

Treball de Fi de Grau
Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Estudi i millora del sistema de refrigeració del LINAC del Sincrotró ALBA

MEMÒRIA

Autor: Marc Ferrater Roca
Director/s: Marcos Quispe Flores
Ponent: Enric Trillas Gay
Convocatòria: Maig 2016



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

En aquest document es presenta un estudi del sistema de refrigeració del *LINAC* (Lineal Accelerator o accelerador lineal) del Sincrotró ALBA. Al final d'aquest, també es proposen algunes millores a introduir en el mateix sistema. Aquestes activitats es troben dins el pla d'optimització del sistema de refrigeració del LINAC a càrrec del Consorci per a la Construcció, Equipament i Explotació del Laboratori de Llum de Sincrotró (CELLS).

Inicialment, s'han realitzat una sèrie de mesures de tot el sistema de refrigeració. Aquestes caracteritzacions han permès la modelització del sistema amb el software de simulació *Pipe Flow Expert*. S'ha validat el model comparant els resultats de les simulacions en condicions normals de treball amb dades reals de cabal mesurades en el *LINAC*.

Amb aquests resultats s'ha pogut veure quines eren les mancances i problemes del sistema actual. En coneixença d'aquests problemes, s'han realitzat un conjunt de simulacions amb possibles modificacions del sistema. Amb els resultats d'aquestes simulacions, s'han proposat les millores que aconseguen complir millor els seus objectius. Aquests objectius són l'augment del cabal per satisfer les necessitats d'evacuació de potència tèrmica i l'adequació de les velocitats de l'aigua a un rang determinat.

Amb el programa *NX*, un software de CAD, s'ha dissenyat la proposta de millora per a un dels subsistemes seguint les condicions de la proposta de millora simulada i en funció de l'espai disponible per a la seva instal·lació.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	3
1. GLOSSARI	7
2. PREFACI	9
2.1. Origen del projecte	9
2.2. Motivació	9
3. INTRODUCCIÓ	11
3.1. Objectius del projecte	11
3.2. Abast del projecte	11
4. LA FONT DE LLUM SINCROTRÓ ALBA [1]	13
4.1. Funcionament.....	14
4.2. Equips presents.....	15
4.2.1. Imants	15
4.2.2. Dispositius d'inserció.....	16
4.2.3. Obturadors de línia.....	17
4.2.4. Sistemes de radiofreqüència.....	17
4.3. Tècniques d'experimentació.....	17
5. DESCRIPCIÓ FÍSICA DE LA REFRIGERACIÓ DEL LINAC	19
5.1. Zona exterior del búnquer	20
5.2. Zona interior del búnquer	21
5.2.1. Egun & Bunching	21
5.2.2. Accelerating Structure 1	22
5.2.3. Accelerating Structure 2	23
5.3. Problemàtica detectada.....	23
6. MESURES EXPERIMENTALS	26
6.1. Equips de mesura	26
6.1.1. Cabalímetre d'ultrasons [2]	26
6.1.2. MSHE (Modular Setup for Hydraulic Experiments)	27
6.2. Condicions normals de treball	31
6.3. Caracterització dels equips	32
6.3.1. Cas cabalímetres	41

7. CÀLCUL DE CÀRREGUES TÈRMiques	45
7.1. Electroimants	45
7.2. Cavitats de radiofreqüència	46
8. DESCRIPCIÓ DEL MODEL PIPE FLOW EXPERT	47
8.1. El software Pipe Flow Expert	47
8.2. Modelització del sistema.....	48
8.3. Condicions de contorn	50
9. CALIBRATGE DEL MODEL	51
10. SIMULACIONS AMB EL MODEL ESTACIONARI	53
10.1. Resultats en cas real d'operació.....	53
10.1.1. Cabals.....	53
10.1.2. Mapa de velocitats	55
10.2. Variació de pressió de retorn	56
11. PROPOSTES DE SOLUCIÓ	58
11.1. Buncher Coil 2	58
11.2. BC1,SL & W1.....	59
11.3. GL & W2	62
11.4. RL2 & W3.....	63
11.5. Cooling Loop 1	64
11.6. Cabalímetres.....	65
12. DISSENY DELS MANIFOLDS DEL COOLING LOOP 1	66
12.1. <i>Manifold</i> entrada	66
12.2. <i>Manifold</i> sortida.....	68
13. PLANIFICACIÓ TEMPORAL I PRESSUPOST	70
13.1. Planificació temporal	70
13.2. Pressupost del projecte	70
13.2.1. Costos directes	70
13.2.2. Costos indirectes	72
13.2.3. Cost total.....	72
14. IMPACTE MEDIAMBIENTAL	74
CONCLUSIONS	75
AGRAÏMENTS	77
BIBLIOGRAFIA	78

Referències bibliogràfiques.....	78
Bibliografia complementària.....	79

1. Glossari

LINAC	Lineal Accelerator o accelerador lineal	
BC	Buncher Coil	
PB1	Prebuncher 1	
PB2	Prebuncher 2	
Bun	Buncher	
SL	Shielding Lens	
W	RF Window	
RF	Radiofrequency	
GL	Glazer Lens	
AS	Accelerating Structure	
RL	Water Load	
KA	Klystron Amplifier	
CL	Cooling Loop	
MSHE	Modular Setup for Hydraulic Experiments	
US	Ultrasound flowmeter	
DN	Diàmetre nominal d'un tub	mm
OD	Diàmetre exterior d'un tub	mm
ID	Diàmetre interior d'un tub	mm
e	espessor d'un tub	mm
k	rugositat absoluta	mm

$\epsilon = k/D$	rugositat relativa [adimensional]	
Re	número de Reynolds [adimensional]	
f	factor de fricció [adimensional]	
Q	cabal	m ³ /s
ΔP	caiguda de pressió	bar
v	velocitat del fluid	m/s
ΔT	variació de temperatura	°C
ΔT_{\max}	variació màxima de temperatura	°C
F_w	Força de l'aigua	N
F_k	Força d'una molla	N
F_p	Força pes	N

CELLS Consorci per a la Construcció, Equipament i Explotació del Laboratori de Llum de Sincrotró

EA Experimental Area o àrea experimental

SA Service Area o àrea de serveis

SR Storage Ring o anell d'emmagatzematge

BO Booster Ring o anell de propulsió

BL Beam Lines o línies experimentals

2. Prefaci

2.1. Origen del projecte

Actualment, el Consorci per a la Construcció, Equipament i Explotació del Laboratori de Llum de Sincrotró (CELLS) està en fase d'optimització del sistema de refrigeració del LINAC (Lineal Accelerator), que és el primer tram de l'accelerador de partícules del Sincrotró ALBA. En el moment de la construcció del sincrotró ALBA, l'accelerador lineal va ser comprat com un conjunt a una empresa exterior. La refrigeració dels equips que componen el LINAC és important per al funcionament de tota la instal·lació, ja que la estabilitat tèrmica i hidràulica afecta a la operació del mateix LINAC i, per tant, al feix d'electrons que circula per l'accelerador.

Per tal de dur a terme millores en la refrigeració d'aquests equips s'han d'executar activitats dins de dos grups:

- Comprensió de la dinàmica del fluid de refrigeració (aigua) pels seus conductes i el control tèrmic del sistema de refrigeració.
- Millora física del circuit de refrigeració amb la introducció de modificacions de les interfases hidràuliques. S'entén com a interfase hidràulica tots els components del circuit de refrigeració que es troben entre l'equip a refrigerar i el subministrament del fluid.

2.2. Motivació

En aquest projecte es treballa en la comprensió del comportament del sistema de refrigeració del LINAC. Per a això, cal caracteritzar tot el sistema i posteriorment usar aquesta caracterització en simulacions numèriques. Els resultats d'aquestes simulacions han de permetre poder fer propostes de millora per a poder optimitzar el seu funcionament, de manera que s'aconsegueixi que el cabal màxim que pot circular pels equips sigui suficient per evacuar la potència tèrmica de dins els equips i que la velocitat d'aquest fluid per les interfases hidràuliques es trobi dins d'un rang desitjat.

Si és possible, les propostes de millora en la refrigeració seran dissenyades per a poder dur a terme els canvis al sistema.

3. Introducció

3.1. Objectius del projecte

L'objectiu d'aquest projecte és realitzar un estudi complet del comportament del sistema de refrigeració del LINAC del Sincrotró ALBA i, si és possible, la millora d'aquest.

Actualment, el cabal d'aigua que passa pels circuits de refrigeració dels equips d'aquest sistema és insuficient per a cobrir les necessitats d'evacuació de potència tèrmica. Per això es vol construir un model hidràulic de simulació que correspongui al comportament real del sistema. Aquest model ha de permetre:

- L'anàlisi del comportament estacionari.
- Observar la modificació del comportament del sistema en funció del canvi de diferents condicions de contorn habituals en el règim normal de treball.

Després d'estudiar el funcionament del sistema, s'han de poder fer propostes de millora per a intentar solucionar el dèficit de cabal actual.

3.2. Abast del projecte

Per a poder complir l'objectiu de modelitzar el sistema de manera fidel a la realitat, s'haurà de fer abans una caracterització completa del sistema. Aquesta caracterització inclourà mesures geomètriques i experimentació amb els circuits de refrigeració per a poder introduir-ne les característiques en el model.

Per a la definició i simulació del model s'utilitzarà la eina Pipe Flow Expert, que és un software de simulació especialitzat en sistemes de tubs pels qual hi circulen fluids.

Amb el mateix software es simularan possibles millores a introduir en el sistema real. Les modificacions que es provaran són variacions en les interfases hidràuliques, que és el conjunt de tubs i instrumentació entre el subministrament del fluid i l'equip on es vol conduir aquest fluid.

Finalment, s'intentarà fer el disseny en 3D de les millores a introduir en el sistema. En aquest cas el software utilitzat serà NX, que és una eina de CAD.

4. La font de llum Sincrotró ALBA [1]

El Sincrotró ALBA és un sincrotró de tercera generació situat a Cerdanyola del Vallès i és el més important de la zona del Mediterrani. Es tracta d'un complex d'acceleradors d'electrons per produir llum de sincrotró, que permet visualitzar la estructura atòmica dels materials i estudiar-ne les seves propietats.

ALBA està gestionat pel Consorci per a la Construcció, Equipament i Explotació del Laboratori de Llum de Sincrotró (CELLS) i cofinançat a parts iguals per l'administració espanyola i catalana.



Figura 4.1 Vista aèria del Sincrotró ALBA [1].

Actualment ALBA disposa de set línies de llum operatives de la fase I, que comprenen tant rajos X tous com rajos X durs¹, i que es destinen sobretot a les biociències, la matèria condensada i la ciència dels materials. Actualment es troben en construcció dues línies de llum de la fase II (microespectroscòpia infraroja i fotoemissió de baixa energia i alta resolució angular per materials complexes). La instal·lació té capacitat per a un total de 34 línies de llum.

Genera 5000 hores de llum anualment i està disponible a oferir servei a més de 1000 investigadors de la comunitat acadèmica i del sector industrial cada any.

¹ La diferència entre els rajos X durs i els rajos X tous és la longitud d'ona de l'ona electromagnètica. Els rajos X tous, de menys energia, tenen longituds d'ona compreses entre els 10^{-8} m i els 10^{-10} m. Els rajos X durs comprenen longituds d'ona entre 10^{-10} m i 10^{-11} m.

4.1. Funcionament

La llum de sincrotró és la llum que emet una partícula carregada, normalment un electró, viatjant a velocitats molt elevades (properes a la velocitat de la llum) quan la seva trajectòria és desviada.

L'accelerador està dividit en tres parts: l'accelerador lineal, l'anell de propulsió i l'anell d'emmagatzematge. En l'accelerador lineal o *LINAC* s'obtenen els electrons escalfant un metall a temperatures molt elevades perquè els electrons més superficials se'n desprenguin i s'accelerïn mitjançant electroimants i cavitats de radiofreqüència des de 0 fins a 100 MeV.

L'accelerador circular o *Booster Ring (BO)* augmenta l'energia dels electrons fins als 3 GeV. A ALBA, el *Booster Ring* té un perímetre de 249,6 m. Quan els electrons han arribat a aquest nivell d'energia passen a l'anell d'emmagatzematge.

En l'anell d'emmagatzematge o *Storage Ring (SR)*, que té un perímetre de 268,8 m, els electrons es mantenen circulant a un nivell d'energia constant i la seva trajectòria es controla amb electroimants. Al provocar una trajectòria circular als electrons, aquests emeten llum de sincrotró en direcció tangencial a la circumferència descrita.

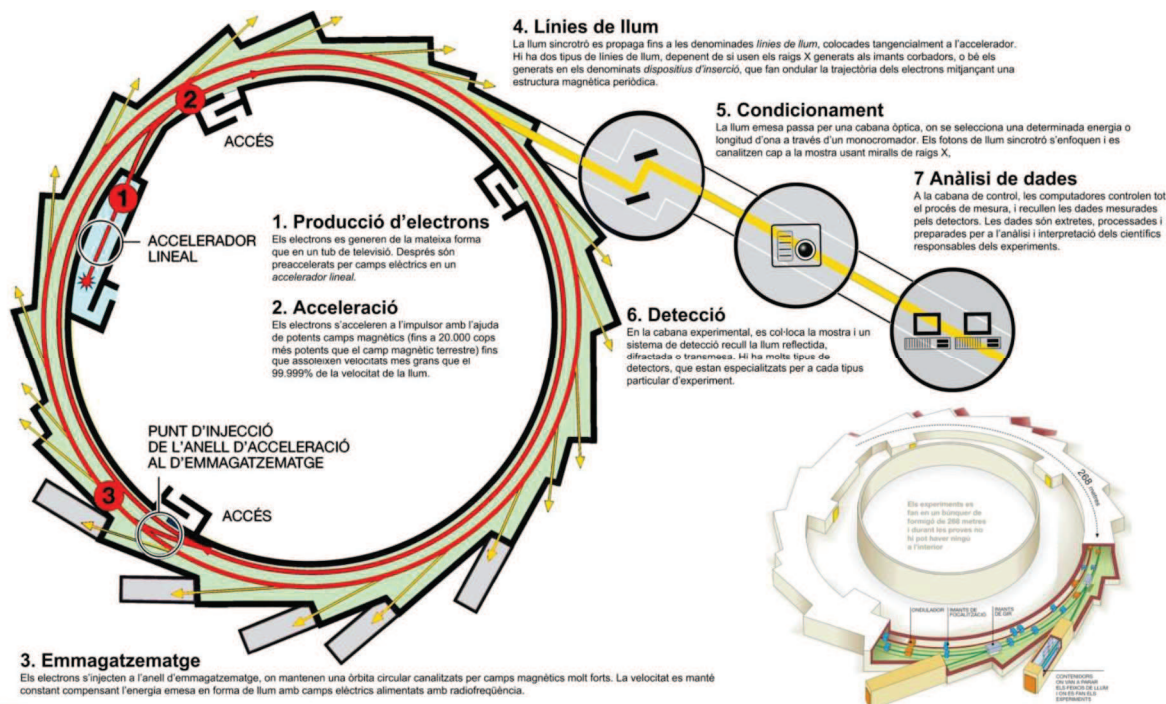


Figura 4.2 Esquema de funcionament d'un sincrotró [1].

Totes les cavitats per on circulen els electrons es troben una pressió dins del rang de ultra alt buit (pressions entre 10^{-9} mbar i 10^{-12} mbar) amb la finalitat d'eliminar gairebé totes les molècules de gas i evitar que els electrons es desviïn de la seva trajectòria en col·lisionar-hi.

Part de la radiació emesa pels electrons s'extreu de l'anell d'emmagatzematge a través d'unes obertures tangencials a l'anell i es dirigeix a les estacions experimentals. En les línies experimentals es selecciona la longitud d'ona desitjada per a dur a terme els experiments adients.

Actualment, a ALBA, existeixen set línies experimentals o *Beam Lines*:

- **BL04 – MSPD.** Ciència de materials i difracció de pols
- **BL09 – MITRAL.** Microscòpia de raigs-X tous
- **BL11 – NCD.** Difracció no cristal·lina
- **BL13 – XALOC.** Cristal·lografia macromolecular
- **BL22 – CLAESS.** Espectroscòpia d'absorció i emissió
- **BL24 – CIRCE.** Espectroscòpia i microscòpia de fotoemissió
- **BL29 – BOREAS.** Dispersió i absorció de ressonància

A més, es troben en construcció dos línies experimentals de fase II noves:

- **BL – MIRAS.** Microespectroscòpia d'infraroig
- **BL – LOREA.** Fotoemissió de baixa energia amb alta resolució angular per a materials complexos

4.2. Equips presents

4.2.1. Imants

Els electroimants s'utilitzen per guiar i enfocar els feixos d'electrons que circulen per la cambra de buit. A ALBA n'hi ha de quatre tipus diferents:

- **Dipolars.** Per a desviar els electrons a les línies de transferència i també per corregir l'òrbita.
- **Quadrupolars.** S'utilitzen per focalitzar els electrons i transportar-los llargues

distàncies.

- **De funcions combinades.** És una combinació d'imat dipolar i imant quadrupolar. S'utilitzen per assegurar que els electrons completin els 360° dels acceleradors circulars i proporcionar una focalització addicional.
- **Sextupolars.** S'utilitzen per corregir aberracions cromàtiques en el feix d'electrons.

4.2.2. Dispositius d'inserció

Per a determinats experiments es pot necessitar llum amb unes característiques específiques que no es poden aconseguir amb els imants corbadors. La solució són uns sistemes magnètics especials que permeten aconseguir que la corba dels electrons tingui un radi específic. Aquests sistemes s'anomenen dispositius d'inserció i consisteixen en dos matrius magnètiques col·locades de manera que la trajectòria dels electrons fa una oscil·lació. N'hi ha de dos tipus:

- **Oscil·ladors.** Successió d'imatns de polaritats alternades que introdueixen una oscil·lació transversal en el feix d'electrons. La llum emesa en cada oscil·lació es sobreposa i augmenta la llum final.
- **Onduladors.** Són similars als oscil·ladors, però menys forts. Ondulen la trajectòria dels electrons, provocant interferències en la llum emesa en cada ondulació. La llum final és més estreta, intensa i focalitzada.

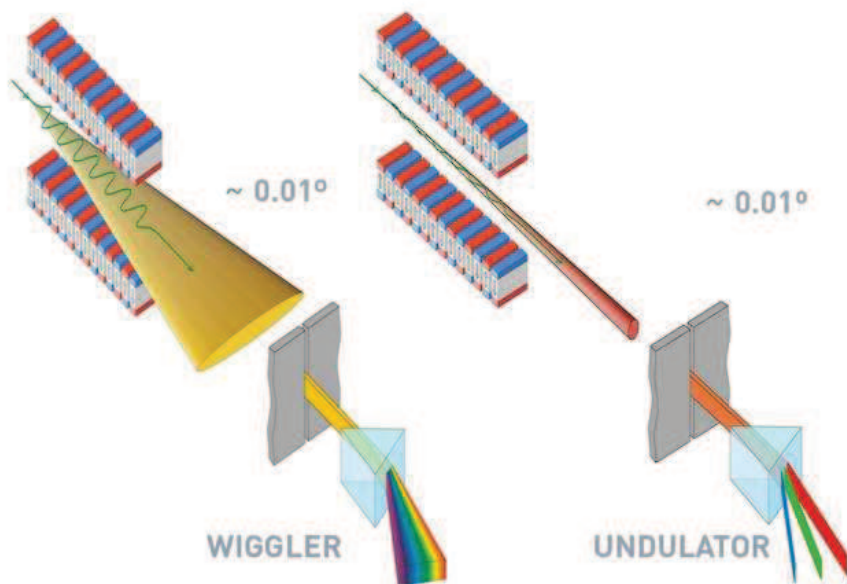


Figura 4.3 Esquema de funcionament dels diferents dispositius d'inserció [1].

4.2.3. Obturadors de línia

La cambra de buit té una obertura que permet l'extracció de la llum. Aquesta obertura està unida a un tub de buit recte que acobla l'accelerador amb la línia de llum. El tub de buit s'anomena obturador de línia perquè està situat al final de l'accelerador i arriba fins a la part frontal de la cabina de la línia de llum.

4.2.4. Sistemes de radiofreqüència

Els sistemes de radiofreqüència són els responsables de l'acceleració dels electrons en l'anell de propulsió i l'anell d'emmagatzematge. Consisteixen en unes cavitats metàl·liques que contenen un camp electromagnètic, que és el que accelera els electrons.

Els camps electromagnètics es generen mitjançant amplificadors de potència. Per les característiques geomètriques de les cavitats el camp magnètic ressona al seu interior i, quan els electrons les travessen, s'acceleren sota l'efecte del camp magnètic.

4.3. Tècniques d'experimentació

Al Sincrotró ALBA es treballa principalment amb tres tècniques diferents: la difracció, la espectroscòpia i la microscòpia.

La **difracció** de la llum és el fenomen pel qual s'altera la direcció d'aquesta quan es troba amb un obstacle o un punt prim. Com més petita sigui la obstrucció, més gran és l'efecte de la difracció. L'ona difractada dona informació sobre l'obstacle que l'ha difractat. Quan els rajos X travessen un sòlid, els àtoms els difracten i es captura la informació de la seva disposició geomètrica. A ALBA es treballa amb la difracció de monocristalls (BL-13), la difracció de sòlids policristal·lins o pols (BL-04) i la difracció no cristal·lina en materials orgànics (BL-11).

Quan els rajos X són absorbits per una mostra, es produeixen molts efectes que es poden detectar per obtenir informació del material. Aquesta tècnica s'anomena **espectroscòpia**. Els efectes que es produeixen són:

1. Fluorescència. Els àtoms s'exciten pels rajos X i emeten fotons de menys energia quan tornen al seu estat fonamental inicial.
2. Fotoemissió. El fotó de rajos X té suficient energia per alliberar un electró de l'àtom.
3. Absorció. L'àtom absorbeix un fotó amb la energia exacta per fer saltar un electró a un nivell atòmic superior.
4. Dispersió ressonant. El fotó de rajos X és absorbit i emès immediatament. Permet fer

experiments de difracció seleccionant només un tipus d'àtom.

5. Corrent de drenatge. Per mantenir la mostra elèctricament neutra, és necessari que tots els electrons que escapin de la mostra per fotoemissió siguin substituïts per una corrent elèctrica que entri a la mostra.

Les principals característiques físiques i químiques de les substàncies vénen determinades per la configuració dels nivells atòmics dels seus àtoms. L'espectroscòpia de rajos X permet estudiar aquesta configuració.

La **microscòpia** de rajos X és útil per obtenir l'estructura tridimensional de mostres que són massa grans per a la microscòpia electrònica ($1\mu\text{m}$) i en casos en què es requereix una major resolució que la que es pot aconseguir amb microscopis de llum visible, o en mostres opaques.

5. Descripció física de la refrigeració del LINAC

Existeix un sistema de refrigeració general que es distribueix en 4 anells (*Experimental Area, Service Area, Storage Ring, Booster Ring*). L'anell de *Service Area (SA)* alimenta la refrigeració del LINAC amb un cabal aproximat de $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. És complicat donar un valor exacte del cabal que hi circula ja que aquests són els paràmetres de disseny i, a més a més, els cabals tenen variacions en funció de si s'obren o es tanquen sectors de refrigeració de la instal·lació (per a realitzar operacions de manteniment, per exemple).

A l'entrada, l'aigua té una pressió de 10,2 bars i una temperatura de 23 °C. A la sortida, la pressió és 2,8 bars i la temperatura és de 27 °C aproximadament. La pressió en el retorn pot variar en algunes dècimes, concretament dins d'un rang de 2 dècimes per sobre i per sota dels 2,8 bars. Això és degut al disseny general de retorn comú dels quatre anells de refrigeració. Si algun sector amb un cabal important es tanca, unes vàlvules reguladores de cabal situades a l'entrada del sistema canvien la seva posició fins arribar al nou punt de treball. Aquests moviments poden produir els canvis en la pressió de retorn esmentats.



Figura 5.1 Imatge del LINAC del Sincrotró ALBA.

Aquestes variacions en la pressió de retorn indueixen que el ΔP entre la entrada i sortida dels equips sigui diferent de l'habitual i, per tant, que el cabal que hi circula també variï.

A l'entrada dels LINAC hi ha un reductor de pressió que la disminueix fins a un valor de 8,8 bars amb la intenció de protegir alguns equips en front de la pressió màxima que poden aguantar (concretament, els *Klystron Amplifiers*).

Tots els valors de cabals donats en aquest apartat són valors teòrics que va donar el proveïdor del LINAC en el moment de la seva adquisició. Més endavant, es realitzen càlculs de les càrregues tèrmiques per a cada equip per a poder tenir coneixement de la potència que cal evacuar amb l'aigua i, juntament amb altres dades tècniques de l'equip, poder avaluar quin és el cabal necessari.

El LINAC es troba a l'interior d'un búnquer per protegir dels efectes de la radiació. Gran part dels equips que el conformen es troben dins d'aquest búnquer excepte tres, que es troben fora.

En l'annex F hi ha l'esquema complet del sistema de refrigeració del LINAC.

5.1. Zona exterior del búnquer

En aquesta zona només hi ha tres equips: *RL1* i els dos equips que limiten la pressió màxima, *KA1* i *KA2*. El cabal que circula en aquesta zona és de $8,83 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ segons els valors de disseny subministrats per l'empresa proveïdora del LINAC.

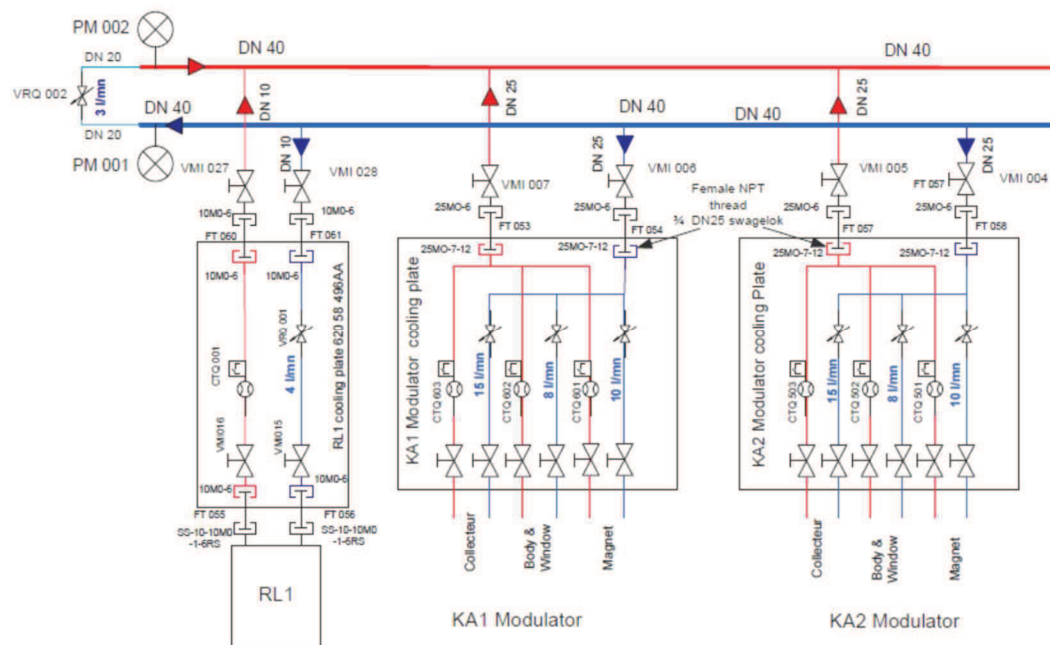


Figura 5.1 Esquema de la red de refrigeració en la zona exterior del búnquer.

5.2. Zona interior del búnquer

El cabal total a l'interior del búnquer és de $5,67 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ segons el disseny rebut amb la compra del sistema. Està compost per tres zones diferenciades.

5.2.1. Egun & Bunching

- BC2: aquest equip ha de ser alimentat amb $8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. Aquest cabal es separa en quatre conductes en paral·lel, cadascun amb el mateix cabal ($2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$).
- CL1: rep $3,33 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ de la xarxa que refrigeren un circuit independent amb un intercanviador de calor. El circuit independent alimenta tres equips: PB1 ($2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$), PB2 ($3,33 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$) i Buncher ($3,33 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$). La temperatura d'aquest circuit independent és de $32 \text{ }^\circ\text{C}$.
- BC1, SL i W1: alimentats amb $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ de la xarxa. Aquest cabal refrigera els tres equips: BC1 amb $5,83 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, 4 unitats de SL amb $4,17 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ ($1,04 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ per a cada unitat) i W1 amb $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

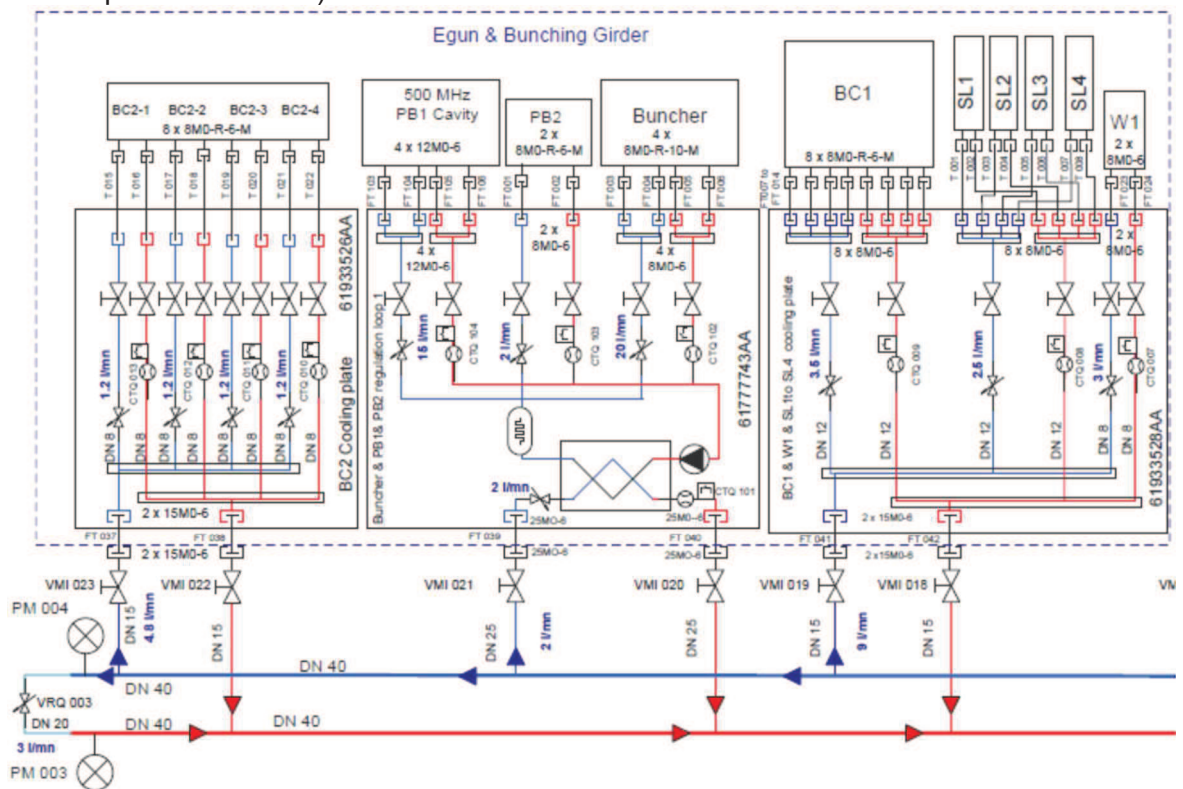


Figura 5.2 Esquema de la red de refrigeració en la zona Egun & Bunching.

5.2.2. Accelerating Structre 1

- GL i W2: reben $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. Aquest es distribueix en $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ per a GL i $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ per a W2.
- CL2: rep $3,33 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ de la xarxa que refrigeren un circuit independent amb un intercanviador de valor. El circuit independent es troba a una temperatura de $32 \text{ }^\circ\text{C}$ i refrigera l'equip AS1 amb un cabal de $4,17 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.
- RL2 i W3: rep $8,33 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ de la xarxa. Aquest cabal alimenta dos equips: RL2 amb $3,33 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ i W3 amb els altres $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

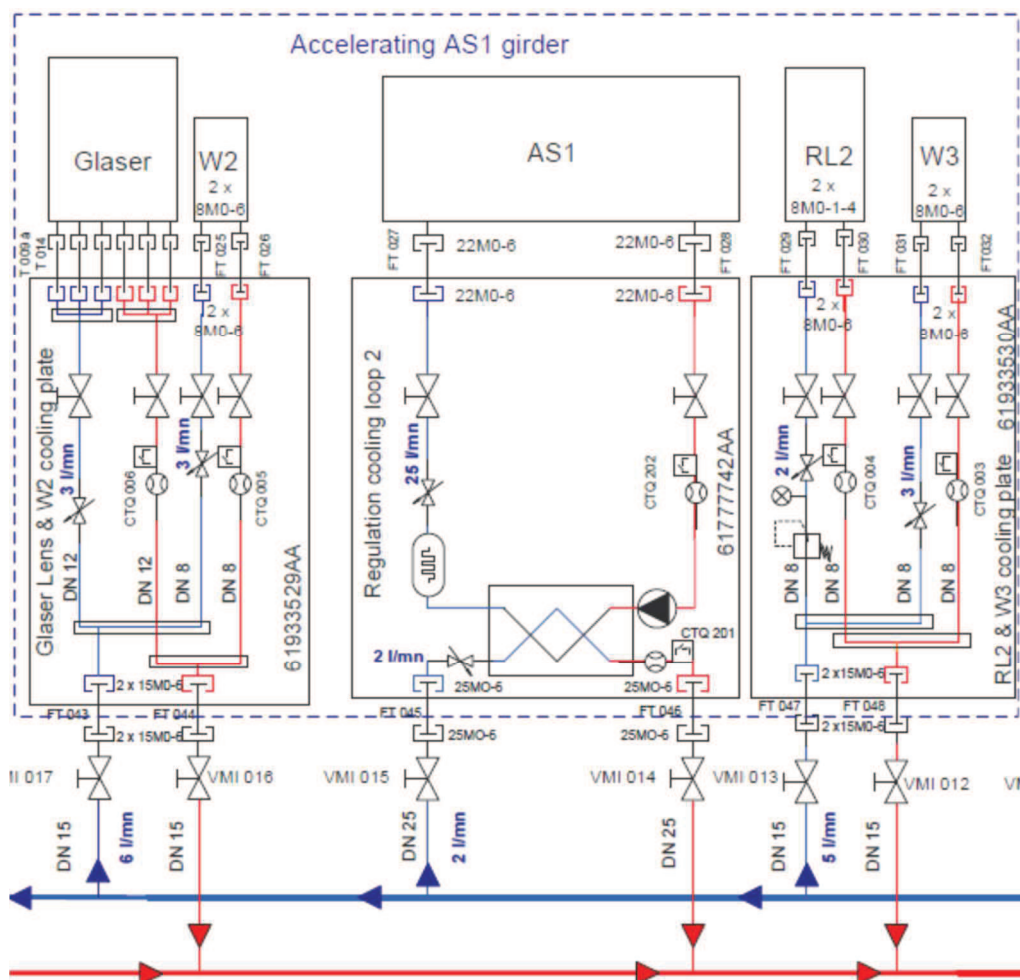


Figura 5.3 Esquema de la xarxa de refrigeració en la zona Accelerating Structure 1.

5.2.3. Accelerating Structure 2

- CL3: actua igual que CL2. Un cabal de $3,33 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ refrigeren un circuit independent a través d'un intercanviador de calor i aquest circuit independent refrigera l'equip AS2 amb un cabal de $4,17 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.
- RL3: un cabal de $3,33 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ refrigeren directament l'equip.

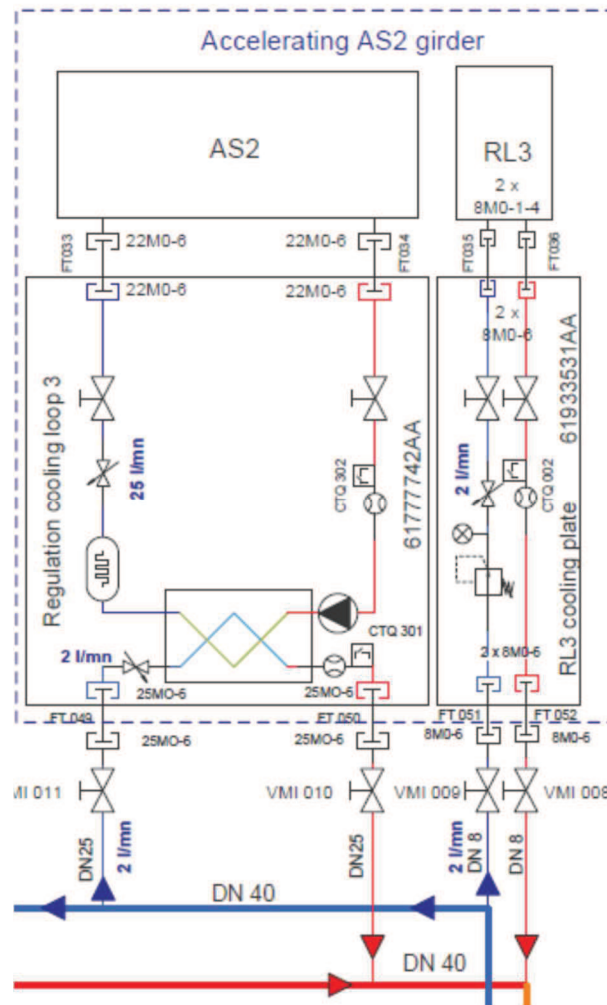


Figura 5.4 Esquema de la red de refrigeració en la zona *Accelerating Structure 2*.

5.3. Problemàtica detectada

L'objectiu del projecte és millorar el sistema perquè no hagi de treballar al límit de les seves capacitats. És a dir, en l'actualitat el sistema permet subministrar els cabals descrits en l'apartat 5.2 amb les vàlvules reguladores de cabal completament obertes. Això significa que

si en algun moment es tingués un pic de potència dissipada major als valors nominals, el sistema no tindria prou capacitat per evacuar-la, cosa que conduiria a un increment de temperatura de l'equip.

La pressió màxima dels equips és un limitant. Una possibilitat a tenir en compte és canviar la posició de la reductora de pressió a l'entrada general i col·locar-la de manera que afecti únicament a l'exterior del búnquer, ja que és allí on es troben els equips que estan protegits per la reductora de pressió. D'aquesta manera s'aconseguiria augmentar el ΔP en 1 bar. Cal realitzar simulacions per veure com afectaria aquesta acció a la resta del sistema, perquè en funció de les característiques geomètriques dels equips pot ser que l'augment de cabal en aquest cas sigui molt poc significatiu.

L'alimentació dels CL és d'entre $1,67 \cdot 10^{-5}$ i $3,33 \cdot 10^{-5}$ m³/s. Aquest cabal circula per uns tubs i mànegues sobredimensionats, provocant que la velocitat de l'aigua en aquest sigui inferior a 0,5 m/s, que és la velocitat mínima per evitar que quedin bosses d'aire atrapades en els conductes.

La refrigeració de BC1 no funciona correctament. El cabal que hi passa és massa petit i conseqüentment el ΔT entre la entrada i la sortida és massa elevat. La possible solució a aquest problema és separar-lo del distribuïdor on es troba (junt amb les SL i W1) per a connectar-lo directament a la xarxa. D'aquesta forma es disminuirien les pèrdues de càrrega en les interfases hidràuliques i, per tant, el cabal podria augmentar.

El principal problema s'intueix que està en el disseny actual dels *manifolds*, els distribuïdors d'aigua. El mal dimensionament de les interfases hidràuliques pot induir pèrdues de càrrega elevades i provocar velocitats del fluid no adequades. Es considera que les velocitats dels fluids han de ser sempre entre 0,5 i 3 m/s. Aquest és el rang de referència utilitzat en tots els sincrotrons. Aquest rang ve determinat per diferents publicacions i estàndards. En la *Guia técnica de agua caliente sanitaria central* de la Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR) s'indica que la velocitat mínima recomanada en tubs metàl·lics i termoplàstics és de 0,5 m/s. En el *British Standard BS 6700: "Specification for design, installation, testing and maintenance of water supply services for domestic buildings"* es diu que la velocitat del fluid no ha de ser superior als 3 m/s per aigua freda i 2,5 m/s per aigua calenta i que per evitar cabals lents i sedimentació en tubs horitzontal s'ha de mantenir la velocitat per sobre dels 0,5 m/s.

Per sota dels 0,5 m/s el fluid no té força per a expulsar bombolles d'aire que poden entrar al sistema i, per tant, es queden allà atrapades, afectant negativament al sistema. Per sobre dels 3 m/s es produeixen dos fenòmens. El primer és que apareixen vibracions en els tubs on

circula el fluid, i aquest fet en una instal·lació on l'alineament de tots els components que el conformen és molt precís pot ser molt negatiu. El segon fenomen és que a partir d'aquesta velocitat el desgast de les parets internes dels tubs es veu molt accelerat.

Durant operacions de manteniment en el LINAC, s'ha vist també que a l'aigua dels *cooling loops* hi ha partícules d'òxid en suspensió. En un altre projecte d'estudi, cal avaluar d'on poden venir.

Una part de la instrumentació, en concret els cabalímetres, no funciona correctament. Aquest fet fa que hi hagi inconsistència en les mesures que es puguin realitzar i, per tant, que molt probablement els diagnòstics que es facin a partir d'aquestes dades siguin erronis.

Per altra banda, es disposa de poques dades tècniques de la refrigeració dels equips que componen el LINAC. Això, sumat a la mala lectura dels cabalímetres, complica molt el coneixement de l'estat actual de la refrigeració del LINAC.

6. Mesures experimentals

Per a poder conèixer amb profunditat el funcionament real del sistema de refrigeració en les seves condicions d'operació actuals és necessari tenir-ne una caracterització completa: des de les característiques geomètriques de les interfases hidràuliques fins als consums d'energia dins dels conductes de refrigeració en passar-hi l'aigua per l'interior.

6.1. Equips de mesura

6.1.1. Cabalímetre d'ultrasons [2]

L'equip d'ultrasons és un tipus de cabalímetre no invasiu. Això significa que al no caler introduir-lo dins del conducte on es vol mesurar el cabal no s'adultera el valor mesurat. El cabal és mesurat amb senyals ultrasònics usant un mètode de diferència de temps de trànsit.

Per a dur a terme les mesures, cal col·locar dos transductors a l'exterior del tub. Els senyals d'ultrasò són enviats per un primer transductor, reflectits en el cantó oposat del tub i posteriorment detectats per un segon transductor. Els senyals són enviats alternativament en el sentit del moviment del fluid i en el sentit oposat.

Com que el medi en el que es propaguen les ones està en moviment, el temps que tarden els senyals en anar d'un transductor fins a l'altre és més curt si és en el mateix sentit del cabal que en el sentit contrari. Aquesta diferència de temps s'utilitza per determinar la velocitat mitja del fluid on es propaguen els senyals d'ultrasò i, per tant, el cabal que hi circula.



Figura 6.1 Esquema del principi de funcionament del cabalímetre d'ultrasons [2].

Aquest equip de mesura té algunes limitacions. La primera és que el diàmetre exterior del tub on es vol mesurar el cabal ha de ser com a mínim de 8 mm. La segona limitació és que la mesura ha de ser en un tram recte i allunyada de possibles pertorbacions, ja que en el tram

on es mesura el fluid ha de ser homogeni.

Les dades tècniques del cabalímetre d'ultrasons FLUXUS F601 i dels transductors utilitzats es troben en l'annex E.

6.1.2. MSHE (Modular Setup for Hydraulic Experiments)

Es tracta d'un circuit extern per tal de poder fer mesures de la relació entre cabal i pèrdua de càrrega en circuits de conductes.

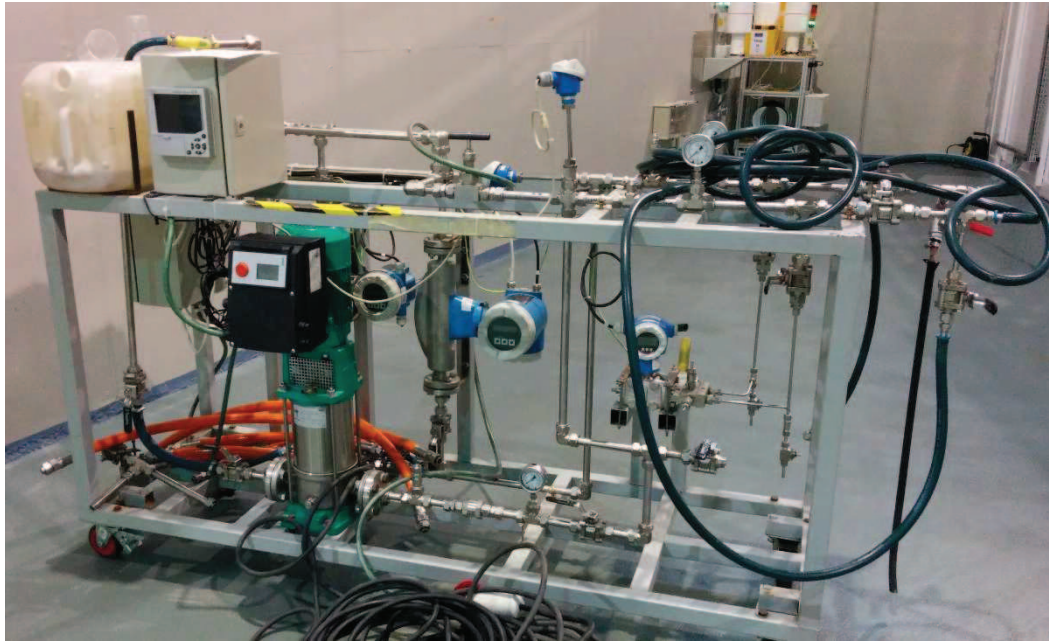


Figura 6.2 Imatge de l'equip MSHE.

El circuit funciona de la següent manera (els números entre parèntesis fan referència a la codificació de cada equip en la figura 6.2):

Un tanc (1) amb un nivell superficial d'aigua a pressió atmosfèrica alimenta una bomba centrífuga (4) que impulsa l'aigua. La bomba consta d'un variador de freqüència per poder-ne variar les revolucions per minut i, conseqüentment, poder obtenir diferents punts de treball (diferents altures manomètriques).

A continuació hi ha una bifurcació: un conducte es dirigeix directament al tanc i l'altre cap a l'equip a mesurar. En el conducte que es dirigeix al tanc hi ha una vàlvula de regulació (23) que permet controlar amb més precisió el cabal que passa per l'equip. Normalment aquesta vàlvula està completament tancada i s'obre a poc a poc per a reduir el cabal que passa per l'equip que s'està caracteritzant.

A l'entrada i sortida dels conductes de l'equip que es mesura (13) hi ha dos manòmetres

analògics (un a l'entrada, 10, i l'altre a la sortida, 12) i un manòmetre digital connectat a l'entrada i sortida (12). Tenen l'objectiu de mesurar la diferència de pressió entre l'entrada i sortida.

També hi ha instal·lat un cabalímetre que funciona pel principi de Coriolis (18). Aquest cabalímetre és d'alta precisió i ofereix una lectura molt acurada del cabal real que hi circula. El major problema que presenta aquest cabalímetre és que només llegeix mesures fins a un cabal de 20 l/min aproximadament.

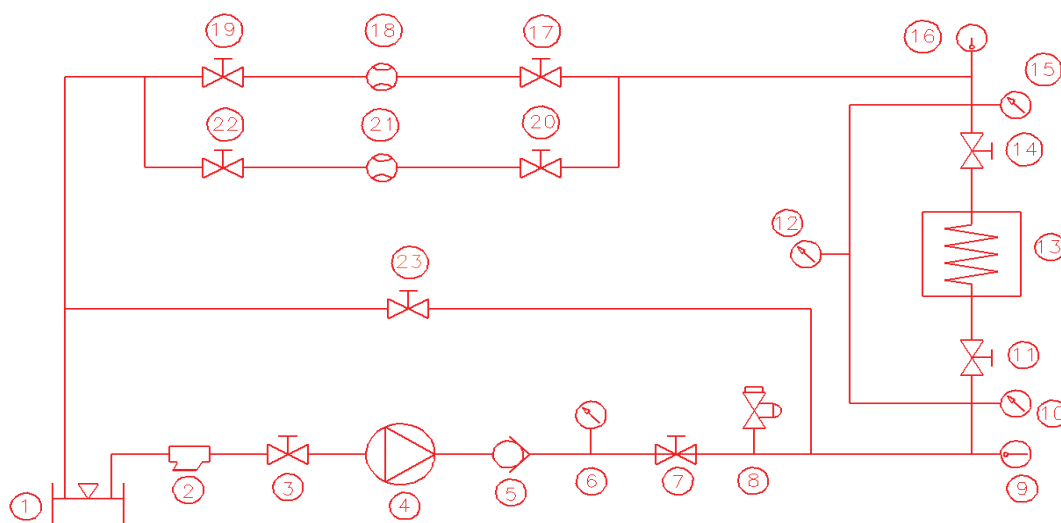
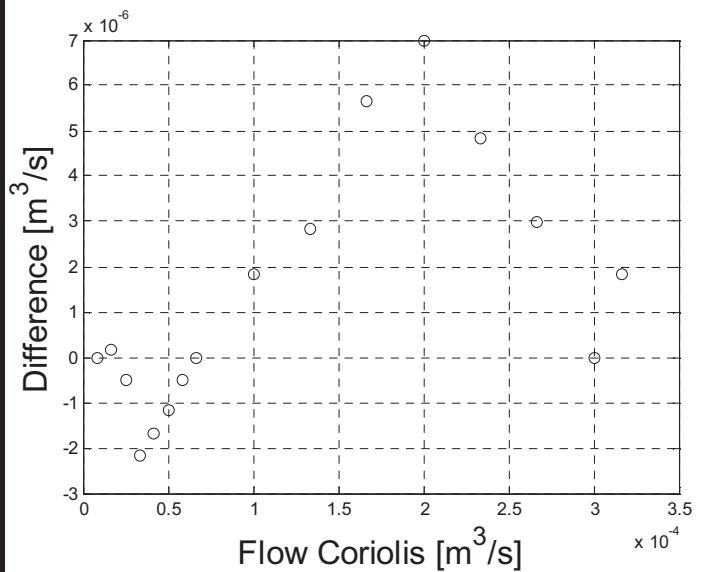


Figura 6.3 Esquema de funcionament de MSHE. Els números entre parèntesis indiquen diferents components d'instrumentació.

En ser aquest un equip de mesura propi, s'han realitzat abans diferents tests per calibrar-lo i comprovar que el sistema funciona correctament.

La primera comprovació és per assegurar el correcte funcionament del cabalímetre. Es regula el cabal amb el variador de freqüència de la bomba i s'anota el valor llegit. S'anota també una segona lectura corresponent al cabalímetre d'ultrasons, que està instal·lat en un conducte del circuit. Ambdues mesures han de ser molt semblants.

Test de cabal [m ³ /s]		
Coriolis	Ultrasò	Diferència
$8,33 \cdot 10^{-6}$	$8,33 \cdot 10^{-6}$	0
$1,67 \cdot 10^{-5}$	$1,65 \cdot 10^{-5}$	$1,67 \cdot 10^{-7}$
$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,55 \cdot 10^{-5}$	$-5 \cdot 10^{-7}$
$3,33 \cdot 10^{-5}$	$3,55 \cdot 10^{-5}$	$-2,17 \cdot 10^{-6}$
$4,17 \cdot 10^{-5}$	$4,33 \cdot 10^{-5}$	$-1,67 \cdot 10^{-6}$
$5 \cdot 10^{-5}$	$5,12 \cdot 10^{-5}$	$-1,17 \cdot 10^{-6}$
$5,83 \cdot 10^{-5}$	$5,88 \cdot 10^{-5}$	$-5 \cdot 10^{-7}$
$6,67 \cdot 10^{-5}$	$6,67 \cdot 10^{-5}$	0
$1 \cdot 10^{-4}$	$9,82 \cdot 10^{-5}$	$1,83 \cdot 10^{-6}$
$1,33 \cdot 10^{-4}$	$1,31 \cdot 10^{-4}$	$2,83 \cdot 10^{-6}$
$1,67 \cdot 10^{-4}$	$1,61 \cdot 10^{-4}$	$5,67 \cdot 10^{-6}$
$2 \cdot 10^{-4}$	$1,93 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-6}$
$2,33 \cdot 10^{-4}$	$2,29 \cdot 10^{-4}$	$4,83 \cdot 10^{-6}$
$2,67 \cdot 10^{-4}$	$2,64 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-6}$
$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	0
$3,17 \cdot 10^{-4}$	$3,15 \cdot 10^{-4}$	$1,83 \cdot 10^{-6}$



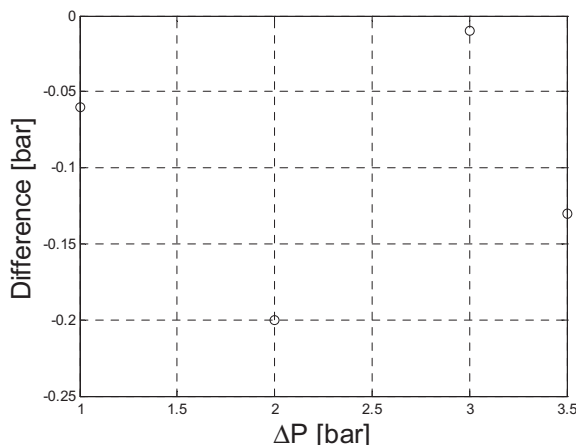
Taula 6.1 Mesures amb els cabalímetres de l'equip MSHE i d'ultrasons.

Figura 6.4 Diferència en les lectures dels dos cabalímetres.

La diferència màxima entre les dos mesures arriba a ser de $7 \cdot 10^{-6}$ m³/s. En no ser una diferència molt gran (es produeix a una magnitud de $2 \cdot 10^{-4}$ m³/s, percentualment la diferència és només de 3,5%), sumat a que la diferència de lectures no segueix cap tendència, es conclou que la mesura de cabal és correcta.

La segona comprovació és la del manòmetre digital. Es regula la pressió usant els manòmetres analògics. Com que el manòmetre de la sortida està a pressió atmosfèrica, aquest ha de marcar sempre una pressió de 0 bar i, conseqüentment, la lectura de l'altre manòmetre analògic marca directament la caiguda de pressió entre entrada i sortida. Es mira la diferència d'aquest valor amb la lectura del manòmetre digital.

Test de pressió [bar]		
ΔP analògic	ΔP digital	Diferència
1	1,06	0,06
2	2,2	0,2
3	3,01	0,01
3,5	3,63	0,13



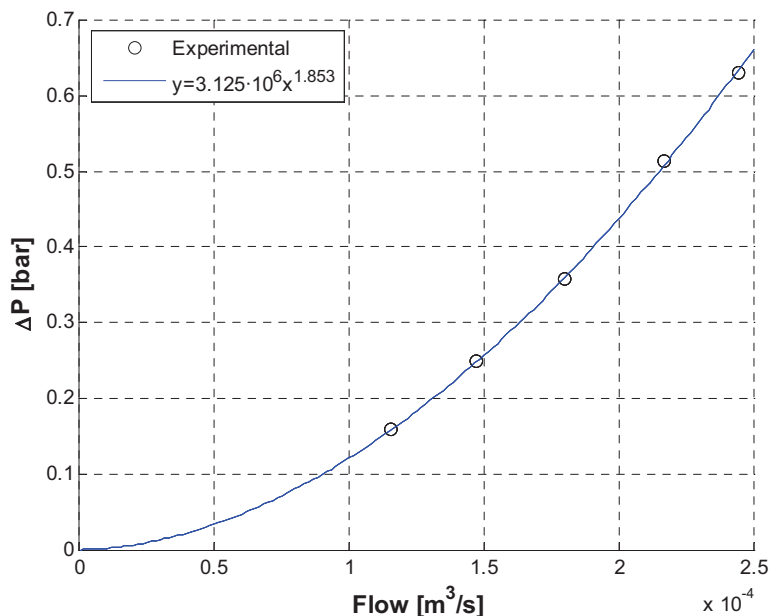
Taula 6.2 Mesures amb els manòmetres digital i analògic de l'equip MSHE.

Figura 6.5 Diferència en les lectures dels dos manòmetres.

La diferència de lectura en els 4 punts és bastant baixa i no segueix una tendència creixent. A més, cal considerar que els manòmetres analògics poden induir a un error de lectura. Es demostra, doncs, que la lectura de la diferència de pressió és també correcta.

Finalment, s'ha quantificat la pèrdua de càrrega que hi ha en les mangueres del MSHE quan hi circula cabal. Les mangueres utilitzades durant els experiments són dues: una de diàmetre intern 10 mm, i una altra de diàmetre intern 18 mm.

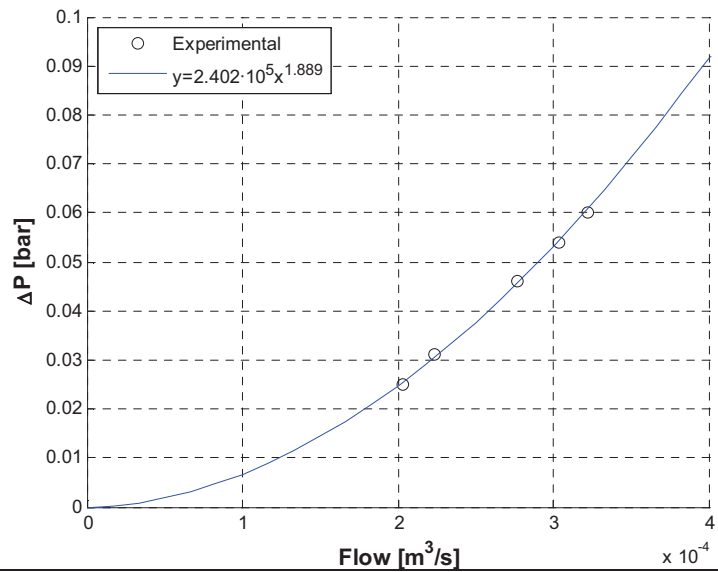
ID=10 mm	
Q [m ³ /s]	ΔP [bar]
$1,16 \cdot 10^{-4}$	0,158
$1,47 \cdot 10^{-4}$	0,249
$1,80 \cdot 10^{-4}$	0,358
$2,17 \cdot 10^{-4}$	0,513
$2,44 \cdot 10^{-4}$	0,631



Taula 6.3 Punts mesurats en la relació entre pèrdua de càrrega i cabal en les mànegues de ID=10 mm.

Figura 6.6 Gràfic dels punts mesurats superposats a la corba teòrica que s'ajusta a la relació.

ID=18 mm	
Q [m ³ /s]	ΔP [bar]
2,03 · 10 ⁻⁴	0,025
2,24 · 10 ⁻⁴	0,031
2,77 · 10 ⁻⁴	0,046
3,03 · 10 ⁻⁴	0,054
3,22 · 10 ⁻⁴	0,060



Taula 6.4 Punts mesurats en la relació entre pèrdua de càrrega i cabal en les mànegues de ID=18 mm.

Figura 6.7 Gràfic dels punts mesurats superposats a la corba teòrica que s'ajusta a la relació.

Les pèrdues són petites per a la mànega de diàmetre intern més gran, mentre que a la mànega més petita les pèrdues de càrrega són més grans. De totes formes, s'haurà de deliberar en cada experiment si les pèrdues degudes a les mànegues de l'equip de mesura són negligibles o no enfront les pèrdues del propi equip que es mesura.

6.2. Condicions normals de treball

S'ha col·locat el cabalímetre d'ultrasons en diferents localitzacions del sistema de refrigeració durant períodes llargs de temps per a poder mesurar el cabal que hi circula en condicions normals de funcionament de l'accelerador.

Amb aquestes mesures es pretén determinar com funciona la refrigeració en la actualitat amb l'objectiu de poder validar, a posteriori, la modelització del sistema amb el software de simulació. És a dir, si en el model s'introdueixen com a condicions de contorn les pressions d'entrada i sortida del sistema; el cabal resultant de les simulacions ha de coincidir també amb el mesurat en condicions normals de funcionament.

Un altre objectiu d'aquestes mesures és observar com varia el valor de cabal al llarg del temps. Les condicions de contorn poden variar i, per tant, el cabal que hi circula també. És per això que interessa saber quin és el rang de variació del cabal d'aigua.

	Cabal [m ³ /s]
Interior búnquer	4,5·10 ⁻⁴ a 5,17·10 ⁻⁴
LINAC	1,73·10 ⁻³ a 1,85·10 ⁻³

Taula 6.5 Cabals mesurats amb el cabalímetre d'ultrasons.

6.3. Caracterització dels equips

Per a la caracterització dels equips cal conèixer la relació entre la diferència de pressió de l'aigua entre l'entrada i la sortida de l'equip i el cabal que circula per aquell equip.

Aquesta relació s'ha establert utilitzant l'equip de mesura MSHE. Amb aquest equip connectat a l'entrada i la sortida dels conductes de refrigeració de l'equip que es vol caracteritzar es força amb la bomba de MSHE diferents valors de cabal obtenint per a cadascun d'aquests punts una caiguda de pressió determinada. L'objectiu és obtenir un nombre de punts suficients per a poder dibuixar una corba d'aquesta relació. La fórmula que caracteritza aquesta corba és la següent relació:

$$\Delta P = a \cdot Q^b \quad \text{Eq. 6.1}$$

En qualsevol equip que es mesuri hi haurà pèrdues de càrrega lineal (trams rectes) més pèrdues de càrrega singulars (com en un colze). L'equació que descriu les pèrdues de càrrega lineals és l'equació de Darcy Weisbach (Eq. 6.2) mentre que la que descriu les pèrdues de càrrega singulars és l'equació 6.3 [3].

$$h_f^{lin} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad \text{Eq. 6.2}$$

$$h_f^{sing} = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad \text{Eq. 6.3}$$

On f és el factor de fricció, L la longitud del tub, D el diàmetre intern, v la velocitat del fluid i g la gravetat. La velocitat del fluid és directament proporcional al cabal, segons la fórmula:

$$Q = v \cdot S \quad \text{Eq. 6.4}$$

On S és la secció del tub per on circula el fluid. Si es substitueix en les equacions 6.2 i 6.3, queden de la següent manera:

$$h_f^{lin} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot S} \quad Eq. 6.5$$

$$h_f^{sing} = K \cdot \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot S} \quad Eq. 6.6$$

La caiguda de pressió entre l'entrada i la sortida serà la suma de totes les pèrdues lineals més les singulars.

$$h_f = h_f^{lin} + h_f^{sing} \quad Eq. 6.7$$

$$h_f = \left(f \cdot \frac{L}{D} + K \right) \cdot \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot S} \quad Eq. 6.8$$

El coeficient de fricció f depèn de la rugositat relativa i del número de Reynolds. Si es fan diversos experiments en un mateix equip (buscant diferents valors de cabal), la rugositat relativa es mantindrà sempre constant. Si en tots els casos el fluid té un comportament turbulent, el número de Reynolds també es mantindrà amb el mateix valor i, per tant, el coeficient de fricció serà igual per als diferents punts en un mateix equip. Variant només el cabal que hi circula, també es mantenen constants la longitud L , el diàmetre D , les constants de pèrdues de càrrega singulars K , la gravetat i la secció per on circula el fluid S . Aquestes deduccions són degudes a que la geometria no variarà.

Llavors, la expressió que relaciona les pèrdues de càrrega totals queda de la següent forma:

$$h_f = (k_1 + k_2) \cdot \frac{Q^2}{k_3} = k_t \cdot Q^2 \quad Eq. 6.9$$

L'equació 6.9 té la mateixa estructura que la 6.1, que és l'enunciada que es farà servir per a dibuixar les corbes de relació entre pèrdua de càrrega i cabal en els equips que es mesurin. L'única diferència és que en l'equació 6.1 el coeficient b pren un valor 2 en l'equació 6.9. Les equacions 6.2 i 6.3 (a partir de les quals s'ha arribat a 6.9) són equacions empíriques i, per tant, el coeficient b no té perquè ser exactament 2. De fet es veurà que tots els coeficients b de les relacions que es troben són bastant propers al valor enter 2.

Després d'haver trobat els punts experimentals per a cada equip, s'ha mirat la influència de la pèrdua de càrrega introduïda per les mànegues de l'equip de mesura MSHE. Quan s'ha detectat que aquesta pèrdua introduïda per les mànegues és superior al 5% del total de pèrdua de càrrega mesurat, s'ha restat a la mesura total amb l'objectiu d'obtenir uns resultats

més afinats a la realitat. Els casos en què això ha succeït i s'ha realitzat l'operació explicada és per als equips *PB1*, *PB2*, *Bun*, *W1*, *W2*, *W3*, *RL1* i *RL3*. Els resultats obtinguts són els següents:

- *Buncher Coil 2:*

1. BC2-1: $\Delta P = 1,846 \cdot 10^8 \cdot Q^{1,576}$

2. BC2-2: $\Delta P = 2,091 \cdot 10^8 \cdot Q^{1,573}$

3. BC2-3: $\Delta P = 2,945 \cdot 10^8 \cdot Q^{1,597}$

4. BC2-4: $\Delta P = 1,779 \cdot 10^8 \cdot Q^{1,539}$

- *Buncher Coil 1:*

1. BC1-1: $\Delta P = 2,321 \cdot 10^7 \cdot Q^{1,356}$

2. BC1-2: $\Delta P = 3,220 \cdot 10^7 \cdot Q^{1,396}$

3. BC1-3: $\Delta P = 2,580 \cdot 10^7 \cdot Q^{1,388}$

4. BC1-4: $\Delta P = 2,264 \cdot 10^7 \cdot Q^{1,384}$

- *Shielding Lens:*

1. SL1: $\Delta P = 2,758 \cdot 10^7 \cdot Q^{1,634}$

2. SL2: $\Delta P = 1,039 \cdot 10^7 \cdot Q^{1,551}$

3. SL3: $\Delta P = 2,003 \cdot 10^7 \cdot Q^{1,609}$

4. SL4: $\Delta P = 8,493 \cdot 10^6 \cdot Q^{1,530}$

- *Radiofrequency window 1:* $\Delta P = 1,228 \cdot 10^7 \cdot Q^{1,784}$

- *Prebuncher 1:*

1. PB1-1: $\Delta P = 3,576 \cdot 10^7 \cdot Q^{2,040}$

2. PB1-2: $\Delta P = 8,336 \cdot 10^6 \cdot Q^{1,899}$

- *Prebuncher 2*: $\Delta P = 3,759 \cdot 10^6 \cdot Q^{1,869}$
- *Buncher*:
 1. Bun-1: $\Delta P = 2,879 \cdot 10^7 \cdot Q^{1,820}$
 2. Bun-2: $\Delta P = 2,581 \cdot 10^7 \cdot Q^{1,813}$
- *Glaser Lens*:
 1. GL1: $\Delta P = 2,839 \cdot 10^7 \cdot Q^{1,366}$
 2. GL2: $\Delta P = 4,117 \cdot 10^7 \cdot Q^{1,385}$
 3. GL3: $\Delta P = 6,753 \cdot 10^7 \cdot Q^{1,443}$
- *Radiofrequency window 2*: $\Delta P = 1,265 \cdot 10^7 \cdot Q^{1,795}$
- *Accelerating Structure*: $\Delta P = 4,138 \cdot 10^5 \cdot Q^{1,881}$. Nota: degut a la complexitat d'aquesta mesura, només es va dur a terme en una de les dos *Accelerating Structure*, ja que són idènticament iguals i, per tant, els punts trobats han de coincidir també.
- *Water Load 2*: $\Delta P = 1,406 \cdot 10^7 \cdot Q^{1,837}$
- *Radiofrequency window 3*: $\Delta P = 7,241 \cdot 10^7 \cdot Q^{1,979}$
- *Water Load 3*: $\Delta P = 7,838 \cdot 10^7 \cdot Q^{2,016}$
- *Water Load 1*: $\Delta P = 1,004 \cdot 10^7 \cdot Q^{1,821}$
- *Klystron Amplifier*: $\Delta P = 2,345 \cdot 10^6 \cdot Q^{1,717}$. Nota: De la mateixa manera i pels mateixos motius que amb les *Accelerating Structure*, per aquest equip s'ha mesurat només un cop tot i haver-n'hi dos d'iguals.

Tots els punts trobats experimentalment amb l'equip MSHE es troben a l'annex A. A continuació es mostren dibuixats els punts trobats sobreposats a les corbes d'ajustament.

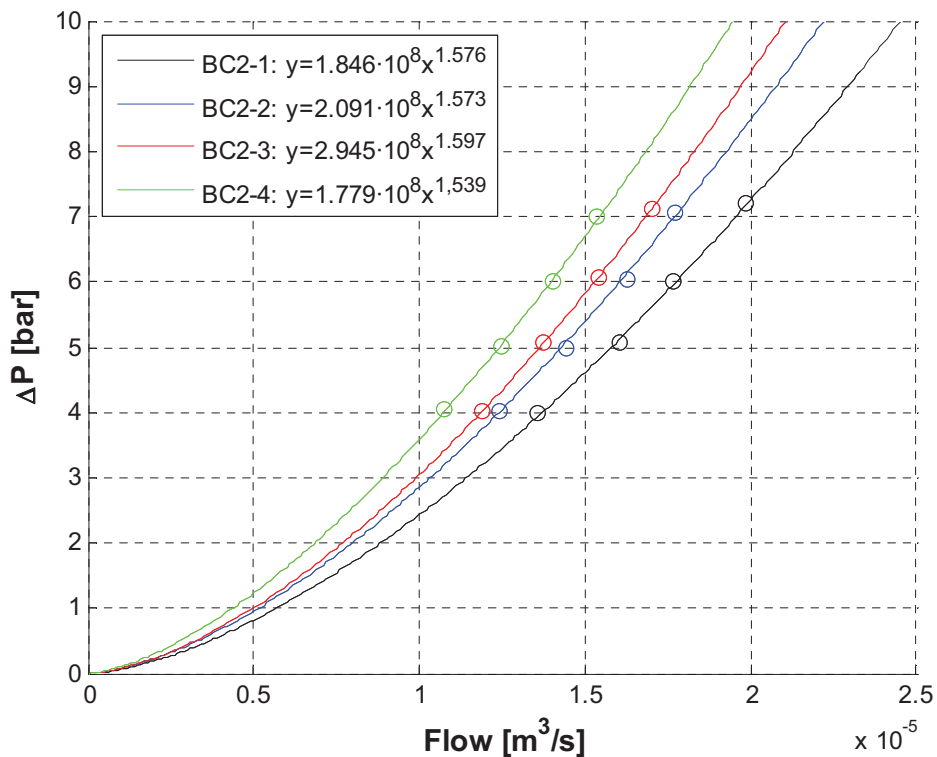


Figura 6.8 Corbes de pèrdua de càrrega per a BC2.

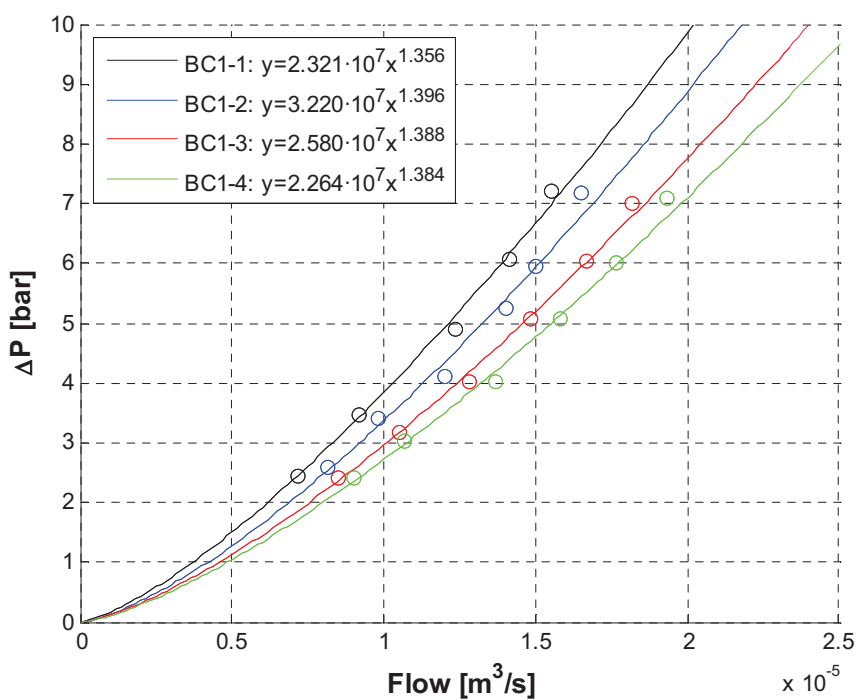


Figura 6.9 Corbes de pèrdua de càrrega per a BC1.

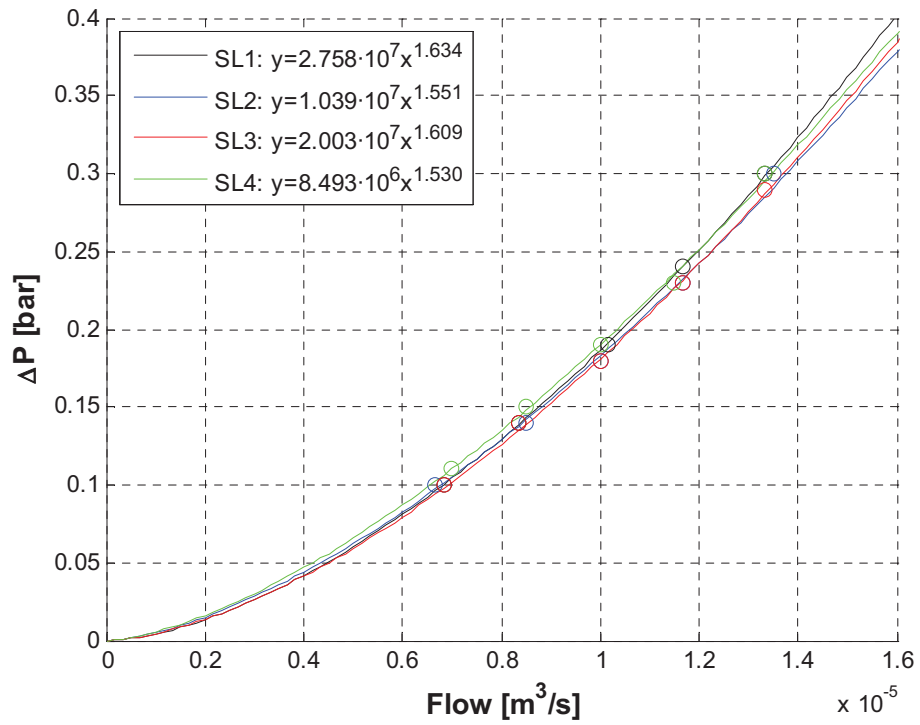
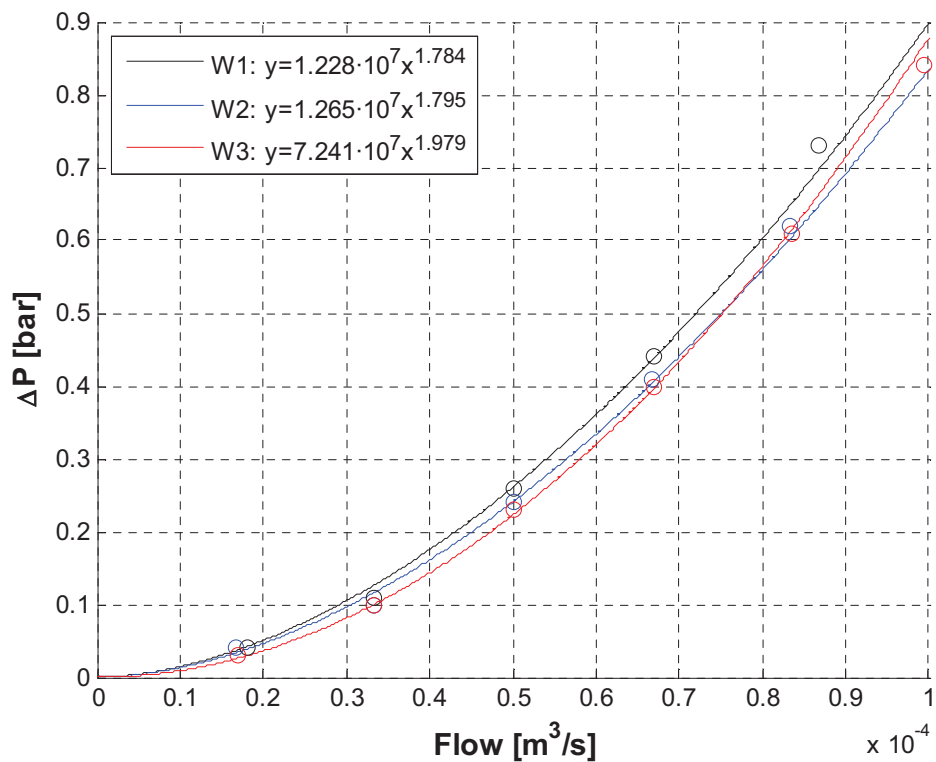


Figura 6.10 Corbes de pèrdua de càrrega per a les quatre SL.

Figura 6.11 Corbes de pèrdua de càrrega per a les tres *Radiofrequency Window*.

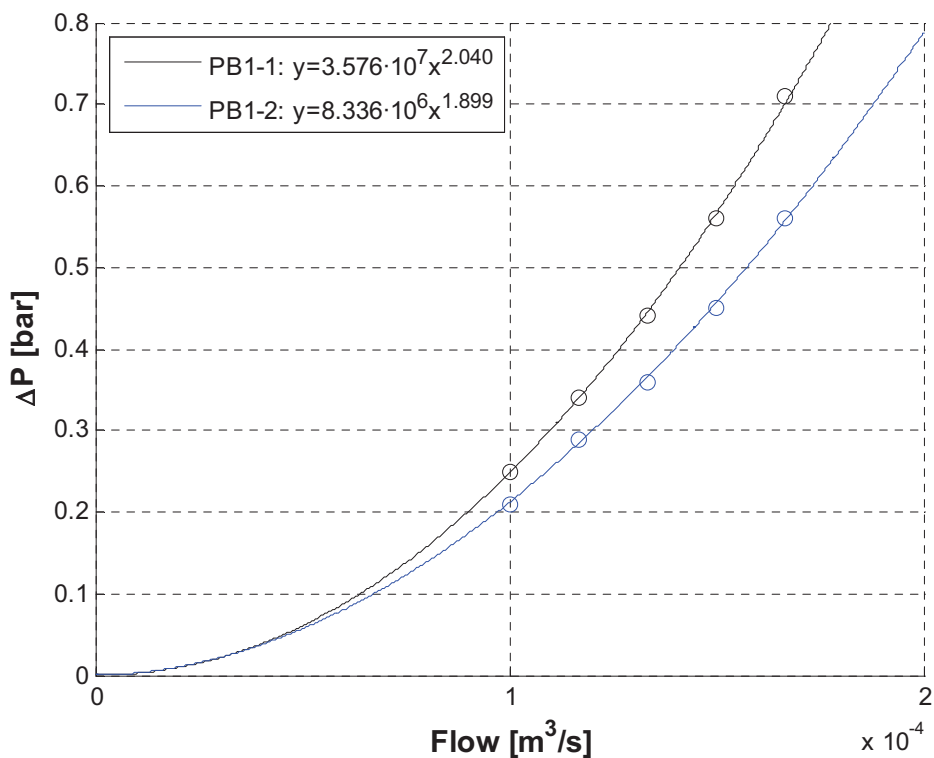


Figura 6.12 Corbes de pèrdua de càrrega per al *Prebuncher 1*.

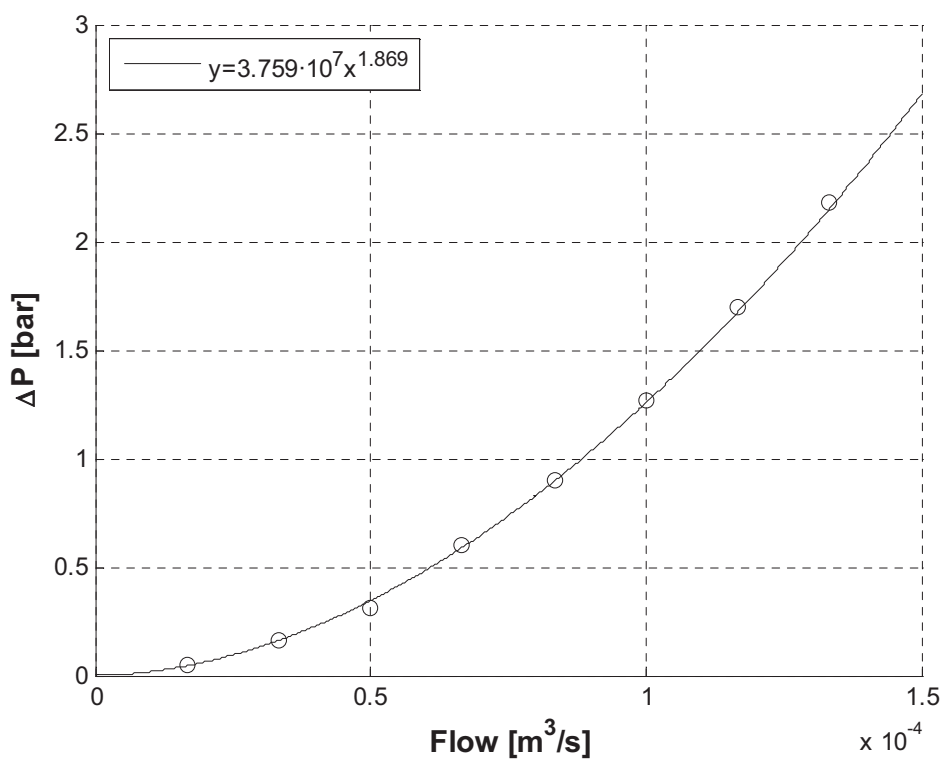
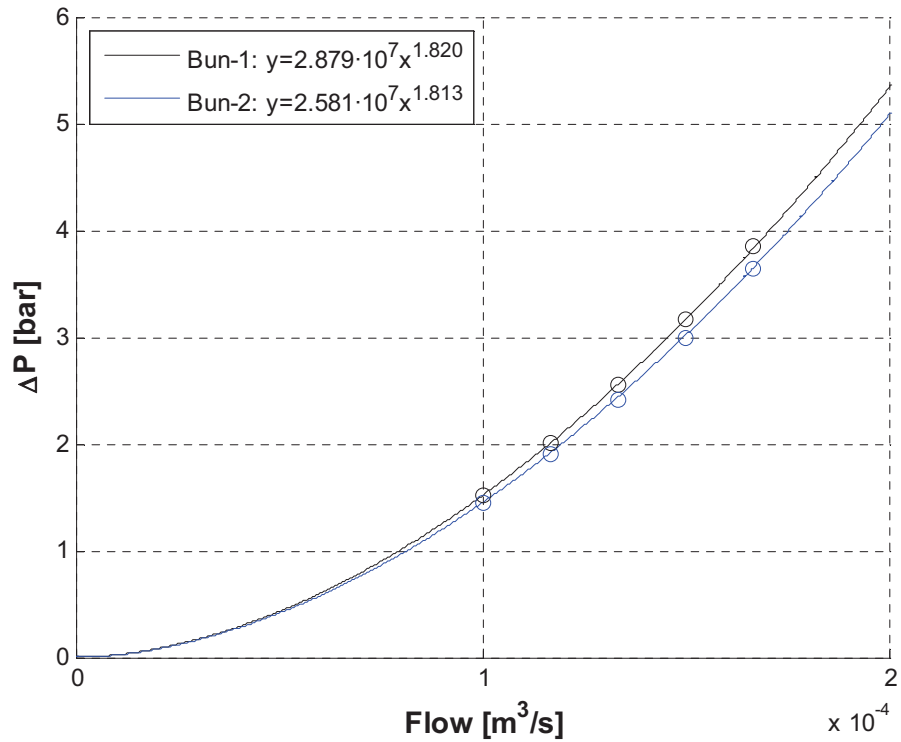
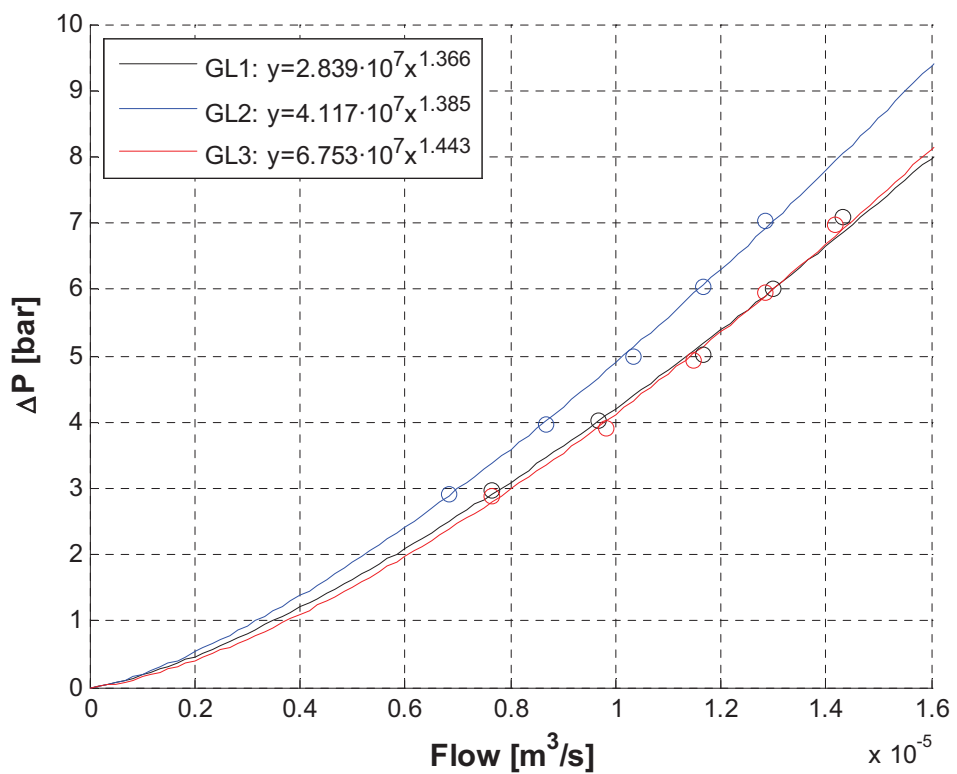


Figura 6.13 Corba de pèrdua de càrrega per al *Prebuncher 2*.

Figura 6.14 Corba de pèrdua de càrrega per al *Buncher*.Figura 6.15 Corba de pèrdua de càrrega per a les tres *Glazer Lens*.

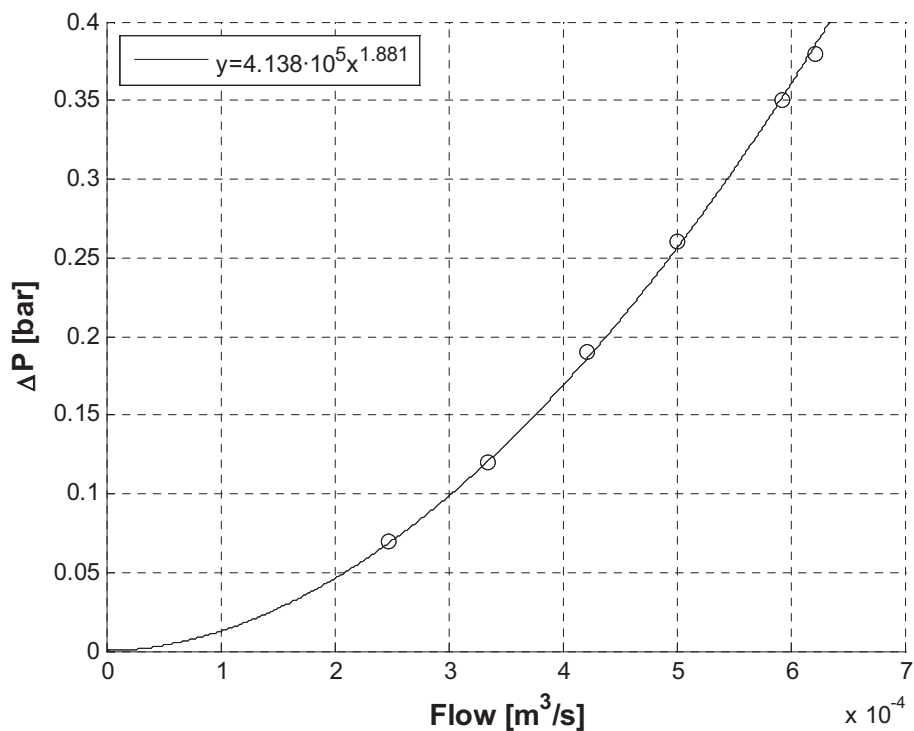


Figura 6.16 Corba de pèrdua de càrrega per a l'Accelerating Structure.

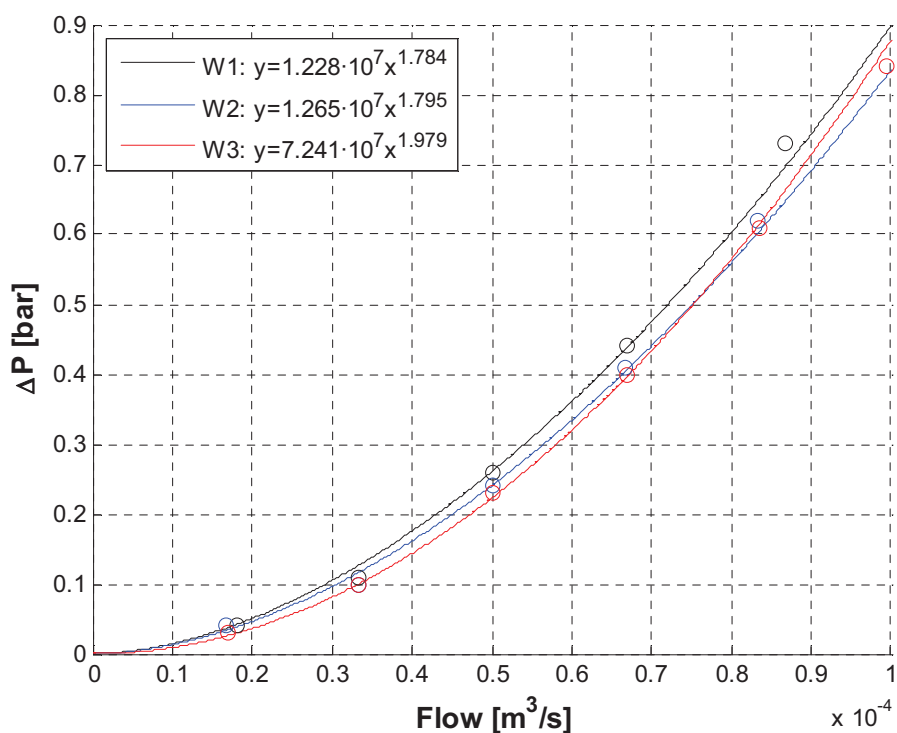


Figura 6.17 Corba de pèrdua de càrrega per a les tres Water Load.

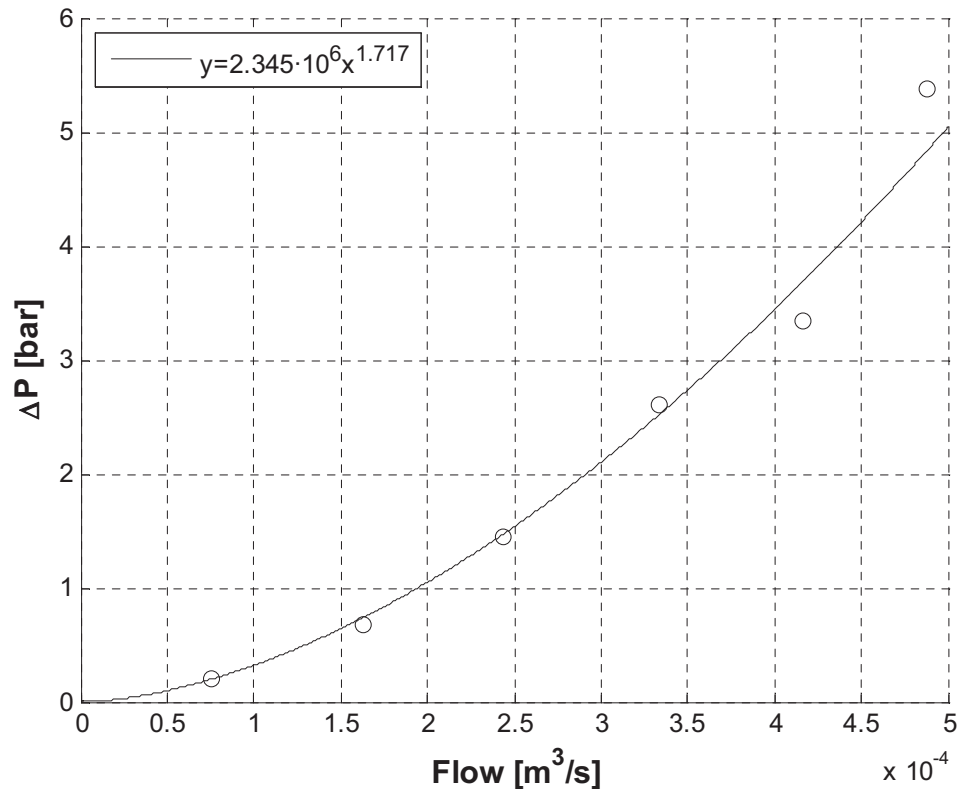


Figura 6.18 Corba de pèrdua de càrrega per al *Klystron Amplifier*.

En el cas de *BC1*, *BC2* i *GL* es veu que la geometria interna dels conductes de refrigeració dels equips són un limitant. En aquests casos s'ha arribat a valors de ΔP molt elevats (uns 7 bars) quan el cabal encara és inferior al de disseny. Això fa pensar que unes possibles modificacions de les interfases hidràuliques per aquests equips no aconseguirien que el cabal màxim augmentés significativament.

6.3.1. Cas cabalímetres

Durant les mesures dutes a terme en els equips del *LINAC*, s'ha observat una discrepància entre els valors de cabal mesurats amb l'equip *MSHE* i els valors dels cabalímetres instal·lats en les interfases hidràuliques.

Els cabalímetres de cada equip estan col·locats en la sortida de cada equip (sentit del flux descendent) i girats de cap per avall. Són uns cabalímetres amb funcionament mecànic: l'aigua fa força sobre una peça metàl·lica en la direcció del flux, mentre que una molla provoca una força en el sentit contrari del cabal. Quan el cabal augmenta, la força aplicada per l'aigua sobre la peça metàl·lica és major, i aquesta canvia de posició fins que el sistema de forces arriba a una nova posició d'equilibri. Existeix una escala a l'exterior per poder determinar el cabal que hi circula en funció de la posició de la peça metàl·lica. En aquest sistema però també hi intervé la força de la gravetat i, al estar el cabalímetre en posició vertical invertida,

les forces de la molla i el fluid sobre la peça canvien de sentit mentre que la força de la gravetat manté sempre el mateix sentit. Aquest fet provoca la discrepància entre les lectures i, per tant, es demostra que tots els cabalímetres instal·lats en sentit descendent poden indicar una lectura errònia.

L'equació 6.2 fa referència a l'equilibri de forces en el cas que el cabalímetre estigui instal·lat correctament (posició vertical ascendent), mentre que l'equació 6.3 $F_w + F_p = F_k$ Eq. 6.3fa referència a l'equilibri quan està instal·lat en posició invertida.

$$F_w = F_k + F_p \quad \text{Eq. 6.2}$$

$$F_w + F_p = F_k \quad \text{Eq. 6.3}$$

Al canviar l'orientació del cabalímetre, la força pes canvia d'una banda a l'altra de la igualtat, essent així la diferència de la força de la molla entre un cas i l'altre de dos vegades la força pes.

Per comprovar el mal funcionament dels cabalímetres, s'ha realitzat un muntatge experimental per poder comparar les lectures del cabalímetre d'ultrasons amb els instal·lats en el sistema. Aquest experiment s'ha realitzat en els tres conductes del *Cooling Loop 1*, una de les zones més crítiques del sistema.

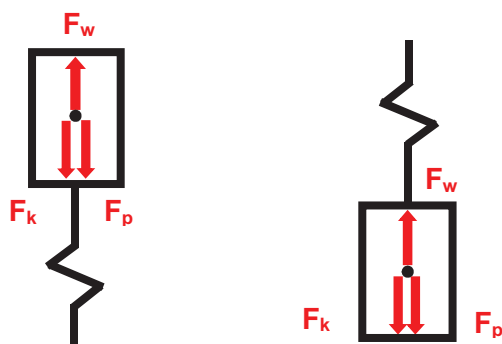


Figura 6.19 Diagrama de forces sobre la peça metàl·lica del cabalímetre en les dos posicions d'aquest.

El muntatge consisteix en afegir al circuit de refrigeració un tub rígid d'acer inoxidable amb una longitud suficient per a poder col·locar el cabalímetre d'ultrasons i poder-ne obtenir una mesura precisa. El tub es connecta entre el *manifold* d'entrada a l'equip i la mànega. D'aquesta manera es pot tenir els dos cabalímetres treballant en sèrie i, per tant, mesurant el mateix cabal. El tub s'ha col·locat en el circuit de refrigeració de cada una de les tres cavitats que conformen el subsistema independent per provar els tres cabalímetres.

Els experiments s'han realitzat amb les condicions normals de treball de la bomba (pressió d'entrada regulada a 0,8 bars i pressió de sortida regulada a 5,7 bars). El procediment seguit ha estat el de variar la posició de les vàlvules reguladores de cabal per obtenir diferents punts de lectura. Els resultats són els que es mostren en les següents taules.

PB1			
Rotàmetre [m³/s]	Ultrasò [m³/s]	Diferència [m³/s]	Diferència [%]
2,50·10 ⁻⁴	1,47·10 ⁻⁴	1,03·10 ⁻⁴	70,3
2,50·10 ⁻⁴	1,46·10 ⁻⁴	1,04·10 ⁻⁴	71,0
2,50·10 ⁻⁴	1,45·10 ⁻⁴	1,05·10 ⁻⁴	72,8
2,50·10 ⁻⁴	9,22·10 ⁻⁵	1,58·10 ⁻⁴	171,2
1,33·10 ⁻⁴	6,27·10 ⁻⁵	7,07·10 ⁻⁵	112,8
1,33·10 ⁻⁴	6,03·10 ⁻⁵	7,30·10 ⁻⁵	121,0
1,17·10 ⁻⁴	5,53·10 ⁻⁵	6,13·10 ⁻⁵	110,8
1,17·10 ⁻⁴	5,15·10 ⁻⁵	6,52·10 ⁻⁵	126,5

Taula 6.5 Diferència de lectures en la cavitat *Prebuncher 1*.

PB2			
Rotàmetre [m³/s]	Ultrasò [m³/s]	Diferència [m³/s]	Diferència [%]
1,50·10 ⁻⁴	1,28·10 ⁻⁴	2,25·10 ⁻⁵	17,6
1,50·10 ⁻⁴	1,26·10 ⁻⁴	2,38·10 ⁻⁵	18,9
1,33·10 ⁻⁴	1,24·10 ⁻⁴	9,33·10 ⁻⁶	7,5
1,17·10 ⁻⁴	1,06·10 ⁻⁴	1,05·10 ⁻⁴	9,9
8,33·10 ⁻⁵	6,47·10 ⁻⁵	1,87·10 ⁻⁴	28,9
7,50·10 ⁻⁵	5,83·10 ⁻⁵	1,67·10 ⁻⁴	28,6

Taula 6.6 Diferència de lectures en la cavitat *Prebuncher 2*.

Bun			
Rotàmetre [m ³ /s]	Ultrasò [m ³ /s]	Diferència [m ³ /s]	Diferència [%]
2,50·10 ⁻⁴	1,61·10 ⁻⁴	8,87·10 ⁻⁵	55,0
2,50·10 ⁻⁴	1,60·10 ⁻⁴	8,98·10 ⁻⁵	56,1
2,50·10 ⁻⁴	1,57·10 ⁻⁴	9,32·10 ⁻⁵	59,4
2,50·10 ⁻⁴	1,53·10 ⁻⁴	9,70·10 ⁻⁵	63,4
2,33·10 ⁻⁴	1,42·10 ⁻⁴	9,17·10 ⁻⁵	64,7

Taula 6.7 Diferència de lectures en la cavitat *Buncher*.

En tots els casos la diferència entre les mesures dels cabalímetres instal·lats (de tipus rotàmetre) i les del cabalímetre d'ultrasò són bastant considerables. Amb aquests resultats es pot concloure que els cabalímetres actuals no funcionen correctament i, per tant, donen un error en la lectura de la mesura.

Existeix també un cabalímetre dins del sistema que mesura el cabal total del *cooling loop* (la suma de les tres cavitats). En condicions normals de treball, aquest cabalímetre mesura uns $3,33 \cdot 10^{-4}$ m³/s aproximadament. Els cabalímetres de cada una de les cavitats mesuren un total de $5,58 \cdot 10^{-4}$ m³/s ($2,50 \cdot 10^{-4}$ m³/s a PB1; $7,50 \cdot 10^{-5}$ m³/s a PB2 i $2,33 \cdot 10^{-4}$ m³/s a Bun). Aquestes mesures no són consistents, ja que si els cabalímetres funcionessin correctament els dos valors haurien de ser iguals. Per altra banda, la suma dels valors mesurats amb el cabalímetre d'ultrasons és de $3,47 \cdot 10^{-4}$ m³/s ($1,47 \cdot 10^{-4}$ m³/s a PB1; $5,83 \cdot 10^{-5}$ m³/s a PB2 i $1,42 \cdot 10^{-4}$ m³/s a Bun). Aquest valor és més proper al total mesurat amb el cabalímetre instal·lat general.

7. Càlcul de càrregues tèrmiques

Amb l'objectiu de poder determinar el cabal necessari per a poder evacuar tota la potència tèrmica dels equips del sistema de refrigeració, s'han realitzat els càlculs de les càrregues tèrmiques que tenen aquests equips. Dins d'aquest apartat, per la manera de calcular les càrregues tèrmiques, cal destacar dos tipus d'equips diferents: electroimants i cavitats de radiofreqüència.

7.1. Electroimants

En aquest cas la potència tèrmica a evacuar es calcula mitjançant els valors de la resistència en els cables de les bobines i el valor de la corrent que s'hi fa passar. Amb l'equació 7.1 es determina la potència calorífica dissipada dins els equips.

$$P = R \cdot I^2 \quad \text{Eq. 7.1}$$

Aquest càlcul s'ha realitzat per a la intensitat nominal de treball i per a la intensitat màxima. El cabal necessari s'ha determinat amb l'augment de temperatura màxima de l'aigua que accepta l'equip i la potència màxima que pot dissipar, ja que són les condicions més extremes de demanda d'evacuació tèrmica. El càlcul de cabal necessari es realitza segons la equació 7.2.

$$Q = \frac{P}{\Delta T_{\max} \cdot C_e} \quad \text{Eq. 7.2}$$

On C_e és el calor específic (en el cas de l'aigua, correspon a $4,18 \text{ J/cm}^3 \cdot \text{K}$).

Els resultats es mostren en la següent taula:

Equip	Potència a corrent nominal [W]	Potència a corrent màxim [W]	ΔT_{\max} [°C]	Cabal necessari [m ³ /s]
SL1	5,91	47,73	0,33	$3,46 \cdot 10^{-5}$
SL2	3,73	48,09	0,33	$3,49 \cdot 10^{-5}$
SL3	7,78	48,27	0,33	$3,50 \cdot 10^{-5}$
SL4	10,70	48,40	0,33	$3,51 \cdot 10^{-5}$
GL	0,43	3040,04	18,63	$3,90 \cdot 10^{-5}$
BC1	3265,54	4217,41	17,00	$5,93 \cdot 10^{-5}$
BC2	1779,64	4217,41	17,00	$5,93 \cdot 10^{-5}$

Taula 7.1 Càlcul de potències tèrmiques i dels cabals de refrigeració en els electroimants

7.2. Cavitats de radiofreqüència

En el cas de les cavitats de radiofreqüència no es disposa de dades en forma d'especificacions tècniques que permetin el càlcul o l'obtenció de les dades de dissipació en forma de calor. S'ha buscat en els documents subministrats pel proveïdor del LINAC en la seva compra però no s'ha obtingut cap informació al respecte.

Degut a aquesta situació, s'ha decidit prendre com a valors de cabal necessaris els presents en els plànols de refrigeració del LINAC.

8. Descripció del model Pipe Flow Expert

8.1. El software Pipe Flow Expert

Pipe Flow Expert és un software per a modelar i simular el comportament de fluids en sistemes de tubs on es poden calcular els cabals, les pèrdues de càrrega i les pressions en cada node entre d'altres. El programa fa una anàlisi estàtica de fluids per poder-ne predir el seu comportament.

Permet dissenyar des de sistemes molt senzills (un sol tub) fins a xarxes complexes de centenars de tubs interconnectats entre si. Els sistemes poden incloure components típics com dipòsits, tancs pressuritzats, bombes, vàlvules, dispositius de control de cabal, intercanviadors de calor i altres components que afecten al cabal en els tubs.

Un cop el disseny s'ha completat, es resol el sistema. Les pèrdues de càrrega degudes al fregament en cada tub s'obtenen de la equació de Darcy-Weisbach. Els factors de fricció utilitzats per a resoldre el sistema es calculen utilitzant la equació de Colebrook-White. El programa realitza iteracions fins que la solució convergeix.

$$h_f = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \text{Equació de Darcy - Weisbach,} \quad \text{Eq. 8.1}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{k/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \right) \quad \text{Equació de Colebrook - White,} \quad \text{Eq. 8.2}$$

8.2. Modelització del sistema

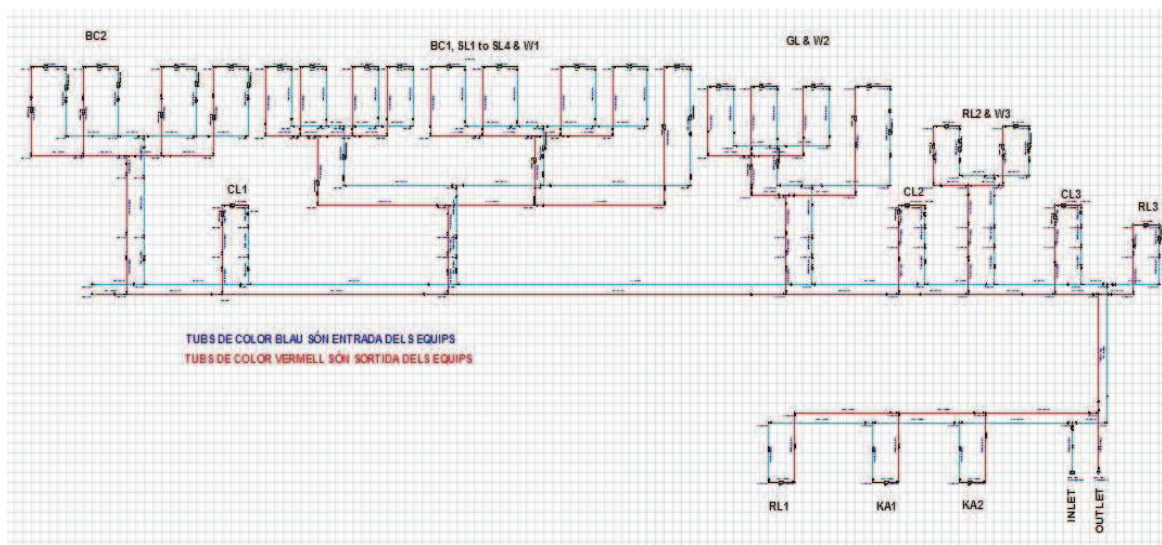


Figura 8.1 Esquema general del model de refrigeració del LINAC. Les línies de color blau representen els tubs abans de passar per l'equip, i les vermelles els tubs de després dels equips.

El model s'ha dissenyat generalment a partir dels elements disponibles en el programari. Els elements no disponibles en el programa, s'han modelitzat com a components utilitzant les característiques proporcionades per l'empresa distribuïdora de cada element de la instrumentació. Generalment, la dada disponible era el coeficient de cabal C_v .

El coeficient de cabal és un factor de disseny que relaciona la diferència de pressió (ΔP) entre l'entrada i la sortida de la vàlvula amb el cabal (Q) que hi circula.

Cada vàlvula té el seu propi coeficient de cabal, que depèn de com aquesta ha estat dissenyada per a deixar-hi passar el fluid. És important conèixer el coeficient de cabal per poder seleccionar la vàlvula que es necessita en una aplicació específica. La fórmula que relaciona el cabal amb la pèrdua de càrrega i el coeficient de cabal és [11]:

$$Q = C_v \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{SG}} \quad Eq. 8.3$$

On SG és la gravetat específica del fluid (com en aquest document sempre es tracta amb aigua, el valor de la gravetat específica serà sempre 1). El valor de C_v és en unitats imperials, en galons per minut. Si es vol treballar en unitats mètriques (m^3/h), el coeficient de cabal es

defineix com K_v . La relació entre els dos coeficients és la següent:

$$C_v = 1,156 \cdot K_v \quad \text{Eq. 8.4}$$

Els equips s'han modelitzat també com a components, amb una corba característica de relació cabal-pèrdua de càrrega. Les relacions introduïdes per a cada equip són les corbes mesurades de forma experimental i desenvolupades en l'apartat 6.3 d'aquest document.

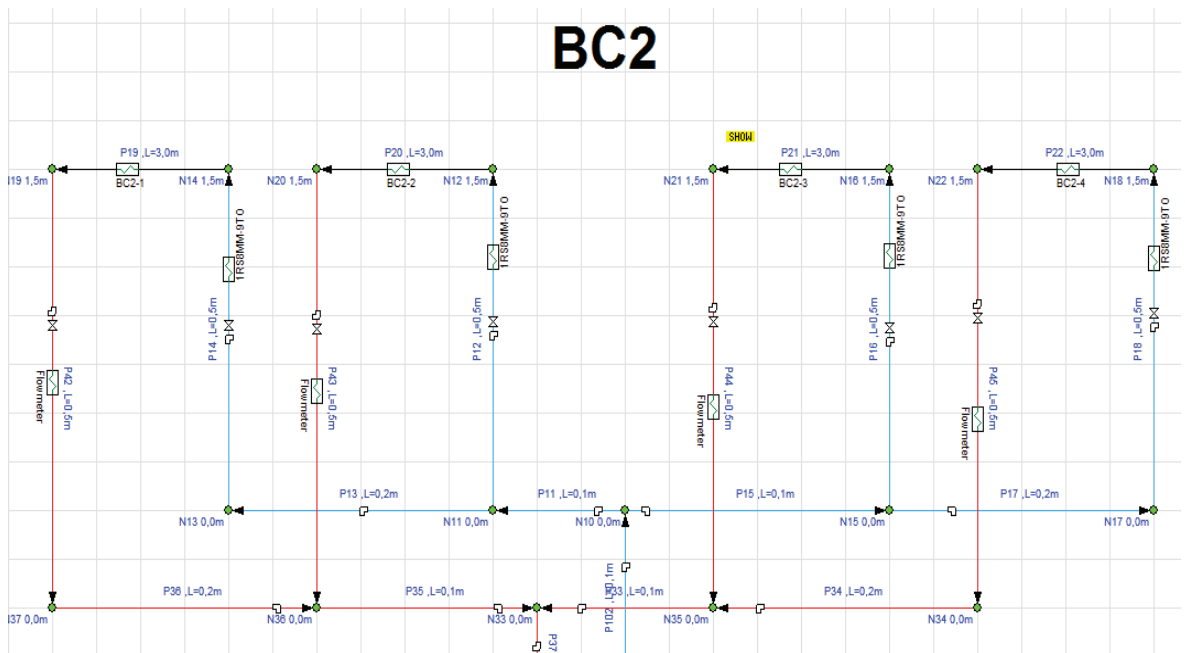


Figura 8.2 Detall del model de refrigeració de l'equip BC2. S'observa que s'alimenten en paral·lel els quatre circuits independents.

En la figura 8.2 es veu una ampliació de la modelització de la xarxa de refrigeració en l'equip BC2. En ella es pot veure el nivell de detall en què s'ha modelitzat el sistema, considerant totes les característiques. La seva complexitat és extrapolable a la resta del sistema.

Els dos *cooling loops* (circuits independents) han estat modelitzats en fitxers diferents del sistema general.

En aquests models s'ha introduït una bomba hidràulica amb un increment de pressió fix, que és el valor mesurat durant operació en el sistema real. També s'ha afegit un tanc pressuritzat a l'entrada de la bomba per introduir la condició de contorn (pressió a l'entrada de la bomba) necessària per realitzar les simulacions.

Els *cooling loops* 2 i 3 s'han simulat amb el mateix model, ja que tota l'estructura és exactament igual.

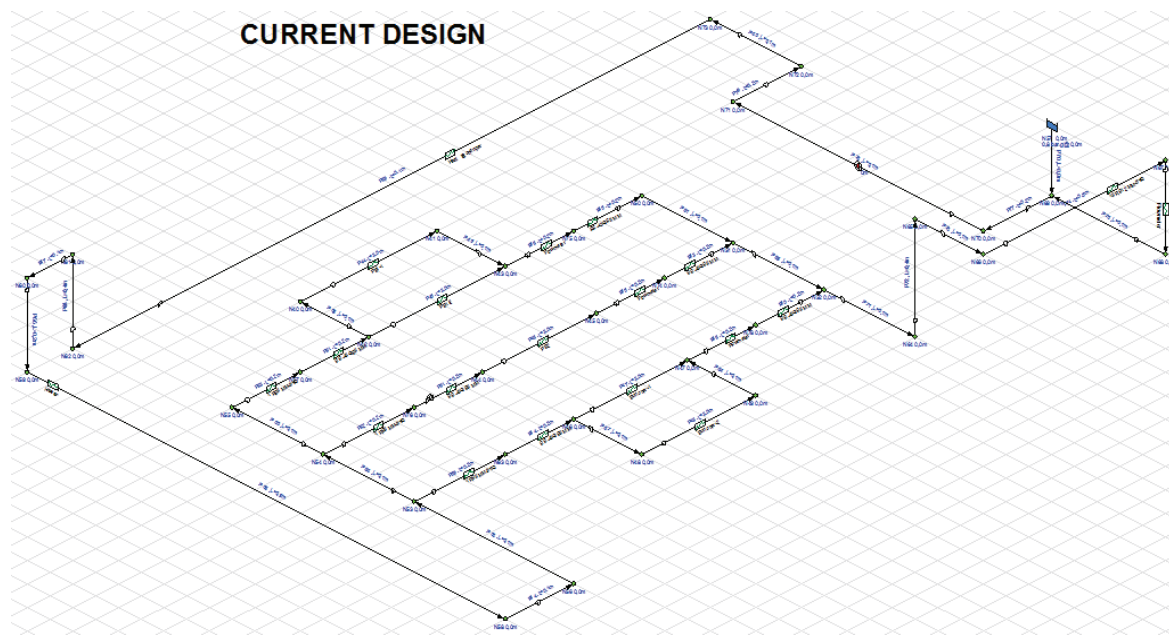


Figura 8.3 Model del Cooling Loop 1.

8.3. Condicions de contorn

Les condicions de contorn utilitzades en el sistema són les de funcionament normal de la instal·lació. La pressió d'entrada és de 10,2 bars, tot i que, com ja s'ha comentat, existeix un reductor de pressió a l'entrada calibrat a 8,8 bars. La pressió de sortida té un valor de 2,8 bars.

En el cas dels *cooling loops*, les condicions de contorn són l'increment de pressió que proporciona la bomba (4,79 bars) i la pressió a l'entrada de la bomba (0,8 bars).

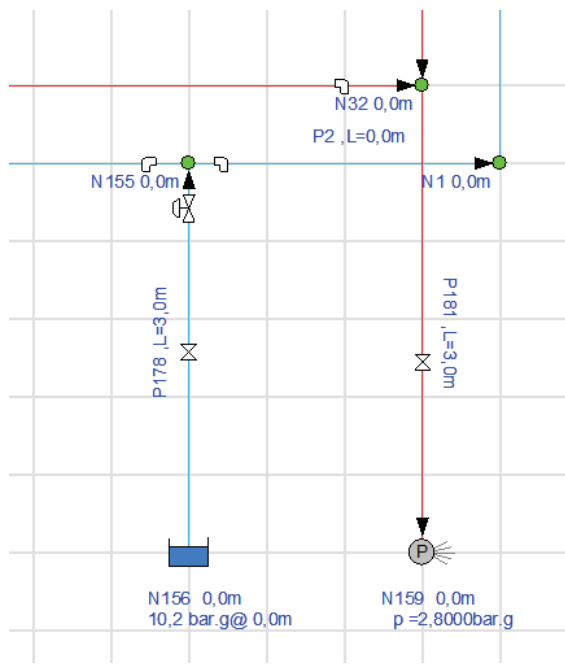


Figura 8.4 Detall de les condicions de contorn utilitzades.

9. Calibratge del model

S'ha realitzat una primera simulació del model complet del LINAC amb totes les vàlvules reguladores completament obertes. En aquesta posició, en funció del seu valor màxim de coeficient de cabal, les vàlvules introdueixen una pèrdua de càrrega singular en el lloc on es troben. Amb aquesta primera configuració, s'han obtingut uns resultats on els cabals en alguns equips eren molt superiors als valors de disseny i en altres equips el cabal era inferior al cabal necessari. Això és degut a que en la realitat no totes les vàlvules reguladores estan completament obertes.

Després d'aquests primers resultats, als circuits dels equips on el cabal resultant de la simulació era superior al de disseny, s'ha afegit un component amb un valor de C_v que s'ha ajustat de tal forma per que el cabal que hi circula s'ajusti al valor desitjat. Aquest procediment correspon al tancament de les vàlvules reguladores per aconseguir el valor que interessa en cada cas.

En els equips on el cabal no era suficient no s'ha introduït cap pèrdua de càrrega extra ja que, al ser el flux insuficient, les vàlvules reguladores resten completament obertes.

Amb l'objectiu de poder verificar el model introduït en el software i comprovar que aquest s'ajusta al comportament real, al llarg de la realització d'aquest projecte, s'han gravat dades del cabal en diferents punts del *LINAC* amb el cabalímetre d'ultrasons durant llargs períodes de temps. Els valors resultants de la simulació i els mesurats amb el cabalímetre no han de divergir molt.

Els punts on s'ha monitoritzat el valor de cabal són la suma de cabals de l'interior del búnquer i la suma de cabals totals del *LINAC* més dos equips externs a aquest. Com ja s'ha comentat, el cabalímetre d'ultrasons necessita una longitud mínima anterior i posterior al punt de mesura per a obtenir una lectura fiable. Per motius geomètrics del sistema ha estat impossible obtenir més punts de mesura que els dos esmentats. Per aconseguir la suma de cabals del *LINAC*, s'han mesurat els dos equips exteriors del *LINAC* i s'han restat les seves lectures a l'obtingut pel segon punt de mesura.

Evidentment, en canviar les condicions de contorn del sistema (generalment la pressió de retorn), els valors de cabal canvien al llarg del temps. Si la pressió de retorn augmenta, el ΔP total entre la entrada i sortida del *LINAC* disminuirà i, conseqüentment, el cabal també disminuirà. De la mateixa manera, si la pressió de retorn disminueix, el ΔP augmenta i, per tant, el cabal augmenta també.

Aquestes variacions han quedat patents en la lectura dels cabals. A l'interior del búnquer el cabal ha variat aproximadament entre els $4,50 \cdot 10^{-4}$ i els $5,17 \cdot 10^{-4}$ m³/s. Aquestes variacions

són degudes, a més a més dels canvis en la pressió de retorn, a diferents posicions de vàlvules de regulació.

Els cabals mesurats en els dos equips externs han resultat tenir un valor molt constant en el temps: $8,83 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ en un i $7,33 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ en l'altre, que suma un total de $1,62 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. El cabal mesurat a l'entrada de la SA ha variat entre uns valors de $1,90 \cdot 10^{-3}$ i $2,02 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Per tant, el cabal total del LINAC té una variació entre els $1,74 \cdot 10^{-3}$ i els $1,86 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

	Cabal simulació [m^3/s]	Cabal mesurat [m^3/s]
General	$1,59 \cdot 10^{-3}$	$1,74 \cdot 10^{-3}$ a $1,86 \cdot 10^{-3}$
Exterior búnquer	$1,08 \cdot 10^{-3}$	$1,28 \cdot 10^{-3}$ a $1,35 \cdot 10^{-3}$
Interior búnquer	$5,12 \cdot 10^{-4}$	$4,50 \cdot 10^{-4}$ a $5,17 \cdot 10^{-4}$

Taula 9.1 Comparació valors experimentals amb valors simulats.

A l'interior del búnquer, el resultat de la simulació cau dins del rang observat en les mesures en el mateix punt. Tant en el cabal de l'exterior del búnquer com el total (interior més exterior) obtinguts en les simulacions són valors inferiors als mesurats experimentalment. Tot i que aquesta diferència no és molt gran, és prou considerable.

Les diferències entre els valors resultants en la simulació i entre els valors mesurats amb el cabalímetre d'ultrasons són degudes a diferents motius. El primer és que el cabalímetre d'ultrasons pot tenir un error de lectura, és a dir, un problema d'instrumentació. També afecta en la diferència que el programa de simulació utilitza un model amb equacions simplificades a una sola dimensió, mentre que en la realitat el fluid té un comportament tridimensional. Els resultants obtinguts en la simulació es mantenen en el mateix ordre de magnitud que el sistema real i amb variacions petites.

S'han comprovat els cabalímetres de l'exterior del búnquer un a un (3 per a cada KA) amb el cabalímetre d'ultrasons i s'ha vist que, tot i estar en posició correcta (vertical ascendent), no funcionen correctament: alguns no es movien de posició i alguns altres tenien una diferència entre el cabal mesurat i el real. Degut a aquest motiu, s'ha regulat el cabal utilitzant el cabalímetre d'ultrasons. Això pot haver provocat que el cabal que hi circula sigui major que l'obtingut en les simulacions degut a que les dades que es van utilitzar per a fer la simulació són diferents a l'estat actual del sistema.

10. Simulacions amb el model estacionari

Amb el model presentat en l'apartat 8.2 d'aquest document, s'ha simulat el sistema amb les condicions de contorn reals de funcionament: pressió d'entrada de 10,2 bars amb una reductora de pressió abans de l'entrada a 8,8 bars i una pressió de retorn de 2,8 bars. Dels resultats obtinguts de la simulació s'han estudiat tant les velocitats del fluid dins els conductes com els cabals.

10.1. Resultats en cas real d'operació

10.1.1. Cabals

Els cabals mesurats per a cada un dels equips en el cas real d'operació són els mostrats en la taula 10.1.

Equip	Cabal simulació [m ³ /s]	Cabal disseny [m ³ /s]	Cabal càlculs [m ³ /s]
BC2-1	1,68·10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁵	1,48·10 ⁻⁵
BC2-2	1,53·10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁵	1,48·10 ⁻⁵
BC2-3	1,45·10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁵	1,48·10 ⁻⁵
BC2-4	1,33·10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁵	1,48·10 ⁻⁵
CL1	3,33·10 ⁻⁵	3,33·10 ⁻⁵	3,33·10 ⁻⁵
BC1-1	1,28·10 ⁻⁵	1,46·10 ⁻⁵	1,48·10 ⁻⁵
BC1-2	1,38·10 ⁻⁵	1,46·10 ⁻⁵	1,48·10 ⁻⁵
BC1-3	1,50·10 ⁻⁵	1,46·10 ⁻⁵	1,48·10 ⁻⁵
BC1-4	1,60·10 ⁻⁵	1,46·10 ⁻⁵	1,48·10 ⁻⁵
SL1	1,03·10 ⁻⁵	1,04·10 ⁻⁵	3,47·10 ⁻⁵
SL2	1,05·10 ⁻⁵	1,04·10 ⁻⁵	3,48·10 ⁻⁵
SL3	1,05·10 ⁻⁵	1,04·10 ⁻⁵	3,50·10 ⁻⁵
SL4	1,02·10 ⁻⁵	1,04·10 ⁻⁵	3,52·10 ⁻⁵
W1	5·10 ⁻⁵	5·10 ⁻⁵	5·10 ⁻⁵
GL1	1,23·10 ⁻⁵	1,67·10 ⁻⁵	1,30·10 ⁻⁵
GL2	1,10·10 ⁻⁵	1,67·10 ⁻⁵	1,30·10 ⁻⁵
GL3	1,23·10 ⁻⁵	1,67·10 ⁻⁵	1,30·10 ⁻⁵
W2	5·10 ⁻⁵	5·10 ⁻⁵	5·10 ⁻⁵
CL2	3,33·10 ⁻⁵	3,33·10 ⁻⁵	3,33·10 ⁻⁵
RL2	3,33·10 ⁻⁵	3,33·10 ⁻⁵	3,33·10 ⁻⁵

Equip	Cabal simulació [m ³ /s]	Cabal disseny [m ³ /s]	Cabal càlculs [m ³ /s]
W3	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
CL3	$3,33 \cdot 10^{-5}$	$3,33 \cdot 10^{-5}$	$3,33 \cdot 10^{-5}$
RL3	$3,33 \cdot 10^{-5}$	$3,33 \cdot 10^{-5}$	$3,33 \cdot 10^{-5}$
RL1	$6,67 \cdot 10^{-5}$	$6,67 \cdot 10^{-5}$	$6,67 \cdot 10^{-5}$
KA1	$5,05 \cdot 10^{-4}$	$5,50 \cdot 10^{-4}$	$5,50 \cdot 10^{-4}$
KA2	$5,05 \cdot 10^{-4}$	$5,50 \cdot 10^{-4}$	$5,50 \cdot 10^{-4}$

Taula 10.1 Valors de cabal en el cas real d'operació.

En l'equip *BC2* el cabal resultant de la simulació és inferior al valor de disseny del proveïdor. Tot i així, respecte als valors de cabal necessaris calculats en l'apartat 7 d'aquest document, el total (la suma dels quatre conductes paral·lels) és pràcticament el mateix valor. Aquests resultats indiquen que, tot i aconseguir subministrar el cabal màxim, no podria donar més de sí en un cas extrem de funcionament.

En *BC1* els cabals obtinguts són una mica inferiors als de *BC2*. De totes formes, es poden extreure unes conclusions molts semblants: el cabal pot ser suficient en condicions normals de treball, però en una situació on es necessiti evacuar més potència no es tindria la capacitat de fer-ho.

Els equips *SL* poden assolir el valor de cabal de disseny sense cap dificultat. El problema en aquest cas és que els valors de disseny són bastant inferiors als cabals necessaris que s'han calculat a l'apartat 7. En els propers capítols s'avaluarà quines són les afectacions en adoptar els cabals calculats.

L'altre equip que presenta uns resultats de la simulació inferiors als valors de disseny és *GL*. La diferència, però, entre els valors calculats a l'apartat 7 i els resultants de la simulació és bastant inferior en comparació amb la diferència entre els valors de disseny inicials i els resultants de la simulació. Tanmateix, es continuaria tenint el mateix problema que amb *BC2* i *BC1*: que es treballa al límit de les possibilitats.

Els dos *Klystron Amplifiers* també es troben per sota dels seus valors de treball, però en aquest cas les mesures es van fer incloent-hi les vàlvules reguladores. Algunes d'aquestes no estaven completament obertes i, per tant, es pot solucionar el problema obrint-les més per tal d'augmentar el cabal.

Els resultats per als dos models de *cooling loops* es mostren en la següent taula.

Grup	Equip	Cabal simulacions [m ³ /s]	Cabal disseny [m ³ /s]
CL1	PB1-1	$3,97 \cdot 10^{-5}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$
	PB1-2	$8,02 \cdot 10^{-5}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$
	PB2	$8,33 \cdot 10^{-5}$	$8,33 \cdot 10^{-5}$
	Bun-1	$5,55 \cdot 10^{-5}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$
	Bun-2	$4,93 \cdot 10^{-5}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$
CL2 i CL3	AS	$4,17 \cdot 10^{-4}$	$4,17 \cdot 10^{-4}$

Taula 10.2 Valors de cabal en el cas real d'operació en els *cooling loops*.

Mentre en els *CL2* i *CL3* el sistema funciona correctament, la diferència entre els valors teòrics i els resultants de la simulació en el *CL1* són molt grans. El principal problema en aquest sistema és el mal dimensionament de les interfases hidràuliques. Alguns tubs estan infradimensionats, provocant velocitats molt elevades i, per tant, pèrdues de càrrega molt importants. Per altra banda, alguns components introdueixen també unes pèrdues de pressió singulars massa elevades.

10.1.2. Mapa de velocitats

En el sistema general s'han obtingut velocitats de l'aigua dintre del rang acceptat (entre 0,5 i 3 m/s) o per sota d'aquest rang, fet que pot produir retenció de bombolles d'aire dintre dels tubs.

Les velocitats més baixes han estat obtingudes en els *manifolds*. Un exemple d'aquest fet és el del *manifold* de *BC2*, on la velocitat més baixa del fluid arriba a ser de 0,075 m/s. En els *manifolds* de *BC1* i *SL* es tenen velocitats de 0,073 m/s i 0,058 m/s, respectivament. L'altre subsistema on es té una velocitat tant baixa és en el de les *GL*, on aquesta té un valor mínim de 0,070 m/s.

En el *CL1*, tot i que els cabals estan molt per sota dels valors de disseny, s'han trobat velocitats molt elevades (fins a 4,5 m/s) en els tubs subdimensionats. En els *CL2* i *CL3* (mateixa estructura) totes les velocitats estan dins del rang recomanat.

Aquests resultats fan patent que a l'hora de proposar millores en el disseny del sistema, no només s'ha de tenir en compte intentar reduir el màxim possible les pèrdues de càrrega, sinó que també serà important que els tubs i mànegues es dimensionin d'acord amb el criteri de velocitats permeses.

10.2. Variació de pressió de retorn

S'ha comentat al llarg d'aquest projecte que el disseny de retorn comú dels quatre anells del sistema de refrigeració d'ALBA provoca variacions en la pressió de retorn. Si degut a alguna operació de manteniment es tanca un consum d'aigua important (com uns $8,33 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$), provoca el reajustament de les vàlvules mescladores de l'aigua provinent dels quatre anells i de l'aigua exterior subministrada. Aquests moviments provoquen variacions de la pressió de retorn que s'han quantificat en uns $3,33 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ respecte el valor normal de treball ($4,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$).

Per altra banda, les bombes que impulsen l'aigua de refrigeració pels quatre anells són capaces de mantenir una pressió d'entrada molt constant de 10,2 bars.

Per a veure quina és la influència d'aquestes variacions de la pressió de retorn en el cabal s'ha simulat el sistema complet modificant aquesta condició de contorn, amb unes variacions de dècimes de bar per sobre i per sota del valor nominal. Cal tenir en compte que per aquestes simulacions les vàlvules reguladores s'han mantingut en una posició fixa, per a que el model sigui el màxim fidel possible a la realitat.

La variació del cabal en funció d'aquestes variacions de pressió no és molt important. La diferència entre un cas extrem i l'altre (3 dècimes per sobre i 3 dècimes per sota del punt nominal) només hi ha una diferència de $8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ en el conjunt del sistema.

Equip	Cabal [m^3/s]				
	Pout=2,5 bar	Pout=2,65 bar	Pout=2,8 bar	Pout=2,95 bar	Pout=3,1 bar
BC2	$6,25 \cdot 10^{-5}$	$6,13 \cdot 10^{-5}$	$6,05 \cdot 10^{-5}$	$5,93 \cdot 10^{-5}$	$5,83 \cdot 10^{-5}$
CL1	$3,40 \cdot 10^{-5}$	$3,35 \cdot 10^{-5}$	$3,32 \cdot 10^{-5}$	$3,27 \cdot 10^{-5}$	$3,22 \cdot 10^{-5}$
BC1	$6 \cdot 10^{-5}$	$5,88 \cdot 10^{-5}$	$5,82 \cdot 10^{-5}$	$5,70 \cdot 10^{-5}$	$5,62 \cdot 10^{-5}$
SL	$4,28 \cdot 10^{-5}$	$4,22 \cdot 10^{-5}$	$4,15 \cdot 10^{-5}$	$4,10 \cdot 10^{-5}$	$4,08 \cdot 10^{-5}$
W1	$5,15 \cdot 10^{-5}$	$5,08 \cdot 10^{-5}$	$5,03 \cdot 10^{-5}$	$4,97 \cdot 10^{-5}$	$4,90 \cdot 10^{-5}$
GL	$3,70 \cdot 10^{-5}$	$3,65 \cdot 10^{-5}$	$3,60 \cdot 10^{-5}$	$3,52 \cdot 10^{-5}$	$3,47 \cdot 10^{-5}$

Equip	Cabal [m ³ /s]				
	Pout=2,5 bar	Pout=2,65 bar	Pout=2,8 bar	Pout=2,95 bar	Pout=3,1 bar
W2	$5,10 \cdot 10^{-5}$	$5,05 \cdot 10^{-5}$	$4,98 \cdot 10^{-5}$	$4,92 \cdot 10^{-5}$	$4,85 \cdot 10^{-5}$
CL2	$3,40 \cdot 10^{-5}$	$3,37 \cdot 10^{-5}$	$3,32 \cdot 10^{-5}$	$3,27 \cdot 10^{-5}$	$3,22 \cdot 10^{-5}$
RL2	$3,57 \cdot 10^{-5}$	$3,45 \cdot 10^{-5}$	$3,32 \cdot 10^{-5}$	$3,20 \cdot 10^{-5}$	$3,05 \cdot 10^{-5}$
W3	$5,13 \cdot 10^{-5}$	$5,07 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$4,93 \cdot 10^{-5}$	$4,87 \cdot 10^{-5}$
CL3	$3,40 \cdot 10^{-5}$	$3,37 \cdot 10^{-5}$	$3,32 \cdot 10^{-5}$	$3,27 \cdot 10^{-5}$	$3,22 \cdot 10^{-5}$
RL3	$3,55 \cdot 10^{-5}$	$3,45 \cdot 10^{-5}$	$3,33 \cdot 10^{-5}$	$3,22 \cdot 10^{-5}$	$3,08 \cdot 10^{-5}$
RL1	$6,82 \cdot 10^{-5}$	$6,75 \cdot 10^{-5}$	$6,67 \cdot 10^{-5}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$	$6,48 \cdot 10^{-5}$
KA1	$5,17 \cdot 10^{-4}$	$5,12 \cdot 10^{-4}$	$5,06 \cdot 10^{-4}$	$5,01 \cdot 10^{-4}$	$4,96 \cdot 10^{-4}$
KA2	$5,17 \cdot 10^{-4}$	$5,12 \cdot 10^{-4}$	$5,07 \cdot 10^{-4}$	$5,01 \cdot 10^{-4}$	$4,96 \cdot 10^{-4}$
Interior Búnquer	$5,29 \cdot 10^{-4}$	$5,21 \cdot 10^{-4}$	$5,12 \cdot 10^{-4}$	$5,03 \cdot 10^{-4}$	$4,94 \cdot 10^{-4}$
Exterior Búnquer	$1,10 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$1,08 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$1,06 \cdot 10^{-3}$
Total	$1,63 \cdot 10^{-3}$	$1,61 \cdot 10^{-3}$	$1,59 \cdot 10^{-3}$	$1,57 \cdot 10^{-3}$	$1,55 \cdot 10^{-3}$

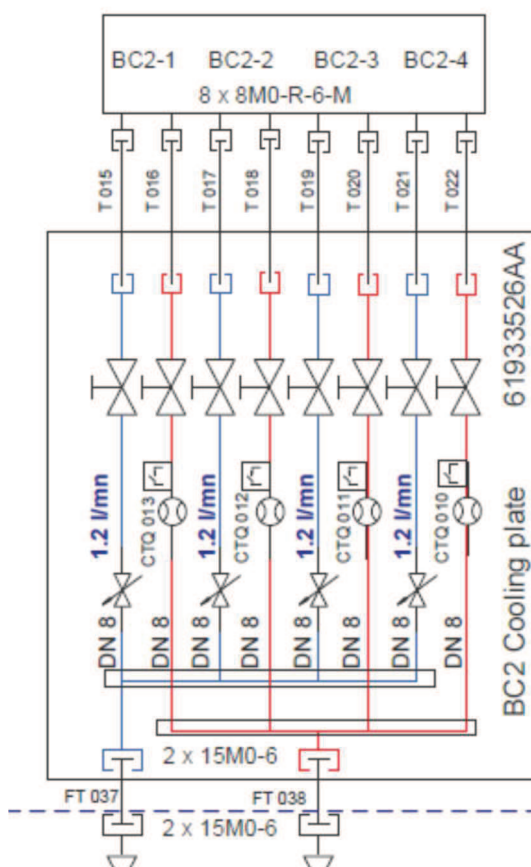
Taula 10.3 Variació dels valors de cabal en funció de la variació de la pressió de retorn del sistema.

11. Propostes de solució

En aquest apartat s'ha seguit un procediment de prova i error amb diferents configuracions de les interfases hidràuliques utilitzant el software *Pipe Flow Expert*. Aquestes modificacions tenen dos objectius: augmentar el cabal que pot circular per cada equip sense modificar les condicions de contorn si és necessari i aconseguir que les velocitats de l'aigua en el sistema es mantinguin dins el rang especificat.

Mitjançant el *Pipe Flow Expert* s'ha generat un arxiu que conté les diferents possibles per a cada subsistema a millorar.

11.1. Buncher Coil 2



En aquest subsistema s'han simulat diferents configuracions amb una pressió d'entrada de 8,8 bars i una pressió de sortida de 2,8 bars.

- Actual: *Manifold* ID=15 mm
- Configuració 1: *Manifold* ID=10 mm
- Configuració 2: *Manifold* ID=8 mm
- Configuració 3: *Manifold* ID=6 mm

Figura 11.1 Esquema del disseny original del *manifold* de l'equip BC2.

Equip	Cabal [m ³ /s]			
	Actual	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 3
BC2-1	$1,70 \cdot 10^{-5}$	$1,70 \cdot 10^{-5}$	$1,70 \cdot 10^{-5}$	$1,67 \cdot 10^{-5}$
BC2-2	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$1,52 \cdot 10^{-5}$
BC2-3	$1,47 \cdot 10^{-5}$	$1,47 \cdot 10^{-5}$	$1,47 \cdot 10^{-5}$	$1,43 \cdot 10^{-5}$
BC2-4	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$1,32 \cdot 10^{-5}$
Total	$6,05 \cdot 10^{-5}$	$6,05 \cdot 10^{-5}$	$6,05 \cdot 10^{-5}$	$5,92 \cdot 10^{-5}$

Taula 11.1 Cabals en les diferents configuracions de BC2.

Amb les configuracions 1 i 2 s'aconsegueix augmentar la velocitat del fluid en les interfases hidràuliques sense influir negativament en la capacitat màxima de cabal. En la configuració 3 s'aconsegueix que les velocitats es mantinguin sempre dintre del rang desitjat, però la capacitat màxima ja es comença a veure disminuïda.

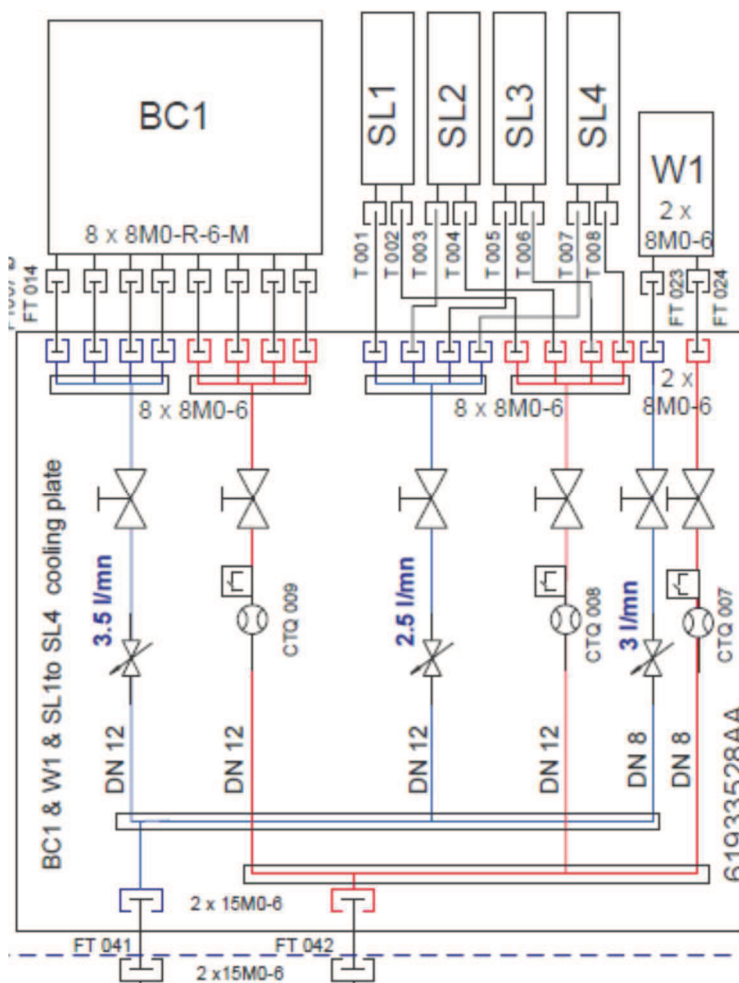
En funció dels resultats de la taula 11.1 es proposa adaptar el sistema actual al simulat en la configuració 2; és a dir, amb un diàmetre interior del *manifold* de 8 mm.

Els canvis proposats no augmenten el cabal total que pot passar per aquest equip, ja que gran part de la pèrdua d'energia de l'aigua es produeix en el mateix equip i, per tant, l'equip és el limitant pel que fa a cabal màxim disponible.

Per altra banda, s'aconsegueix millorar el mapa de velocitats del fluid sense alterar la capacitat màxima de flux. Mentre que en el cas inicial la velocitat mínima de l'aigua en el subsistema era de 0,076 m/s, amb la millora proposada aquest augmenta fins a 0,264 m/s en el mateix tram.

11.2. BC1, SL & W1

El problema en aquest subsistema es troba únicament en l'equip *Buncher Coil 1* (BC1). S'han realitzat diferents simulacions amb variacions respecte al sistema actual amb la intenció de poder augmentar la capacitat de cabal a BC1 sense afectar negativament en SL i W1. Segons els càlculs realitzats en l'apartat 7 d'aquest document, el cabal necessari per a SL és de $1,33 \cdot 10^{-4}$ m³/s. Aquest canvi pot afectar negativament al cabal que circula per BC1. Les configuracions simulades són les següents:



- Actual: manifold general ID=15 mm, BC1 manifold ID=15 mm, SL manifold ID=15 mm.

- Configuració 1: manifold general ID=10 mm, BC1 manifold ID=6 mm, SL manifold ID=6 mm.

- Configuració 2: manifold general ID=10 mm, BC1 manifold ID=8 mm, SL manifold ID=8 mm.

- Configuració 3: Dos manifolds independents. El primer per a BC1, amb un ID=8 mm. El segon per a SL i W1, amb un ID=10 mm i el manifold de SL de ID=8 mm.

- Configuració 4: Un manifold conjunt per a BC1 i BC2, amb un ID=10 mm. El propi de cada equip amb un ID=8 mm.

Figura 11.2 Esquema del disseny original del manifold dels equips BC1, SL i W1.

Equip	Cabal [m ³ /s]				
	Actual	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 3	Conf. 4
BC1-1	1,17·10 ⁻⁵	1,05·10 ⁻⁵	1,08·10 ⁻⁵	1,25·10 ⁻⁵	1,25·10 ⁻⁵
BC1-2	1,28·10 ⁻⁵	1,20·10 ⁻⁵	1,23·10 ⁻⁵	1,35·10 ⁻⁵	1,37·10 ⁻⁵
BC1-3	1,38·10 ⁻⁵	1,30·10 ⁻⁵	1,33·10 ⁻⁵	1,47·10 ⁻⁵	1,48·10 ⁻⁵
BC1-4	1,48·10 ⁻⁵	1,38·10 ⁻⁵	1,42·10 ⁻⁵	1,57·10 ⁻⁵	1,58·10 ⁻⁵
SL1	3,37·10 ⁻⁵	3,32·10 ⁻⁵	3,37·10 ⁻⁵	3,37·10 ⁻⁵	-
SL2	3,28·10 ⁻⁵	3,35·10 ⁻⁵	3,30·10 ⁻⁵	3,30·10 ⁻⁵	-

Equip	Cabal [m ³ /s]				
	Actual	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 3	Conf. 4
SL3	$3,40 \cdot 10^{-5}$	$3,47 \cdot 10^{-5}$	$3,42 \cdot 10^{-5}$	$3,42 \cdot 10^{-5}$	-
SL4	$3,28 \cdot 10^{-5}$	$3,22 \cdot 10^{-5}$	$3,25 \cdot 10^{-5}$	$3,25 \cdot 10^{-5}$	-
W2	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	-
BC2-1	-	-	-	-	$1,58 \cdot 10^{-5}$
BC2-2	-	-	-	-	$1,43 \cdot 10^{-5}$
BC2-3	-	-	-	-	$1,37 \cdot 10^{-5}$
BC2-4	-	-	-	-	$1,25 \cdot 10^{-5}$
Total	$1,50 \cdot 10^{-4}$	$1,46 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{-4}$	$1,48 \cdot 10^{-4}$	$1,13 \cdot 10^{-4}$

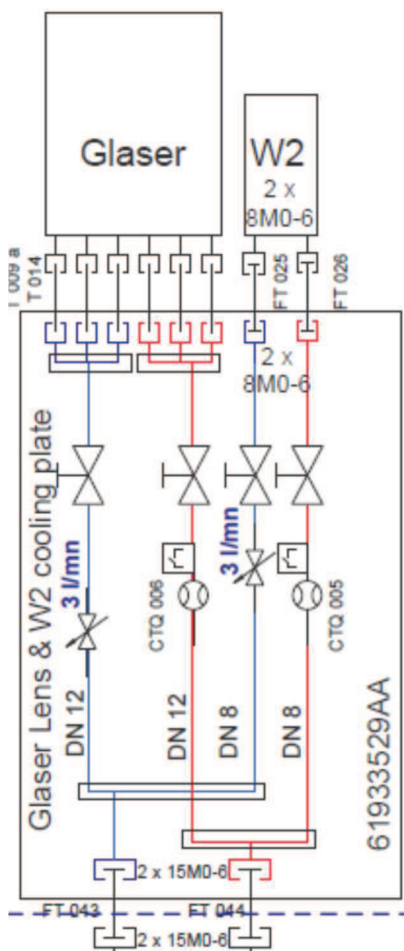
Taula 11.2 Cabals en les diferents configuracions de BC1, SL i W1.

Es pot veure que augmentar el cabal dels equips SL de $4,17 \cdot 10^{-5}$ a $1,33 \cdot 10^{-4}$ m³/s afecta negativament al cabal que pot passar per BC1. La configuració 1, a més a més de disminuir bastant el cabal de BC1, provoca que en un conducte del manifold de SL es tingui una velocitat massa elevada (4,68 m/s). En la configuració 2 es soluciona aquest problema amb la velocitat elevada i el cabal de BC1 augmenta. Tot i així, el cabal és encara menor al valor calculat com a necessari ($4,95 \cdot 10^{-4}$ m³/s en la configuració 1; $5,05 \cdot 10^{-4}$ m³/s en la configuració 2 i $5,93 \cdot 10^{-4}$ m³/s en els valors calculats).

En les configuracions 3 i 4 es separa la refrigeració de BC1 de les de SL i W1. En la configuració 3 hi ha un manifold per a BC1 i un altre per a SL i W1. Per la part de SL i W1 no hi ha cap problema i en BC1 s'augmenta el cabal fins als $5,63 \cdot 10^{-4}$ m³/s.

En la configuració 4 es proposa un manifold conjunt per a BC1 i per a BC2. Amb aquesta distribució, BC1 pot tenir un cabal de $5,67 \cdot 10^{-5}$ m³/s i BC2 de $5,63 \cdot 10^{-5}$ m³/s. Aquesta configuració fa disminuir el cabal de BC2 respecte els resultats obtinguts en l'apartat 11.1 ($6,05 \cdot 10^{-5}$ m³/s) sense augmentar significativament el cabal de BC1. És per això que la millor opció és la configuració 3. Amb aquesta distribució és la que es pot subministrar un cabal més elevat de BC1 sense que els altres equips es vegin afectats negativament.

11.3. GL & W2



En aquest cas l'equip W2 té un cabal suficient, però l'equip GL té un cabal inferior al de disseny. S'han simulat diferents configuracions per a intentar millorar aquest problema:

- Actual: *Manifold general ID=15 mm, GL manifold ID=15 mm.*
- Opció 1: *Manifold general ID=10 mm, GL manifold ID=8 mm.*
- Opció 2: *Manifold general ID=10 mm, GL manifold ID=6 mm.*

Figura 11.3 Esquema del disseny original del *manifold* dels equips GL i W2.

Els resultats d'aquestes simulacions es presenten en la següent taula:

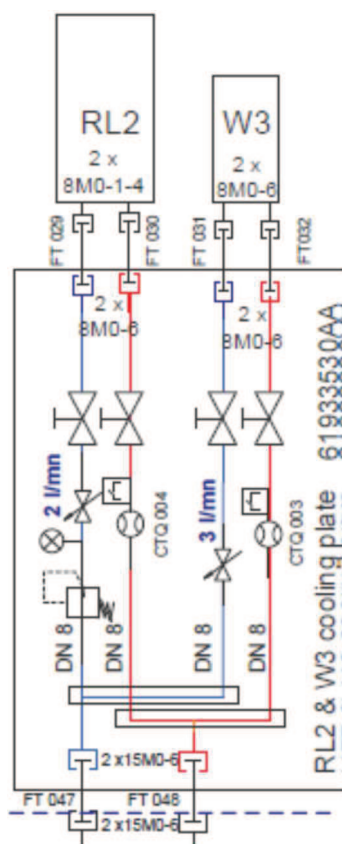
Equip	Cabal [m³/s]		
	Actual	Opció 1	Opció 2
GL1	$1,23 \cdot 10^{-5}$	$1,23 \cdot 10^{-5}$	$1,22 \cdot 10^{-5}$
GL2	$1,10 \cdot 10^{-5}$	$1,10 \cdot 10^{-5}$	$1,08 \cdot 10^{-5}$
GL3	$1,22 \cdot 10^{-5}$	$1,22 \cdot 10^{-5}$	$1,22 \cdot 10^{-5}$
W2	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Total	$8,53 \cdot 10^{-5}$	$8,53 \cdot 10^{-5}$	$8,52 \cdot 10^{-5}$

Taula 11.3 Cabals en les diferents configuracions de GL & W2.

Segons els càlculs de càrregues tèrmiques de l'apartat 7 d'aquest document, el cabal necessari de GL és de $3,90 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. Amb les modificacions simulades no s'aconsegueix augmentar el cabal que hi pot circular, però en cada una d'elles es millora les velocitats del fluid.

En el disseny actual, la velocitat més baixa del fluid és de $0,069 \text{ m/s}$. En la configuració 1 aquest valor mínim és de $0,242 \text{ m/s}$ i en la configuració 2 de $0,427 \text{ m/s}$. La millor opció és, doncs, la configuració número 2 ja que apropa molt la velocitat del fluid al rang desitjat sense disminuir pràcticament el cabal màxim que hi pot circular.

11.4. RL2 & W3



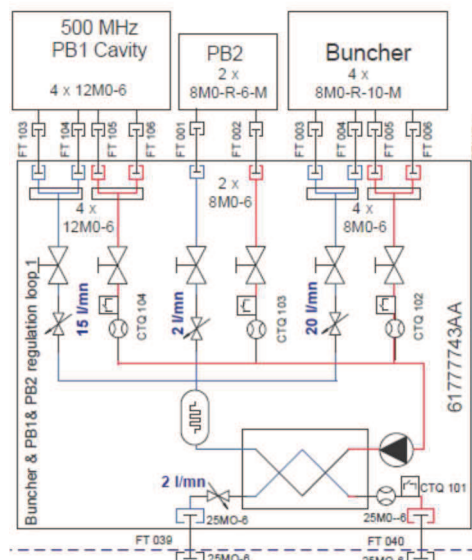
Els dos equips que componen aquest *manifold*, tenen una capacitat de cabal suficient d'acord a les seves necessitats de potència calorífica a evacuar. Els canvis proposats es centren en la millora de les velocitats per les seves interfases. S'han simulat dos configuracions:

- Actual: Manifold ID=15 mm
- Opció 1: Manifold ID=8 mm

En el sistema actual, la velocitat mínima del fluid és de $0,188 \text{ m/s}$; mentre que en l'altra opció simulada s'augmenta aquest valor fins obtenir una velocitat de $0,659 \text{ m/s}$ aconseguint així que totes les velocitats quedin dintre del rang desitjat (entre $0,5$ i 3 m/s).

Figura 11.4 Esquema del disseny original del *manifold* dels equips RL2 i W3.

11.5. Cooling Loop 1



El circuit independent que refrigera els equips *PB1*, *PB2* i *Bun* no subministra suficient cabal a aquests. Per a solucionar el problema s'han simulat tres configuracions. Les condicions de contorn utilitzades en aquests models són les condicions de treball habituals: pressió d'entrada a la bomba de 0,8 bars i augment de pressió a la bomba de 4,75 bars.

- Actual: *Manifold* ID=30 mm, tubs de *PB1*, *PB2* i *Bun* de ID=6 mm.
- Configuració 1: *Manifold* ID=21 mm, tubs de *PB1* i *PB2* de ID= 15 mm i tub de *PB2* de ID=8 mm. Tanmateix, les vàlvules de regulació de *PB1* i *Bun* s'han canviat per unes que s'adeqüin a la mida dels tubs i amb un major valor de Cv màxim (de 0,37 en les instal·lades actualment fins a 1,80 en les simulades en aquesta configuració). Les vàlvules de tall s'han canviat a *PB1* i *Bun* per unes altres que s'adeqüen al diàmetre dels tubs i presenten un major valor de Cv (1,5 de les actuals per 13,6 dels nous models).
- Configuració 2: mateixes dimensions en els diàmetres interior de tot el sistema. La vàlvula de regulació general es canvia per una amb un major coeficient de cabal Cv (de 1,8 a 5,72).

Figura 11.5 Esquema del disseny original del *manifold* dels equips *PB1*, *PB2* i *W2*.

Equip	Cabal [m³/s]		
	Actual	Conf. 1	Conf. 2
PB1-1	3,97·10 ⁻⁵	1,53·10 ⁻⁴	1,85·10 ⁻⁴
PB1-2	8,02·10 ⁻⁵	1,73·10 ⁻⁴	1,73·10 ⁻⁴
PB2	8,33·10 ⁻⁵	7,30·10 ⁻⁵	8,33·10 ⁻⁵
Bun-1	5,55·10 ⁻⁵	7,57·10 ⁻⁵	1,73·10 ⁻⁴
Bun-2	4,93·10 ⁻⁵	7,95·10 ⁻⁵	1,73·10 ⁻⁴
Total	3,08·10 ⁻⁴	5,54·10 ⁻⁴	7,02·10 ⁻⁴

Taula 11.4 Cabals en les diferents configuracions de CL1.

En la taula es pot veure que en cada configuració nova la situació millora considerablement respecte a la situació actual. L'opció amb més bons resultats és la configuració 2, que aconseguix assegurar un cabal de refrigeració suficient per a totes les cavitats.

11.6. Cabalímetres

Amb diferents mesures s'ha demostrat que els cabalímetres actuals no funcionen correctament, generalment degut a la seva col·locació. Això fa impossible conèixer l'estat actual de funcionament del sistema i en dificulta la regulació.

És necessari que els cabalímetres es trobin a la sortida dels equips, cosa que implica que estiguin en sentit de flux descendent, per a poder conèixer el cabal real que passa per dins de l'equip en cas de que existís alguna fuga d'aigua en el sistema. Degut a aquest motiu la millor opció és canviar els cabalímetres actuals per uns altres amb un principi de funcionament diferent, en el que no influeixi el sentit del flux.

En aquest cas, s'ha decantat cap a uns cabalímetres que funcionen pel principi del diferencial de pressió. El principi de funcionament d'aquests cabalímetres consisteix en disminuir el diàmetre per on circula el fluid i després tornar-lo a augmentar a la mida original. Aquesta contracció i expansió en la secció per on circula el fluid produeix una caiguda de pressió en el fluid. Si aquesta diferència de pressió és mesurada, es pot determinar el cabal que hi circula.

Amb anterioritat a l'actual projecte, en el mateix departament d'enginyeria del Sincrotró ALBA, es va realitzar un estudi sobre la calibratge d'aquest model de cabalímetres [4]. L'origen d'aquell estudi va ser degut a la detecció de diferències entre el cabal mesurat i el cabal real. La conclusió final a la que es va arribar va ser que per aconseguir una mesura acurada del cabal es necessitava un tram de tub de 300 mm abans del cabalímetre i un altre de 100 mm després d'aquest amb el mateix diàmetre intern del cabalímetre. En aquest tram tampoc hi pot existir cap vàlvula ni pertorbació, amb l'objectiu que el fluid arribi el màxim uniforme possible al cabalímetre.

12. Disseny dels *manifolds* del *Cooling Loop 1*

Segons les conclusions extretes en l'apartat 11.5 d'aquest document s'ha procedit al disseny dels *manifolds* d'entrada i sortida dels equips del *Cooling Loop 1* perquè les velocitats es trobin dins del rang de 0,5 i 3 m/s i, sobretot, reduir en tot el que sigui possible les pèrdues de càrrega per tal de poder augmentar el cabal màxim. A més a més dels canvis provats en les simulacions s'hauran de tenir en compte també les restriccions geomètriques, ja que no es disposa de molt d'espai per introduir canvis.

12.1. *Manifold* entrada

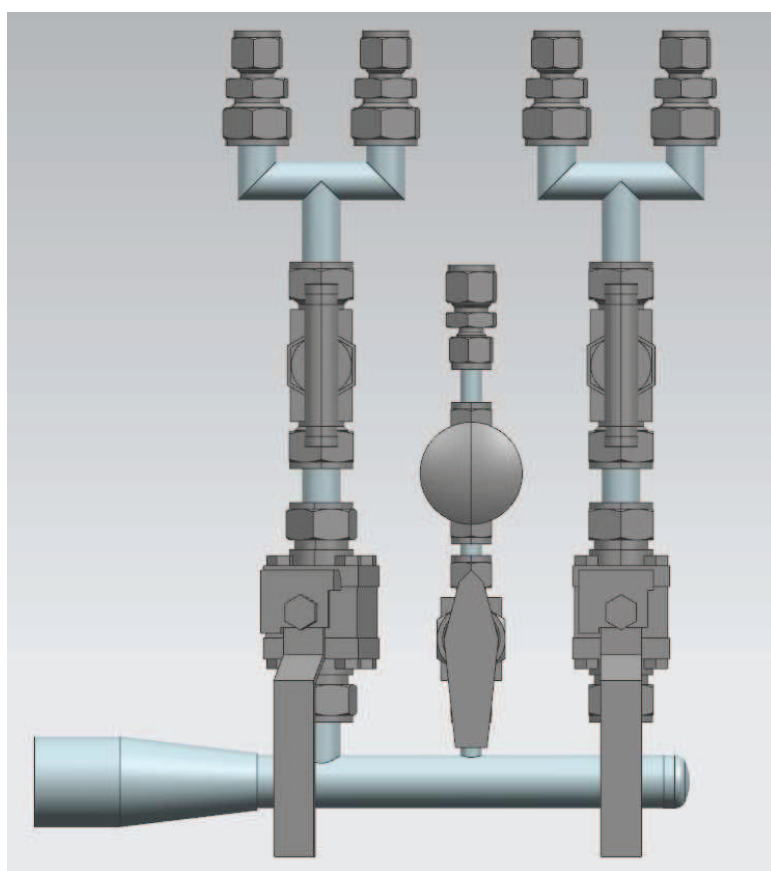


Figura 12.1 Vista frontal del nou disseny del *manifold* d'entrada.

Per al disseny de l'entrada s'han tingut en compte diverses consideracions. La primera és que l'escalfador (on es connecta l'inici del manifold) té una connexió per a rosca mascle de 1 ¼" de tipus BSP. En un primer disseny, per a poder adequar aquesta connexió a la mida del *manifold* no s'han trobat connexions directes, així que la seqüència que s'utilitzava és d'una unió rosca mascle de 1 ¼" a tub de OD=30 mm seguida per una unió entre tubs de 30 mm a 25mm. Degut a la gran longitud que suposava aquesta solució, finalment es farà un mecanitzat al tub del *manifold* per tal de poder enroscar-lo directament a l'escalfador. Com que el tub ha de tenir un diàmetre nominal de 1 ¼" per a poder ser enroscat, aquest ha de ser seguit per una reducció concèntrica de 1 ¼" a 25 mm [9].

La geometria actual compta amb un gir de 180° abans de la distribució de l'aigua entre els tres equips. S'ha intentat evitar aquesta geomètrica dibuixant una geometria recta. Per a poder dur-ho a terme i disposar de suficient espai, s'ha hagut de desplaçar l'escalfador 10 cm.

El diàmetre interior del tub del *manifold* és de 21 mm. D'aquesta manera s'aconsegueix que les velocitats del fluid estiguin dintre el rang desitjat (entre 0,5 i 3 m/s) sense augmentar significativament les pèrdues de càrrega. S'ha utilitzat un tub amb un diàmetre exterior de 25 mm i, per tant, de 2 mm d'espessor. Per als equips *Prebuncher 1* i *Buncher*, el diàmetre interior dels tubs és de 15 mm i l'exterior de 18 mm. Per al *Prebuncher 2* el diàmetre interior és de 8 mm i l'exterior de 10 mm.

Les vàlvules de tall són de tipus bola i les vàlvules de regulació són d'agulla. L'elecció de les vàlvules ha estat marcada per dos condicions. La primera és l'adequació a la mida dels tubs on es troben col·locades per a que existeixin les menors contraccions i expansions possibles, amb l'objectiu d'evitar pèrdues de càrrega singulars extremes. La segona és que el valor del coeficient de cabal ha de ser el més gran possible. L'empresa subministradora de les vàlvules, Swagelok, té els valors del coeficient C_v en les especificacions [5][6][7] de les seves vàlvules.

A més a més, en el disseny actual les vàlvules de regulació estan situades més a prop de del *manifold* i després hi ha les de tall. En el nou disseny l'ordre és el contrari. Això es fa així per tal que si s'han de fer actuacions de manteniment en el sistema, al tenir les vàlvules de tall just després del *manifold*, permet aïllar tot el sistema.

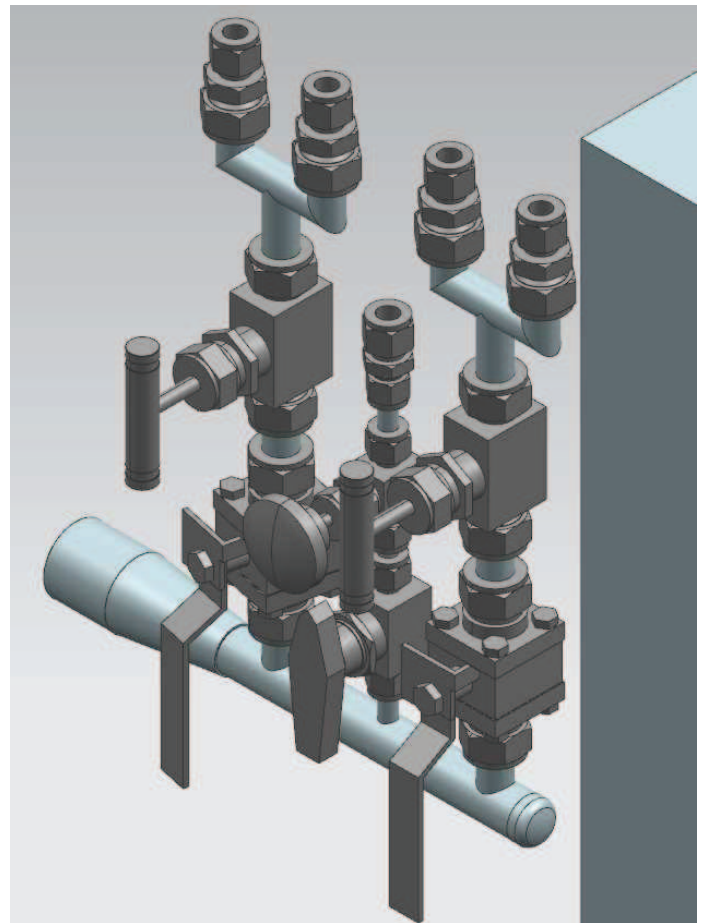


Figura 12.2 Vista isomètrica del nou disseny del *manifold* d'entrada.

En el cas del *Prebuncher 1* i el *Buncher* ha d'existir un altre *manifold* per a cada un. El motiu és que aquests equips tenen dos circuits de refrigeració iguals i independents. Al final s'han afegit connexions per a mànegues per tal de poder-les connectar als tubs metàl·lics.

12.2. Manifold sortida

Els cabalímetres usats en el disseny són els descrits en l'apartat 11.6, que funcionen pel mètode de diferència de pressió [10]. Perquè aquests funcionin de manera precisa, necessiten un tram de tub de 300 mm de ID=16 mm sense cap interferència (com vàlvules) abans del cabalímetre i un altre tram d'iguals característiques i de longitud 100 mm després del cabalímetre. El tub de 16 mm de diàmetre intern té un gruix de parets de 2 mm i, per tant, un diàmetre exterior de 20 mm. Com s'ha comentat a l'inici d'aquest apartat, un dels problemes per al disseny dels *manifolds* és la falta d'espai. S'ha establert que la altura

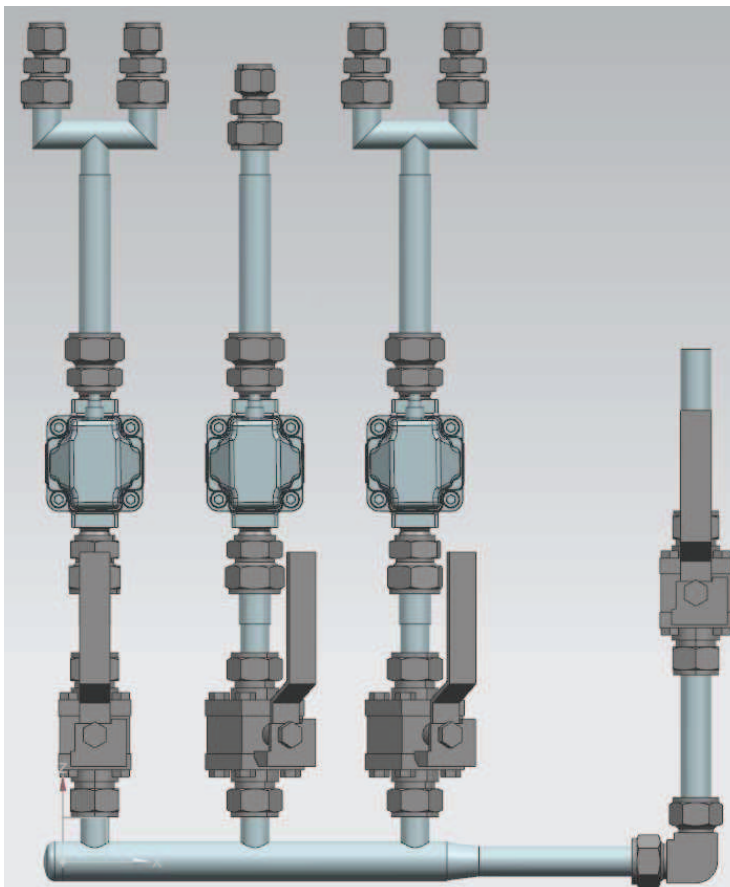


Figura 12.3 Vista frontal del nou disseny del *manifold* de sortida.

màxima d'aquests no pot ser superior a 50 cm. Això ha condicionat que els trams rectes anteriors i posteriors al cabalímetre no poden ser complets. Finalment, el tram anterior al cabalímetre té una longitud de 140 mm i el tram posterior té una longitud de 60 mm. Aquest disseny provocarà un error en la lectura dels cabalímetres que haurà de ser quantificat amb anterioritat a la instal·lació del *manifold* al sistema. Tanmateix, els cabalímetres han estat col·locats amb el capçal cap enfora per tal de facilitar operacions de manteniment en cas que sigui necessari.

De la mateixa manera que en el *manifold* d'entrada, el tub de distribució general té un diàmetre interior de 21 mm i un diàmetre exterior de 25 mm. En els equips *Prebuncher 1* i *Buncher* els tubs són de diàmetre intern 15 mm, excepte en els trams necessaris de ID=16 mm per al correcte funcionament del cabalímetre. En el cas del *Prebuncher 2* també es necessiten els trams de ID=16 per al cabalímetre. Per a evitar grans contraccions i expansions, la resta de

tubs són de les mateixes dimensions que en els altres dos equips. La unió entre els tubs de OD=18 mm i els tubs de OD=20 mm es realitzarà amb soldadures.

Les vàlvules de tall per a *PB1* i *Bun* són les mateixes que les utilitzades en el *manifold* d'entrada. Degut al redimensionament dels tubs de *PB2*, la vàlvula de tall ha estat canviada per a utilitzar el mateix model que en els altres dos equips. De la mateixa manera que en el *manifold* d'entrada, en el disseny actual els cabalímetres estan més propers al *manifold* que les vàlvules de tall. L'ordre s'ha canviat en el nou disseny per poder aïllar tot el sistema en cas de fer actuacions de manteniment en el sistema.

El circuit general té un diàmetre exterior de $\frac{3}{4}$ " , que correspon a 19,05 mm. És per això que després del *manifold* de sortida dels equips ha d'haver-hi una reducció concèntrica de 24 mm de diàmetre extern fins a 19 mm.

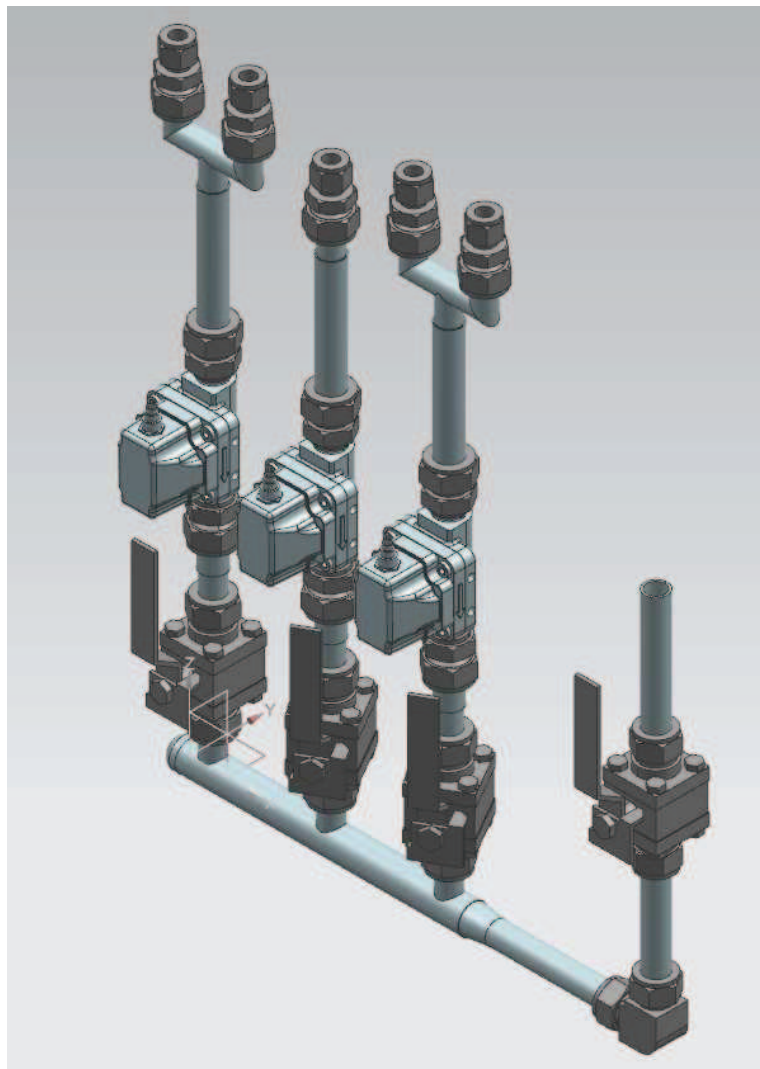


Figura 12.4 Vista isomètrica del nou disseny del *manifold* de sortida.

13. Planificació temporal i pressupost

13.1. Planificació temporal

El projecte consta de dos fases principals. La primera fase és la fase de disseny. Aquesta està composta per una primera fase on es determina l'ordre de magnitud i s'estudia l'estat actual de la refrigeració del LINAC i es busca la informació disponible. Posteriorment es troba l'estudi preliminar, que compren tot el conjunt de mesures experimental i la modelització del sistema amb les posteriors simulacions. En la fase de disseny també hi ha una part de disseny preliminar, on s'estudien totes les possibilitats de millora del sistema, i un disseny detallat del nou *manifold* del *Cooling Loop 1*, utilitzant un programa de CAD.

La segona fase és la fase de construcció. Aquesta fase comprèn la compra de materials necessaris (demanda d'ofertes, realització de compra i recepció de peces), l'assemblatge del nou *manifold* i la instal·lació d'aquest en el sistema. La instal·lació no pot començar fins el dia 25 de Juliol de 2016. Això és degut a que no es poden fer canvis en dies d'operació del Síncrotró. A partir d'aquest dia i fins finals d'agost és període de *Shutdown* i, per tant, es poden fer les modificacions del sistema adients.

S'ha realitzat un Diagrama de Gantt amb l'eina de programari lliure *GanttProject*.

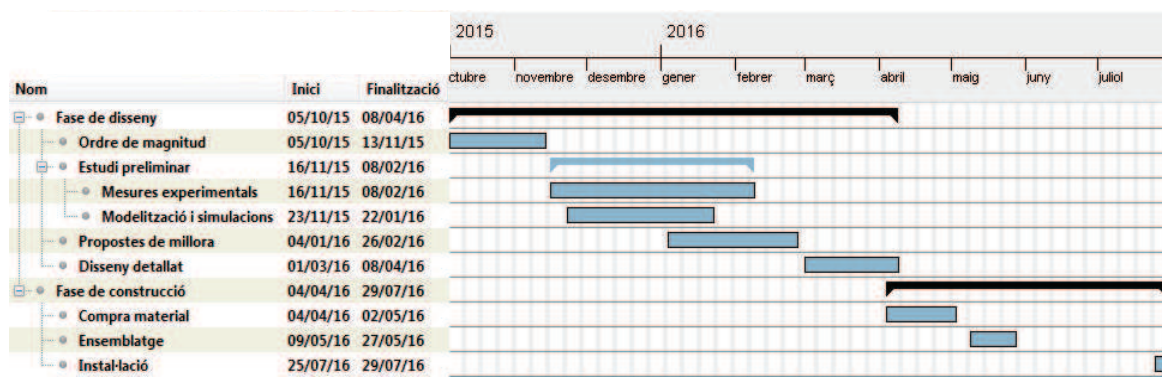


Figura 13.1 Diagrama de Gantt de la planificació temporal del projecte.

13.2. Pressupost del projecte

13.2.1. Costos directes

Per a realitzar un pressupost del projecte cal analitzar els diferents costos del mateix. En aquest

projecte, els únics costos presents són els costos de disseny i els de producció del nou *manifold*.

En aquest cas, s'atribueix als costos directes el cost dels materials utilitzats per a la construcció dels canvis duts a terme, els costos de salaris en personal treballant en el projecte i els costos del software de simulació.

Com a costos de materials s'ha tingut en compte tot el material necessari per a la construcció i instal·lació dels dissenys dels *manifolds* d'entrada i sortida del *Cooling Loop 1*.

Ítem	Marca	Cost unitari [€/u]	Unitats	Cost [€]
Vàlvula de bola 18 mm	Swagelok	153,02	5	765,10
Vàlvula de bola 10 mm	Swagelok	103,30	1	103,30
Vàlvula agulla 18 mm	Swagelok	198,20	2	396,40
Vàlvula agulla 10 mm	Swagelok	114,39	1	114,39
Unió reductora 18-12 mm	Swagelok	34,44	9	309,96
Unió reductora 12-8 mm	Swagelok	21,18	1	21,18
Set cons ¾"	Swagelok	24,60	1	24,60
Set cons 8 mm	Swagelok	19,35	1	19,35
Connector mascle 20mm-1/2"	Swagelok	22,16	6	177,28
Colze 90°	Swagelok	26,53	1	26,53
Tub acer inoxidable OD=25 mm	Swagelok	16,25	1	16,25
Tub acer inoxidable OD=20 mm	Swagelok	13,40	1	13,40
Tub acer inoxidable OD= ¾"	Swagelok	13,05	1	13,05
Entroncament 1¼"	Hastinik	4,55	1	4,55
Tap 25 mm	Hastinik	1,61	2	3,22
Reducció 24-19 mm	Hastinik	3,83	2	7,66
Reducció 1 ¼" - ¾"	Hastinik	6,86	2	13,72
Cabalímetre 0-50 l/min	Eletta	857,00	3	2571,00
Transports	-	15,00	3	45
Total				4751,15

Taula 13.1 Costos de materials per a la construcció dels nous *manifolds*.

En els preus de la taula anterior no s'hi inclou l'IVA. Amb un impost d'un 21%, el preu total dels materials ascendeix a 5748,89 €.

El cost de llicència d'un any del software de simulació és de 2485,91 €, mentre que el cost de manteniment del software de CAD és de 4900 €. Comptant que l'any té un total de 260 dies laborables, el cost per hora és de 1,20 € pel programa de simulació i de 2,36 € pel programa

de CAD. S'han utilitzat un total de 340 i 150 hores, respectivament. Els cost total del programa de simulació és de 406,4 € i el cost del software de CAD és de 273,3 €. D'aquesta manera, el cost total en software és de 679,70 €.

Concepte	Unitats	Cost unitari	Cost [€]
Enginyer en pràctiques	450 h	5 €/h	2250
Enginyer	40 h	30 €/h	1200
Físics	50 h	30 €/h	1500
Personal de taller	10 h	20 €/h	200
Cost de personal			5150
Software			679,70
Materials			5748,89
Total			11578,59

Taula 13.2 Costs directes.

13.2.2. Costs indirectes

Es tenen en compte aquells costs que no són directament assignables al projecte. En aquest projecte poden ser el cost de l'electricitat, l'amortització dels dispositius utilitzats en el projecte o l'aigua necessària per realitzar els experiments. Aquest cost s'estimarà com un 15% del total de costs directes del projecte.

Com a costs indirectes es considera el cost de l'electricitat, amortització de tots els dispositius utilitzats durant el transcurs del projecte i l'aigua necessària per a fer els experiments. Per a estimar aquests costs s'aproximaran a un 15% dels costs directes.

$$\text{Costs indirectes} = 11578,59 \cdot 0,15 = 1736,79 \text{ €}$$

13.2.3. Cost total

El cost total del projecte és la suma dels costs directes més els costs indirectes.

	Cost [€]
Costs directes	11578,59
Costs indirectes	1736,79
Total	13315,38

Taula 13.3 Cost total del projecte.

Gran part dels costos del projecte venen donats per les partides de costos de personal i el cost dels materials necessaris per a comprar els materials del nom *manifold* a construir. En el següent diagrama es pot veure una representació gràfica de cada un dels costos.

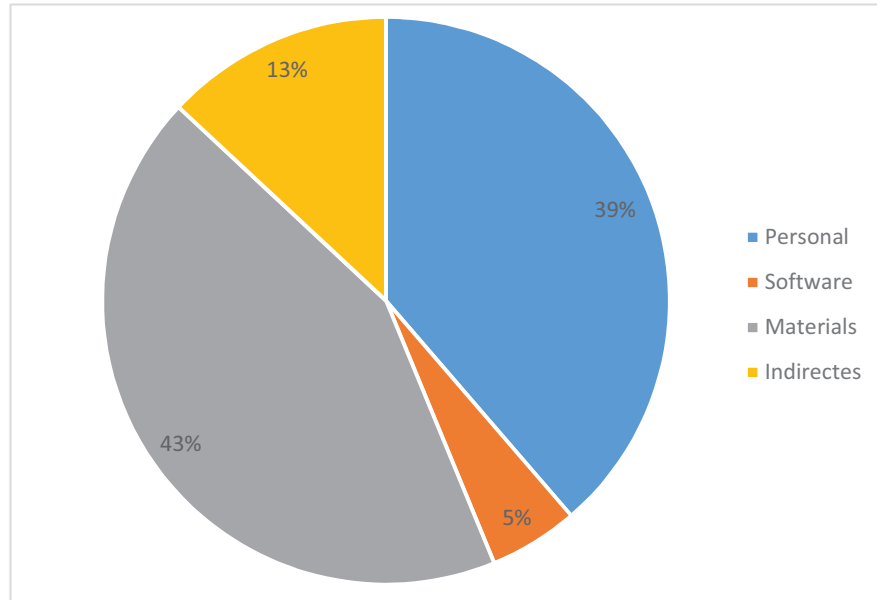


Figura 13.2 Percentatge del cost de cada una de les partides.

14. Impacte mediambiental

L'impacte mediambiental del desenvolupament d'aquest projecte ha estat mínim. Cal destacar en aquest apartat el consum d'electricitat i d'aigua per dur a terme els experiments per caracteritzar els equips.

Pel que fa a la construcció dels nous *manifolds* del *Cooling Loop 1*, l'únic material utilitzat serà l'acer inoxidable, que és un material reciclable. A més a més, si en algun moment aquest disseny quedés obsolet, es poden reutilitzar les vàlvules i els cabalímetres en altres muntatges si aquests encara estan en bones condicions.

El mateix succeeix amb el disseny actual dels *manifolds* que serà substituït. Els tubs són d'acer inoxidable i, per tant, reciclables. Les vàlvules, que encara funcionen correctament, poden ser guardades i utilitzades en situacions adients.

Finalment, cal tenir en compte que l'equip MSHE ha estat dissenyat i construït en el mateix Sincrotró ALBA. Aquest ha estat confeccionat reciclant peces sobrants o que ja no s'utilitzaven.

Conclusions

Les mesures realitzades amb els equips de mesura han permès realitzar una caracterització completa del sistema. D'una banda, amb l'equip MSHE s'ha aconseguit trobar les relacions entre pèrdua de càrrega i cabal per a cada un dels equips. Aquestes relacions tenen la forma d'una relació polinòmica. S'ha comprovat que de les fórmules de pèrdua de càrrega lineal i pèrdues de càrrega singulars s'arriba també a una relació polinòmica de grau dos, tot i que amb alguna diferència. Aquesta diferència és deguda a que les fórmules de pèrdua de càrrega conegudes són fórmules empíriques. És a dir, que de la mateixa forma que les relacions trobades en aquest treball, les equacions utilitzades en mecànica de fluids han estat trobades a partir d'experiments.

A partir d'aquestes relacions s'ha pogut entreveure que en alguns equips la modificació de les interfases hidràuliques no permeten l'augment del cabal màxim. En aquests casos, doncs, els circuits interns de refrigeració dels equips són un limitant, ja que és on es produeix la gran part de les pèrdues de pressió. Per una altra banda, amb el cabalímetre d'ultrasons s'han aconseguit les dades del cabal real en diferents punts del *LINAC* durant llargs períodes de temps.

En el transcurs d'aquestes mesures, s'ha detectat el mal funcionament dels cabalímetres instal·lats en les interfases hidràuliques. Aquests, col·locats en una posició vertical inversa, donen una lectura errònia; fet que ha dificultat algunes mesures del projecte degut a la manca d'informació del funcionament real.

Degut a la desconfiança dels valors de cabal necessaris per a cada equip, s'han realitzat càlculs de les càrregues tèrmiques en tots els electroimants. Amb aquestes dades i les de l'increment de temperatura màxima que accepten els equips s'han re-calculat els cabals necessaris. S'ha trobat que en l'equip *SL* el cabal necessari és superior al de disseny, mentre que en els casos de les *GL* i en els dos *BC* és inferior. Per a les cavitats de radiofreqüència no es disposava de dades per poder realitzar aquests càlculs i, per tant, s'ha continuat utilitzant les mateixes dades de cabals necessaris.

Amb les dades de la caracterització del sistema i les seves condicions de contorn s'ha modelat aquest amb el software *Pipe Flow Expert*. La comparació entre els resultats de les simulacions del model introduït al programa i les dades de cabal reals indica que s'ajusta al comportament real. Aquest model ha permès analitzar les propietats fluidodinàmiques en condicions reals d'operació. També s'espera que aquest model es mantingui per poder fer altres estudis del comportament del sistema en un futur en cas de ser necessari.

S'ha vist que els cabals d'alguns equips són insuficients per a cobrir les necessitats d'evacuació de potència tèrmica. Per al correcte funcionament i evitar problemes cal evitar

altes i baixes velocitats, considerant una velocitat baixa per sota de 0,5 m/s i una velocitat alta per sobre de 3 m/s. S'han trobat velocitats inferiors a 0,5 m/s, generalment en els *manifolds*, i velocitats superiors a 3 m/s, en alguns conductes del *Cooling Loop 1*.

S'ha comprovat que les variacions en la pressió de retorn del sistema que es produeixen en condicions de treball normals no afecten de forma significativa al cabal que circula pels circuits de refrigeració.

En vista als resultats obtinguts en les simulacions del model del *LINAC*, s'han realitzat models amb els software de simulació per a diferents configuracions dels *manifolds* i dels *cooling loops*. En alguns casos com *BC2*, *BC1*, *SL&W1*, *GL&W2* i *RL2&W3* les possibles millores no augmenten el cabal que pot circular pels equips. En aquests casos, doncs, les millores proposades es centren en la millora de les velocitats de l'aigua per tal que es trobin dintre del rang desitjat.

En el cas del *Cooling Loop 1*, s'ha aconseguit proposar una millora que augmenti significativament el cabal màxim que és capaç de circular-hi i que, a la vegada, s'adeqüi al criteri de velocitats. Aquest canvi ha estat dissenyat (tenint en compte les restriccions d'espai) amb un software de CAD i serà assembletat i instal·lat al Sincrotró ALBA, substituint al disseny actual.

La resta de propostes de millora, al no ser tant urgents, no seran dutes a terme de moment. És clar que és necessari canviar tots els cabalímetres per tal de poder tenir, al contrari que ara, lectures correctes dels cabals als equips. Això implicaria doncs el canvi de pràcticament la totalitat dels *manifolds* del sistema. M'agradaria que aquests canvis siguin duts a terme en vista als resultats obtinguts en aquest projecte.

Finalment, espero que els experiments i estudis treballats en aquest document puguin ser una eina útil per a que es pugui continuar amb la comprensió del funcionament i l'optimització del sistema de refrigeració del *LINAC* i que el procediment seguit en aquest projecte serveixi d'exemple per a poder estudiar altres sistemes de refrigeració del Sincrotró ALBA i fora d'aquest.

Agraïments

Vull donar les gràcies per l'ajuda i l'atenció rebuda per part del personal de CELLS durant aquest projecte. En especial vull agrair al meu tutor Marcos Quispe, la Raquel Muñoz i Davide Lanaia.

També vull agrair la col·laboració del professor Enric Trillas pels consells en la confecció de la memòria del projecte.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] CONSORCI PER A LA CONSTRUCCIÓ, EQUIPAMENT I EXPLOTACIÓ DEL LABORATORI DE LLUM DE SINCROTRÓ. [www.cells.es, 4 de gener de 2016]
- [2] H. HERMANN EHLERS GmbH, *Ultrasonic Flowmeter F604 User Manual*
- [3] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. DEPARTAMENT DE MECÀNICA DE FLUIDS. *Apunts de Mecànica de Fluids. Tema 2*. Barcelona.
- [4] MARCOS QUISPE, *Estudio de la conexiones (tubo+connectores) anexas a los monitores Eletta de los crotch y longitudinal absorber (Storage Ring)*. Cerdanyola del Vallès, 2009.
- [5] SWAGELOK. *Integral-Bonnet Needle Valves. 0,1,18,20 and 26 Series*. USA, 2014. [http://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/en/ms-01-164.pdf, 6 d'abril de 2016]
- [6] SWAGELOK. *One-Piece Instrumentation Ball Valves. 40G and 40 Series*. USA, 2014. [http://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/en/ms-02-331.pdf, 6 d'abril de 2016]
- [7] SWAGELOK. *Ball valves. General Purpose and Special Application. 60 Series*. USA, 2015. [http://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/en/MS-01-146.pdf, 6 d'abril de 2016]
- [8] SWAGELOK. *Gaugeable Tube Fittings and Adapter Fittings*. USA, 2015. [http://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/en/MS-01-140.pdf, 6 d'abril de 2016]
- [9] HASTINIK. *Gama mil·limètrica de acero inoxidable*. Espanya [http://www.grupohastinik.com/catalogos/Catalogo_Hastinik_Milimetrico-%2802-15%29.pdf, 6 d'abril de 2016]
- [10] ELETTA. *The M-Series Eletta Flow Meter*. Suècia. [http://www.eletta.se/en/product-overview/m3-series/, 6 d'abril de 2016]
- [11] VALVIAS. *Coeficiente de Caudal*. [www.valvias.com/coeficiente-de-caudal.php, 14 de gener de 2016]

Bibliografia complementària

MONTERRAT PRIETO MOLINÉ. *Simulació del comportament fluidodinàmic del sistema de refrigeració del sincrotró ALBA*. Projecte Final de Carrera.

I.E. IDELCHIK. *Handbook of Hydraulic Resistance*. 3rd edition, 2006.