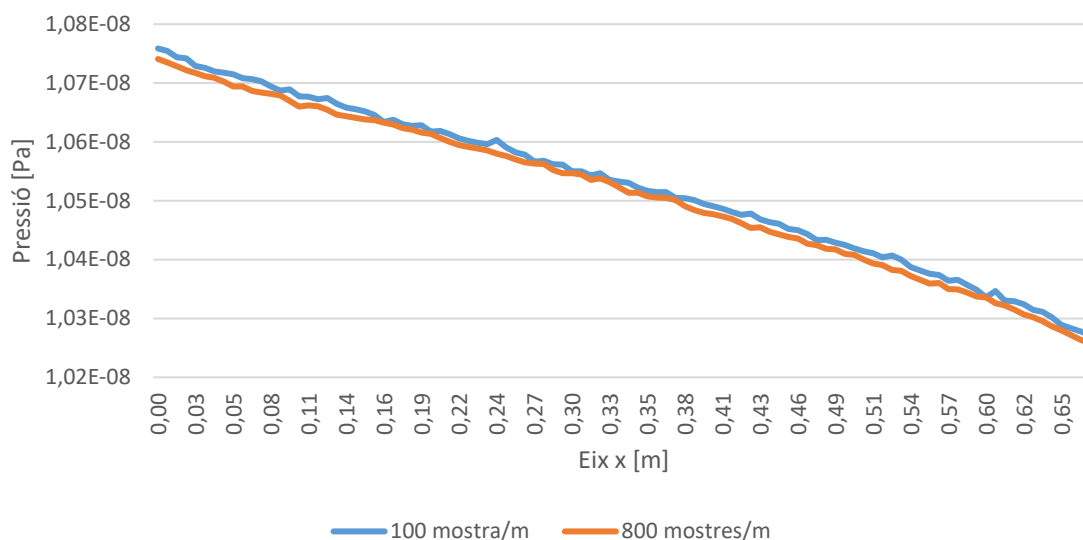


Figura 26. Perfil de pressions en una geometria donada per la malla més gruixuda i la més fina que s'ha simulat.

En els gràfics anteriors s'observa que augmentar la finor de la malla no canvia la linealitat dels resultats. Tot i així, per tal d'analitzar la possible existència de tendència dels resultats en augmentar la finor, es representa la pressió mitjana per a cada una de les resolucions mencionades:

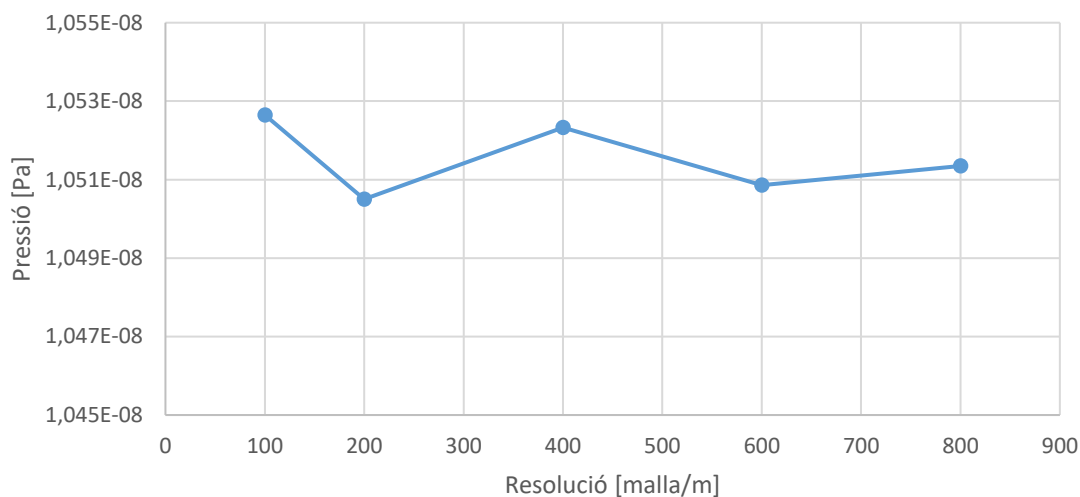


Figura 27. Representació de la pressió mitjana per a cada resolució simulada.

A continuació es calcula el percentatge de la diferència entre el valor màxim i el mínim respecte la pressió mitjana:

$$Error (\%) = \frac{p_{m\grave{a}x} - p_{m\grave{i}n}}{\Delta P_{mitjana}} = 0,2\%$$

En observar que l'error comès en utilitzar una malla o altra és molt petit i en haver-se observat que com més fina és la malla el temps necessari per arribar a la convergència del resultat augmenta en gran mesura, es decideix que per una geometria simple, com són les relatives als presents casos, s'utilitza una malla de 200 mostres/m, en tenir aquesta un resultat fiable i en obtenir els resultats menys temps.

6.1.2. Estudi de sensibilitat

En aquest apartat s'estudia l'efecte de la velocitat de bombeig i la taxa de desorció en el valor de la pressió.

a) Velocitat de bombeig

En primer lloc, s'escullen diferents valors de velocitat de bombeig basats en les bombes que actualment hi ha al Microtró. El valor més baix utilitzat és 0,040 m³/s que correspon a la velocitat de bombeig de la bomba turbomolecular actual. A continuació, es realitza les simulacions amb velocitat de bombeig de 0,065; 0,068 i 0,075 m³/s que són el valor de la bomba iònica actual i els dos valors de les següents gammes possibles, respectivament.

Taula 6. Paràmetres i valors utilitzats per a l'estudi de sensibilitat de la velocitat de bombeig.

Paràmetre	Valor
Massa molecular (H ₂)	2·10 ⁻³ kg/mol
Desorció/àrea (acer inoxidable)	6,7·10 ⁻¹⁰ Pa·m ³ /s·m ²
Temperatura	23 °C
Malla	200 mostres/m

Prèviament a mostrar els resultats gràficament es mostra la distribució de pressions per a la velocitat de bombeig més alta:

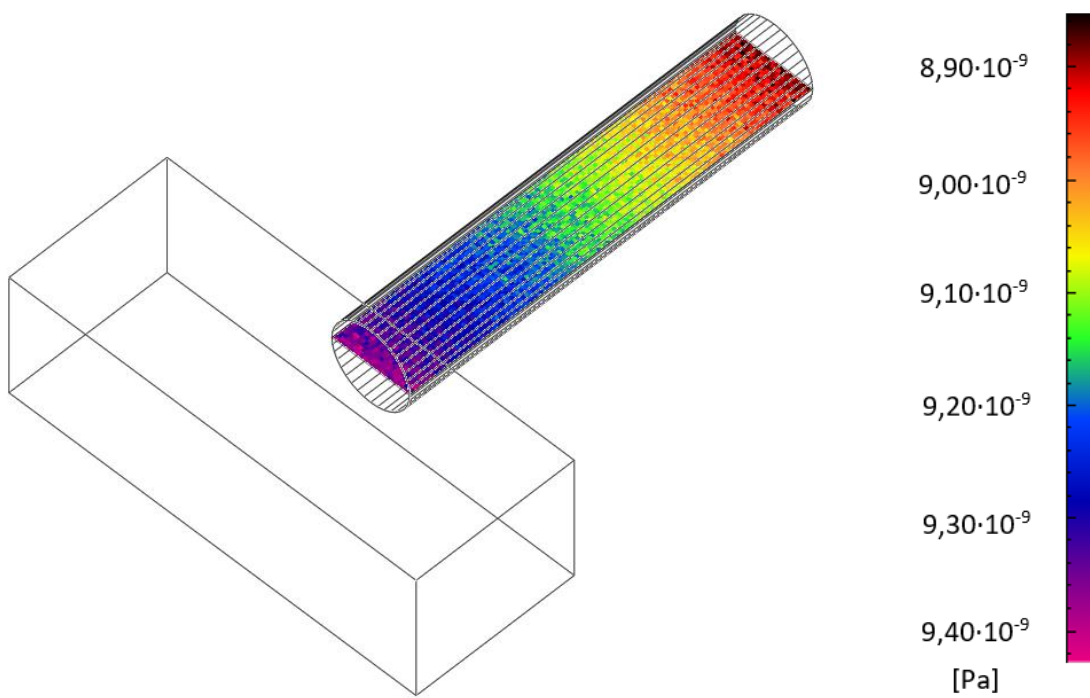


Figura 28. Perfil de pressió per velocitat de bombeig de 0,075 m³/s.

A continuació es mostra de manera gràfica els resultats per a les diferents velocitats de bombeig:

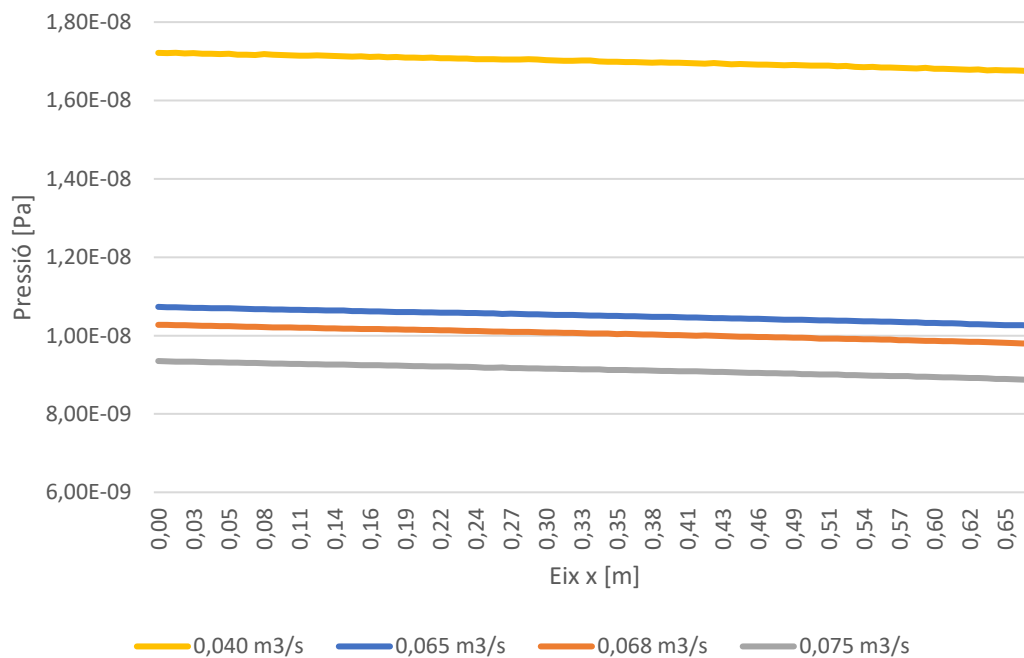


Figura 29. Perfil de pressions en una geometria donada per diferents velocitats de bombeig.

En vista dels resultats obtinguts es decideix analitzar la tendència entre la pressió i la velocitat de bombeig. Per a realitzar-ho és necessari la simulació de més velocitats de bombeig, el valor de les quals s'escull segons es considera necessari per definir la tendència. En la següent gràfica es mostren la pressió màxima, mitjana i mínima del tub de bombeig representat a la Figura 28 per a cada velocitat de bombeig simulada. De la mateixa manera, es representa la tendència i l'equació que la defineix:

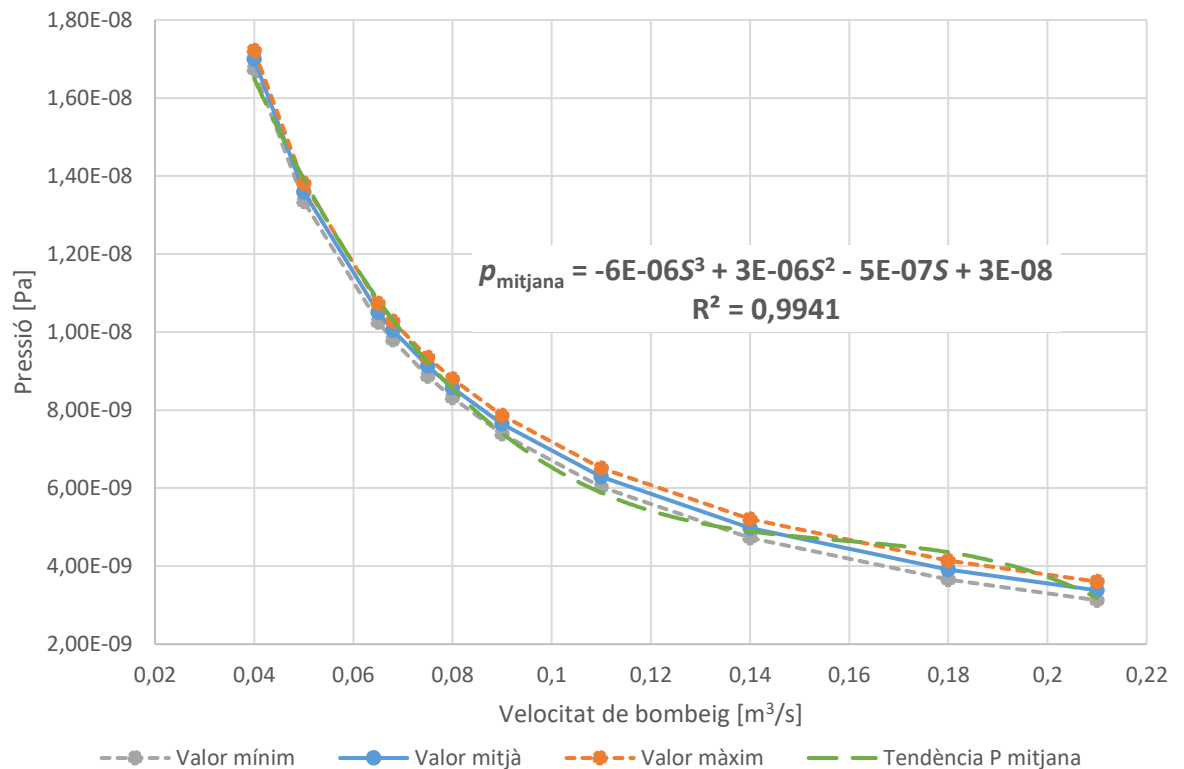


Figura 30. Tendència de la pressió mitjana i dels valors màxims i mínims d'aquesta en funció de la velocitat de bombeig.

En la figura anterior s'observa que la tendència de la pressió respecte a la velocitat de bombeig es pot aproximar amb un polinomi. També es pot observar que el pendent entre els diferents valors augmenta en petit grau, és a dir, que la caiguda de pressió depèn en gran mesura del sistema i no de la bomba.

b) Desorció

En ser la desorció un dels principals problemes de l'ultra-buit, en aquest apartat s'estudia la sensibilitat de la pressió al variar el valor de desorció tant del tub de bombeig com de la cambra de buit.

Taula 7. Paràmetres i valors utilitzats per a l'estudi de sensibilitat de la desorció.

Paràmetre	Valor
Massa molecular (H ₂)	2·10 ⁻³ kg/mol
Velocitat de bombeig	0,065 m ³ /s
Temperatura	23 °C
Malla	200 mostres/m

La desorció d'una superfície depèn de diferents factors, com el tractament superficial o la temperatura. És per aquest motiu que segons la bibliografia emprada es poden trobar diversos valors dins d'un rang per un mateix material. Els valors utilitzats en les simulacions inicials corresponen a diferents valors que pot prendre la desorció pel material corresponent a la cambra de buit i al tub de bombeig i són: 2·10⁻⁵, 6·10⁻⁶, 4·10⁻⁹ i 6,7·10⁻¹⁰ Pa·m³/(s·m²), [6] i [14].

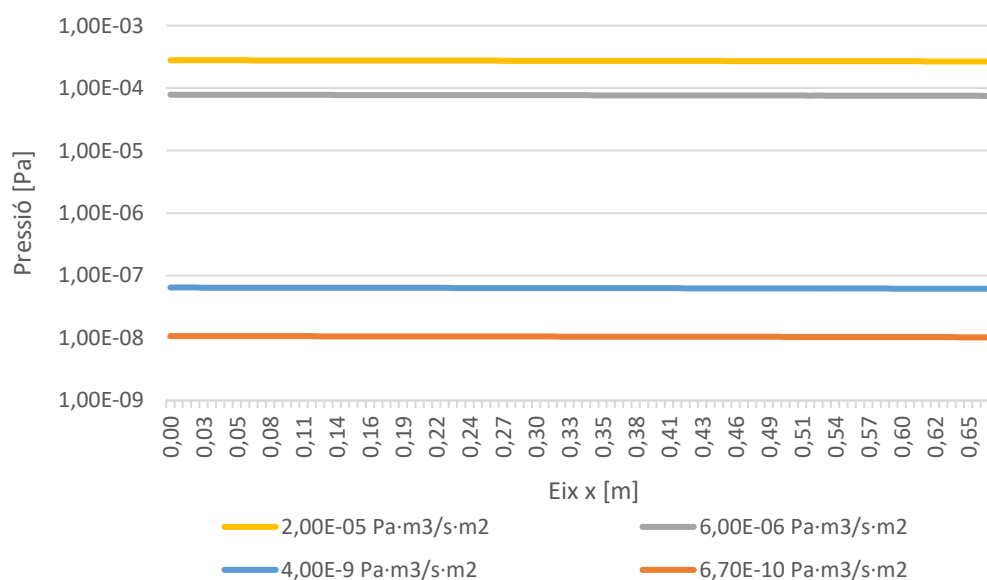


Figura 31. Perfil de pressions en una geometria donada per diferents valors de desorció.

En vista dels resultats obtinguts es realitza, igual que pel cas anterior, una comparativa per tal de mostrar la tendència dels valors mitjans, màxims i mínims de pressió per diferents valors de desorció. En aquest cas els valors de desorció utilitzats són escollits únicament amb la finalitat d'ampliar el rang d'estudi i surten del rang establert per les diferents fonts bibliogràfiques utilitzades.

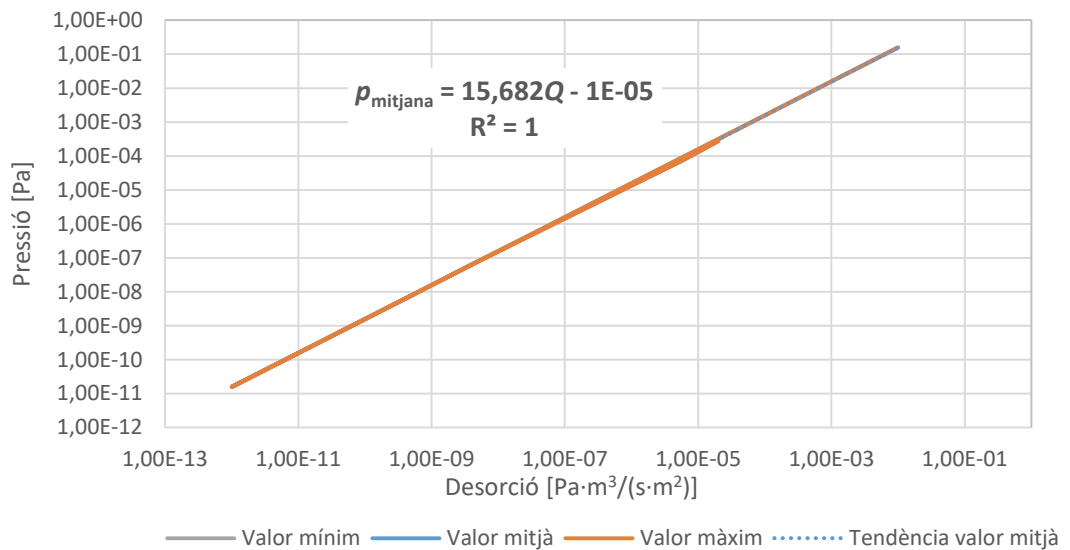


Figura 32. Representació de la tendència de la pressió mitjana i dels valors màxims i mínims d'aquesta en funció de la desorció.

En primer lloc, i com era d'esperar, en augmentar el nivell de desorció augmenta també la pressió. El que es pot observar clarament en la gràfica anterior és que la relació entre els dos paràmetres és lineal, amb una correlació absoluta ($R^2=1$). De la mateixa manera, s'observa que no hi ha pràcticament diferència entre la pressió mínima, mitjana i màxima per a cada nivell de desorció.

6.2. Simulació de les bombes

Una vegada realitzades les simulacions inicials, es treballa amb la geometria pròpia del Microtró, però únicament amb quatre elements. En la geometria anterior s'introdueixen les dues bombes corresponents: iònica i turbomolecular. La geometria utilitzada és la següent:

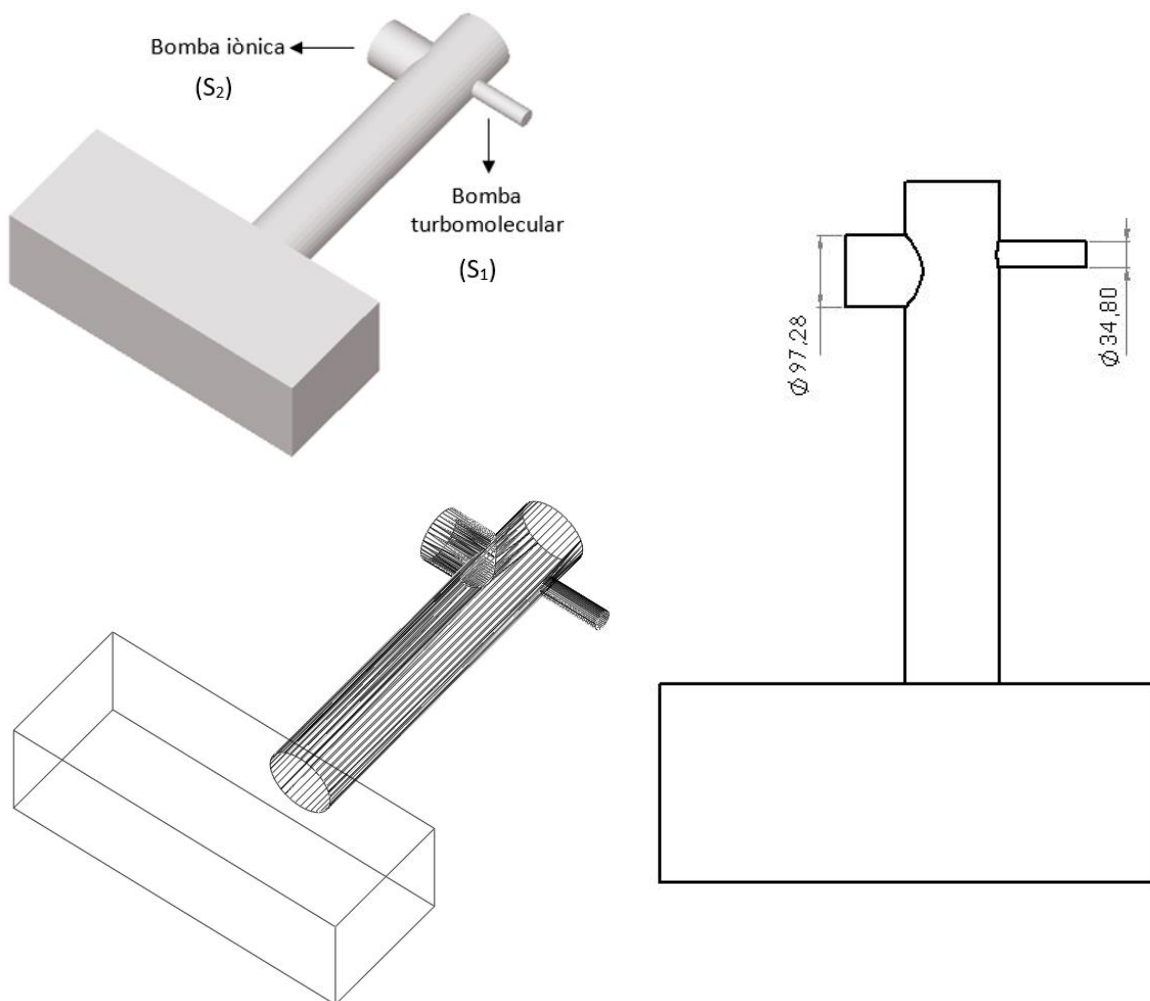


Figura 33. Geometria amb representació de la bomba turbomolecular i de la bomba iònica, cotes en mm.

Per les condicions amb els quals s'ha treballat fins al moment la bomba turbomolecular no estaria en funcionament al ser els rangs de pressions inferiors a la pressió mínima de funcionament d'aquesta bomba. En voler-se estudiar en aquest apartat l'efecte que té en el sistema, i per tal de no crear confusió, la ubicació de la bomba turbomolecular passa a denominar-se S_1 i la ubicació de la bomba iònica S_2 .

6.2.1. Velocitat de bombeig de la bomba iònica

En primer lloc, i donat que amb la introducció de les dues bombes la geometria deixa de ser simètrica, s'analitza la possible diferència del perfil de pressions per diferents superfícies del tub de bombeig. Per realitzar aquesta comparativa es parteix dels següents paràmetres i s'estudia el valor de la pressió per diferents velocitats de bombeig de la bomba S_2 :

Taula 8. Paràmetres i valors utilitzats per a l'estudi del perfil de pressions amb dues bombes.

Paràmetre	Valor
Massa molecular (H_2)	$2 \cdot 10^{-3}$ kg/mol
Desorció/àrea (acer inoxidable)	$6,7 \cdot 10^{-10}$ Pa·m ³ /s·m ²
Temperatura	23 °C
Malla	200 mostres/m
Velocitat bombeig bomba S_1	0,040 m ³ /s

A continuació es representen les dues superfícies que s'analitzen per tal de determinar si, en estudiar una geometria no simètrica, el perfil de pressions al llarg de la secció longitudinal del tub és igual per a ambdues superfícies.

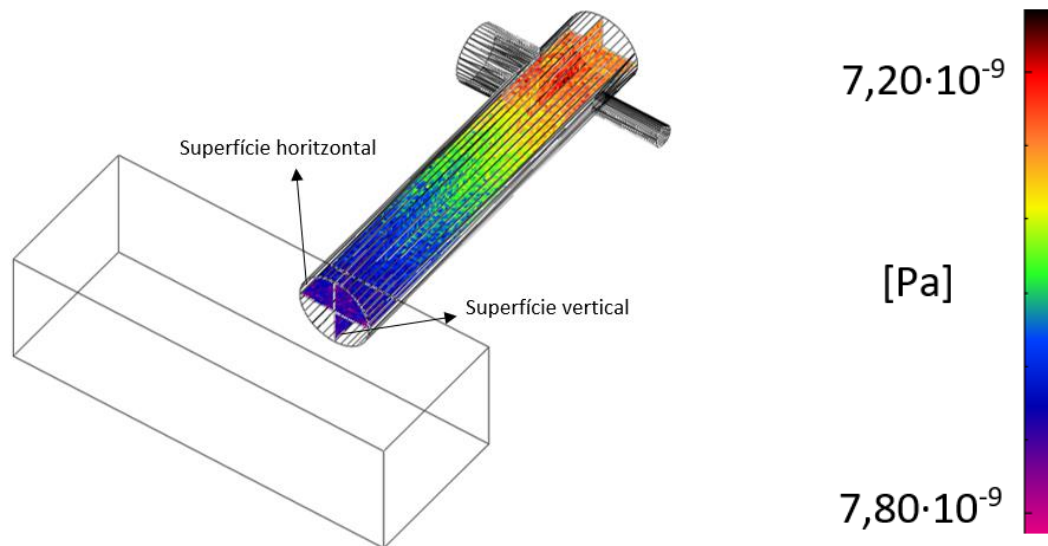


Figura 34. Representació de les dues superfícies simulades i orientació de les bombes amb condicions de simulació: $S_1 = 0,040$ m³/s i $S_2 = 0,065$ m³/s.

En el gràfic següent s'observen els resultats obtinguts en les dues superfícies quan la velocitat de bombeig per S_2 és 0,065 m³/s.

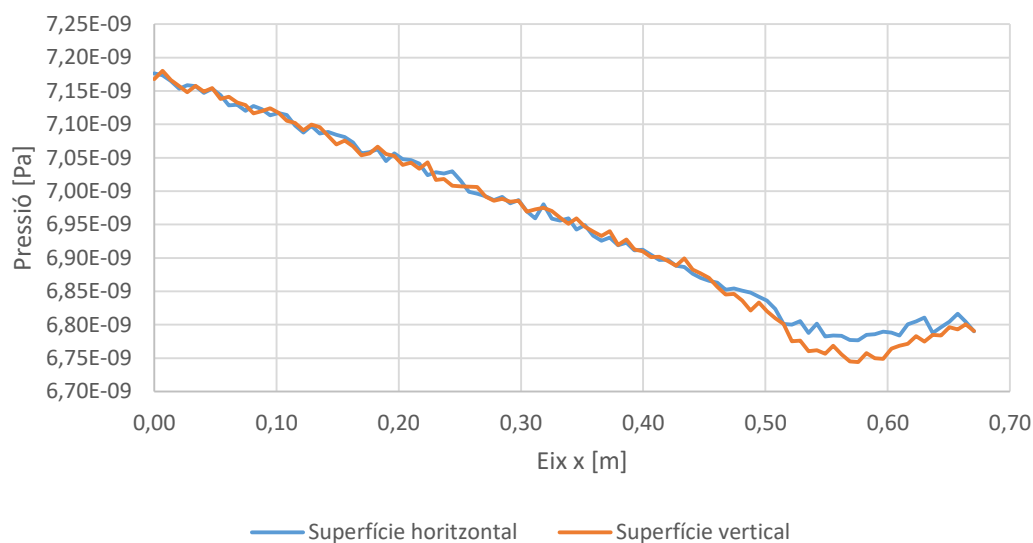


Figura 35. Perfil de pressions de les dues superfícies del tub de bombeig, amb velocitat de bombeig de $0,065 \text{ m}^3/\text{s}$ per S_2 .

Una vegada visualitzada la diferència entre els perfils de les superfícies i observat que no presenten pràcticament diferència, es presenten les simulacions per la resta de velocitats de bombeig:

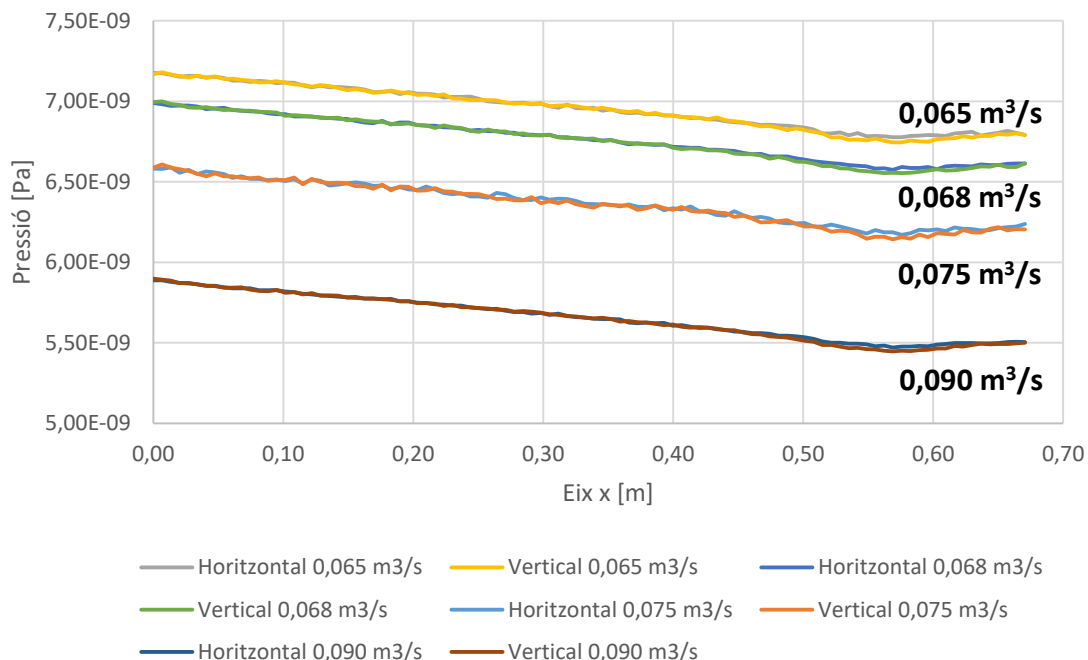


Figura 36. Perfil de pressions de les dues superfícies del tub de buit simulades per les diferents velocitats de bombeig de la bomba S_2 .

Tal com s'observa el perfil de pressions és pràcticament simètric, existint únicament una petita variació entre la superfície horitzontal i la vertical. És per això que, a partir d'ara, en els casos d'aquest apartat s'analitza únicament la superfície horitzontal de cada simulació. S'escull l'horitzontal per poder comparar els resultats obtinguts amb els casos anteriors amb una precisió superior.

Una vegada analitzada l'asimetria de la geometria, s'estudia l'efecte resultant de la variació de la velocitat de bombeig de S_2 per un valor constant de S_1 . A aquesta darrera bomba se li dóna els valors de 0,020; 0,040 i 0,050 m^3/s i es determina la tendència que pren la pressió en funció de la velocitat de bombeig de la denominada bomba S_2 .

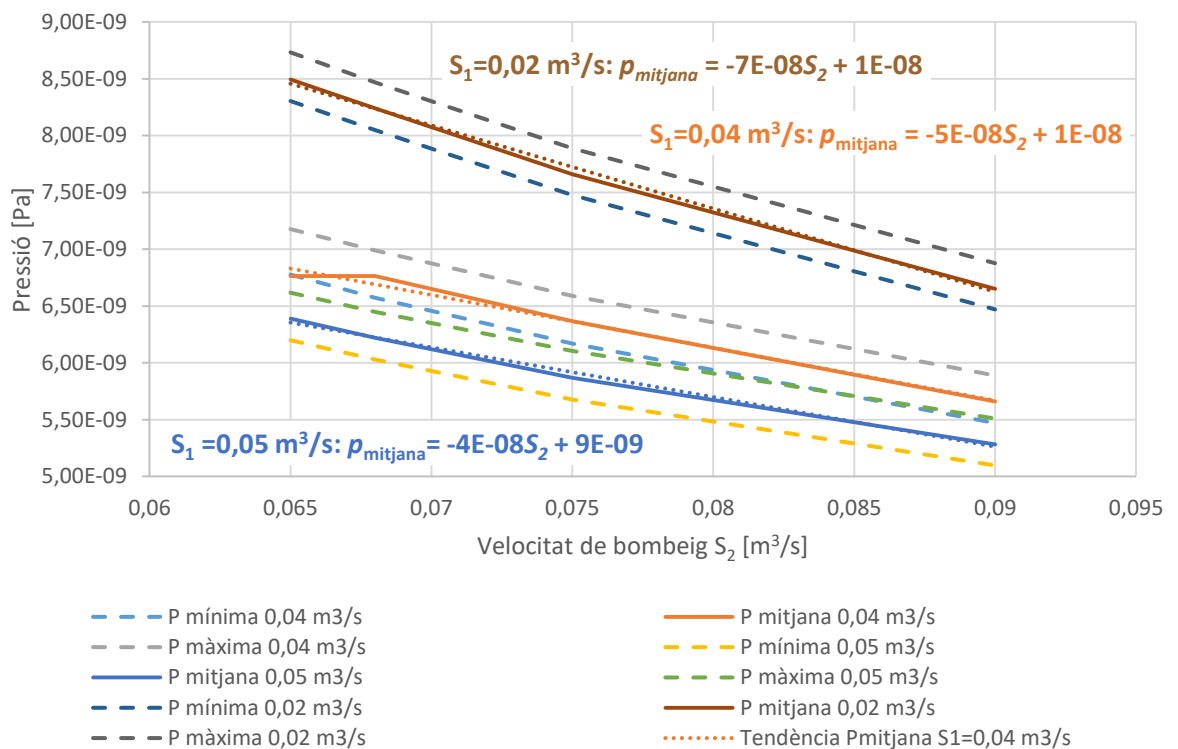


Figura 37. Representació de la tendència de la pressió mínima, mitjana i màxima en funció de la velocitat de bombeig de la bomba S_2 , per a diferents valors de la bomba S_1 .

Com és d'esperar, per a velocitats de bombeig superiors de qualsevol de les dues bombes la pressió és inferior.

De la figura anterior cal destacar la disminució de pendent existent quan augmenta la velocitat de bombeig. Això és degut al ser cada vegada més difícil aconseguir generar més buit o, el que és el mateix, com menys molècules hi ha més difícil és seguir extreure.

En vista que amb les simulacions realitzades ja es dedueix la tendència dels resultats, no es

prossegueix realitzant simulacions amb més velocitats de bombeig de la bomba S_1 .

6.2.2. Desorció

Per finalitzar amb les simulacions preliminars, de la mateixa manera que s'ha fet anteriorment amb altres paràmetres, s'estudia la sensibilitat de la pressió en funció del nivell de desorció dels elements del sistema. Els valors utilitzats en els diferents casos són els següents:

Taula 9. Paràmetres i valors utilitzats per a l'estudi del perfil de pressions amb dues bombes.

Paràmetre	Valor
Massa molecular (H_2)	$2 \cdot 10^{-3}$ kg/mol
Velocitat de bombeig bomba S_1	0,040 m ³ /s
Velocitat de bombeig bomba S_2	0,065 m ³ /s
Temperatura	23 °C
Malla	200 mostres/m

S'han realitzat simulacions amb diferents nivells de desorció, utilitzant els mateixos valors que en casos anteriors, i s'ha calculat el valor mitjà, mínim i màxim per cadascuna d'aquestes simulacions. En la següent figura es mostren els resultats obtinguts per tal d'observar el comportament del sistema.

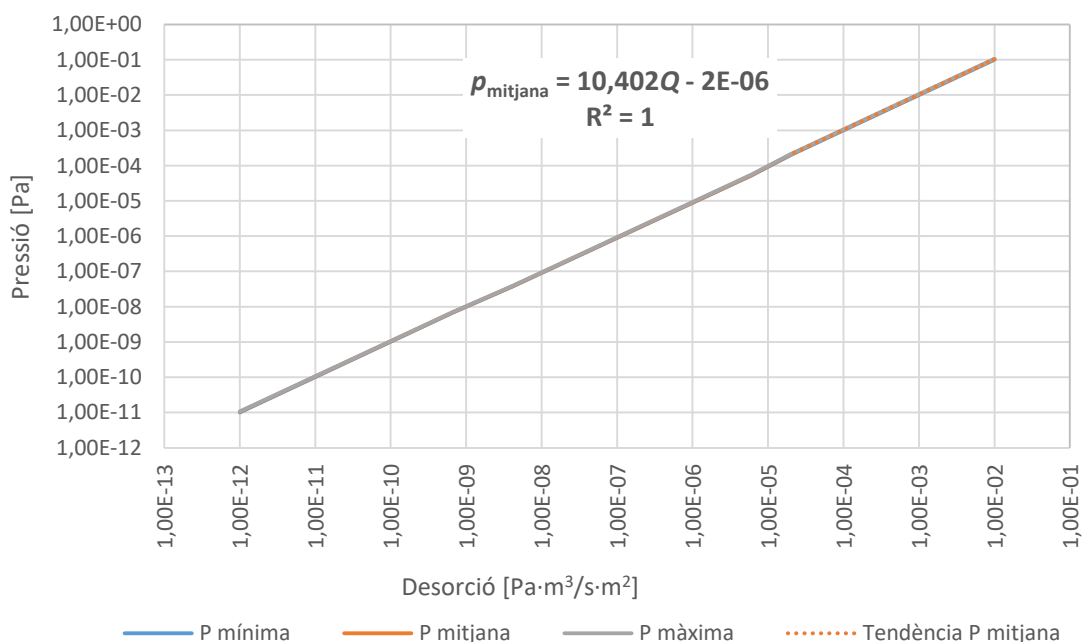


Figura 38. Representació de la tendència de la pressió mínima, mitjana i màxima en funció del valor de desorció.

De la mateixa manera que en el cas anterior, en la gràfica anterior s'observa que el valor de la pressió és proporcional a la desorció. En dependre el valor de la desorció de molts paràmetres i com que no és un valor fàcil d'estimar, la conclusió extreta en aquest apartat implica que es pot simular amb un valor de desorció determinat i únicament és necessari escalar els resultats de pressió per obtenir els ajustats a una desorció diferent, però mantenint-se en tot moment la tendència.

També s'observa com no hi ha pràcticament variació entre les tres rectes de pressió mostrades.

Per últim, cal destacar la completa correlació entre la pressió i la desorció en ser $R^2=1$.

7. Simulacions

Una vegada determinada la sensibilitat del model davant diferents paràmetres s'afegeixen més elements per tal de poder analitzar i entendre el comportament del sistema. En primer lloc, s'afegeixen els imants a la geometria i, una vegada s'ha analitzat, s'introdueix l'estructura d'acceleració.

Per a totes les simulacions d'aquest apartat s'han utilitzat els següents valors:

Taula 10. Paràmetres i valors utilitzats per a l'estudi del perfil de pressions.

Paràmetre	Valor
Massa molecular (H ₂)	2·10 ⁻³ kg/mol
Temperatura	23 °C
Malla	200 mostres/m
Velocitat bombeig bomba S ₁	0 m ³ /s

7.1. Model parcial

La introducció dels imants al sistema ve motivada per la necessitat de conèixer la pressió a l'interior dels imants, en considerar-se aquest un punt crític del sistema per on passa el feix d'electrons. Actualment es pot conèixer únicament la pressió al sensor (pàg. 28) i, amb l'objectiu de poder relacionar els dos valors, s'introdueix també el sensor a la geometria estudiada. En la següent imatge es mostra la geometria analitzada:

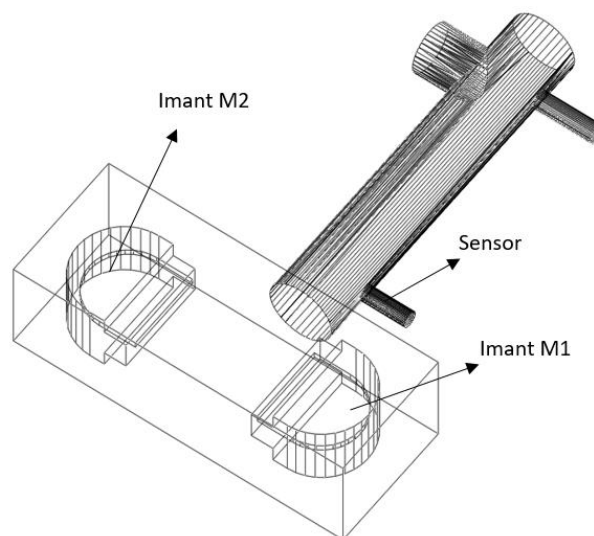


Figura 39. Representació de la geometria amb la introducció dels imants i del sensor.

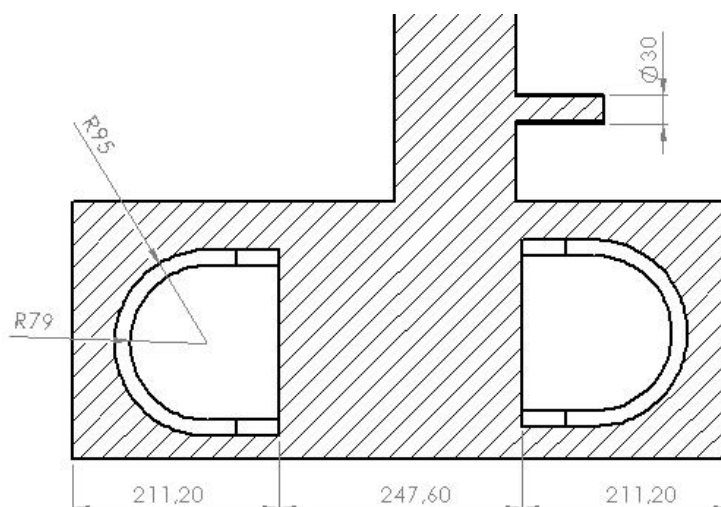


Figura 40. Principals mesures de la geometria amb la introducció dels imants i del sensor, cotes en mm.

En les simulacions realitzades en aquest apartat s'utilitza un valor de desorció que correspon a l'acer inoxidable AISI 304L però amb unes condicions de superfície no tan tractada, ja que se suposa més pròxim a l'acer inoxidable del Microtró de la UPC. Tot i que, com s'ha conclòs en l'apartat anterior, la relació entre el valor de la pressió i la desorció és proporcional, s'escull utilitzar $1 \cdot 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$. L'elecció d'aquest valor ve incentivada per dues raons. En primer lloc, es considera aquest valor més aproximat a la realitat del Microtró estudiat i, per tant, els resultats es poden analitzar directament sense necessitat d'escalar-los. En segon lloc, en ser aquest valor més ajustat a la realitat, es pot tenir en consideració la possible presència de la bomba turbomolecular.

La necessitat de considerar el possible funcionament de la bomba turbomolecular és degut al fet que la pressió mínima a la qual pot treballar és pròxima als $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ (Taula 3). És a dir, depenent del rang de pressions de treball en cada cas particular pot ser que la bomba turbomolecular també estigui en funcionament o que només ho estigui la iònica.

Per l'exposat anteriorment, és necessari poder calcular la pressió en la secció transversal a la ubicació de la bomba turbomolecular per conèixer si en cada cas particular està en funcionament. Tot i així, en vista dels rangs de pressió dels resultats obtinguts anteriorment, es parteix d'una velocitat de bombeig nul·la per a la bomba turbomolecular i es modifica la velocitat de la bomba iònica.

L'objectiu d'aquest apartat és calcular la pressió a l'interior dels imants pel qual passa el feix d'electrons. A continuació es destaca la zona mencionada:

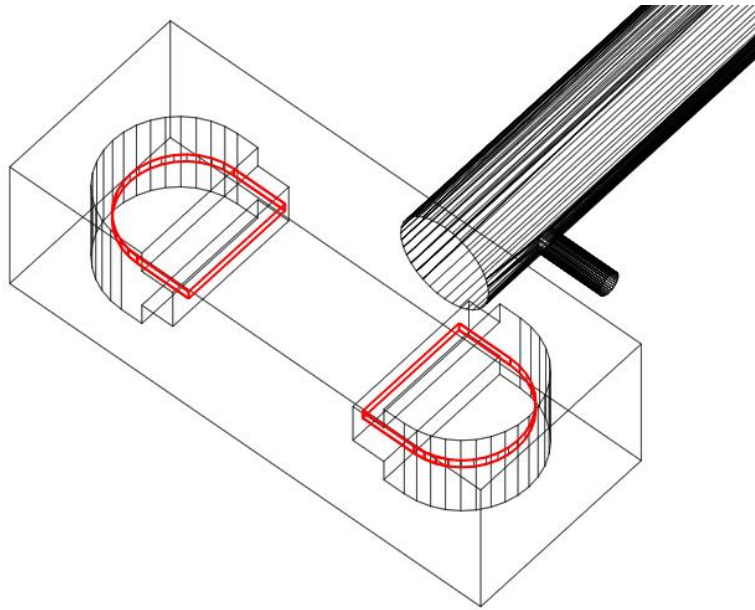


Figura 41. Representació en color vermell de l'interior dels imants.

En resum, és necessari mesurar la pressió en quatre superfícies diferents: secció transversal de la bomba turbomolecular, al sensor i a l'interior dels dos imants. Aquestes superfícies es mostren a continuació:

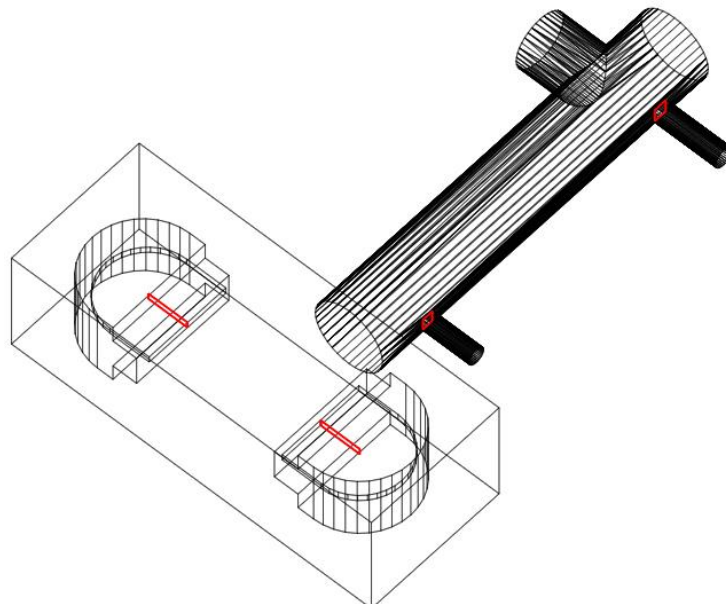


Figura 42. Visualització de les quatre superfícies on es mesura la pressió en color vermell.

El rang de velocitats de bombeig utilitzat va dels 0,065 fins als 0,110 m³/s, ja que en simulacions anteriors s'ha observat que a partir de 0,110 m³/s la disminució de pressió aconseguida en augmentar la velocitat és petita.

En primer lloc, i degut que la ubicació dels imants no és simètrica, s'estudia la possible asimetria en els resultats a l'interior dels imants.

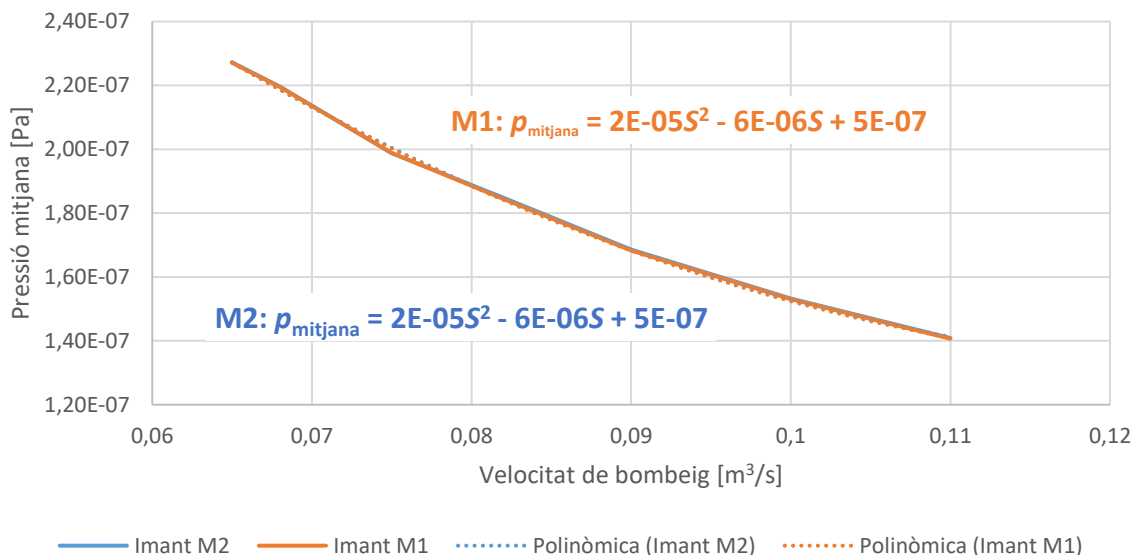


Figura 43. Pressió mitjana a l'interior dels imants en funció de la velocitat de bombeig de la bomba iònica.

Com s'observa, la pressió mitjana a l'interior de l'imant M1 és igual que la pressió mitjana a l'interior de l'imant M2. Per aquest motiu es continua analitzant el sistema mostrant els resultats d'un únic imant.

En segon lloc, s'estudia la variació de pressió en funció de la velocitat de bombeig en la bomba turbomolecular, en el sensor i en un dels imants (M1).

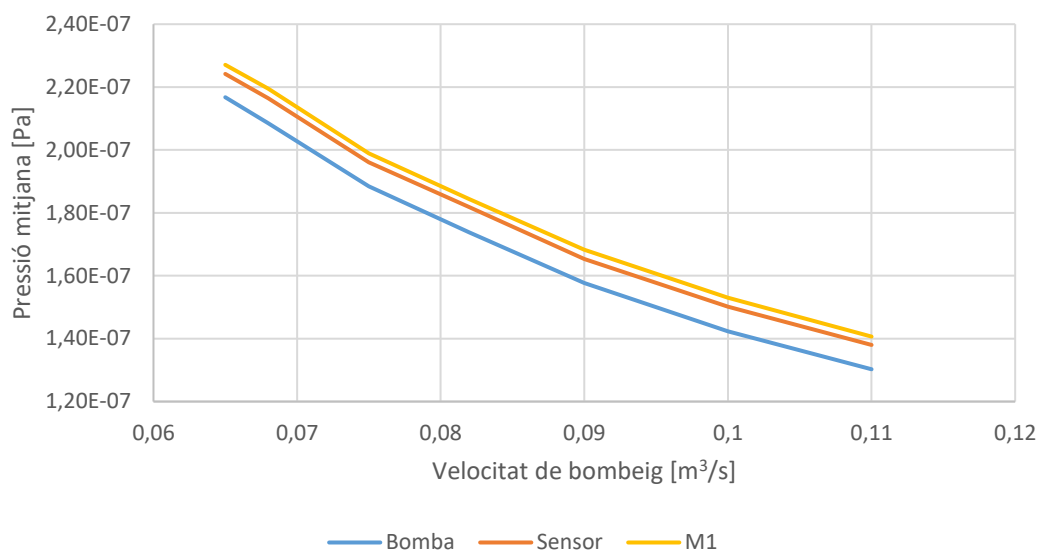


Figura 44. Pressió mitjana de diferents elements en funció de la velocitat de bombeig de la bomba iònica.

Tal com s'observa, el rang de pressions està comprès entre $1,2 \cdot 10^{-7}$ i $2,3 \cdot 10^{-7}$ Pa, per tant, la hipòtesi que únicament està en funcionament la bomba iònica és certa.

Pel que fa a la comparació de la pressió entre ubicacions, a la figura anterior s'observa la pèrdua de càrrega quan més lluny de les bombes és la zona que es mesura. És per això que la pressió a la superfície de la bomba és la més baixa, seguida pel sensor i, finalment, l'interior de l'imant. La tendència de la pressió pels tres elements s'observa que és la mateixa i que no depèn de la velocitat de bombeig. Per tant, al ser la relació de la pressió pels tres elements constant, a partir de la pressió del sensor es pot saber la pressió a l'interior dels imants.

7.2. Model complet

En aquest apartat s'estudia el model més complet analitzat en aquest treball, i consisteix a introduir en la geometria anterior l'estructura d'acceleració. Tal com s'observa en les següents imatges, això comporta la introducció de dos elements. És important destacar la "finestra" que connecta els dos tubs amb l'objectiu d'aconseguir un buit superior (disminuir la pressió) a l'interior del linac.

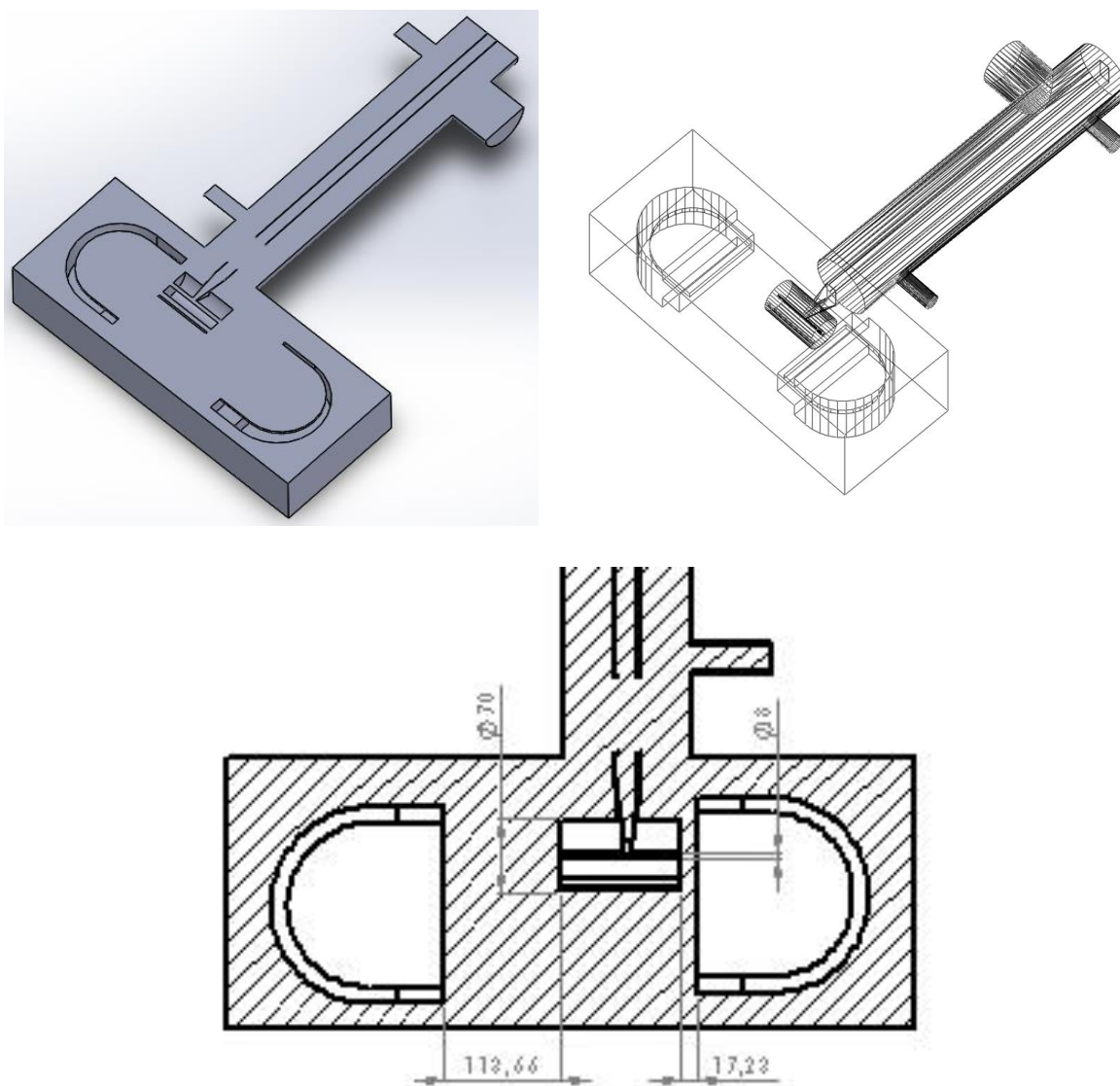


Figura 45. Representació i principals mesures de la geometria amb la introducció de l'estructura d'acceleració, cotes en mm.

Per tal de poder fer un estudi complet d'aquesta geometria se seleccionen 9 superfícies d'interès. En primer lloc, conèixer el valor de la pressió a la bomba iònica és molt útil com a punt de control, ja que se sap que, si és l'única bomba funcionant del sistema, la pressió en aquella àrea ha de ser la mínima. En segon lloc, de la mateixa manera que en el cas anterior, s'estudia la pressió a la bomba turbomolecular, al sensor i a l'interior dels imants. En canviar de cas, s'analitzen la pressió a l'interior dels dos imants per confirmar si se segueix tenint pressió simètrica. A part, amb la introducció del linac es vol conèixer el valor de la pressió a tres ubicacions diferents: als exteriors del tub central i al centre d'aquest, sent aquest últim punt on acaba el tub del linac. Per últim, com a un altre punt de control, s'estudia el centre del tub de buit per tal de comprovar com varia la pressió.

En les següents figures es poden observar les 9 superfícies esmentades així com els noms amb les quals es mencionen més endavant:

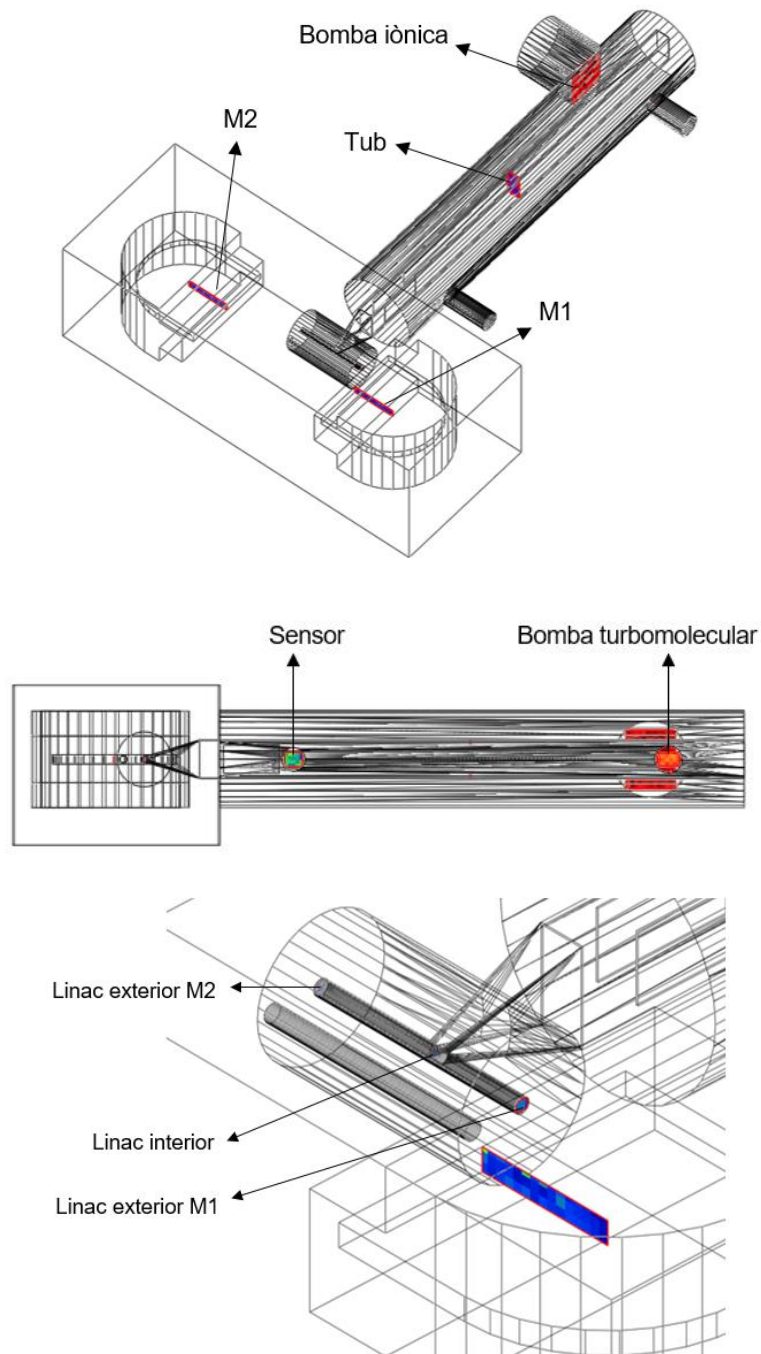


Figura 46. Representació de les superfícies analitzades.

En primer lloc, es compara la pressió a l'interior dels dos imants:

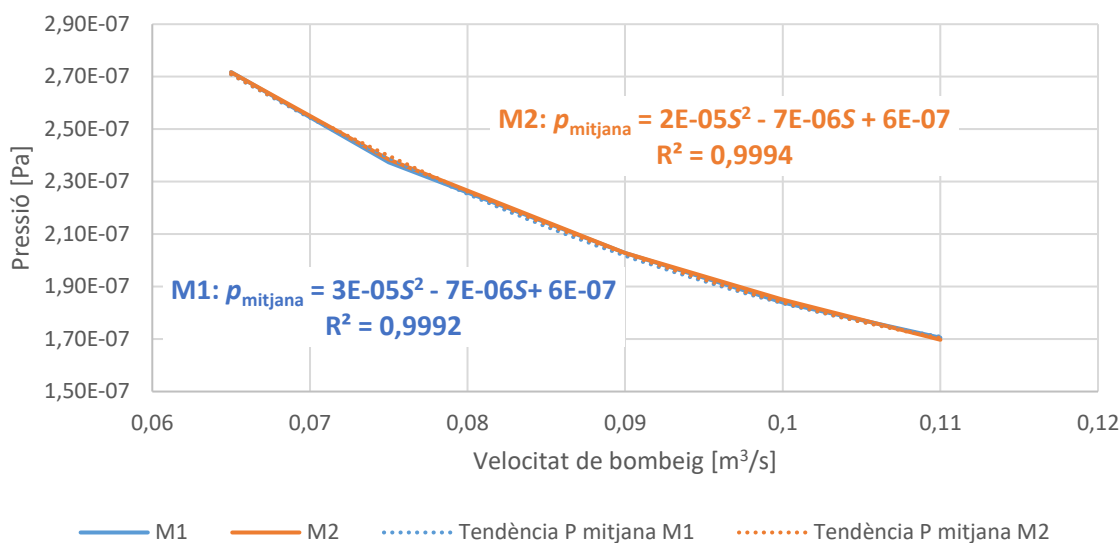


Figura 47. Pressió mitjana a l'interior dels imants en funció de la velocitat de bombeig de la bomba iònica.

A partir de l'equació de tendència s'observa que la pressió a l'interior dels dos imants és pràcticament igual. L'error mitjà comès si es té en compte únicament l'imant M1 és del 0,12% i l'error màxim de 0,59%, diferències de pressions que bé poden ser atribuïdes al caràcter aleatori de les simulacions. Per aquest motiu, a partir d'ara la geometria s'analitza tenint en compte únicament un dels dos imants (M1).

En segon lloc, s'estudia la pressió en les tres superfícies del linac que s'analitzen:

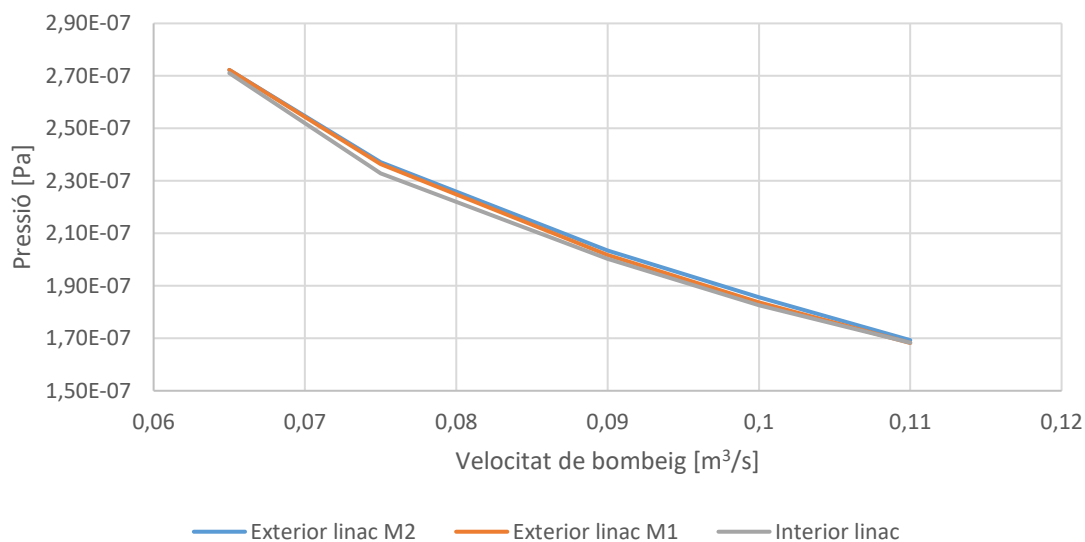


Figura 48. Pressió mitjana a les 3 superfícies de l'estructura d'acceleració estudiades.

En la gràfica anterior s'observa com les pressions a les dues superfícies exteriors de l'estructura d'acceleració són pràcticament iguals, mentre la pressió a l'interior del linac és lleugerament inferior. Tot i estar simulant amb temperatura uniforme i no amb una superfície exterior amb temperatura més elevada que l'altre com succeeix a la realitat, que la pressió mitjana a l'interior sigui inferior és el que s'esperava.

A continuació es compara la pressió mitjana en diferents elements del sistema:

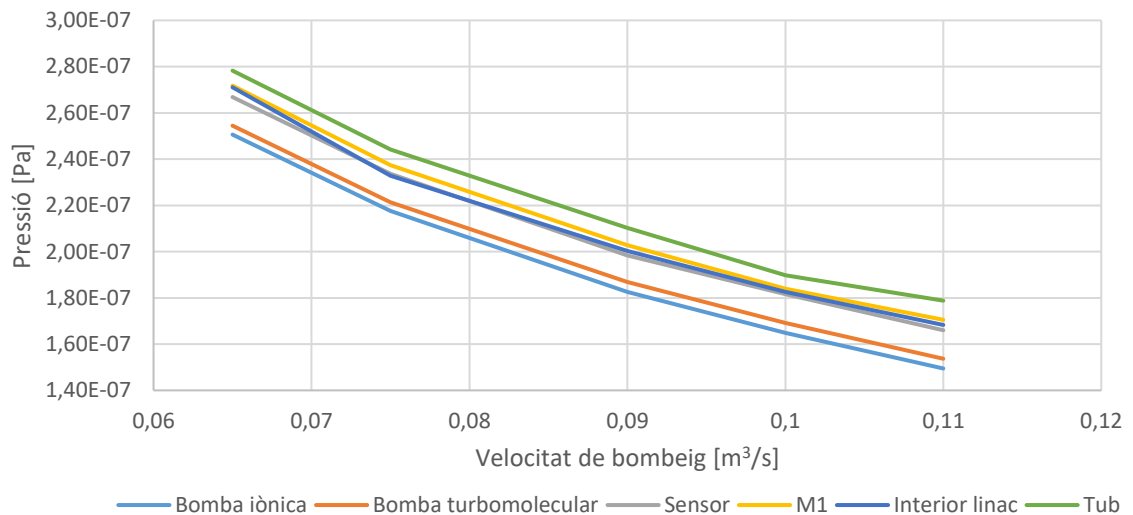


Figura 49. Pressió en diferents elements del sistema en funció de la velocitat de bombeig de la bomba iònica.

En la figura anterior es pot observar com la pressió mitjana mínima dels elements estudiats és a la bomba iònica, valor esperat al ser l'única bomba en funcionament. En estar la bomba turbomolecular molt pròxima de l'altre bomba, aquesta té la següent pressió mitjana inferior.

Pel que fa al sensor i a l'interior del linac s'observa que el valor estudiat de la pressió és molt pròxim, sent aquest valor una mica superior a l'interior dels imants.

Prèviament a finalitzar aquest apartat, es representa en un gràfic la pressió mitjana a l'interior del linac, a l'interior de l'imant i al sensor, per tal de, a partir de la pressió mínima que es vulgui aconseguir, poder trobar quina és la velocitat de bombeig mínima que s'ha de proporcionar al sistema.

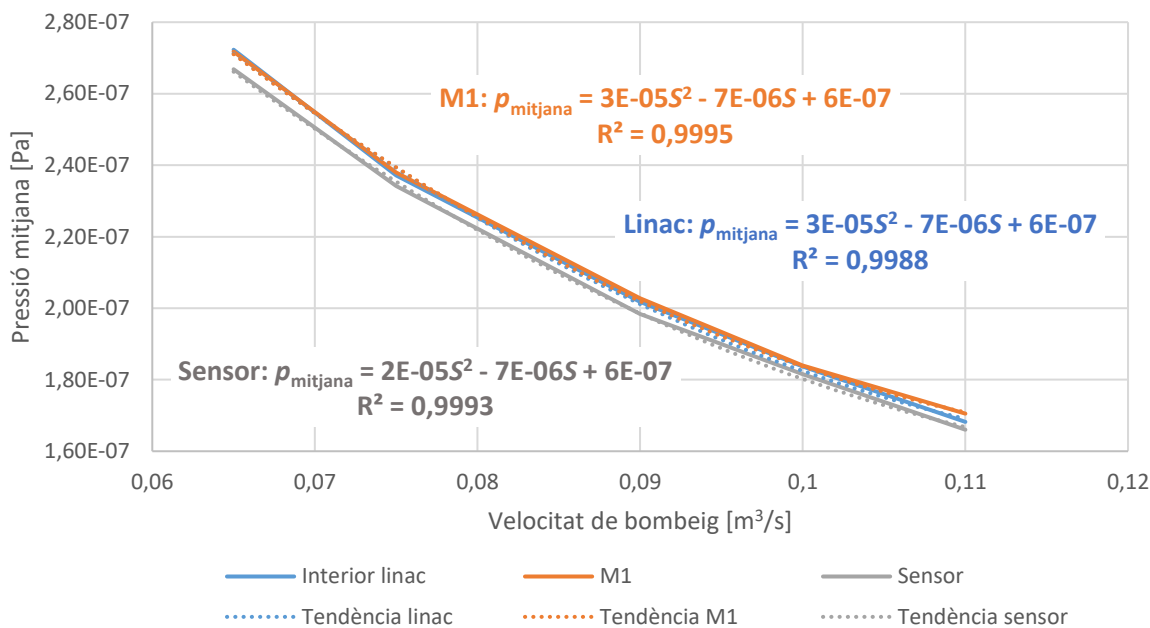


Figura 50. Pressió mitjana a l'interior del linac, a l'interior d'un imant i al sensor en funció de la velocitat de bombeig de la bomba iònica.

Veient la baixa diferència de pressió entre els elements anteriors, es calcula el percentatge de desviació de la pressió als imants i al linac respecte a la del sensor.

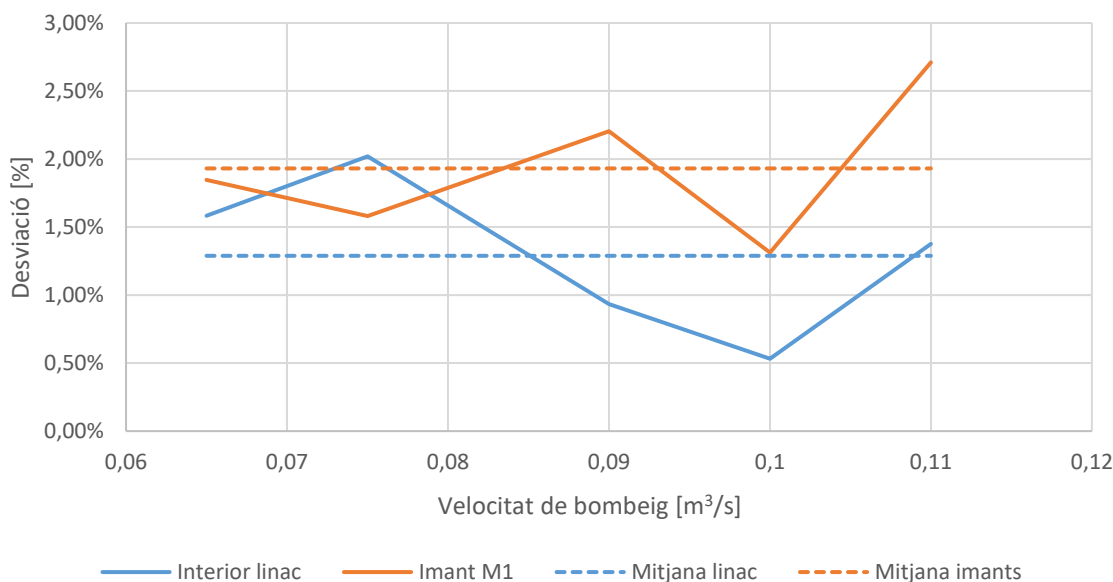


Figura 51. Desviació de la pressió mitjana a l'interior de l'imant M1 i a l'interior del linac respecte al sensor en funció de la velocitat de bombeig de la bomba iònica.

En la figura anterior s'observa que per qualsevol velocitat de bombeig existeix aproximadament un 1,3% d'increment de pressió entre el sensor i l'interior del linac i un 1,9% d'increment entre el sensor i l'interior dels imants.

Aquest apartat s'ha iniciat amb la hipòtesi que el valor de desorció és proporcional a la pressió i per això s'ha justificat utilitzar el valor $1 \cdot 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$. Per tal de comprovar aquesta hipòtesi amb la geometria més completa estudiada en el present treball, a continuació es representa la pressió mitjana en els elements principals del sistema en funció de la desorció.

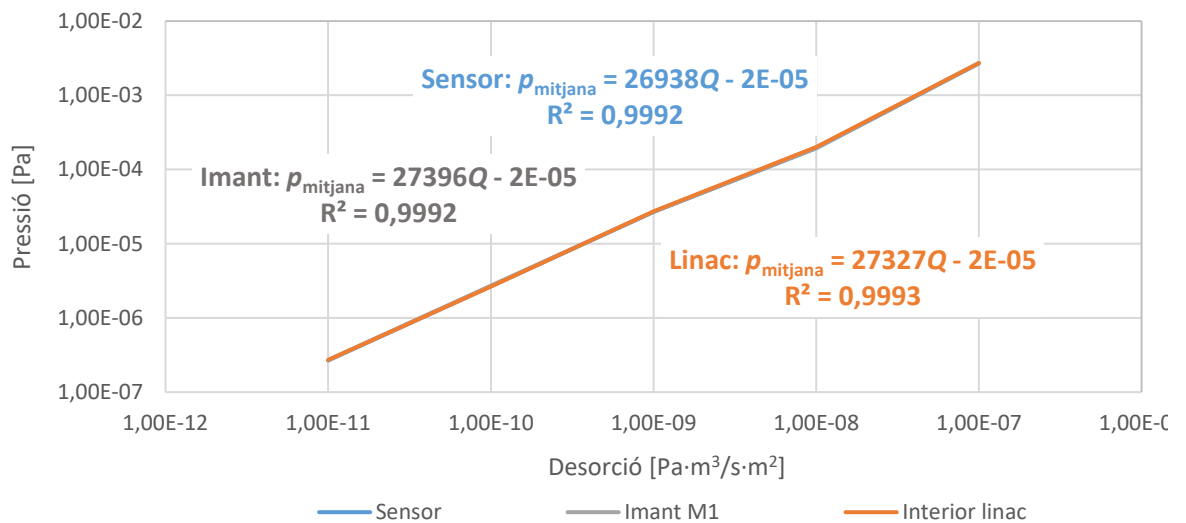


Figura 52. Pressió mitjana en diferents elements del sistema en funció del valor de desorció.

En observar-se a la figura anterior que la pressió mitjana sí que és proporcional al valor de desorció es vol conèixer la relació entre dues pressions quan varia el valor de la desorció. Sabent que l'equació d'una recta genèrica és:

$$p = m \cdot Q - b$$

Si es vol conèixer la variació de pressió entre dos punts, es té:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = m \cdot Q_2 - b - (m \cdot Q_1 - b) = m \cdot Q_2 - b - m \cdot Q_1 + b = m \cdot Q_2 - m \cdot Q_1 \rightarrow \Delta p = m \cdot (Q_2 - Q_1)$$

Per tant, coneguda la pressió per un valor de desorció determinat i sabent el pendent de la recta es pot conèixer la pressió si el valor de desorció varia. Com en les tres equacions el pendent té un valor semblant, es calcula el pendent mitjà (\bar{m}) del linac, del sensor i dels imants:

$$\bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{N} = \frac{27396 + 26938 + 27327}{3} = 27220 \frac{s \cdot m^2}{m^3}$$

Per tant, si es multiplica la diferència de desorcions per una constant \bar{m} s'obté la variació de pressions respecte al valor que es tenia anteriorment.

7.3. Comparativa entre models

Amb tots els casos i resultats anteriors, a continuació es fa un estudi comparatiu entre el model quan no hi ha imants, amb la introducció dels imants i, finalment, amb la introducció del linac. El valor de desorció utilitzat és $1 \cdot 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$.

La gràfica següent representa el valor mitjà de la pressió al sensor en els 3 últims models estudiats:

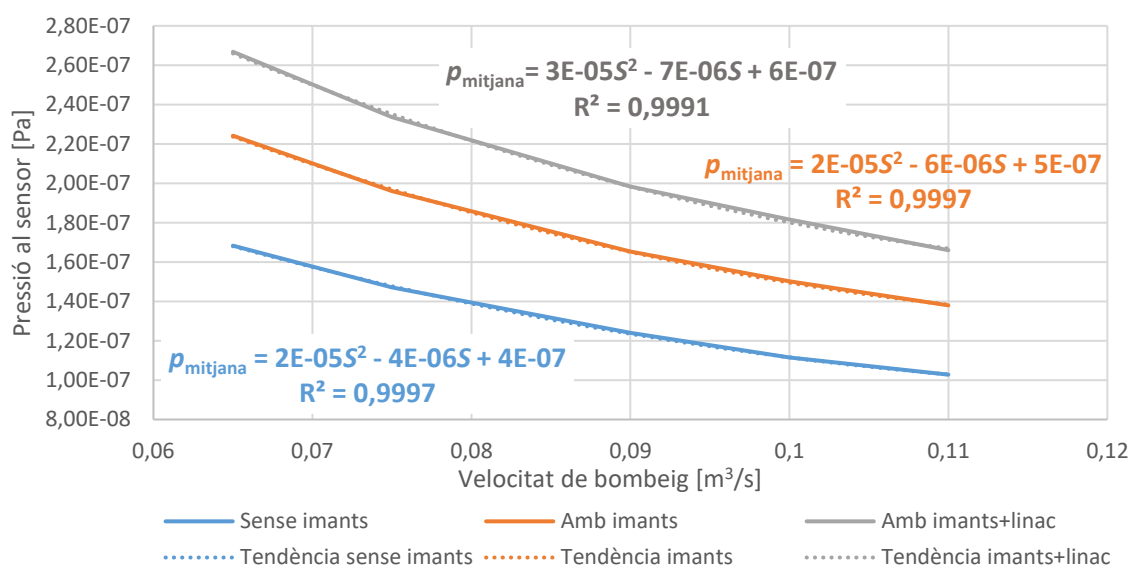


Figura 53. Comparativa de la pressió mitjana al sensor segons geometria en funció de la velocitat de bombeig de la bomba iònica.

En la gràfica anterior s'observa com en introduir elements la pressió augmenta per qualsevol valor de velocitat de bombeig, en augmentar també la desorció del sistema. Gràcies a les equacions es veu com els paràmetres de l'equació quadràtica augmenten en introduir més elements al model.

A continuació es compara la pressió a l'interior dels imants segons la presència de l'estructura d'acceleració. En ser la pressió als imants simètrica en ambdós casos únicament es representa un:

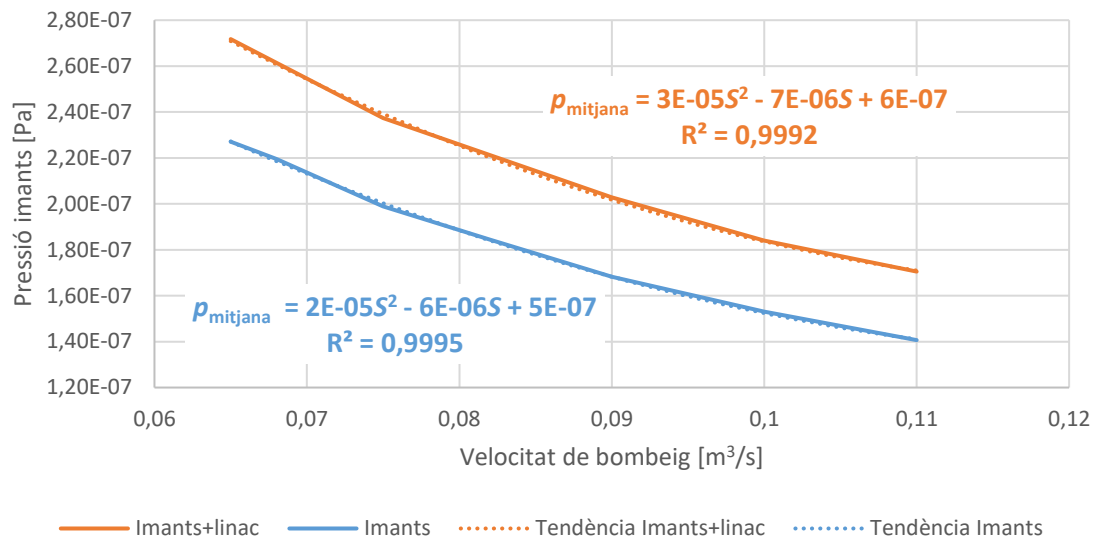


Figura 54. Comparativa de la pressió mitjana a l'interior dels imants segons geometria en funció de la velocitat de bombeig de la bomba iònica.

De la mateixa manera que en l'anterior figura s'observa que els tres paràmetres de l'equació quadràtica augmenten per igual en augmentar els elements de la geometria, també es veu que amb una quasi absoluta correlació la tendència de la pressió en funció de la velocitat de bombeig segueix una corba.

D'aquesta comparativa entre models es conclou que en augmentar el nombre d'elements i , per tant, el nombre de superfícies la pressió general del sistema augmenta. Aquest augment és proporcional i depèn únicament de la quantitat de superfícies i de les dimensions d'aquestes.

8. Planificació temporal

El projecte s'ha dividit en tres marcades etapes pel que fa a la planificació temporal. En primer lloc, ha sigut necessària una formació prèvia tant en coneixements teòrics com en el programa. En tenir un gran desconeixement inicial en el món del buit va haver-se de dur a terme una recerca d'informació sobre el buit, els acceleradors de partícules, bombes de buit, etc. En aquesta primera etapa de formació, va haver-hi una part d'aprenentatge sobre el Molflow+ i la necessària realització de diversos tutorials per tal d'entendre com funciona així com per conèixer totes les opcions que ofereix.

La segona etapa ha consistit en la realització de les simulacions i l'anàlisi de les dades. Aquesta ha sigut l'etapa que ha requerit més hores i, consegüentment, ha ocupat moltes setmanes.

Per últim, la tercera etapa s'ha realitzat paral·lelament a la segona i ha sigut la redacció de la memòria.

A continuació es presenta gràficament amb un Diagrama de Gantt la planificació temporal del projecte explicada.

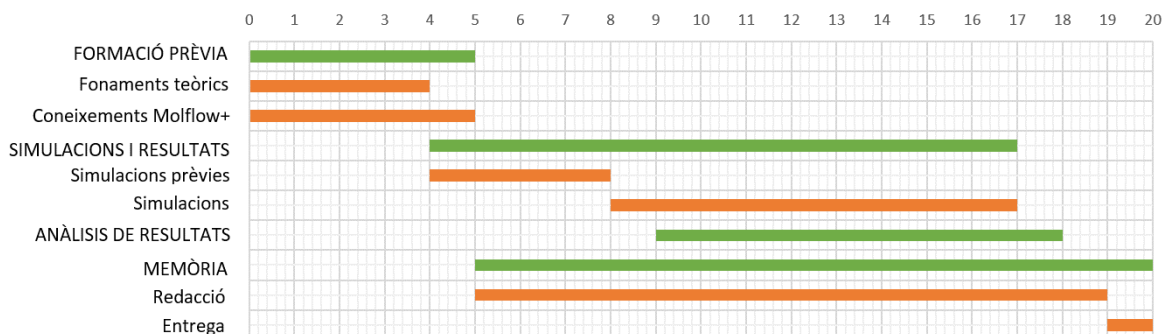


Figura 55. Esquema de la planificació temporal del projecte en setmanes.

9. Pressupost

L'abast del projecte és simular el nivell d'ultra-buit del Microtró i està fora de l'abast la implementació física tant del Microtró com de qualsevol modificació. És per aquest motiu que el pressupost del treball només engloba les simulacions i l'anàlisi dels resultats, així com el temps de redacció de la memòria.

A continuació es mostra el pressupost dividit en dos grups: recursos humans i materials i subministres.

Recursos humans

Considerant que el preu/hora d'un enginyer junior és de 15 €/h, a continuació es mostra una taula resum del cost en recursos humans d'aquest projecte:

Taula 11. Costos de recursos humans associats al projecte.

Concepte	Temps [h]	Preu [€/h]	Total [€]
Fonaments bàsics en "buit"	40	15	600
Formació tècnica Molflow+	30	15	450
Simulacions i obtenció de dades	140	15	2.100
Anàlisi de resultats	90	15	1.350
Memòria	60	15	900
TOTAL	360	-	5.400 €

Materials i subministres

Pel càlcul del cost de materials i subministres es considera la llargada del projecte d'aproximadament 5 mesos. D'aquesta manera, els costos que apareixen en la següent taula ja estan calculats directament tenint en compte el total dels 5 mesos.

En primer lloc, s'ha tingut en compte el lloguer d'una oficina per a la realització del projecte i el material d'oficina que s'ha d'utilitzar.

Pel que fa al programari utilitzat, Molflow+ és gratuït però SolidWorks requereix una llicència anual d'aproximadament 6.000 €.

Taula 12. Costos de material i subministres associats al projecte.

Concepte	Total [€]
Lloguer oficina	2.200
Ordinador portàtil	800
Material d'oficina i fungibles	120
Llicència SolidWorks (mig any)	3.000
Internet	150
TOTAL	6.270 €

Finalment es pot calcular el pressupost total del projecte:

Taula 13. Pressupost total del projecte.

Concepte	Total [€]
Recursos humans	5.400
Materials i subministres	6.270
Costos generals (+10%)	1.167
Benefici industrial (+6%)	700,20
TOTAL SENSE IVA	13.537,20
+21% IVA	2.842,81
TOTAL	16.380,01 €

El pressupost total associat a la realització del projecte és de 16.380,01 € (IVA inclòs).

10. Impacte medi ambiental

La causa principal d'emissions atribuïbles a aquest treball és l'emissió de CO₂ a l'atmosfera com a conseqüència del consum elèctric generat durant el projecte.

Taula 14. Consums i emissions de CO₂ dels equips utilitzats.

Equip	Potència [kW]	Temps d'utilització [h]	Consum [kW/h]	Equivalent a kg de CO ₂
Ordinador portàtil	0,20	600	120	46,2 ¹
Impressora	0,15	2	0,30	0,12
Climatització	0,50	360	180	69,3
TOTAL	-	-	-	115,62 kg

Cal afegir també el consum de paper que s'ha realitzat. Considerant que s'han utilitzat uns 400 fulls A4 (0,062 m²/full), representa 24,95 m² de paper. L'equivalent, si es consideren fulls estàndard de 90 g/m², és de 2,25 kg de paper comú que representa 6,75 kg de CO₂².

En resum, l'impacte medi ambiental d'aquest projecte és de 122,37 kg de CO₂, que equival a un impacte molt petit.

Cal comentar també l'estalvi no quantificable relacionat amb la utilització de simulacions numèriques, ja que permet obtenir informació de manera ràpida i econòmica sense necessitat de realitzar mesures experimentals. Aquest benefici aportat a l'hora de fer simulacions enfront de l'estudi experimental equivalent cal tenir-ho en consideració com un estalvi energètic.

¹ El càlcul d'emissions de CO₂ en relació als consums energètics s'extreu de la Comissió Europea que estableix que 1 kWh és equivalent a 0,385 kg de CO₂.

² Segons la Comissió Europea el factor de conversió entre kg de paper comú i kg de CO₂ equivalent és de 3.

Conclusions

Després de l'obtenció i l'anàlisi dels resultats de cada part del treball es pot concloure que:

- ✓ S'ha determinat el nivell d'ultra-buit que s'assoleix en el Microtró de l'INTE (UPC) a partir d'un model numèric aproximat i d'estimacions dels valors de desorció i de velocitats de bombeig.
- ✓ La pressió d'equilibri ha estat calculada per models amb diferents nivells de complexitat que han anat des d'una geometria simple fins a una de més completa on s'han anat afegint components. D'aquesta manera s'ha anat entenent el comportament del sistema així com s'ha facilitat la detecció de possibles errors.
- ✓ S'ha determinat que quan s'assoleix la pressió d'equilibri, pel rang de valors de desorció analitzat, la bomba turbomolecular no cal que estigui en funcionament. Així que, la capacitat d'extracció depèn únicament de la bomba iònica.
- ✓ Pels valors de desorció estudiats, el Microtró assoliria el rang de pressions que comprèn el nivell d'ultra-buit. Pel cas més complet estudiat, que correspon als valors de màxim nivell de pressió, aquests estan al voltant de $2 \cdot 10^{-7}$ Pa.
- ✓ A mesura que s'introdueixen elements s'ha observat com la pressió del sistema augmenta, disminuint la capacitat de produir buit de la bomba iònica. Aquesta disminució de la capacitat únicament depèn de la quantitat de contorns sòlids introduïts i de les dimensions d'aquests.

De manera quantitativa es pot dir que:

- ✓ La pressió a l'interior dels dos imants és pràcticament igual. La diferència de la pressió mitjana a l'imant M2 respecte al M1 és del 0,12%.
- ✓ Les pressions mitjanes als imants, a l'estructura d'acceleració i al sensor són de $2,72 \cdot 10^{-7}$, $2,71 \cdot 10^{-7}$ i $2,67 \cdot 10^{-7}$ Pa, respectivament, quan la velocitat de bombeig és de $0,065 \text{ m}^3/\text{s}$ i la desorció és de $1 \cdot 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$.
- ✓ La pressió, p (Pa), varia en funció de la velocitat de bombeig, S ($\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$), segons:

$$p = 3 \cdot 10^{-5} \cdot S^2 - 7 \cdot 10^{-6} \cdot S + 6 \cdot 10^{-7}$$
 pels imants i l'estructura d'acceleració, i

$$p = 2 \cdot 10^{-5} \cdot S^2 - 7 \cdot 10^{-6} \cdot S + 6 \cdot 10^{-7}$$
 pel sensor.

- ✓ Variacions del nivell de desorció provoquen canvis dels valors de pressió segons la constant de proporcionalitat $27220 \text{ s}\cdot\text{m}^2/\text{m}^3$. Això permet determinar els valors de pressió si es canvien les propietats dels materials així com plantejar diferents hipòtesis sense necessitat de tornar a simular els diferents casos.
- ✓ Per qualsevol velocitat de bombeig la diferència entre la pressió als imants i la pressió al sensor és de l'1,9%. De la mateixa manera, la diferència entre la pressió a l'interior del linac i al sensor és de l'1,3%.

Per tot això, es conclou que s'han aconseguit els objectius plantejats en aquest treball.

Agraïments

A Xavier Escaler per tota l'ajuda i interès mostrat en l'elaboració del projecte, així com perquè sempre s'ha mostrat disponible per resoldre tots els meus dubtes.

A Youri Koubychine per proposar aquest projecte, per facilitar la informació i experiència pel seu desenvolupament i per ser un referent al llarg del treball.

Finalment, agrair a tots aquells que m'han ajudat al llarg de tots els estudis així com durant la realització del treball de fi de màster.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] VAC AERO INTERNATIONAL INC. *A Brief History of Vacuum Technology*. 2014. [<https://vacaero.com/information-resources/the-heat-treat-doctor/1347-a-brief-history-of-vacuum-technology.html>; 28 de desembre, 2016]
- [2] ACCELERATORS FOR SOCIETY. *The microtron*. [<http://www.accelerators-for-society.org/about-accelerators/index.php?id=21#microtron>, 27 de setembre, 2016].
- [3] TSIPENYUK, YOURI M. *The microtron. Development and Applications*. Octubre 2004.
- [4] AGILENT TECHNOLOGIES. *High and ultra-high vacuum for science research*. Setembre, 2011. [http://www.agilent.com/cs/library/training/Public/UHV_Seminar_Handbook.pdf; 12 d'octubre, 2016]
- [5] ORSAY PHYSICS. *What is UHV?* 2014. [<http://www.orsayphysics.com/what-is-uhv>; 4 de setembre, 2016].
- [6] AL-DMOUR, ESHRAQ. CELLS. *The Vacuum Technology for Accelerators*.
- [7] PFEIFFER VACUUM. *Types of flow*. 2016. [<https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/know-how/introduction-to-vacuum-technology/fundamentals/types-of-flow/>; 19 d'octubre, 2016]
- [8] MIDWEST TUNGSTEN SERVICE. *Leaks and gas loads*. [<http://www.tungsten.com/tips/leaks-and-gas-loads/>; 23 de novembre, 2016]
- [9] ACCELERATORS FOR SOCIETY. *The microtron*. [<http://www.accelerators-for-society.org/about-accelerators/index.php?id=21#microtron>, 27 de setembre, 2016].
- [10] WIKIPEDIA. *Microtron*. Juliol 2016. [<https://en.wikipedia.org/wiki/Microtron>; 17 d'octubre, 2016].
- [11] PFEIFFER VACUUM. *Turbomolecular pump operating principles*. 2016. [<https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/know-how/vacuum-generation/turbomolecular-pumps/design-operating-principle/turbomolecular-pump-operating-principle/>; 19 d'octubre, 2016]

- [12] GRÖBNER, OSWALD. Introduction to Accelerator Physics- Vacuum in Accelerators. 1-13 octubre 2006.
- [13] AGILENT TECHNOLOGIES. *Agilent Mini-TASK AG81*. 15 de juliol, 2011. [<http://www.agilent.com/cs/library/brochures/Mini-TASK%20AG81%20Brochure.pdf>; 4 de setembre, 2016].
- [14] AGILENT TECHNOLOGIES. *Ion pumps-Vaclon Plus 75*. Maig de 2011. [<http://www.agilent.com/en-us/products/vacuum-technologies/high-vacuum-pumps/ion-pumps/vacion-plus-75>; 4 de setembre, 2016].
- [15] UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO. *El acelerador lineal*. [<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/movimiento/lineal/lineal.htm>; 27 d'octubre, 2016].
- [16] LARGE HADRON COLLIDER. *Linear Accelerator – Protonen*. [<http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=linac>; 13 de novembre, 2016].
- [17] ALBA. *Imanes*. 2014. [<https://www.cells.es/es/aceleradores/imanes>; 2 d'octubre, 2016].
- [18] CERN ACCELERATING SCIENCE. *Molflow+, a Monte-Carlo Simulator package developed at CERN*. [<http://test-molflow.web.cern.ch/content/about-molflow>; 8 de setembre, 2016].
- [19] UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID. *Método de Montecarlo*. [https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/carlosp/html/pid/montecarlo.html, 23 de novembre, 2016].
- [20] ADY, MARTON I KERSEVAN, ROBERTO. *MolFlow+ user guide, versió 2.4.1*. 3 de juny 2014.