

## Resum

La *Llum Sincrotró* resulta de la radiació emesa de les partícules carregades quan aquestes es mouen a velocitats relativistes i varien la seva trajectòria. La màquina que caracteritza un laboratori de Llum Sincrotró, és un *anell d'emmagatzematge* compost per elements magnètics que defineixen una trajectòria circular a seguir per als electrons, que hi circulen en un medi de buit.

L'Ondulador en buit com és un element més que es situa a l'anell d'emmagatzematge d'un accelerador de partícules i la seva missió és provocar una oscil·lació de caràcter sinusoidal als electrons que hi circulen a través d'ell per extreure'n radiació.

El principal element de la màquina són dues bigues simètriques amb imants permanents disposats un darrera l'altre dins d'una cambra de buit. Estan sol·licitades longitudinalment amb una càrrega distribuïda linealment de dos tonelades, degut a la força d'atracció magnètica. Aquesta estructura ha de tenir una rigidesa molt elevada perquè en la distància de separació entre ambdós bigues, es permet una deformació màxima de desenes de micrometres per a que el funcionament sigui òptim.

Aquesta distància entre bigues ha de poder augmentar i disminuir amb intervals d'aquest ordre i s'ha de dissenyar un mecanisme d'alta precisió basat en la *servo operació* que desplaci les bigues carregades, simètricament respecte d'un *pla d'obertura*, el pla sobre el qual es defineix la trajectòria sinusoidal dels electrons.

Els elements que s'instal·len a l'anell d'emmagatzematge i l'Ondulador en buit en particular, han d'estar alineats l'un respecte de l'altre i respecte el centre de l'anell sota toleràncies d'alta precisió. L'anell té 80 metres de diàmetre i el feix de llum extret de l'Ondulador poques dècimes de mil·límetre. S'ha de dissenyar un banc d'alineament, també basat en la servo operació que permeti posicionar *l'eix de simetria magnètic*, que caracteritza l'ondulador geomètricament sota aquestes toleràncies. S'han d'escollir els elements adequats per resoldre aquests mecanismes de moviment discret.

En el disseny de l'Ondulador en buit, l'alta precisió en la fabricació i els petits moviments estan a l'ordre del dia,. La correcta utilització de les toleràncies en el disseny, fa que la màquina tingui altes prestacions, però per altra banda fa que els seus components tinguin un cost de fabricació elevat.





## Sumari

<b>RESUM</b>	<b>1</b>
<b>SUMARI</b>	<b>3</b>
<b>1. GLOSSARI</b>	<b>7</b>
<b>2. PREFACI</b>	<b>9</b>
2.2. Llum Síncrotró. Acceleradors de partícules.....	9
2.2.1. Que és la llum síncrotró?.....	9
2.2.2. La necessitat d'una font de Llum Síncrotró a Barcelona.....	9
2.2.3. Historial i planificació de futur del Laboratori de Llum síncrotró.....	12
2.2.4. La física dels acceleradors circulars de partícules.....	13
2.2.5. L'accelerador de partícules. Descripció.....	15
2.3. Els Dispositius D'inserció. L'ondulador en buit.....	19
2.3.1. Funcionament.....	19
2.3.2. Tipus de dispositiu d'inserció.....	20
2.3.3. El dispositiu d'inserció com a element mecànic.....	22
2.3.4. <i>IDs</i> al síncrotró <i>ALBA</i> . Especificacions.....	24
2.4. Motivació.....	25
<b>3. INTRODUCCIÓ</b>	<b>26</b>
3.1. Objectius del projecte.....	26
3.2. Abast del projecte.....	26
<b>4. DESCRIPCIÓ GENERAL DE LES PARTS</b>	<b>27</b>
<b>5. DIMENSIONAT INICIAL</b>	<b>30</b>
<b>6. SUBCONJUNT MOBILS</b>	<b>32</b>
6.1. Deformacions permeses.....	32
6.1.1. Variació màxima permesa en la distància de separació entre les bigues.....	32
6.1.2. Deformació angular permesa.....	33
6.2. El model 1D. Optimització de la geometria.....	34
6.2.1. Model amb 5 cilindres de connexió i biga interna d'acer.....	35
6.2.2. Model amb 6 cilindres de connexió i biga interna d'alumini.....	35
6.3. El model 3D.....	36
6.4. El subconjunt mòbil peça a peça.....	37



6.4.1.	Conjunt biga interna.....	37
6.4.2.	Connexió de la regió en buit amb l'exterior. ....	39
6.4.3.	Biga externa .....	40
6.5.	Sol.licitació sobre el subconjunt mòbil.....	41
6.6.	Patins a deformació .....	42
<b>7.</b>	<b>MECANISME D'OBERTURA</b> .....	<b>44</b>
7.1.	Descripció, funcionalitat i característiques.....	44
7.1.1.	Descripció. Graus de llibertat i coordenades independents.....	45
7.1.2.	Especificacions bàsiques. ....	45
7.1.3.	Funcionament.....	47
7.2.	Cadena cinemàtica, paràmetres.....	48
7.3.	Fusell amb femella .....	49
7.3.1.	Decisió. Alternatives.....	49
7.3.2.	Fusell Roscat .....	50
7.3.3.	Rodaments de suport.....	51
7.3.4.	Velocitat angular, parell necessari. Potència .....	51
7.4.	Reductor vis sens fi .....	54
7.4.1.	Funcionalitat.....	54
7.4.2.	Especificacions. Decisió orientativa i materials. ....	55
7.4.3.	Dos possibles tipus de funcionament, dos tamanyes a l'hora d'escollir.....	55
7.5.	Sistema motor amb reenviament d'angle .....	57
7.5.1.	Joc al sistema motriu dependent del sistema de control.....	57
7.5.2.	Motor. Descripció, Alternatives i funcionalitat .....	57
7.5.3.	Especificacions. Elecció orientativa.....	58
7.6.	Elecció definitiva dels elements. Comprovacions .....	58
7.6.1.	Etapes de reducció .....	58
7.6.2.	Resolució.....	59
7.6.3.	Reductor vis sens fi.....	59
7.6.4.	Reenviament d'angle. ....	60
7.6.5.	Motor pas a pas .....	61
7.7.	Elements auxiliars .....	62
7.7.1.	Acoblaments.....	62
7.8.	Control bàsic de l'obertura i fi de cursa.....	64
7.8.1.	Dispositius per la lectura de la posició.....	65
7.8.2.	Diagrama de control. Característiques del processador de posicionament .....	67



7.8.3.	Condicions de funcionament.....	68
7.9.	Conclusions referents al servo mecanisme.....	70
<b>8.</b>	<b>ESTRUCTURA PRINCIPAL</b> .....	<b>71</b>
8.1.	Disseny de les columnes. Deformacions.....	71
8.2.	Despeçament.....	73
<b>9.</b>	<b>SISTEMA DE BUIT</b> .....	<b>74</b>
9.1.	Elements del sistema de buit.....	74
9.1.1.	Cambra de buit.....	74
9.1.2.	Manxes.....	75
9.1.3.	Sistema de bombejat.....	76
9.1.4.	Instrumentació de lectura.....	76
<b>10.</b>	<b>DISPOSITIUS DE PROTECCIO TERMICA</b> .....	<b>77</b>
10.1.1.	Protecció dels imants durant el calentament de la cambra de buit.....	77
10.1.2.	Protecció dels imants del calentament degut al feix d'electrons.....	77
10.1.3.	Absorció de la radiació provenint del dipol anterior.....	77
<b>11.</b>	<b>BANCS D'ALINEAMENT</b> .....	<b>80</b>
11.1.	Alineament de l'ondulador en buit com a cas particular.....	80
11.1.1.	Alineament general.....	80
11.1.2.	Posicionament final en l'ondulador en buit. Requeriments mínims.....	81
11.1.3.	Graus de Llibertat.....	82
11.2.	Criteris previs a disseny. Plànols d'estudi.....	83
11.3.	Requeriments generals.....	84
11.4.	Centre de gravetat.....	85
11.5.	Primera opció. Banc manual amb elevador motoritzat.....	86
11.5.1.	Segona etapa: Disseny conceptual. Possibles solucions.....	86
11.5.2.	Elecció de l'esquema i planteig.....	88
11.5.3.	Primera etapa: Disseny conceptual. Esquemes i esborranys del disseny.....	88
11.5.4.	Sol.licitacions.....	89
11.5.5.	Actuador reductor.....	89
11.5.6.	Reenviament d'angle.....	90
11.5.7.	Motor.....	90
11.5.8.	Parell a l'eix motor. Càlculs.....	91
11.5.9.	Resolució.....	91
11.5.10.	Segona etapa. Plàtera corredissa i plàtera terra fixa.....	92



11.5.11. Potes. Alternatives .....	92
11.5.12. Estructura .....	93
11.5.13. Gat .....	94
11.5.14. Elements auxiliars.....	95
11.5.15. Aspectes dinàmics de moviment.....	96
11.5.16. Mètode de funcionament.....	97
11.6. Segona opció: Banc amb actuadors d'excèntriques.....	98
11.6.1. Avantatges e inconvenients d'un disseny d'aquest tipus .....	98
11.6.2. Característiques geomètriques.....	100
11.6.3. L'excèntrica: Característiques cinemàtiques i Posició inicial.....	101
11.6.4. Els moviments longitudinals per separat.....	102
11.6.5. Disseny conceptual. Característiques del banc.....	103
11.6.6. Esforços.....	104
11.6.7. Parell motor. Tria elements.....	104
11.6.8. L'actuador. Despeçament.....	104
11.6.9. Palpadors.....	105
11.6.10. Suport i sistema d'anivellació manual.....	106
11.6.11. Funcionament.....	106
<b>12. MUNTATGE, CALIBRATGE I POSADA A PUNT</b> .....	<b>108</b>
12.1. Estructures .....	108
12.2. Muntatge de la zona "en buit".....	109
12.3. Calibratge, posada apunt.....	111
12.4. Fotografies.....	113
<b>CONCLUSIONS</b> .....	<b>115</b>
<b>AGRAÏMENTS</b> .....	<b>118</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>120</b>



# 1. GLOSSARI

- *Anell d'emmagatzematge*: Anell de l'accelerador encarregat d'emmagatzemar els electrons en òrbita durant un període de temps concret.
- *Àrea experimental*: Zona física perifèrica de l'accelerador on arriba la Llum Sincrotró on es duen a terme els experiments.
- *Booster*: Anell de l'accelerador mes petit que el d'emmagatzematge la funció del qual es accelerar els electrons a una velocitat suficient per al funcionament. Pot ser concèntric o no a l'anterior depenent del disseny de l'accelerador.
- *Eix de simetria magnètic*: Eix format per la intersecció entre el pla d'obertura i un pla de simetria que talla verticalment les dues matrius d'imants.
- *ID*: Abreviatura del mot en anglès *Insertion Device*, correspon a tot tipus de dispositiu d'inserció a l'anell d'emmagatzematge.
- *IVU*: Abreviatura del mot en anglès *In Vacuum Undulator*, que significa Ondulador en Buit.
- *Linac*: Dispositiu generador d'electrons per ser accelerats.
- *LS*: Abreviatura de *Llum Sincrotró*: Radiació emesa per una partícula carregada accelerada que emet quan aquesta es mou a velocitats relativistes.
- *Plà d'obertura*: Pla de simetria de les dues matrius d'imants que defineixen un dispositiu d'inserció.







## 2. PREFACI

Es vol introduir els conceptes físics de *l'ondulador en buit* en un laboratori de *llum sincrotró*. En aquest apartat s'insinua “que es”, “que fa” i “com es fa” la llum sincrotró, i també es descriu a grans trets la física i les parts d'un *accelerador de partícules*. Es considera interessant presentar-ho per entendre bé com funcionen els *dispositius d'inserció*, i *l'ondulador en buit* com a cas particular.

### 2.2. Llum Sincrotró. Acceleradors de partícules

#### 2.2.1. Que és la llum sincrotró?

S'anomena *Llum Sincrotró (LS)* a la llum que emeten les partícules carregades que es mouen a velocitats relativistes quan segueixen trajectòries corbes. Aquesta llum, d'alta energia i intensitat, altament focalitzada i que a més està linealment polaritzada s'utilitza usualment per a l'estudi de la matèria, en aplicacions industrials o d'investigació de caràcter físic, químic, biològic, farmacèutic o mèdic. L'instrument bàsic per produir la Llum Sincrotró és un *accelerador circular de partícules* [Campmany, 1997] (electrons, en el cas del laboratori *ALBA*)

#### 2.2.2. La necessitat d'una font de Llum Sincrotró a Barcelona

L'investigació de l'estat espanyol ha crescut de forma important en els darrers 15 anys, i tot i així falten instal·lacions a gran escala. Ni Catalunya ni l'estat espanyol té cap instal·lació dedicada a l'obtenció de llum sincrotró (*LS*).

La necessitat és molt rellevant en el nostre entorn territorial. L'estat espanyol és membre de la Unió Europea amb major nombre d'usuaris de *LS* en instal·lacions estrangeres. Així, mentre que els científics postdoctorals que la utilitzaven el 1980 eren dos, el 1995 assolien ja uns 300 i actualment es calcula una demanda potencial a curt termini de 80 grups i més de 600 científics. [Campmany, 1997] A partir d'aquesta realitat, diversos grups de diferents universitats espanyoles es van plantejar el 1992 la necessitat de preveure la construcció d'una font de *LS* a l'estat.

La idea de construir-la a Barcelona va adquirir el rang oficial el 1993 i va ser inclosa en el Pla de recerca de Catalunya de la Generalitat de Catalunya. El març del 1995 es va firmar un conveni entre la Comissió Interdepartamental de Recerca i Innovació Tecnològica (CIRIT) del



Govern Català i la Comisión Internacional de Ciencia y Tecnología (CICYT) del govern espanyol per al finançament conjunt del disseny detallat i la seva explotació en cas de construcció.

En un període dels 3 anys anteriors, un equip de 13 científics i tècnics ha treballat en el disseny del Laboratori de Llum Sincrotró (*LLS*). Actualment són 60 treballadors, entre administratius, físics, estudiants i enginyers sota el Consorci per l'Equipament i Explotació del Laboratori de Llum Sincrotró format a l'any 2002, finançat a parts iguals per el *Ministerio de Educación y Ciencia* i la Generalitat de Catalunya. Es preveu 125 treballadors per al 2007

El Laboratori de Llum Sincrotró *ALBA* està en fase de disseny. l'edifici tindrà l'aspecte mostrat a la Figura 2.1 i s'ubicarà de la següent manera al costat del Parc Tecnològic de Cerdanyola del Vallès, com es pot veure al plànol topogràfic de la Figura 2.2, pag. 11



*Fig. 2.1. Simulació fotogràfica que representa l'aspecte final de la instal·lació ALBA*



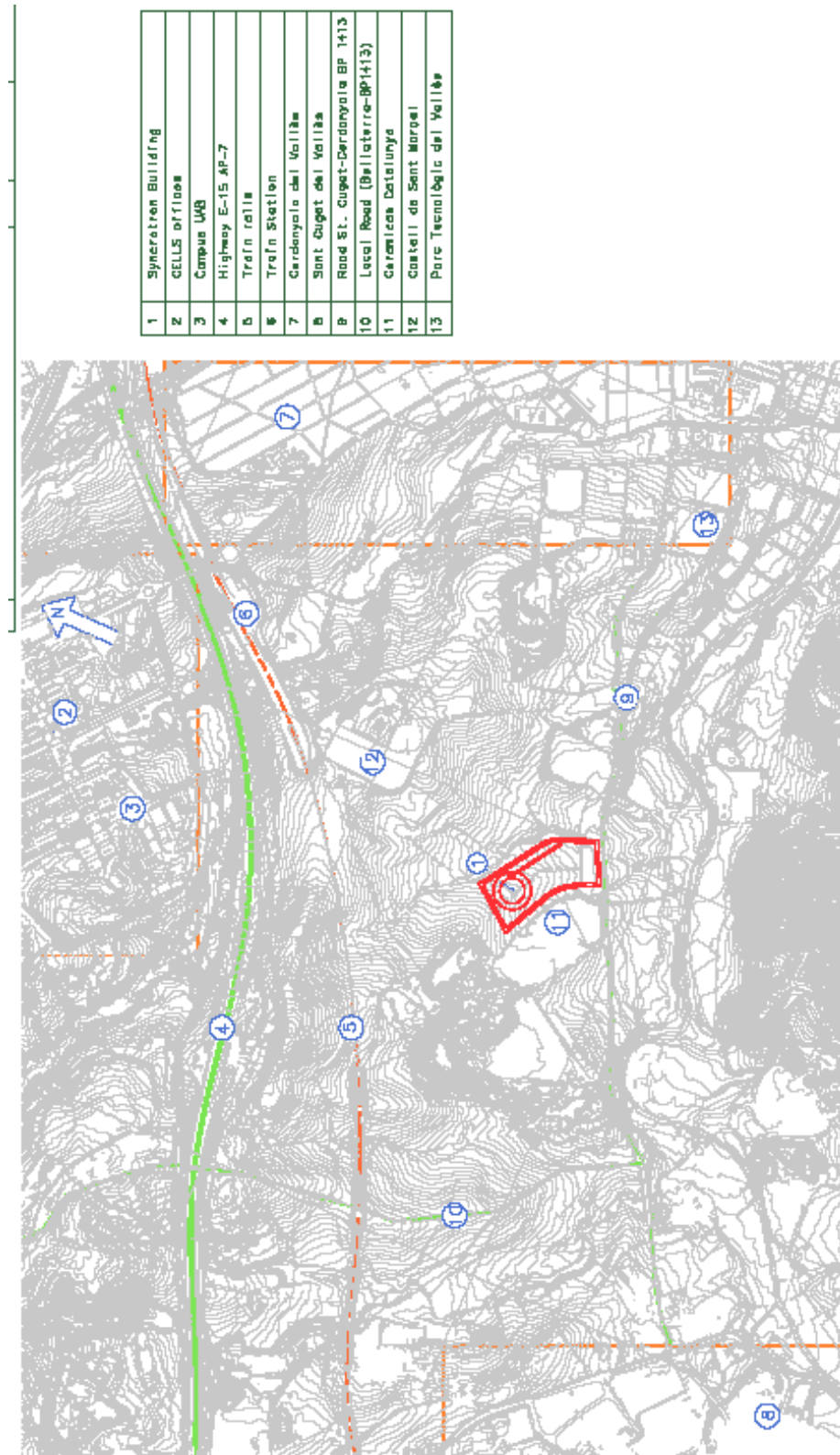


Fig. 2.2. Ubicació del Sincrotró del Vallès



### 2.2.3. Historial i planificació de futur del Laboratori de Llum sincrotró

- 1990: Primers passos per conèixer la necessitat d'una font de Llum Sincrotró al País..
- 1994: Es prepara un equip per al predisseny d'una font de 2.5 GeV.
- 1997: El disseny conceptual de la font és acabat.
- 2002: S'aprova el consorci entre la Generalitat i el *Ministerio de educacion y ciencia*.
- 2003: Es decideix el Director General
- 2003: S'anuncien les posicions per als caps de les 5 divisions de treball.
- 2003: Primer aplec d'usuaris (Menorca).
- 2004: Segon aplec d'usuaris (Màlaga).
- 2004: Redisseny de *l'anell d'emmagatzematge*.
- 2004: Estudi geotècnic del lloc.
- 2005: Condicionament de la parcel·la.
- 2006: Es comença construir l'edifici.
- 2007: Instal·lació del *Linac*.
- 2008: Instal·lació del *Booster i Storage Ring*.
- 2009: Posada a punt
- 2010: Usuaris operant a 5 línies de llum.

Aquestes son les dades reals més significatives en les quals es preveu la realització del laboratori. ([www.cells.es](http://www.cells.es))



#### 2.2.4. La física dels acceleradors circulars de partícules

##### *Acceleració circular de les partícules. Força de Lorentz. Necessitat d'imants*

El moviment de les càrregues elèctriques en camps purament elèctrics és pot determinar a partir de l'equació (Eq. 2.1)

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q \cdot \vec{E} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

On  $q$  és la càrrega de la partícula,  $\vec{p}$  és el seu moment i  $\vec{E}$  és el camp elèctric. El moment  $p$ , ve donat per  $m \cdot \gamma \cdot \vec{v}$  on  $m$  és la massa de la partícula,  $\vec{v}$  la seva velocitat i  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$ .

$c$  és la velocitat de la llum en el buit. L'equació (Eq. 2.1) ens indica que els camps elèctrics canvien el moment de les càrregues en la seva mateixa direcció: Un camp que tingui la mateixa direcció que la trajectòria de les partícules les accelerarà longitudinalment.

Per altra banda, el moviment de les càrregues elèctriques en camps purament magnètics es pot descriure amb l'expressió (Eq. 2.2)

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

On  $\vec{B}$  és la inducció magnètica. Com es veu, la càrrega rep una força perpendicular a la direcció de la seva velocitat i a la direcció de la inducció magnètica. En definitiva, un camp purament magnètic provoca una acceleració purament transversal que corba la trajectòria de les càrregues en moviment. També s'observa que si la càrrega està aturada, l'acceleració serà nul·la.

Si es vol incrementar l'energia d'una partícula carregada, primerament es pot pensar en fer-ho mitjançant un camp elèctric. Aquesta es la forma usual d'obtenir partícules energètiques, sempre que l'energia d'aquestes no superi el valor d'uns 20 MeV per unitat elemental de càrrega [Campmany, 1997].

Si el que es pretén és donar més energia a les partícules accelerades i davant la impossibilitat de generar camps elèctrics més intensos, caldria enginyar un sistema que permeti una acceleració per etapes, tot fent passar la partícula que es vol accelerar diverses vegades pel



mateix camp elèctric. Això s'aconsegueix amb els acceleradors circulars, l'esquema del qual es pot contemplar a la Figura 2.3.

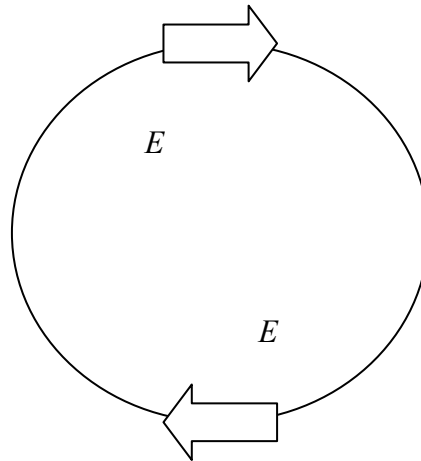


Fig. 2.3. Esquema d'un accelerador circular de partícules

Les partícules van donant voltes al circuit, i en passar una i altra vegada per la zona de camp  $E$ , assoleixen velocitats extremadament properes a la velocitat límit  $c$ .

Per aconseguir una trajectòria circular en el moviment, s'utilitzen camps magnètics, ja que a velocitats elevades, la mateixa acceleració transversal que produiria un camp elèctric molt elevat es pot produir mitjançant un camp d'inducció magnètica relativament baix. Per això els imants són elements essencials dels acceleradors de partícules.

En el moviment circular, existeix una relació entre el moviment circular i l'acceleració centrípeta. Així es té que a partir de (Eq. 2.2.), per un camp magnètic perpendicular a la trajectòria l'acceleració resultant sempre serà radial segons l'expressió (Eq. 2.3):

$$q \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot \gamma \cdot v^2}{\rho} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Si s'accelera, s'incrementa la velocitat  $v$  de la partícula i aleshores, per tal de que el radi de curvatura  $\rho$  es mantingui constant, i es vol que la partícula segueixi una trajectòria tancada s'haurà d'augmentar igualment el camp  $B$  dels imants.



### ***Pèrdues energètiques de les partícules accelerades***

A grans trets, l'energia radiada per una càrrega sotmesa a una força és molt més gran en cas que aquesta força s'apliqui transversalment que no pas longitudinalment. A la practica, la major part de les pèrdues energètiques en partícules accelerades provindran de l'energia radiada per acceleracions transversals.

Es planteja la següent paradoxa: Sembla que les altes energies son més senzilles d'assolir un màquines circulars, ja que s'aprofita un camp elèctric relativament petit, que accelera poc, fent-hi passar moltes vegades la partícula, en canvi es pateix per pèrdues de radiació molt grans a causa de l'elevada acceleració transversal que comporten, que cal anar compensant si es vol anar mantenint la velocitat a les partícules.

La solució a aquesta paradoxa, si es vol tenir velocitats properes a  $c$  o energies molt elevades, és la construcció de màquines circulars amb el radi de curvatura el mes gran possible. Es la solució adoptada, per exemple per *CERN (Ginebra)*, amb un anell que supera els 4 km de radi.

Per a una volta completa de la partícula a un accelerador circular de radi  $\rho$  l'energia que es perd a cada volta sencera per emissió de radiació es designa per  $U_0$ , i es descriu segons l'equació (Eq. 2.4)

$$U_0 = \frac{q^2}{3\epsilon_0\rho} \cdot \frac{E^4}{(mc^2)^4} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

on  $E$  representa l'energia total de la partícula,  $q$  la seva carrega i  $m$  la seva massa. Aquestes pèrdues per radiació, son les que s'anomenen Llum Sincrotró. Com que l'emissió de llum és molt més gran en maquines circulars que en màquines lineals, son les primeres les que s'utilitzen con a fonts de llum sincrotró. L'accelerador *ALBA* que s'està dissenyant a Catalunya, té com a missió l'acceleració de partícules per optimitzar l'aprofitament d'aquesta emissió de llum.

### **2.2.5. L'accelerador de partícules. Descripció.**

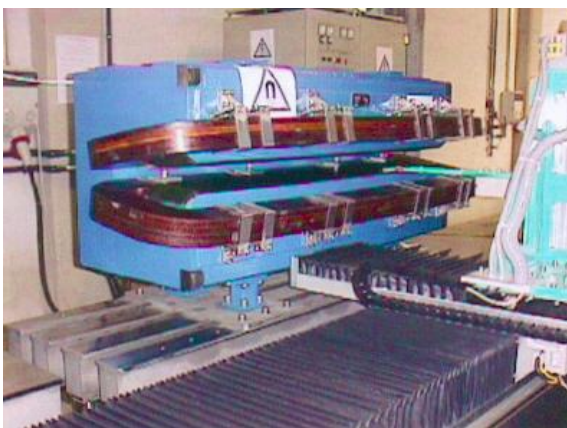
#### ***Breu descripció de la maquina***

Es distingeixen dues xarxes d'imants principals en l'accelerador de partícules. En el cas de fonts de llum sincrotró modernes, es separen dues funcions principals "acceleració" i "emmagatzematge" (*Propulsor* o *Booster* i *Anell d'emmagatzematge* o *Storage Ring*) en dos anells diferents. Les partícules s'acceleren al primer anell, fins arribar a un màxim d'energia



(energia irradiada = energia subministrada). Llavors s'extreuen de l'anell propulsor i passen a l'anell d'emmagatzematge. Aquí hi poden girar durant hores o be dies, depenent del disseny de la màquina. La xarxa d'imants es compon, com ja s'ha dit, per dues sub-xarxes, i com a nota característica, tot el circuit de generació, acceleració i emmagatzematge de partícules es realitza a través de cambres d'ultra-buit, ( $10^{-7}$  Pa). A la figura 2.5, pag. 18 se'n veu els elements més importants.

- **Booster (1):** és l'anell d'acceleració. És un cercle d'imants corbats dipolars on hi desemboca el generador principal de partícules (**Linac (2)**) per a que aquestes siguin accelerades. El *booster*, desemboca a la línia de transferència (3) que porta les partícules accelerades a l'anell d'emmagatzematge (*Storage Ring*)
- **Storage Ring (4):** Es l'anell on s'emmagatzema les partícules accelerades. Com en el *booster*, els electrons circulen dins d'un medi buit format per un anell de cambres i sistemes de bombatge d'ultra-buit, i són conduïts en trajectòries circulars pels següents elements:
  - **Dipols:** (5) Son imants amb un cert radi de curvatura. La seva missió és provocar als electrons una trajectòria corba per poder extreure'n radiació en forma de ventall, com es pot veure a la Figura 2.4



**Conventional (Dipole) Magnet (~1T)**

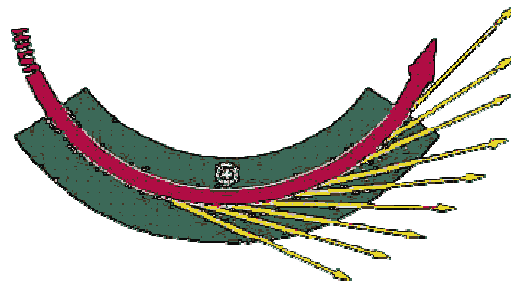


Fig. 2.4. Imant dipolar en un banc d'assaig (esquerra) Radiació emesa (dreta)





- **Imants òptics:** Son imants quadrupolars (6) o sextupolars (7). La seva missió es guiar els electrons en la seva trajectòria, focalitzant-los en l'espai transversal i longitudinal.
- **Dispositius d'inserció (8):** Son formats per matrius d'imants seguides, que provoquen en el feix una ondulació sinusoidal d'un cert període que emet llum sincrotró molt més potent que la dels dipòls. N'hi ha de varis tipus.

L'anell d'emmagatzematge, no es completament circular, sinó que te una forma poligonal. Els dipòls són de geometria corba, però les seccions destinades a dispositius d'inserció i als imants focalitzadors, són rectes. Com a elements importants s'hi troben, a més:

- **cavitats de radio freqüència:** Tenen la missió de proporcionar camp elèctric a les partícules accelerades per compensar les pèrdues d'energia a causa de la radiació emesa. Se'n posen a l'anell d'emmagatzematge, varies a l'anell propulsor i al *linac*
- **Front end:** (9) formats per un conjunt de dispositius que canalitzen la radiació emesa i la condueixen a les *Línies Experimentals* (10). Aquestes, són un conjunt d'instruments que adapten la llum sincrotró per poder-la utilitzar en cadascun dels diversos experiments (microscopia, etc.)

El conjunt de línies experimentals formen *l'àrea experimental*, la zona física on es desenvolupen les activitats d'investigació.

L'accelerador complet, com a màquina es situa dins d'un túnel blindat. A la següent Figura 2.5 es troba un esquema de l'accelerador *ALBA*, on es veu les seccions rectes, els dipòls i els dispositius d'inserció.



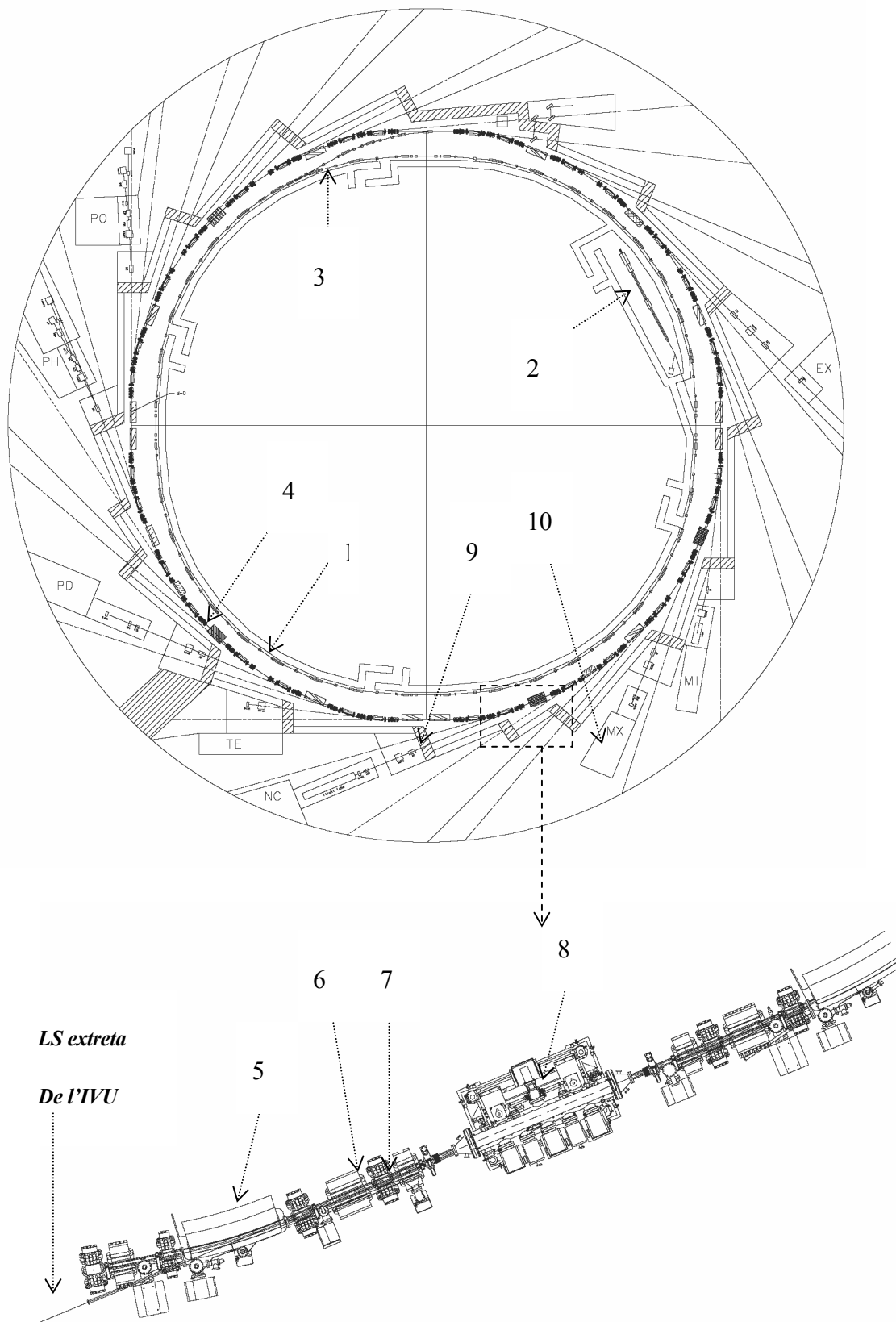


Fig. 2.5. ALBA



## 2.3. Els Dispositius D'inserció. L'ondulador en buit.

### 2.3.1. Funcionament

Els dispositius d'inserció (*IDs*, del mot anglès *Insertion Device*) es basen en matrius d'imants que provoquen una trajectòria ondulada als electrons que hi circulen. Els *IDs* s'ubiquen a les seccions rectes de l'anell d'emmagatzematge de les quals se'n vol extreure radiació d'alta energia.

Un *ID* és un conjunt d'imants dipolars disposats consecutivament. Es forma una estructura magnètica, mitjançant blocs imanats N→S amb una periodicitat  $\lambda$  (mm) i  $N$  períodes, separats una distància  $d$  i situats com es pot veure a la Figura 2.6

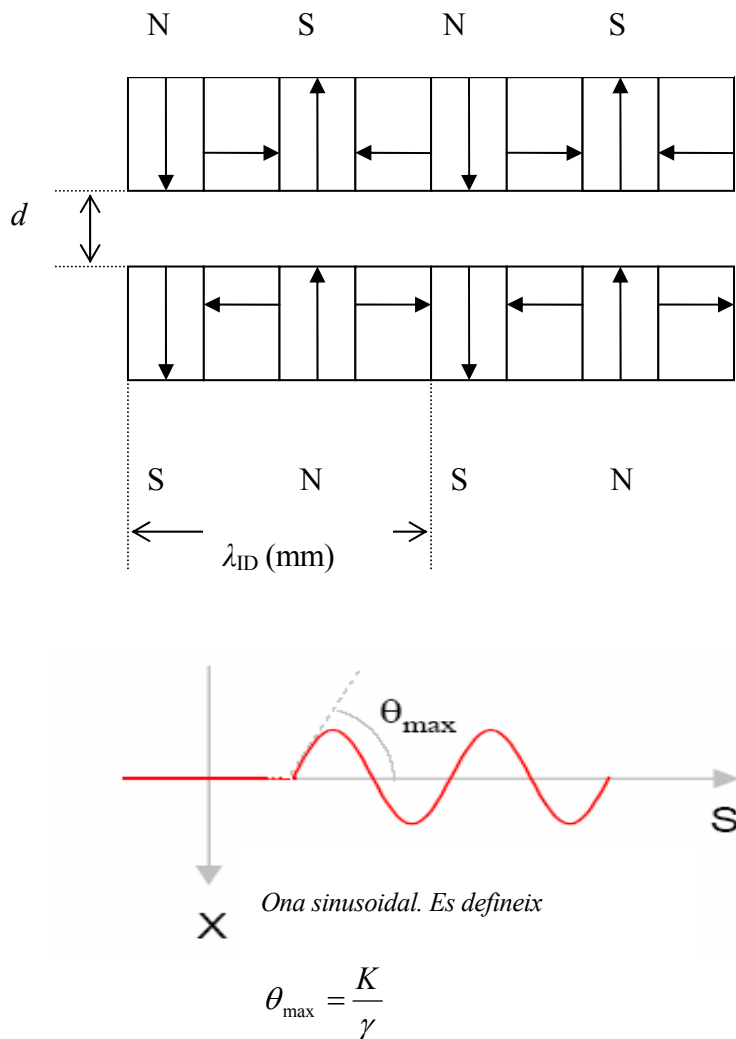


Fig. 2.6. Esquema d'una matriu d'imants



Per crear una ondulació sinusoidal, es pot utilitzar una matriu d'imants permanents. Cada període  $\lambda_{ID}$  és format per un bloc de quatre parelles d'imants, enlloc de dues, ja que s'aconsegueix un millor efecte sinusoidal si es gira 90 graus cadascun dels imants intermitjos (veure Figura 2.5). Els blocs amb el camp vertical s'anomenen imants i els que tenen el camp en direcció horitzontal, blocs.

El rendiment magnètic, depèn del quocient  $\lambda_{ID}/d$ . Es pot tenir un camp magnètic elevat, si  $\lambda_{ID}$  és suficientment alt, o bé  $d$  suficientment petita.

El camp magnètic i en conseqüència la força d'atracció, depèn directament de la distància de separació entre les dues matrius d'imants. L'expressió que segueix es veu a (Eq. 2.5)

$$B = B_0 \cdot e^{\frac{-d}{\lambda_{ID}}} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

Es defineix també  $K$  com el paràmetre de deflexió de l'ona sinusoidal, i es un paràmetre fonamental per definir els diferents tipus de  $ID$ s. Ve donat per l'equació (Eq 2.6):

$$K = 0,943 \cdot B \cdot \lambda_{ID} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

$B$  (T) és el camp magnètic màxim generat pel dispositiu. En el disseny d'un dispositiu d'inserció, el paràmetre  $\lambda_{ID}$  és escollit d'acord amb cada aplicació i queda fixat pel gruix dels imants. El paràmetre  $K$  es pot ajustar variant la distància  $d$  que separa les dues matrius d'imants. Per un valor fix de  $\lambda_{ID}$  el flux de radiació depèn només del valor de  $K$ .

### 2.3.2. Tipus de dispositiu d'inserció

Hi ha tres tipus de *dispositius d'inserció*. Aquests, es dissenyen segons les necessitats que ha de cobrir la línia de llum corresponent a l'àrea experimental. La magnitud física que defineix el tipus de  $ID$  és el paràmetre  $K$ .

- **$K > 10$**  → S'observa un **espectre de llum emesa continu** en la gràfica que relaciona el flux de fotons (fotons/s) amb l'energia (eV) (figura 2.7) El resultat de la radiació és equivalent a un seguit d'imants dipolars seguits. El  $ID$  com a dispositiu mecànic corresponent s'anomena **Wiggler** (oscil.lador).
- **$K \approx 1$**  → L'oscil·lació té una amplitud baixa, i l'angle  $\theta$  de cada ondulació (figura 2.7) coincideix amb el con d'emissió de la llum emesa. Es crea una interferència entre la llum emesa pel mateix electró a cada ondulació. S'observa un **espectre discret** en la



gràfica que relaciona el flux fotònic (fotons/s) amb l'energia (eV). El flux fotònic s'agrupa entorn de segons quines energies, i l'escombrat de les diferents energies s'obté a base de variar la distància  $d$  entre ambdós matrius d'imants, cosa que fa canviar la  $K$

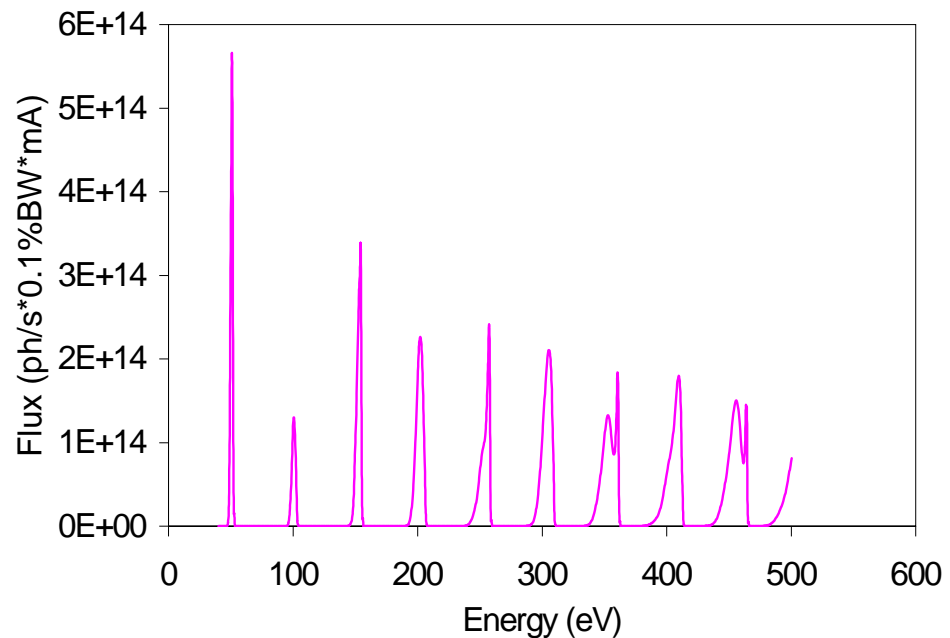


Fig. 2.7. Espectre energètic per  $K=1$

La següent Figura 2.8 mostra els diferents aspectes del ventall de flux de radiació sincrotró per un dipol, un oscil.lador i un ondulator. S'observa que en aquest últim el feix està molt més concentrat

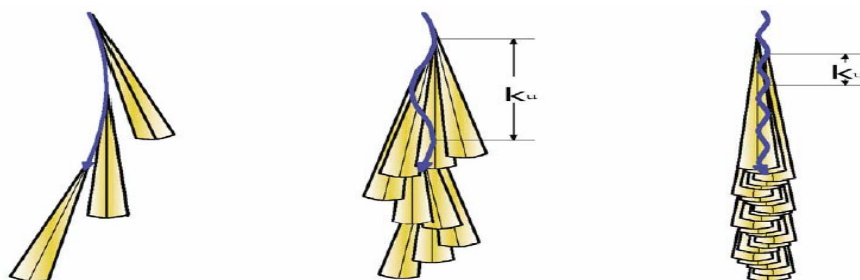


Fig. 2.8. Ventall de radiació per un dipol (esquerra) oscil.lador (mig) ondulator (dreta)



### 2.3.3. El dispositiu d'inserció com a element mecànic.

Es vol presentar i justificar l'aspecte mecànic dels dispositius d'inserció bàsics que es poden ubicar en l'anell d'emmagatzematge per obtenir llum sincrotró

#### *Oscil·lador*

No te més que dues bigues d'imants a una certa distancia fixa, per fora de la cambra de buit, en una secció recta de l'anell d'emmagatzematge.

#### *Ondulador fora de Buit*

És com un oscil·lador, però es necessita variar la distància  $d$  per tal d'escombrar les energies i trobar aquelles en que hi ha flux. La distancia  $d$  mínima entre les matrius d'imants de l'ondulador fora de buit ve determinada per el gruix de la cambra de buit de l'anell d'emmagatzematge.

D'aquest, en deriva l'*ondulador "Apple"* que és un mecanisme molt bonic que combina el moviment de quatre matrius d'imants disposades de dues en dues. El moviment relatiu entre elles i absolut respecte l'estructura provoca que els electrons descriguin una ondulació helicoidal

#### *Ondulador en Buit*

Com l'ondulador fora de buit, amb l'avantatge que les matrius d'imants, en estar situades dins de la cambra de buit, poden minimitzar al màxim la distancia  $d$ , amb un valor de  $K$  més elevat per un període  $\lambda_{ID}$  fixat. Permet obtenir radiació fotònica d'alta energia.

Per altra banda, el disseny de l'ondulador en buit, té més complicació que el de fora de buit, perquè s'ha d'aconseguir transmetre el moviment de les matrius d'imants a dins la cambra de buit, ja que la distancia  $d$  ha de poder ser variable, segons les mateixes raons que a l'ondulador "fora de buit" per obtenir la llum a l'energia desitjada.

Apart, les matrius d'imants lluiten contra una força considerable provocada per l'atracció magnètica. Aquesta força magnètica, és màxima com més petita és  $d$  i tendeix a zero a  $d$  elevada, com es pot veure a Eq. 2.5.



A la Figura 2.9, s'esquematitza els dos tipus d'ondulador.

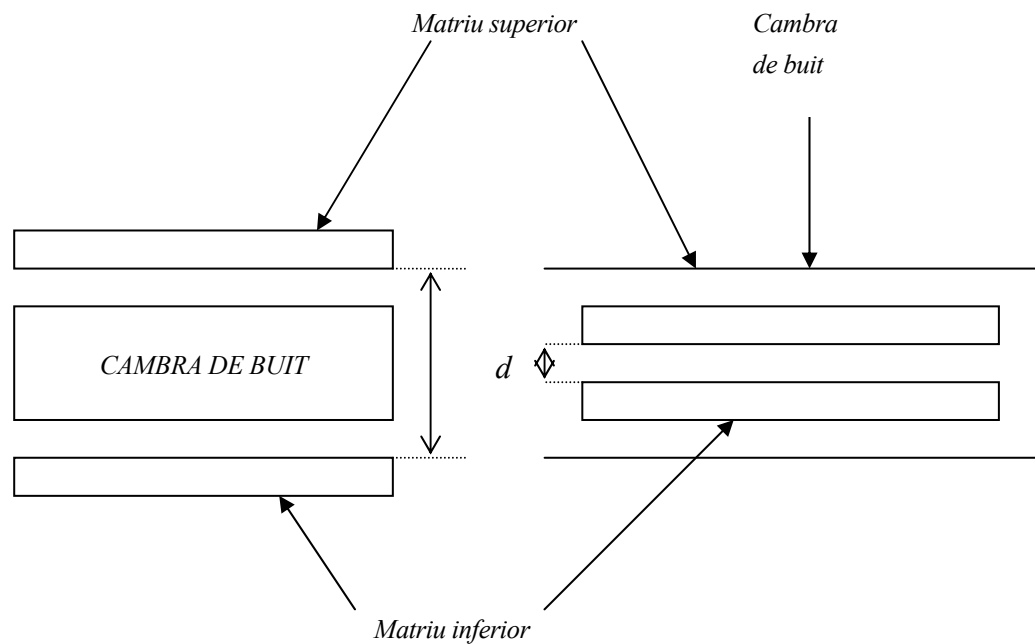


Fig. 2.9. Ondulador fora de buit (esquerra) Ondulador en buit (dreta)

Es pot classificar també els onduladors, segons el tipus de matriu d'imants. Aquests poden ser:

- **Híbrids (HYB)** Es substitueixen els imants per làmines d'un material fèrric tipus *permenur* que augmenta considerablement l'inducció magnètica. Els blocs resten igual. L'ondulació resulta amb els pics més accentuats.
- **D'imants permanents (PPM)** Tots els imants i els blocs son del mateix material magnètic.



### 2.3.4. *IDs al sincrotró ALBA. Especificacions*

L'equip de físics interactua amb l'equip d'experimentadors per decidir les prestacions que han de tenir els dispositius d'inserció. Es decideix sobre la taula:

- grandària i tipus de matriu (*HYB* o *PPM*)
- període  $\lambda_{ID}$ , factor  $K$  i material dels elements magnètics
- distància  $d$  mínima entre matrius d'imants
- La deformació màxima que es permet a les matrius d'imants, l'amplitud de moviment d'aquestes a les energies (ample de banda dels pics d'interferència de la Figura 2.7), es decideixen a partir dels tres primers punts.

L'equip d'enginyers és l'encarregat de decidir sobre la resta, interactuant amb els físics, mentre es compleixin les especificacions.

L'estratègia que se segueix a *CELLS* per definir els dispositius d'inserció que aniran instal·lats a *ALBA*, és: muntar tres *IVU* construïts "a casa", dos onduldors tipus *Apple* i un oscil·lador, externitzats mitjançant concurs a través d'un plec de condicions.

Per construir els onduldors a casa es necessita dissenyar paral·lelament un laboratori que s'ha d'equipar amb la instrumentació adequada per el muntatge i posada a punt, i un dels objectius és preparar enginyers per dissenyar, muntar i calibrar els *IDs*.

Es necessita un onduldor en buit amb les següents característiques:

- Tipus *PPM*, matriu de 2000 mm.
- Període ( $\lambda_{ID}$ ):  $T = 25$  mm.
- Distància entre matrius ( $d$ ) Ha de poder variar entre  $L_{ob,min} = 5$  mm i  $L_{ob,max} = 25$  mm amb una resolució de  $\Delta L_{ob} = 2$   $\mu$ m.
- L'eix de simetria magnètic es situa a la mateixa altura de l'òrbita nominal: 1400 mm





## 2.4. Motivació

El projectista ha estat contractat des del 12 de Juliol del 2004 per *CELLS* com a delineant/projectista mentre finalitza els estudis universitaris (*PFC*).

El Consorci per l'Elaboració i Equipament del Laboratori de Llum Sincrotró disposa d'un disseny conceptual d'un Ondulador en buit, realitzat l'any anterior. El Consorci necessita **familiaritzar personal** en el tema de *IDs*, per crear un equip d'enginyeria que treballi constantment en el disseny conceptual, detall i despeçament, encàrrec de les peces, seguiment i ensamblatge.

Un bon motiu per a que l'alumne i projectista en persona es familiaritzi amb aquest camp, és realitzar el **projecte final de carrera**, treballant sobre el disseny conceptual d'un *ID*, concretament **l'ondulador en buit**.

La **motivació principal** per la realització del disseny d'un ondulador en buit és adquirir una certa **experiència i una visió general** del disseny detallat d'una *ID*, per poder-hi treballar posteriorment, com a enginyer superior sota contracte.

**No s'utilitzen hores laborals per la realització del *PFC***, però la quantitat i la informació que es té a l'abast fàcilment és motiu suficient com per dedicar les hores requerides a emprendre aquest projecte.

Apart s'ha tingut la oportunitat de visitar la instal·lació *ESRF* (Grenoble, França), en motiu de qüestionar aspectes mecànics dels *IDs*. El resultat d'aquesta visita ha estat molt fructífer a nivell d'aprenentatge, i es pot veure en un informe realitzat pel mateix projectista i dirigit a la divisió d'enginyeria, adjuntat com a Annex E.



### 3. INTRODUCCIÓ

Un ondulator en buit es un *dispositiu d'inserció* instal·lat en l'anell d'emmagatzematge en una instal·lació circular de producció de llum sincrotró. Consta bàsicament de dues fileres d'imants suportades amb bigues disposades simètricament dins d'una cambra de buit circular.

L'avantatge principal d'instal·lar les bigues dins la cambra, es reduir la distància als imants, augmentar el camp magnètic considerablement i en conseqüència l'energia de la radiació emesa pels electrons al definir el radi de curvatura.

#### 3.1. Objectius del projecte

Disseny d'un ondulator en buit segons les especificacions citades a 2.4. L'objectiu es aconseguir una màquina molt rígida que es deformi a nivell de pocs  $\mu\text{m}$  sota carregues produïdes per l'atracció entre imants. Sota aquestes, també s'han de donar moviments d'alta resolució i precisió.

#### 3.2. Abast del projecte

Es parteix del disseny conceptual i se n'agafa el dimensionat general de les seccions de les bigues. Es realitza el despeçament de tota la màquina a un nivell detallat tenint en compte les especificacions inicials obtingudes. Es comença completant el disseny conceptual a base d'optimitzar aquestes seccions, contemplant la solució més interessant o senzilla a nivell constructiu. S'estudien els mecanismes de servo operació al detall per l'obertura entre bigues i alineament de la màquina. Es plantegen aspectes relacionats amb els circuits de refrigeració.

En la majoria d'ocasions s'escull i es discuteix el material necessari per a les peces mitjançant la bibliografia adequada i recopilació d'informació. Es planteja el procés de fabricació d'algunes de les peces i es decideixen les toleràncies sobre plànol i els acabats que han de tenir.

Es creu convenient que els plànols de peça i de conjunt han de ser els necessaris i suficients per entendre el disseny d'una màquina d'aquest tipus al complet, i amb la informació continguda en ells se'n pugui construir una màquina real. En l'elecció dels elements comercials es s'acura en el seu estudi a partir dels catàlegs. Es realitza un pressupost.



## 4. DESCRIPCIO GENERAL DE LES PARTS

Per aconseguir la ondulació d'electrons en buit es disposen **dues sèries simètriques d'imants permanents** (1) en fila muntats sobre una biga. Aquests, tenen consecutivament la direcció i el sentit del camp magnètic en diferent orientació, per que la trajectòria dels electrons sigui una sinusoide. Les dues sèries estan separades per una distància de separació variable, el mínim de la qual és de pocs mil·límetres.

Aquestes dues sèries van instal·lades dins d'una **cambra de buit** (2) cilíndrica. L'augment i la disminució de la distància de separació d'entre les sèries es dona perquè cadascuna de les **bigues internes al buit** (3) va connectada a una altra **biga externa** (4) estructural d'inèrcia més gran mitjançant uns **cilindres de connexió**.(5) Aquests, fan de nexa d'unió entre la biga interna que suporta els imants i la biga externa. Els imants, la biga interna, les barres de connexió i la biga externa amb tots els corresponents elements mecànics de fixació i lliscament necessaris i els elements de termalització formen un **subconjunt mòbil** (6). El moviment dels subconjunts mòbils és de translació i simètric respecte un pla de simetria que es troba entre les dues sèries d'imants. Se l'anomena *pla d'obertura*.

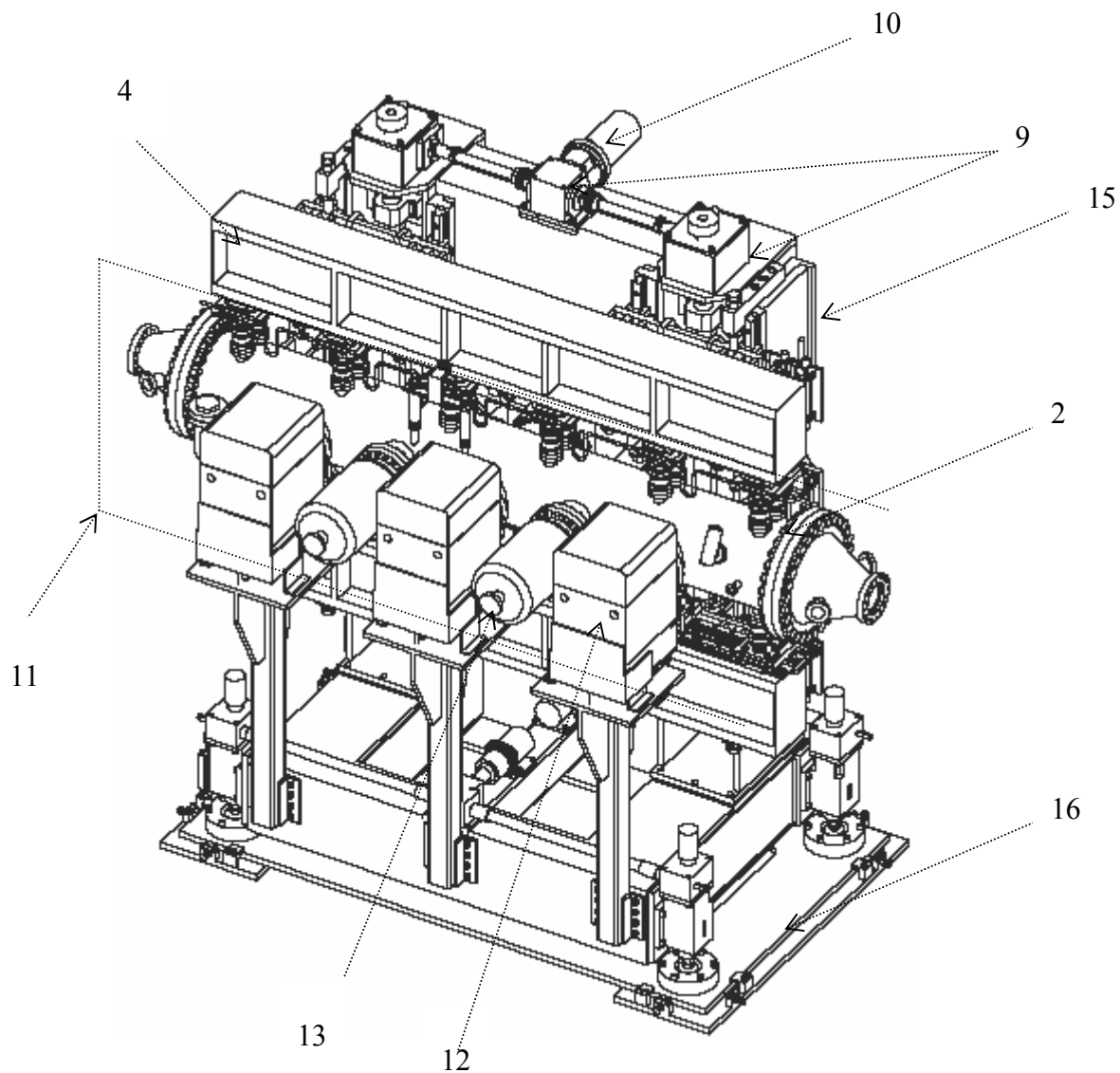
Poder augmentar la distància de simetria dels imants respecte el *pla d'obertura* es soluciona muntant els dos subconjunts mòbils, a una estructura principal mitjançant guies de **rodaments lineals**, (7) i produir el desplaçament d'aquests respecte l'estructura mitjançant un mecanisme d'obertura basat en servo operació, doncs es necessari que el moviment de les dos matrius d'imants sigui simètric respecte el *pla d'obertura* i es pugui donar en intervals molt petits. Consta de dos **fusells** (8) giratoris amb femelles fixes als subconjunts mòbils i provoca el moviment lineal d'aquests entre ells i relatiu a l'estructura. Les femelles dels fusells són solidaries a la biga externa i els fusells a l'estructura mitjançant rodaments. La velocitat de gir de cada fusell es reduïda considerablement, mitjançant **etapes de reducció** (9). Es controla tot el mecanisme mitjançant un **motor pas a pas** (10), doncs aquest és capaç d'augmentar i reduir la *distància d'obertura* en intervals de  $\mu\text{m}$ .

El **sistema de buit** (11), consta d'una cambra cilíndrica, un **sistema de bombatge**, manxes, brides i elements mecànics d'estanqueïtat, sondes i aparells de mesura. Un cop instal·lat tot el sistema és solidari a l'estructura, Les **bombes iòniques** (12) i de **sublimació de titani** (13) que proporcionen un buit d'alta pressió (*ultra-buit*) a l'interior de la cambra, Les **manxes** (14) emboliquen els cilindres de connexió i la cambra de buit. La seva funció és unir els subconjunts mòbils amb la cambra fixa, permetent el desplaçament relatiu entre ambdós



sistemes. El conjunt manxa-cilindre de connexió és el nexa d'unió entre la *zona en buit* i la zona a pressió atmosfèrica.

L'**estructura** (15) conté els subconjunts mòbils, el mecanisme que els mou i el sistema de buit, es suportada per un **banc d'alineament**.(16) La seva funció es suportar el pes d'aquesta estructura de l'ondulador en buit i alinear-lo respecte el feix de llum amb la suficient precisió mitjançant quatre gats o be un mecanisme d'excèntriques coordinades. Com es pot veure, a la Figura 4.1 es mostra el resultat obtingut en aquest disseny. L'ondulador en buit esta compost per dos sèries d'imants (no es veuen a la Figura) muntats a dins la cambra de buit uns conjunts estructurals, que formen els subconjunts mòbils, un sistema d'ultra-buit, un servo-mecanisme i tot muntat a una estructura muntada sobre un banc d'alineament que posiciona la maquina respecte tots els elements de l'*anell d'emmagatzematge*.



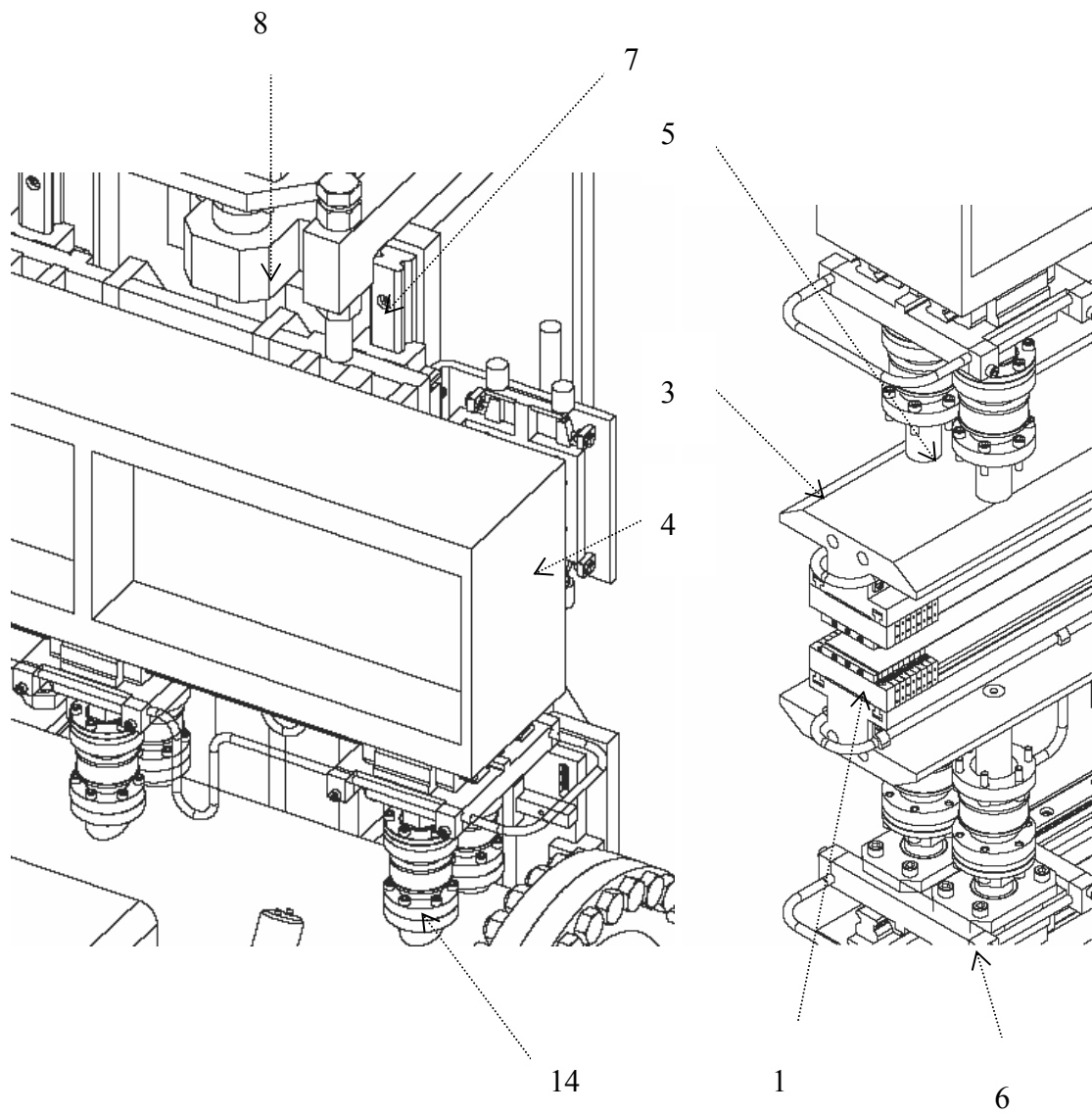


Fig. 4.1. Vistes de l'Ondulador en buit. Resultat final del disseny



## 5. DIMENSIONAT INICIAL

El disseny de l'ondulador en buit parteix d'un predisseny conceptual que forma part de material de la divisió d'enginyeria de *CELLS*. Es te com a punt de partida:

### *Dimensionat de la cambra de buit*

La cambra i l'elecció del tipus de bombatge instal·lat. Es pretén que tota la cambra de buit es pugui soldar a partir de tub normalitzat i brides de compra. Es càlculs tèrmics per a que la posada apunt de la cambra i la instal·lació dels bescanviadors de calor sigui viable.

### *Dimensionat de la biga interna.*

Aquesta ve donada pel tamany del bloc magnètic, el diàmetre interior de la cambra de buit i la distancia d'obertura màxima que es vol tenir: El diàmetre interior de la cambra de buit, l'altura del bloc magnètic, l'altura del contenidor i la distancia d'obertura son 4 variables relacionades entre elles, com es pot veure a la Figura 5.1.

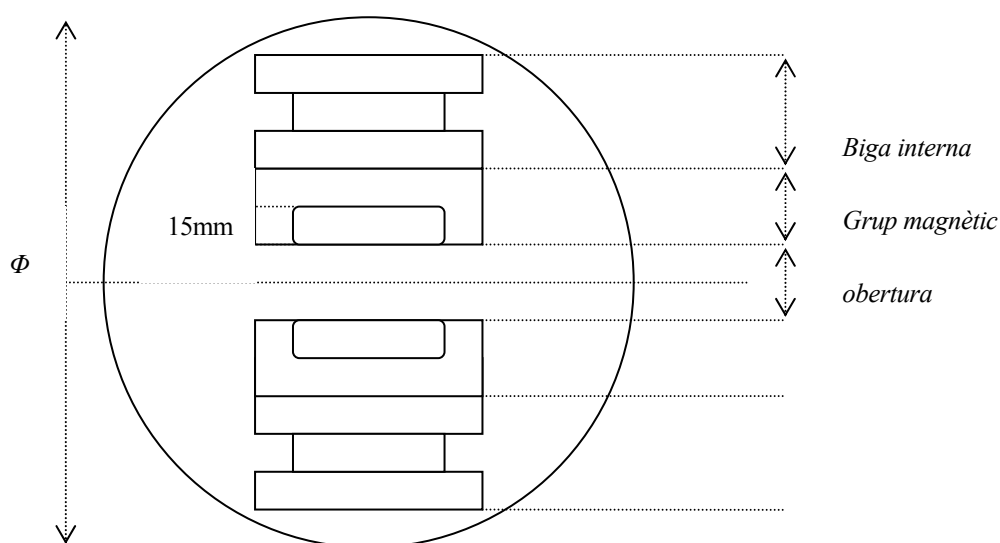


Fig. 5.1. Dimensionat inicial



Per una obertura màxima de 25 mm i un imant de 15 mm d'altura s'ha apostat per el diàmetre interior de cambra de buit que dona una brida comercial de 270 mm de diàmetre. El tub que forma el cos de la cambra també podrà ser comercial, sense necessitat de doblegar una llauna i soldar-la. Amb aquestes condicions, es té que la dimensió màxima que pot tenir la biga interna i el grup magnètic ha d'ésser inferior a 90 mm.

### ***Dimensionat de la biga externa***

De longitud similar a la biga interna. Per un disseny compacte, es vol que la biga externa tingui la secció mes petita possible, sempre i quan compleixi amb les deformacions permeses en la distancia entre els imants i el pla d'obertura. La secció més adient serà del tipus H, però com es veurà, no pot ser un perfil normalitzat, doncs s'ha de tenir una estructura super-rígida.

### ***Espai vital***

L'espai que ocupa l'ondulador, horitzontalment ve donat per la longitud de la matriu d'imants. Essent aquesta de 2000 mm, determinarà la longitud de la cambra de buit. Es deixa un espai a cada banda de 250 mm per els cons extrems i els elements que connecten la cambra de buit amb els altres cambres de *l'anell d'emmagatzematge*. Es necessita una longitud de 2500 mm d'espai entre les cambres de buit de l'anell per instal.lar l'ondulador

Verticalment, ve donat per la distancia de l'òrbita que segueixen els electrons amb el terra. Aquesta és de 1400 mm. A partir del *pla d'obertura* situat a aquesta distancia del terra, l'ondulador creixerà en direcció vertical. No hi ha cap altre límit físic que el sostre del túnel de l'accelerador.



## 6. SUBCONJUNT MOBILS

El disseny de l'ondulador comença en el disseny del subconjunt mòbil, encarregat de suportar la matriu d'imants i que es pugui desplaçar dins de la cambra de buit. Aquest ha de ser el suficientment rígid per a que es deformi sota tolerància quan la força magnètica hi es aplicada.

### 6.1. Deformacions permeses

#### 6.1.1. Variació màxima permesa en la distància de separació entre les bigues.

L'elevada força magnètica d'atracció que actua entre les dos bigues internes que suporten les fileres d'imants fa que aquestes deformin a curvatura, i com a conseqüència, ajuda a que la distància entre les bigues internes variï al llarg de la longitud d'aquestes. Suposant que tot el sistema d'imants està ajustat a la seva posició corresponent, aquesta deformació "extra", causa una variació del camp magnètic. Es permet una deformació fins un cert valor.

Cal assegurar que a nivell de disseny, aquesta variació ha estat reduïda fins a un marge permès.

La variació permesa de la distància d'obertura depèn del tipus de matriu d'imants (*PPM* o *HYB*, veure apartat 2.3.3) Es presenten valors màxims permesos per dos tipus de *IVU* com a especificacions per part de l'equip de físics. També la força magnètica per unitat de longitud de la biga.

- Per un *IVU-PPM*, la variació màxima és de 75  $\mu\text{m}$
- Per un *IVU-HYB*, la variació màxima és de 40  $\mu\text{m}$
- Força que actua a la biga interna amb direcció vertical descendent: 9  $\text{kN/m}^2$  en el pitjor dels casos (mínima distància d'obertura)

S'agafa el valor més petit, per tenir un disseny on es pugui instal·lar qualsevol dels dos tipus de matrius d'imants (*PPM* o *HYB*). **40  $\mu\text{m}$  és el total permès** en variació en la distància entre bigues i es "separa" de la següent manera:

- Es permet una variació de la distància entre bigues de 30  $\mu\text{m}$  per la fabricació i muntatge d'aquestes.





- *Condicció de deformació:* Es permet una variació  $\leq 10 \mu\text{m}$  per la màxima fletxa de la biga interna sol·licitada amb els apoïaments corresponents (cilindres de connexió). A la figura 6.1 s'esquematitza la condició de deformació

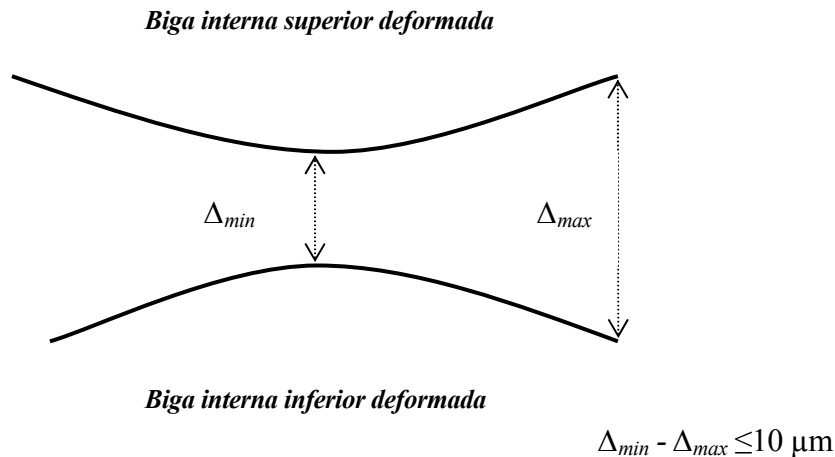


Fig. 6.1. Esquema de condició de deformació

### 6.1.2. Deformació angular permesa

Cadascun dels subconjunts mòbils ha d'estar suportat a l'estructura en un punt d'apoïament situat a una distància  $l$  (braç) del punt d'aplicació de la força magnètica. En aquest punt, s'hi crea un parell que deformarà en part tot el subconjunt mòbil respecte el pla d'obertura. S'esquematitza a la figura 6.2

L'angle  $\varphi$  format entre la matriu d'imants sol·licitada i el pla d'obertura (veure plànol **PFC-C00**) S'ha de complir que aquest angle sigui menor a 0,1 mrad per un funcionament òptim de l'IVU. És important tenir en compte i com s'explicarà més endavant, que la deformació del subconjunt mòbil influeix en part a aquesta deformació angular, doncs també hi intervé la deformació en els patins, i la de l'estructura principal.

$$\varphi = \varphi_{sub} + \varphi_{2pat} + \varphi_{est} \leq 0,1 \text{ mrad} \quad (\text{Eq. 6.1})$$



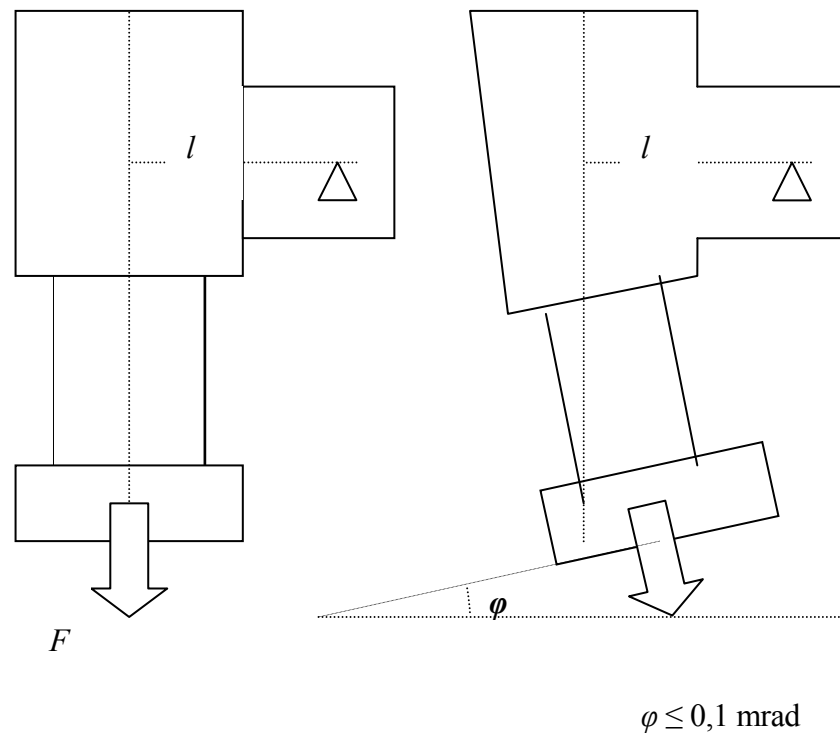


Fig. 6.2. Deformació angular permesa

## 6.2. El model 1D. Optimització de la geometria.

En aquest apartat, s'explica breument el procediment que s'ha seguit per realitzar la optimització de les coordenades de la graella formada per la biga externa, la biga interna i els cilindres de connexió.

Per analitzar la rigidesa del sistema, s'ha desenvolupat un model d'elements finits (*FEM*) amb el *software* de disseny *I-DEAS*. Com que l'estructura que forma el *subconjunt mòbil* (biga interna, biga externa i cilindres de connexió) es simètrica en pla horitzontal (pla d'obertura), es tindran en compte sols les deformacions una meitat d'un subconjunt mòbil. A l'annex A "càlculs" s'explica detalladament les simulacions realitzades. S'han estudiat dos casos:

- Biga interna i externa d'acer amb baix contingut de carboni. La condició de deformació es compleix amb 5 cilindres de connexió.



- Biga interna d'alumini i l'externa d'acer amb baix carboni. La condició de deformació es compleix per 6 cilindres de connexió. Aquesta serà la solució amb la que es procedirà .

### 6.2.1. Model amb 5 cilindres de connexió i biga interna d'acer

La fletxa de la biga interna depèn de quina és la posició dels cilindres de connexió i els punts on van les femelles dels fusells. A partir d'unes seccions de partida determinades per la biga interna i la biga externa, i les condicions de contorn exposades a l'apartat anterior, a partir de varies iteracions la posició òptima dels 5 cilindres i les femelles es veu a l'annex A "càlculs" (Figura A.2, pag. 7) i correspon a la distribució on la fletxa màxima de deformació és mínima.

Respecte els resultats obtinguts al executar el model *FEM*, s'arriba a una variació total de la distancia entre bigues d'uns **10  $\mu\text{m}$** . A pag. 8 de l'annex A es veu com la fletxa mínima es dona a la vora del punt on va la femella, i la màxima entremig dels cilindres.

### 6.2.2. Model amb 6 cilindres de connexió i biga interna d'alumini.

El model anterior, es vàlid per al disseny. Tot i així, s'ha considerat més interessant que la biga interna sigui d'alumini pels següents motius:

- L'alumini es un material no magnètic. Apart, actua be com a dissipador de calor i ajudarà a tenir els imants refrigerats durant el procés de calentament de la cambra de buit.
- Si els cilindres de connexió interns estan directament connectats a la biga interna, hi ha risc de soldadura freda si ambdós son d'acer.

L'únic inconvenient que té l'ús de l'alumini es que el seu mòdul elàstic és considerablement més petit que el de l'acer al baix carboni. Per això que s'ha vist convenient d'entrada en plantejar la graella amb un cilindre de connexió intern de més.

Amb l'ultima secció provada pel model anterior, es fa córrer la simulació i s'arriba a un valor de variació de la distancia d'uns **8  $\mu\text{m}$** . per tota l'estructura com es pot contemplar a la pag. 10 de l'annex A. La fletxa màxima, ara es dona a la punta del voladiu, i la mínima molt a prop del cilindre més proper a la femella. A partir d'aquí tots els assaigs s'han realitzat a partir d'aquesta configuració.



S'ha observat com afecta el pes propi a la deformació del subconjunt mòbil superior. Els efectes d'aquest, són el desplaçament del *pla d'obertura* en sentit descendent.

### 6.3. El model 3D

Els càlculs realitzats fins ara, estan basats en la modelització de l'estructura del subconjunt mòbil com una graella d'elements finits 1D, aptes per a un dimensionat inicial, i implica uns certs aspectes que per ara no s'han tingut en compte:

- En els models 1D, es representen les femelles dels fusells com un acoblament al mateix pla de deformació, però respecte el parell creat per la força a la aplicada biga interna i el braç  $l$ , no se n'avaluen les conseqüències. En el model 3D es podrà avaluar part de la deformació angular que trenca el paral·lelisme entre el pla de la biga interna i el pla d'obertura.
- El carro que uneix els subconjunts mòbils i l'estructura no és infinitament rígid. La deformació d'aquest s'ha de considerar, doncs contribuirà especialment en la deformació angular, i també amb la variació de la distància entre bigues.
- Com es pot veure a l'annex A "càlculs", pag 12 s'ha dissenyat una aproximació en 3D **de la meitat** dels elements estructurals del subconjunt mòbil, a partir de les seccions ja trobades, els materials definits, la distribució òptima i dels valors decidits en el dimensionat 1D. S'ha tingut en compte en el disseny, que el braç  $l$  fos mínim. Els cilindres de connexió són barres simples de 30 mm de diàmetre.

Es comprova que el dimensionat és vàlid de moment. Es pot veure a les pag.13-14 de l'annex A que la variació de la distància entre bigues internes és d'uns **9  $\mu\text{m}$** . Respecte la condició de deformació angular permesa, la component  $\varphi_{sub}$  s'estima de **0,03 mrad** i correspon a la deformació angular lateral dels imants considerant que el pla de la femella és fix i contribuirà en la deformació angular total segons (Eq. 6.1).



## 6.4. El subconjunt mòbil peça a peça.

### 6.4.1. Conjunt biga interna

#### *El grup magnètic: imant i el seu contenidors*

Existeixen dues alternatives per escollir el material per la fabricació dels imants per l'ondulador. Per una banda, el  $NdFeB$  amb un camp magnètic romanent de  $B_r=1,35$  T, no te tanta resistència a la radiació i a l'alta temperatura com el  $Sm_2Co_{17}$ . Per altra banda en aquest últim, el camp magnètic romanent és més baix, amb un valor de  $B_r=1,03$  T. Aquesta diferencia de camp, equival a efectes pràctics a un mil·límetre menys en la distància d'obertura. (Eq. 2.6) Els imants per aquest ondulador estaran fabricats a partir de sinteritzat de  $Sm_2Co_{17}$  recobert de titani, per eliminar les porositats característiques del procés de fabricació. El període magnètic en mm ve donat per les especificacions, i aquest és de  $T=25$  mm.

Cal un gruix per imant de 6,25 mm. En aquest disseny, es convenient deixar una llum suficient entre imant e imant per assegurar el muntatge correcte dels contenidors i ajudar a realitzar el buit a tots els intersticis mecànics de l'ensamblatge de la biga interna (es veu al plànol **PFC-CA0**). El gruix del grup format per l'imant i els accessoris per el seu ajust (contenedor i grapes), serà de 6 mm deixant 0,25 mm de llum entre dos grups consecutius.

Els **suports contenidors**, (veure plànol **PFC-CA2**) es dissenyen una geometria completament funcional, doncs son un element crític de l'IVU. Aquests tenen la funció de suportar l'imant, actuar com a element dissipador de calor i ajustar el camp magnètic en la direcció de l'imant. Per això són els forats travessers al contenidor, en la mateixa direcció que la del camp magnètic de l'imant que hi ha d'anar muntat. Es distingeix així (plànol **PFC-CA0**) el *contenedor-H* i el *contenedor-V* doncs el camp s'ajusta mitjançant pastilles cilíndriques de material magnètic, en el calibratge com es veurà més endavant.

Les **grapes de centrat** (veure plànol **PFC-CA3**) fixen l'imant al contenidor i el centren. El material per la fabricació del grup de suport magnètic (contenedor i grapes) ha d'ésser un dissipador de calor excel·lent, doncs com es veurà més endavant, aquests estan sotmesos a càrregues tèrmiques importants, i a partir de certes temperatures l'imant perd les seves propietats.

Tant les grapes com els suports contenidors es fabriquen amb Coure lliure d'oxigen (*Cu-FRHC*, *UNE C-1100*) per que es un material amb una altíssima conductivitat tèrmica, i d'adquisició relativament fàcil.



La funcionalitat dels forats petits travessers i l'exagerada amplària de les llums és per ajudar a disminuir el fenomen d'aparició de gas provenint dels intersticis mecànics quan s'arriba al buit extrem.

L'imant queda centrat respecte el seu suport contenidor. Es mecanitzen els carrils "T" la llum dels quals també és necessària per assegurar el contacte entre de les dos superfícies. Permeten el centrat horitzontal respecte la biga i a la vegada absorbeixen també part de l'esforç vertical creat per la força d'atracció magnètica. El carril "T" ajusta les distàncies de separació entre els grups magnètics o **períodes** en intervals de 25 mm. (plànol **PFC-CA0**)

### ***Biga interna***

A partir de la secció decidida, es mecanitza com està indicat al plànol **PFC-CA1** sobre un bloc d'alumini *UNE L-3140* [Riba, 1998b, p18] . Per collar dels cilindres de connexió interns, hi ha una entrada cilíndrica que predomina sobre el roscat. Aquesta assegura el centrat i la perpendicularitat d'aquests. La biga, no és d'una fabricació complicada, doncs l'alumini es mecanitza molt bé a nivell de toleràncies molt reduïdes.

### ***Conjunt***

Els 320 ensamblatges van muntats sobre la biga interna. Per les puntes, s'ha dissenyat una tapa amb el perfil de l'ensamblatge sencer, la missió de la qual es fixar a les dos puntes una cinta de Cupro-Níquel (*UNE C-9215*) que tapa tot el conjunt magnètic, i permet la conducció del corrent altern. Ha de ser el suficientment gruixuda per protegir els imants de l'efecte *skin*.

Al voltant de la biga interna, hi va un serpentí de coure *UNE L-6820* la funció del qual es mantenir refrigerats els imants sota una temperatura de 120°C. (s'explica més endavant) Aquest, es colla mitjançant grapes. Tots els cargols de dins la cambra de buit estan recoberts d'un platejat de 5 µm de gruix, per segellar les possibles porositats que puguin tenir.

A la figura 6.3, s'aprecia el detall del perfil de muntatge dels contenidors aquests a la biga interna a l'*IVU* de la *Swiss Light Source*. Noti's la llum existent entre les unitats, la cinta de Cu-Ni (part superior de la foto) i el serpentí de refrigeració.



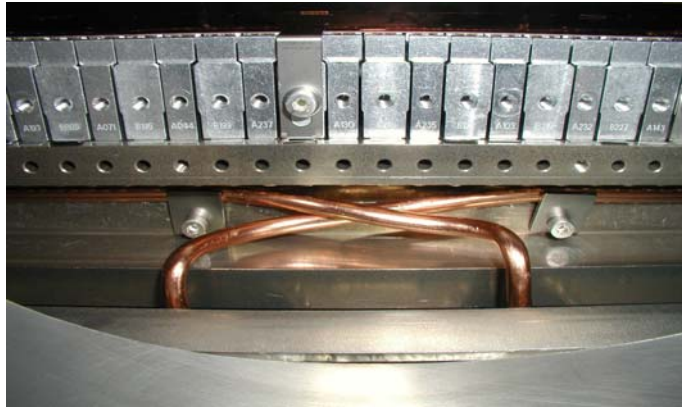


Fig. 6.3. Ensamblatge biga interna a SLS

Es necessari que totes les peces que van dins al buit, no tinguin defectes superficials, i estiguin recobertes amb una pel·lícula de material segellant aquelles que presenten mes porositats (imants sinteritzats, cargols, etc.). **Fer net a totes les superfícies un cop mecanitzades ha de formar part del plec d'especificacions per la fabricació de les peces del plànol *PFC-CA0*.**

#### 6.4.2. Connexió de la regió en buit amb l'exterior.

Es l'encarregat de connectar els elements de l'exterior de la cambra de buit amb l'interior, i transmetre'n el moviment. Esta format principalment per dos cossos, l'intern al buit i l'extern, collats entre ells mitjançant una unió cargolada.

El cilindre de connexió intern es mecanitza com indica al plànol *PFC-C20*. L'entrada hexagonal es normalitzada per clau plana. El cilindre de connexió extern (plànol *PFC-C30*) rosca amb l'intern (també s'hi observa l'entrada per clau plana) i la seva funció es assegurar el contacte superficial amb la peça de connexió superior, on van aguantats a pressió mitjançant una grapa que els fixa amb parelles. En aquest ensamblatge, s'hi deixa una llum per assegurar l'apretament entre el cilindre de connexió extern amb la peça de connexió superior.

Ambdós es mecanitzen amb acer de bonificació (*UNE F-1250*) i els roscats son fins. Les toleràncies geomètriques han d'assegurar fins aquí el paral·lelisme entre el pla inferior de la biga interna i el pla superior del cilindre de connexió extern. La secció de l'ensamblatge es pot veure al plànol *PFC-C00*

El cilindre de connexió extern, porta soldat amb *TIG* una brida rotativa *CF40DN* preparada per aplicacions d'ultra-buit on s'hi cargola la manxa. Aquesta delimita la zona de dins del buit



amb la de fora i es solda a muntatge, perquè abans s'ha de passar la grapa que el colla a les plates de connexió. Aquestes tipus de brida, té una entalla mecanitzada on s'hi situa una junta de coure que després de l'apretament queda completament hermètica.

El serpentí exterior refrigera els cilindres de connexió en cas que sigui necessari quan hi ha altes temperatures dins la cambra de buit.

### 6.4.3. Biga externa

Amb secció de tipus H decidida anteriorment, aquesta es fa a partir de peces d'acer d'ús general amb baix contingut de carboni *UNE-S235* doncs es necessita un acer barat amb alta capacitat per a ser soldat [Riba, 1998a, p86]

S'hi ha afegit carteles als punts on s'ha previst màxima deformació a partir del model *FEM*, i també als carros, tres per cada conjunt de patins (veure plànols *PFC-C00* i *PFC-C10*). Tenir una estructura extremadament rígida n'és l'objectiu. Existeix la possibilitat de que la H fos de perfil normalitzat, (*HEB* o bé *IPN*) però es necessitaria un perfil de grans dimensions per igualar el moment d'inèrcia que ofereix l'actual.

Respecte les soldadures de les carteles dels carros, son factibles de fer tot i semblar el contrari a primera vista, doncs s'ha exposat la situació prèviament a un experimentat cap de taller. El procés de fabricació es tractaria en soldar tota l'estructura amb un posterior relaxat de tensions. Constarà en recalentar [Niemann, 1981, p.114] l'estructura soldada durant varies hores entre 400 i 500°C i deixar-la refredar durant dies seguits per eliminar tensions internes de soldadura. Posteriorment, es realitzarien els mecanitzats i es tornaria a fer un relaxat de tensions superficials post-mecanitzat.

El zincat galvànic [Riba, 1998a, p.52] sobre els mecanitzats es realitza per protegir les superfícies de la corrosió. Ja es conta el seu gruix en els valors de les toleràncies.

Les toleràncies geomètriques asseguren el paral·lelisme entre la superfície on es colla la femella del fusell i la superfície on van els rails que connecten amb els cilindres, i la perpendicularitat amb les superfícies on es collen els patins a l'estructura. Com es pot veure amb les toleràncies, s'ha d'assegurar un posicionat molt precís de les matrius d'imants.

La biga externa va connectada amb els parells de cilindres mitjançant un sistema de patins *IKO LRX 25* que s'han elegit precarregats per assegurar precisió matant tot tipus de joc. El motiu d'aquests patins es permetre a la biga interna i als cilindres de connexió el desplaçament longitudinal. Així es permet la dilatació de la biga interna quan està sotmesa a altes





temperatures sense deformar els elements estructurals. Es restringeix al punt mig (veure plànol *PFC-C00*) perquè aquesta elongació sigui simètrica en ambdós meitats.

Totes les unions cargolades dels subconjunt mòbil son de tipus *allen* (*CHC NF E 27-161*) sense cap unió crítica a destacar.

## 6.5. Sol.licitació sobre el subconjunt mòbil.

En aquest punt del disseny on alguns dels elements ja estan presentats és interessant el càlcul de la força total que actua sobre el subconjunt mòbil doncs a partir d'ara importa saber aquest valor per continuar amb el disseny.

El diagrama de forces està representat a l'annex A "càlculs" a la Figura A.7 pag 16 on s'arriba a la conclusió, que les forces que actuen sobre un subconjunt mòbil depèn bàsicament de  $F_{mag}$  (la força produïda per l'atracció magnètica entre les barres),  $F_{buit}$  (la força que exerceix la depressió del buit sobre les brides rotatives dels cilindres de connexió) i  $P$ , el pes de tot el subconjunt, que independentment de si es el subconjunt superior o inferior, sempre actuarà en la mateixa direcció. (veure Figura 6.4).

Aquesta força es calcula per obertura mínima (5mm) que és quan la component predominant  $F_{mag}$  és màxima. A mesura que incrementa l'obertura aquesta decreix considerablement. Es dissenyarà per  $F_T$  en el seu valor és màxim de 25 kN.



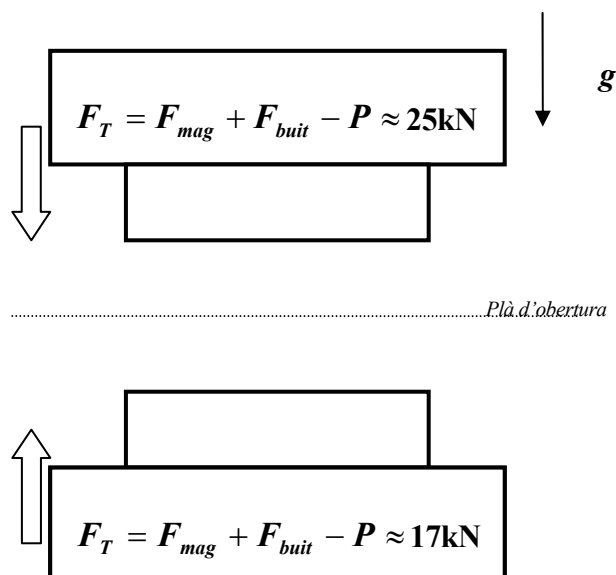


Fig. 6.4. Sol·licitació als subconjunts mòbils

## 6.6. Patins a deformació

Una de les peces més crítiques de l'ondulador en buit són els patins que permeten el moviment vertical dels subconjunts mòbils respecte l'estructura principal. Es coneixen casos d'altres instal·lacions on aquests patins han acabat trencat o agafant massa joc, per un ajustat dimensionat inicial.

S'elegeixen uns patins on el moviment es doni mitjançant rodadura, i podent escollir entre patins de boles i de corrons, s'agafen de corrons, doncs per el mateix tamany:

- Més rigidesa perquè els corrons es deformen menys que les boles.
- Més capacitat de càrrega, perquè els corrons tenen una àrea de contacte molt més gran que les boles.



- Més precisió gràcies a la capacitat d'alta precàrrega que permet l'apretament dels corrons a les guies.

Els patins, son els encarregats d'absorbir el parell  $T_T$  que crea  $F_T$  degut al braç  $l$ . No es realitzarà cap càlcul per escollir aquests patins, però si que es tindrà en compte la seva deformació un cop escollits perquè aquesta contribuirà també a trencar el paral·lelisme entre els imants i el pla d'obertura.

Els **IKO LRX 35** son adequats a nivell de dimensionat i compleixen de sobres amb el parell admissible sota factor de seguretat. S'agafen de mida estàndard. Se'n muntaran dos a cada guia amb una separació petita entre ells.

Tindran precàrrega màxima (aquesta es considera per el càlcul de la resistència al lliscament: veure annex A "càlculs") per eliminar al màxim el possible joc en el moviment, i un paral·lelisme de  $\pm 0,01\text{mm}$  entre la cara superior del pati i la inferior del rail. Correspon a patins de *Super-precisió* en el catàleg *IKO*. Es reb el pressupost.

Es suposa a nivell de disseny que el pati absorbeix tot el parell aplicat ( $T_{2pat} = 1,25 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ) a cadascuna de les unitats, responent amb una deformació  $\phi_{2pat}$  que es dona a la unitat de dos patins de **0,047 mrad**. S'ha calculat a l'annex A "càlculs" i contribuirà a la deformació angular segons (Eq 6.1)



## 7. MECANISME D'OBERTURA

### 7.1. Descripció, funcionalitat i característiques

La funció d'aquest servo mecanisme és obrir i tancar la distància d'obertura  $L_{ob}$  per tal de modificar el camp magnètic que actua sobre el feix d'electrons i ajustar així l'energia a la que s'emet radiació sincrotró (veure apartat 2.3) Al plànol *PFC-BOO* es troben els elements escollits. La simbolització d'aquest es veu a la Figura 7.1

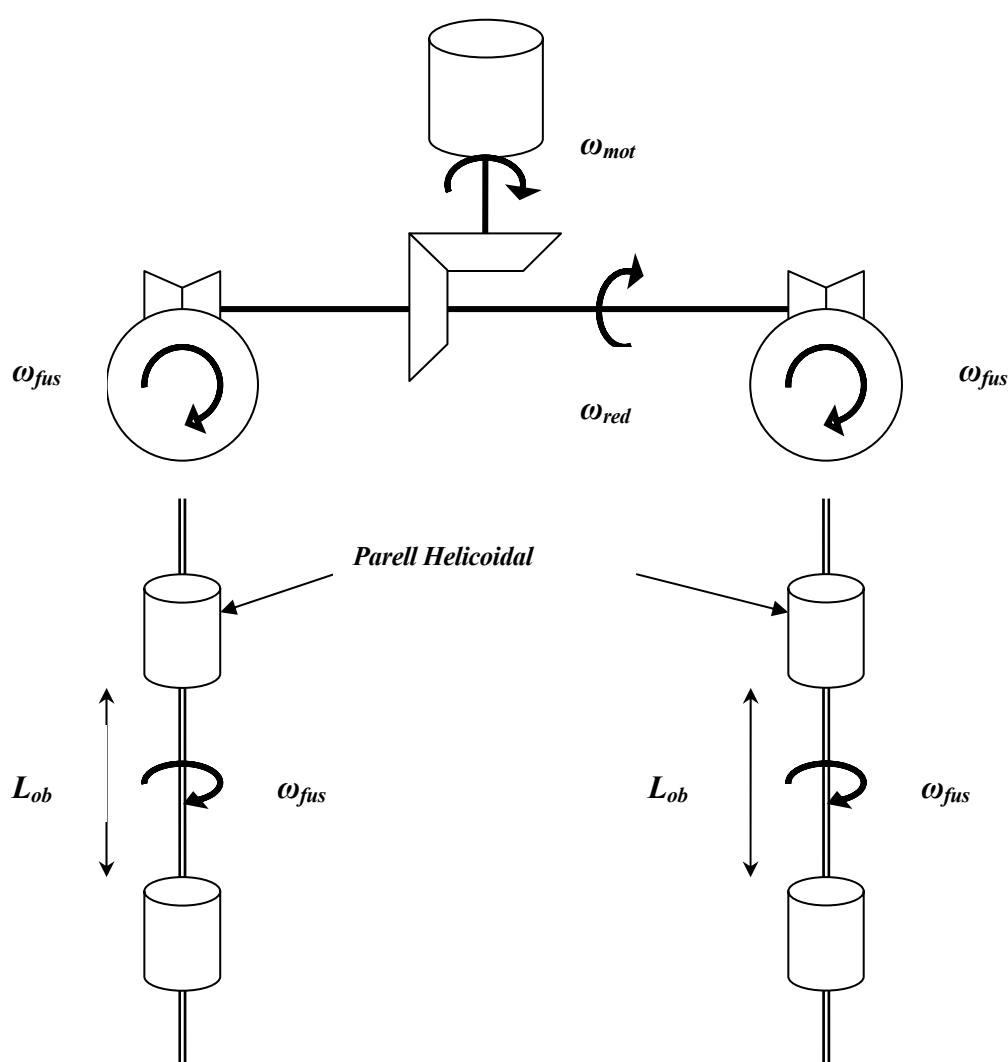


Fig. 7.1. Simbolització del mecanisme d'obertura



### 7.1.1. Descripció. Graus de llibertat i coordenades independents

El gir discret del motor pas a pas es desdobra amb un reenviament d'angle i es transmet als dos fusells mitjançant dos reductors vis sens fi. La rotació es converteix en un moviment longitudinal gràcies als fusells solidaris als subconjunts mòbils. Així es permet una obertura i tancament  $L_{ob}$  respecte un pla de simetria sempre fix anomenat *pla d'obertura*. (dibuixat al plànol **PFC-C00**) Els codificadors angulars o *encoders* s'instal·len de tal manera que es mesura la rotació de cada fusell. La solució que s'adopta en aquest cas és molt comú en dispositius d'inserció construïts actualment per a diversos sincrotrons. (veure annex B “mecanisme”)

Es tracta d'un mecanisme *d'un grau de llibertat*, doncs per inspecció directa [Cardona i Clos, 2000, p.38-42] s'observa que si s'atura qualsevol dels eixos de gir que el formen, el mecanisme queda bloquejat. També per inspecció directa observem que el mecanisme té una sola *coordenada independent*, que és  $L_{ob}$ .

Aquest mecanisme presenta una *redundància total*, doncs s'utilitzen dos fusells per obtenir la coordenada  $L_{ob}$  i amb un seria suficient. Es justifica aquesta redundància perquè es necessiten dos fusells per repartir simètricament els esforços que s'apliquen als dos subconjunts durant el moviment

En aquest cas, els subconjunts mòbils i femelles fan la funció de receptor i el motor és l'element motriu. El mecanisme es dissenya per a que compleixi els requeriments necessaris, com la velocitat de moviment i la resolució en la qual s'ha de donar, i ser irreversible vers la força que actua sobre els subconjunts mòbils.

### 7.1.2. Especificacions bàsiques.

Els criteris que es segueixen es basen en les especificacions del mecanisme d'obertura. Sense cap ordre de prioritat són els següents:

#### ***Obertura màxima i mínima.***

La distància d'obertura màxima i mínima així com la ubicació del pla d'obertura s'observa a la Figura 4.2 és de  $L_{ob,max} = 25$  mm i la mínima de  $L_{ob,min} = 5$  mm.



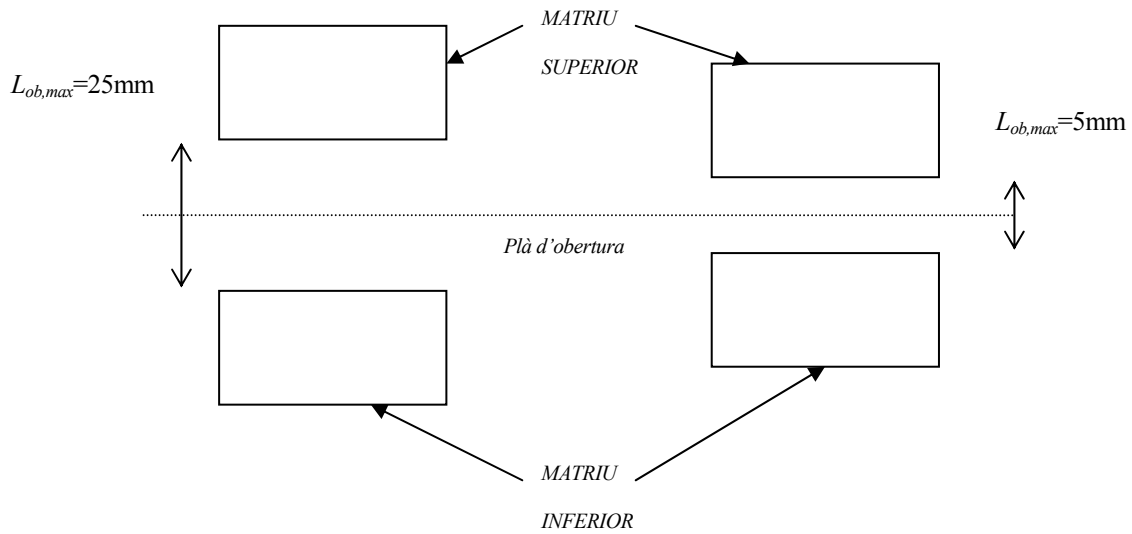


Fig. 7.2. Obertura màxima i mínima

### **Increment d'obertura mínim**

S'han de poder donar variacions d'obertura entre imants d'uns **2  $\mu\text{m}$** .

Ambdós especificacions anteriors, (resolució i obertura màxima i mínima) son dades que decideixen l'equip de físics de *IDs* juntament amb el grup de físics experimentals, els clients interns a qui va dirigit l'ondulador en buit. A partir d'aquí, les especificacions següents son imposades per el projectista per a que el disseny compleixi amb les anteriors.

### **Resolució**

La resolució és el mínim canvi de la entrada que es pot observar a la sortida. Com a sistema de control, l'entrada es la posició angular del motor i la sortida l'increment en la distància d'obertura  $\Delta L_{ob}$ .

Per complir amb el mínim increment d'obertura necessitat, es necessita un desplaçament de  $1\mu\text{m}$  per cada subconjunt mòbil. El sistema de control ha de ser capaç de detectar aquesta variació.

- **Resolució possible:**  $\Delta L_{ob,POS}$  ( $\mu\text{m/pas}$ ) la mínima obertura que el mecanisme és capaç de proporcionar



- **Resolució desitjada:**  $\Delta L_{ob,MIN} = 2 \mu\text{m}$  → El valor d'obertura que es necessita detectar com a mínim, apart de considerar en el procés de calibratge la repetitivitat. El mecanisme ha d'ésser capaç de donar-ho i el sistema de control de detectar-ho.

**Durant el disseny:**  $\Delta L_{ob,POS} \leq \Delta L_{ob,MIN}$

### ***Precisió.***

La cadena cinemàtica ha de tenir joc zero. Sempre quedarà matat per la força que s'aplica als subconjunts mòbils, i es tracta de reduir-lo al mínim possible i per igual en ambdós desdoblaments, s'ha d'assegurar la mateixa posició en ambdós fusells. Per tant a l'hora d'elegir acoblaments, ajusts i etapes de reducció s'ha de tenir principalment en compte aquest requisit.

### ***Irreversibilitat.***

El mecanisme ha de poder donar el moviment amb la precisió màxima i la resolució indicada, i en cap moment es pot permetre que la sol.licitació que actua sobre les bigues faci cedir la cadena cinemàtica, ja sigui en funcionament o be parat.

### ***Velocitat de moviment***

Considerant aquest un moviment lineal (tot i ser discret, ja que es dona a partir dels passos del motor) la màxima velocitat de moviment lineal màxima dels subconjunts serà de **1 mm/s**, així s'assegura una acceleració i desacceleració suau en un temps petit quan els subconjunts mòbils comencen a moure's o be arriben als seus extrems de moviment

### **7.1.3. Funcionament**

La característica que presenta aquest mecanisme es que sol està en moviment quan es necessita passar d'una posició d'obertura a una altra, i això es pot donar amb una periodicitat de dies, depenent dels requisits de l'experiment. Mentrestant, el mecanisme, romandrà en una única posició i en repòs.

- Per fer canvis petits de la distància d'obertura, no es necessita arribar a la velocitat màxima de funcionament.
- Es poden realitzar escombrats des de  $L_{ob,max}$  a  $L_{ob,min}$  o viceversa. Llavors si que s'assoleix la velocitat màxima de 1 mm/s,



## 7.2. Cadena cinemàtica, paràmetres.

La cadena cinemàtica que descriu aquest mecanisme es pot representar tal com està indicat a la Figura 7.3 S'indica els paràmetres de moviment que aniran apareixent en aquest apartat.

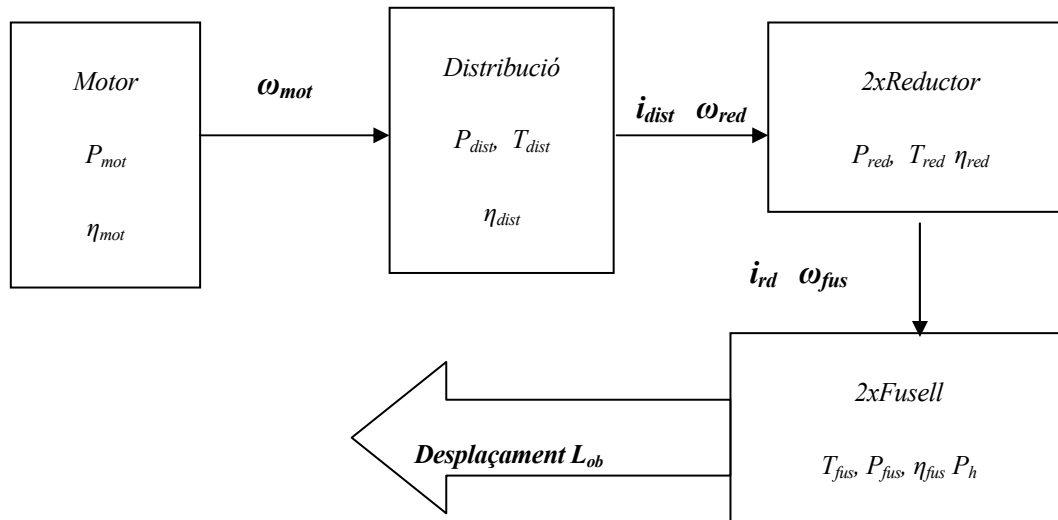


Fig. 7.3. Obertura màxima i mínima

En el següent apartat es van escollint els elements mecànics que formen el mecanisme a la vegada que es va desenvolupant la cadena cinemàtica. Per això, s'ha desenvolupat una fulla de càlcul en la que es relacionen tots els paràmetres indicats anteriorment El desenvolupament d'aquests càlculs també es troba al mateix annex A "càlculs".

Els paràmetres que s'entren a aquest full són els característics de cada element i s'agafen dels catàlegs, com les eficiències, les relacions de reducció, pas de rosca... L'ús del full de càlcul complet permet dissenyar la cadena cinemàtica per tempteig i d'una forma efectiva i ràpida

El mecanisme ha d'ésser capaç de transmetre una força de 25 kN a cada un dels subconjunts mòbils. La velocitat màxima de 1 mm/s i el recorregut de cada subconjunt 10 mm. Es permet passar de la posició d'obertura màxima a la d'obertura mínima o viceversa en 10 s. Per dimensionar, es considera que s'ha de produir la **màxima força a velocitat màxima**, tot i que es sap que quan es tingui la màxima força el moviment ha d'estar desaccelerant per realitzar la parada a una obertura de  $L_{ob,min} = 5$  mm.





- **potència neta necessària** per moure linealment dos subconjunts mòbils a una velocitat de 1 mm/s cadascun d'ells i lluitant amb 25 kN de força és de 50 W

Per l'elecció dels elements principals que componen el mecanisme d'obertura (*cal tenir a la vista plànol PFC-B00*) es segueix el moviment des de la translació dels subconjunts mòbils fins a la rotació del motor. Els criteris que es seguiran per al disseny d'aquest mecanisme i la tria dels components que el componen són: precisió, resolució e irreversibilitat

### 7.3. Fusell amb femella

Segons *DIN 69 051* Un fusell es un mecanisme que permet el canvi de moviment de rotació al de translació i viceversa. Poden ser de rosca trapezoïdal o be poden contenir corrons o boles com a elements de rodadura. Els fusells:

- Són els encarregats de convertir la rotació en desplaçament longitudinal. Per aconseguir un moviment simètric d'ambdós subconjunts mòbils, es requereix que les dos femelles solidàries al subconjunt mòbil superior tinguin el mateix sentit de gir, i les dues solidàries al subconjunt mòbil inferior sentit contrari a les anteriors. les dues superiors han de girar a dretes i les dues inferiors a esquerres.
- Absorbeixen la càrrega axial provocada pel pes d'ambdós subconjunts mòbils, doncs la força magnètica i la força del buit aplicada als fusells es cancel·la en el diagrama del fusell com a sòlid lliure. Si existeix càrrega radial, es que aquesta es deu a desalineament. No es considera en el cas que ens ocupa.

#### 7.3.1. Decisió. Alternatives.

Hi ha molts tipus de fusells cadascun òptim per un tipus de funcionament. A l'annex B "mecanisme" es justifica perquè s'ha escollit un ***fusell amb femelles de corrons planetaris*** per l'aplicació. Els fusells amb elements de rodadura son els mes aptes per una aplicació de precisió.

Quan la precisió de posicionat és important sota carrega, es requereix que la femella estigui precarregada per eliminar el tot el possible joc que es pugui donar. L'escollida serà amb el ***parell de precàrrega màxima*** dins del rang possible. També es necessita que la carcassa presenti una ***brida*** per cargolar-la al subconjunt mòbil.



La femella pertany a la sèrie *PRK* que compleix amb els requisits anteriors, del fabricant *SKF*. Es vol que el pas sigui mínim, doncs així s'obté la màxima resolució en el moviment i el diàmetre del fusell màxim, perquè la deformació deguda a la càrrega axial sigui mínima.

La femella que presenta aquestes característiques és la *SKF PRK 48x5*. Es veu un extracte del catàleg a l'annex B "mecanisme". Té un diàmetre nominal, pas i parell de precarrega de  $d_o = 48 \text{ mm}$ ,  $P_h = 5 \text{ mm}$ ,  $T_{pr} = 2,47 \text{ N}\cdot\text{m}$  respectivament

### 7.3.2. Fusell Roscat

El fusell ha d'ésser una peça de disseny propi. (es pot veure al plànol *PFC-B20*) Apart de roscar en ambdós direccions, ha de suportar a l'estructura mitjançant rodaments. Apart, l'extrem superior d'aquest requereix ser acoblat a la resta de la cadena cinemàtica. Es faran els salts de secció corresponents, necessaris i mínims, S'entrega el plànol *PFC-B20* al proveïdor de *SKF* per obtenir pressupost de la seva mecanització a mida. No resulta ser barat.

Els eixos del fusells estàndard estan mecanitzats amb acer *UNE F-1252* el qual es endurit superficialment. Aquest acer de bonificació [Riba, 1998a, p.92-94] es destinat per la fabricació de peces resistents. Es troba fàcilment en el mercat i es usat per a peces altament sol·licitades, doncs presenta una resistència molt gran, i en estat de bonificat, es mecanitza bé. Es un material amb capacitat de tremp i reveniment en tota la massa. En aquest cas, el tremp superficial es fa per inducció o corrent d'alta freqüència.

Les femelles estàndard, estan mecanitzades amb acer *UNE F-3130* totalment endurit. Amb els tractaments d'enduriment superficial en el fusell i d'enduriment total a la femella s'aconsegueix una duresa a la superfície de contacte de 56 HRc a 60 HRc. El fusell s'acobla directament a l'eix buit del reductor.



### 7.3.3. Rodaments de suport

Per fixar els fusells a l'estructura principal, es fa mitjançant un conjunt de rodaments amb carcassa tant per la part superior com inferior. Cada un dels fusells, com a sòlid rígid sols està sotmès a carrega axial, i aquesta es deu al pes dels subconjunts mòbils. Les forces magnètiques i de buit es cancel·len elles mateixes.

*SKF* prepara unitats de rodaments amb carcassa, lubricats de per vida per poder subjectar els fusells. S'ubicarà sobre el roscat superior del fusell un rodament de dues fileres de boles amb contacte angular. L'elegit és el ***SKF-PLBU50*** amb un diàmetre interior de 35 mm. Aquest absorbeix tota la carrega axial i s'elegeix amb lleugera precàrrega, (no quantificada al catàleg) per eliminar el possible joc. El fusell es fixa al rodament amb una femella autoblocant d'alta precisió.

S'ubicarà un rodament d'una filera de boles de contacte radial a la part inferior del fusell. L'única funció que farà aquest es guiar l'arbre. L'elegit és el ***SKF-BUF50*** també amb carcassa, i diàmetre interior de 30 mm. Aquest permet el moviment en l'eix del fusell degut a la deformació d'aquest i la seva responsabilitat és mínima.

### 7.3.4. Velocitat angular, parell necessari. Potència

#### *Velocitat angular*

Per avançar 1 mm/s amb un pas de 5 mm, es té que la rotació del fusell es de  $\omega_{fus} = 12 \text{ min}^{-1}$



### *Parell resultant necessari*

Es tracta quin es el parell que cal per moure un dels fusells sol·licitat amb les forces que actuen a cadascun dels subconjunts mòbils (no es considera per ara precàrrega ni fricció). Ambdós roscats són en sentits diferents, i com es pot veure a la Figura 7.4 el sentit del pes es el mateix. A cadascuna de les femelles, el parell que es crea degut al pes es cancel·la en el comptatge.

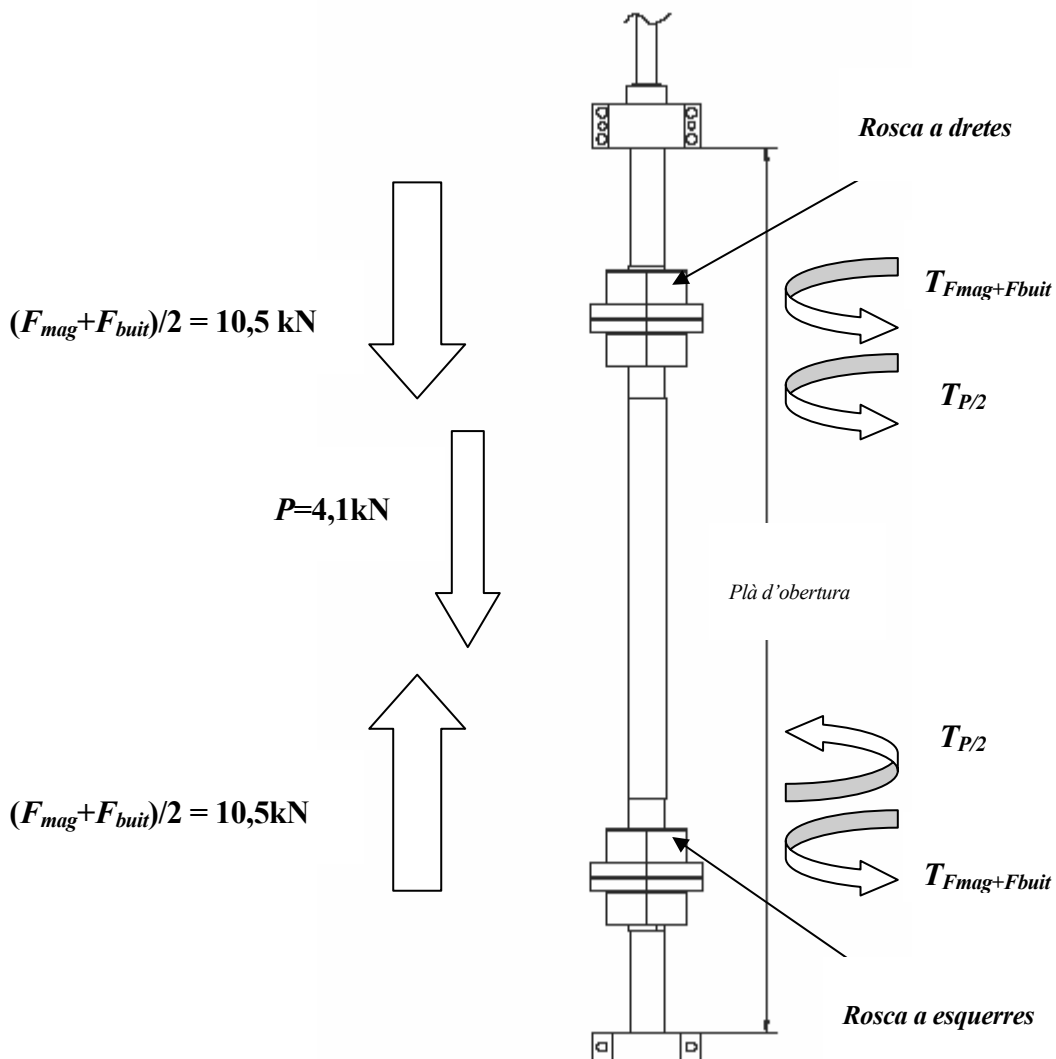


Fig. 7.4. Parell resultant al fusell

Es considera interessant sobredimensionar aquest mecanisme doncs ha d'oferir la precisió necessària amb un període molt llarg de vida. Es pren com a valor de la força que produeix



parell a cada femella de  $F_T/2$  (veure (Eq. A.1) a l'annex A, pag.20) actuant en sentits contraris per a cadascuna per tal de sobredimensionar d'entrada aquest parell.

El parell  $T_{fus}$  que s'ha d'aplicar a cadascun dels fusells ha de ser el necessari per superar: el parell produït per  $F_T/2$  aplicat a cada femella, el parell de precàrrega per cada femella i el de fricció que es doni a les unitats de rodaments precarregades que aguanten un fusell a l'estructura. En l'annex A "càlculs" es realitza un càlcul precís d'aquest i s'obté que  $T_{fus} = 32 \text{ N}\cdot\text{m}$

### ***Potència a l'entrada. Potència neta. Rendiment.***

En l'annex A "càlculs" es troba el desenvolupament d'aquest balanç. S'arriba a les següents conclusions:

- La potència "bruta" que s'aplica a l'entrada de cada fusell per poder dur aquest moviment és al voltant de 40 W i que correspon a 80 W per ambdós fusells.
- La potència total que s'aplica als fusells es perd en part al fusell per superar la precàrrega de les dues femelles i la fricció en les unitats de suport, La resta de potència és absorbida per les femelles, per donar el moviment i dissipar-se en forma de calor, segons l'eficàcia del fusell. La potència neta total per moure els dos subconjunts mòbils equival a 50W.
- Es perd la totalitat de 30W de potència en: friccions als suports, precàrrega al fusell i als patins, i a la femella. El rendiment d'aquest conjunt és del 62%. Verificació dels components

### ***Sol.licitacions estàtiques. Deformació.***

Les femelles dels fusells treballen aguantant durant llargs períodes de temps aguantant càrrega axial.

El fusell es veu sol·licitat amb una força de compressió simètrica respecte plà d'obertura i una càrrega axial. Pel que fà a la deformació de compressió varia la distància d'obertura teòrica. No s'avalua el seu valor, doncs es calibrarà el mecanisme mitjançant lectura directa de l'obertura.



El pes, també donarà lloc a una deformació axial que desplaçarà el *pla d'obertura*. Aquesta tampoc es tindrà en compte, doncs es a l'hora d'alinejar l'*IVU* quan es corregeix aquest desplaçament.

No hi ha perill de vinclament, amb un diàmetre de 48 mm i una longitud entre femelles de 750 mm

### ***Verificació del fusell i els rodaments***

Es fan les verificacions a l'annex A i es veu com el fusell compleix sobradament les condicions de càrrega estàtica. Respecte als rodaments, s'obté una vida infinita en cicles.

### ***Sol·licitacions dinàmiques.***

La sol·licitació dinàmica a la que es veu sotmesa aquest fusell és mínima, doncs per una variació d'obertura màxima (10 mm) cada femella ha de donar dos voltes completes, i el pas d'obertura màxima a mínima sols es dona en el cas de posada a punt de tot el sistema.

Les acceleracions i desacceleracions a l'engegada i parada també són mínimes, doncs els moviments es donen a velocitats angulars del fusell molt lentes. En aquest cas no té sentit fer cap càlcul de comprovació dinàmica. (vida en hores o cicles)

## **7.4. Reductor vis sens fi**

### **7.4.1. Funcionalitat**

- ***Reduir*** la velocitat angular d'entrada a la de sortida, que serà la velocitat de gir del fusell. tot girant la direcció de la rotació 90°
- ***Assegurar la irreversibilitat*** del mecanisme, doncs aquest s'ha de bloquejar a la posició que sigui necessària durant un llarg període de temps.
- ***Transmetre el parell*** que vindrà del sistema motor, multiplicant-lo considerablement per tal que superi el parell resistent que ofereixen els fusells sol·licitats

Es per satisfer aquestes condicions, que es proposa la utilització d'un reductor vis sens fi de 90°, doncs es una transmissió d'eixos que es creuen irreversible i a la vegada assequible. Per aplicacions d'aquest tipus, es típica la seva utilització, doncs com que és necessari que l'obertura es mantingui constant durant un període de temps.



#### 7.4.2. Especificacions. Decisió orientativa i materials.

S'escull un reductor de precisió del catàleg d'*ATLANTA*. La justificació es troba a l'annex B "mecanisme". Els requeriments que tindrà aquest es presenten a continuació:

- Tots els reductors compleixen amb la condició de *irreversibilitat*
- Respecte la *precisió*, *ATLANTA* ofereix uns reductors amb un joc de 0,6 mrad, donat per un alt recobriment del dentat en el vis sens fi glòbic. Aquest joc reduït al pas del fusell equival a un increment en la distància d'obertura d'1  $\mu\text{m}$ . El joc  $\theta$  és convenient a partir del moment en el que la cadena cinemàtica es desdobra per aconseguir un moviment igual en ambdós branques. En el cas del reductor, el joc quedarà matat tant en funcionament com en repos, perquè  $F_T$  sempre és existent i en el mateix sentit. Llavors atracarà el dentat del vis sens fi sempre per la mateixa cara. Cal especificar que ambdós reductors tinguin exactament el mateix joc.
- Per una bona *resolució* s'ha de pensar en una relació de transmissió alta.
- Per al càlcul pràctic d'un reductor, ja es sap que el parell resistent serà  $T_{fus} = 32 \text{ N}\cdot\text{m}$

La relació de reducció que serà alta per complir amb el criteri de resolució, però per ara no es sap doncs s'ha d'orientar abans l'elecció dels següents elements. En conseqüència no es coneix tampoc el rendiment.

Segons *ATLANTA* el càrter del servoreductor està fet d'alumini per la seva bona dissipació de calor i poc pes, amb possibilitat de tenir-lo d'acer. El vis és d'acer endurit i la roda de bronze, encastada a un eix buit. El conjunt està lubricat internament amb oli sintètic. A l'eix d'entrada *ATLANTA* instal·la als reductors de precisió dos rodaments de contacte angular per eliminar el joc axial al vis, i uns rodaments robustos de corrons a l'eix de sortida per absorbir amb èxit la carrega axial i radial aplicada a aquest.

#### 7.4.3. Dos possibles tipus de funcionament, dos tamanys a l'hora d'escollir

Es clar que l'eix de sortida del reductor està sol·licitat amb un parell i el reductor com a element mecànic irreversible és capaç de que aquest no es transmeti cap a l'eix d'entrada, independentment si aquest transmet parell o no. Aquest parell farà que les *dents* de la corona apliquin una força a la *serp* del vis.



*BROTOMATIC* (Distribuïdor d'*ATLANTA*). per servo-aplicació recomana la utilització d'un reductor que simplement compleix amb el parell, (tamany  $a = 50$  mm) estant el servo sempre connectat, i transmetent parell a l'eix d'entrada, per equilibrar. El parell aplicat fa que la *serp* del vis transmeti una força en la mateixa direcció, valor i sentit contrari a les dents de la *corona*. Així s'aconsegueix que el vis sens fi estigui equilibrat, a canvi de que el servomecanisme estigui obligatòriament transmetent parell contínuament.

Per altra banda, es considera que no és un cas de "fatiga en cicles" per aquest funcionament, doncs els canvis de posició son molt poc freqüents. La sol.licitació no canvia d'una manera continuada i es pensa que la *serp* del vis en aquest tipus de funcionament pot aguantar perfectament l'esforç provocat pel parell resistent.

Aquestes són les raons per les quals es pensa que, en el funcionament, un cop el sistema esta a la posició adequada es pot parar el servo i serà la *serp* qui absorbirà tot l'esforç. S'elegeix un reductor sobredimensionat (tamany  $a = 63$ mm). Sempre es podrà mantenir el servo connectat per equilibrar l'esforç, tot i que es pensa que no es necessari.

En el disseny d'aquest mecanisme es lluita contra la pèrdua de precisió degut a l'esforç constant del dentat. Es aquest el motiu del sobredimensionament, per fer que l'esforç suportat pel carter, el dentat i els eixos sigui mínim. Es creu necessari especificar que el càrter sigui d'acer.





## 7.5. Sistema motor amb reenviament d'angle

El reenviament d'angle és l'element que distribueix la potència de sortida als dos reductors. Es basa en un sistema d'eixos concurrents amb engranatges cònics de dentat recte que permet la transmissió del moviment en la direcció necessària. Es vol un reenviament d'angle del catàleg de *PFAFF SILBERBLAU*, per que proporcionarà també més endavant elements per al banc d'alineament.

A l'hora d'escollir una gamma de reenviaments es vol que els diàmetres dels eixos de sortida tinguin una certa relació de tamanys amb els del reductor, i també que tingui un sistema d'embridament per al motor. Aquest te forma de "tarrina de gelat" i s'hi haurà de mecanitzar una peça addicional per adaptar-hi el motor escollit. Per la gamma de *PFAFF-SILBERBLAU* en la que es vol escollir, aquesta ofereix reduccions de 1:1, 1:2 i 1:3 i joc molt reduït.

### 7.5.1. Joc al sistema motriu dependent del sistema de control

- Si el sistema de control és en llaç tancat, (lectura constant de l'obertura) l'existència de joc en aquest punt de la cadena no es un factor important, doncs el motor donarà els passos necessaris fins que els *encoders* arribin a la posició calculada. Es important es que el joc sigui el mateix als dos arbres de transmissió i amb el corresponent eix del reenviament, per a que el sincronisme entre els dos conjunts eix-reenviament-acoblament-arbre-acoblament-reductor-fusell sigui perfecte.
- Si el sistema de control fos en llaç obert (numero de passos calculat anteriorment es important que el sistema motriu sigui precís per assegurar "l'ús" de tots els passos de motor.

Es vol que tota la cadena cinemàtica sigui de precisió (joc 0) incloent-hi l'arbre motriu. (eix motor-acoblament-reenviament)

### 7.5.2. Motor. Descripció, Alternatives i funcionalitat

El motor és l'encarregat de moure tota la cadena cinemàtica a partir del gir del seu eix i a la vegada transmetre un parell. Es presenten varies alternatives dins del grup d'elements motors d'accionament electromecànic a l'annex B "mecanisme". Per un servosistema de precisió de petits moviments sota control, un **motor pas a pas** n'és la millor alternativa.



### 7.5.3. Especificacions. Elecció orientativa

Els motors pas a pas del catàleg *PYTHON* són motors *bifàsics e híbrids* (veure annex B “mecanisme”). Les característiques més significatives d’aquests motors són: 200 passos per revolució que equival a  $1,8^\circ$  per pas complert. Ofereixen parells de 0.45 N·m a 17 N·m en mode bipolar. Els tamanys més grans inclouen claveter a l’eix de sortida.

Aquests motors poden tenir un sistema de frenada elèctric incorporat, i/o un *encoder* incremental per la lectura de l’angle girat i també la possibilitat d’incorporar una etapa de reducció a l’eix del motor.

*PHYTRON* presenta les corbes característiques per als motors pas a pas. Aquestes relacionen el parell que proporciona el motor amb els polsos (velocitat angular) que cal aplicar. Són dos corbes diferents depenent del voltatge.

## 7.6. Elecció definitiva dels elements. Comprovacions

### 7.6.1. Etapes de reducció

Es vol que el motor no treballi a màxim parell durant funcionament normal, doncs s’ha de tenir en compte que es necessita una mica més de parell quan aquest s’accelera i es desaccelera. S’escull un punt de funcionament més o menys a la meitat del que presenta el gràfic parell-velocitat angular del motor

- Es vol que el motor treballi a uns **1200 min<sup>-1</sup>**
- Per a que es compleixi la condició de  $v = 1$  mm/s (velocitat de moviment lineal dels subconjunts mòbils en funcionament normal), el fusell ha de girar com a màxim a **12 min<sup>-1</sup>**
- Per tant, la relació de transmissió total del sistema serà:

$$\frac{1200}{12} = i_{red} \cdot i_{dist} = 100 \quad (\text{Eq. 7.1})$$



Es ara quan la fulla de càlcul amb l'equació (Eq 7.1) ens ajuda a decidir quins seran els dos paràmetres  $i_{red}$ ,  $i_{dist}$  (reducció que es dona al reductor i al reenviament respectivament) que multiplicats entre ells donaran la reducció total del mecanisme. Es presenten varies alternatives pròximes al valor escollit, però la que interessa més és la següent:

$$i_{red} = 52, i_{dist} = 2, i_T = 104.$$

En aquesta aplicació es vol reduir al màxim al vis sens fi, doncs com més alta sigui la relació de reducció, més elevat serà el recobriment d'aquest i en conseqüència es minimitzarà més el joc.

S'avalua com afecten aquests valors al funcionament general del mecanisme, sabent que els passos per volta d'un motor *PHYTRON* són 200 amb un angle de gir per pas de  $1,8^\circ$ . El motor girarà a **1248 rpm** per a que els subconjunts mòbils es desplacin a la velocitat màxima  $v = 1$  mm/s.

### 7.6.2. Resolució

En la fulla de càlcul es reflecteixen els següents paràmetres, per verificar si la cadena cinemàtica compleix a nivell de resolució un cop decidits els paràmetres. Els resultats obtinguts es troben a l'annex A "càlculs", pag.29

- **Resolució possible:**  $\Delta L_{ob,POS} = 0,48 \mu\text{m/pas}$
- **Resolució desitjada:** Per  $\Delta L_{ob,MIN} = 2 \mu\text{m}$ . Es compleix que  $\Delta L_{ob,POS} \leq \Delta L_{ob,MIN}$

Mecànicament esta bé, però faltarà que el sistema de control sigui capaç de captar com a mínim la resolució desitjada. Cal saber de cara a l'elecció dels elements de mesura a quin angle de gir  $\Phi$  del fusell correspon a un desplaçament  $\Delta L_{el,MIN}$ . Per això es planteja l'expressió (Eq 7.2)

$$\Phi_{MIN} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta L_{ob,MIN}}{2}}{P_h} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-3} \text{ rad} = 0,7^\circ \quad (\text{Eq. 7.2})$$

### 7.6.3. Reductor vis sens fi

El reductor escollit és *ATLANTA 59 04 52* amb una relació de reducció  $i_{red} = 52$  i tamany definit per la distància entre eixos de  $a_o = 63 \text{ mm}$ . A l'annex A "càlculs" es presenta un gràfic



del catàleg (Figura A.12, pag. 33) que relaciona l'eficiència amb la relació de reducció i la velocitat. Surt del 55%. Es reb pressupost d'aquest.

### ***Parell a l'entrada***

El parell que s'ha d'aplicar a l'eix d'entrada del reductor serà:  $T_{red} = 1,1 \text{ N}\cdot\text{m}$  i la velocitat de gir al mateix eix  $\omega_{dist} = 624 \text{ min}^{-1}$ . El parell resistent és ara el parell del fusell  $T_{res} = 32 \text{ N}\cdot\text{m}$ . La potència que s'aplica a cada reductor és  $P_{red} = 72,5 \text{ W}$ , i per ambdós  $P_{T,red} = 145 \text{ W}$

### ***Comprovació***

El reductor vis sens fi es comprova interpolant a les taules del catàleg, per la velocitat de gir de l'eix d'entrada al reductor  $\omega_I = \omega_{dist}$ . El factor de servei s'estima de  $F_s = 2$  justificat a l'annex A "càlculs" per les condicions de funcionament esmentades. Es comprova que  $T_{N,red} > F_s \cdot T_{res}$ .

#### **7.6.4. Reenviament d'angle.**

S'escull un reenviament d'angle que compleixi de sobres amb els valors nominals de parell com de potència, per una velocitat determinada a l'eix d'entrada. Per altra banda, es busca la possibilitat de trobar-ne un amb l'eix de sortida buit la qual cosa no pot ser per un diàmetre superior a 20 mm. No es vol un diàmetre de punta inferior a tal valor, ja que el diàmetre que té l'eix de sortida del reductor és d'uns 25 mm. Que l'eix de sortida del reenviament d'angle sigui de 25mm serà un criteri que s'utilitzarà per la seva tria.

***PFAFF-SILBERBLAU KV9 config D*** que dongui  $i_{dist} = 2$  i tingui  $D_{eix} = 25 \text{ mm}$

El rendiment no ens el dona el catàleg però per una transmissió d'eixos concurrents amb engranatges cònics de dentat recte, i amb acoblaments flexibles a cada un dels eixos suposem:  $\eta_{dist} = 0,9$ . Es presenten els càlculs dels paràmetres cinemàtics i dinàmics a l'annex A "càlculs", on bàsicament, es té que la velocitat angular, parell i potència a l'entrada son respectivament  $\omega_{mot} = 1248 \text{ rpm}$ ,  $T_{mot} = 1,2 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,  $P_{mot} = 161 \text{ W}$ . Per altra banda, el parell resistent és ara el parell d'entrada al reductor  $T_{resist} = 1,1 \text{ N}\cdot\text{m}$

### ***Comprovació***

Parell nominal a l'eix de sortida  $T_{N,dist}$  es calcula per interpolació. dels valors del catàleg. Idem amb la potència nominal a l'entrada  $P_{N,dist}$ . Seguint el mateix criteri que amb el reductor:  $T_{N,dist} > F_s \cdot T_{resist}$  Ara el parell resistent és el d'entrada als reductors és  $T_{red}$  Interpolant de forma



anàloga al reductor, i ara amb un factor de servei per aquest de  $F_s = 1.1$ , s'obtenen uns valors de potència nominal a l'entrada  $P_{N,dist}$  i parell nominal a la sortida  $T_{N,dist}$  molt superiors als necessaris.

### 7.6.5. Motor pas a pas

S'escull un motor amb sistema de frenada incorporat per que es barat i s'utilitzarà com a element de seguretat per bloquejar l'eix, tot i que es consideri que el mecanisme es capaç de mantenir la irreversibilitat amb el servo en parat.

El motor que s'escull ha de ser capaç de superar el parell resistent que es troba aplicat a l'eix d'entrada del reenviament. Aquest és ara  $T_{resist} = 1,2 \text{ N}\cdot\text{m}$ . Es miren les corbes (Figura 7.5) que relacionen el parell nominal del motor  $T_{Nmot}$  amb la freqüència de polsos per segon (Hz) o bé velocitat angular en  $\text{min}^{-1}$ .

El motor **PHYTRON ZSH 107/2.200.10** té la capacitat proporcionar un parell superior al resistent de  $1,2 \text{ N}\cdot\text{m}$  i ofereix un número de passos per volta  $N_p = 200$ . Interpolant, s'observa que per una velocitat de  $1248 \text{ min}^{-1}$  el parell nominal està molt per sota del resistent. (per  $90\text{V}$ ,  $T_{N,mot,90} = 3,3 \text{ N}\cdot\text{m}$  i per  $140\text{V}$   $T_{N,mot,140} = 4,3 \text{ N}\cdot\text{m}$ )

La corba, com es pot veure a la figura 7.5, a la pàgina següent, presenta un pronunciament del parell a menys velocitat que ajudarà al mecanisme a l'acceleració i a la frenada. Tot i tractar-se d'un moviment molt lent, s'ha calculat (a l'annex A, pag. 36) el sobre-parell que el motor ha d'ésser capaç de proporcionar al sistema per arrancar en moviment per tenir una idea d'aquest valor. Aquest, augmenta vora un 10% el parell de funcionament normal del motor.

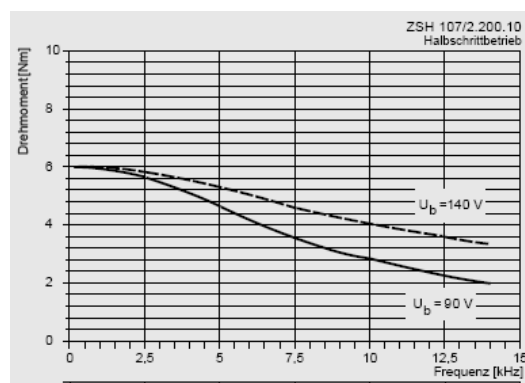


Fig. 7.5. Corba del motor pas a pas



Es considera el pitjor dels casos en l'acceleració per passar de  $0 \text{ min}^{-1}$  a  $1248 \text{ min}^{-1}$  en 1 s. Com que  $T_{arr} = 0,3 \text{ N}\cdot\text{m}$  és evident que un motor d'aquestes característiques no tindrà cap problema en posar-se en velocitat de funcionament en un segon, doncs es pot contemplar a la gràfica que el parell aquest es assolible fàcilment. El motor es controlarà a la velocitat que es vulgui dins d'aquest rang imposat i el sistema de control s'encarregarà de que sigui més petita com més petit sigui el  $\Delta L_{ob}$  que es vulgui donar.

$$0 \leq \omega_{mot} \leq 1248 \text{ min}^{-1}$$

## 7.7. Elements auxiliars

Els elements accessoris permeten que els elements principals que componen el mecanisme estiguin connectats adequadament i a la vegada, tot el mecanisme muntat sobre l'estructura principal de l'IVU. Aquests són: acoblaments, eixos, brides, cargols etc.

### 7.7.1. Acoblaments

Es requereix que totes les connexions entre motor, eixos, reductors, fusells... siguin elàstiques i amb joc zero, i que siguin capaç d'absorbir tots els desalineaments que es puguin donar en el muntatge. Es necessita uns acoblaments rígids, per poder transmetre tot el parell amb moviments molt petits.

- **Fusell-reductor (eix de sortida):** Per connectar el fusell al reductor l'opció més pràctica i econòmica es que la punta del primer encaixi dins del forat buit del segon. El reductor ha d'estar a l'estructura, i a la vegada l'*encoder* de mesura ha de tenir un gir solidari amb el del fusell. S'ha pensat en allargar més la punta del fusell per poder agafar l'*encoder*, però dificultaria el muntatge i no interessa.
  - Al ser dos eixos independents, s'inclourà una claveta amb taló que enclavarà l'eix on es munta l'*encoder* i la punta del fusell a la vegada, dins de l'eix buit del reductor. Aquesta claveta es amb taló 8x7x133. La longitud que enclava l'eix del fusell és de 78 mm. La resta de la claveta situa l'eix de l'*encoder* al fusell. No té sentit provar-la a torsió perquè la velocitat de gir es molt lenta.
  - Es vol en aquest acoblament un ajust fi l'eix buit del reductor (forat 28H6). Es decideix doncs H6h5 per als dos eixos que entren dins l'eix buit. La claveta amb taló anirà lleugerament apretada als dos claveters per evitar cap tipus de joc. Es per això que es vol una tolerància de forat P9 al claveter.



- **Reductor (eix d'entrada)/reenviament d'angle (eix de sortida):** Els reductors disposen a l'eix d'entrada d'un acoblament que el proporciona el mateix fabricant. Aquest és el *ATLANTA 65 54 025*.
  - Es fabriquen dos eixos que transmeten el moviment del reductor al reenviament d'angle. Per aquesta última connexió s'utilitza un acoblament *MHW-63* Aquest, és un acoblament que es caracteritza per l'alta rigidesa torsional, i joc zero. Es capaç a la vegada d'absorbir els desalineaments de muntatge que es puguin donar mitjançant els discs d'acer del qual n'està fet la seva part central. S'ha de tenir fabricat un adaptador per aquests acoblaments
  - Respecte als arbres, tot i que el parell que s'aplica a ells es poc, la seva rigidesa torsional ha d'ésser elevada. Es poden fabricar amb qualsevol acer inoxidable amb la rigidesa suficient per assegurar deformació zero. S'utilitza un acer similar a l'usat per fabricar el fusell, *UNE F-1250*. i s'haurà d'acurar molt el mecanitzat a les puntes.
- **Reenviament d'angle (eix d'entrada/motor eix de sortida)** El reenviament presenta una brida amb un eix negatiu que encaixa amb l'eix de sortida del motor *PHYTRON* i aquests van enclavats. Es comprova l'ajust a partir dels catàlegs i és correcte. S'ha dissenyat una peça intermitja que adapta la brida del motor amb la brida del reenviament, doncs al ser de fabricants diferents, la distància entre forats discrepa.

Tots els cargols que s'utilitzen per collar els elements del mecanisme a l'estructura són de cap cilíndric amb buidat hexagonal (*CHC NF E 27-161*) anomenats també *allen*, sense sol.licitació. El reductor es colla mitjançant espàrrecs passants i roscats. S'ha d'assegurar un molt bon centrat d'aquest.



## 7.8. Control bàsic de l'obertura i fi de cursa

Es pretén exposar els criteris bàsics de disseny d'un llaç de control per al mecanisme d'obertura. En aquesta aplicació, per la necessitat d'obtenir una alta exactitud de posicionament, s'ha de dissenyar un sistema de llaç tancat, amb lectura directa a l'obertura, l'esquema general del qual esta representat a la Figura 7.6 [Balcells, 1997]

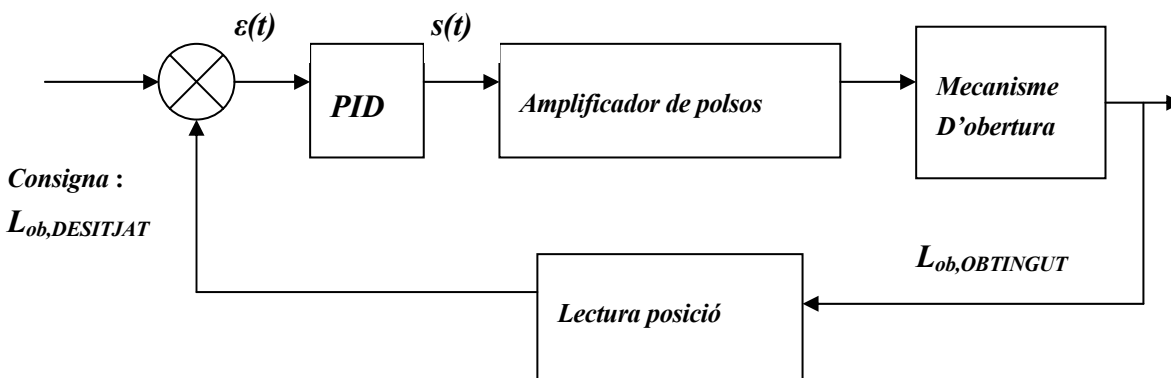


Fig. 7.6. Esquema de llaç tancat per l'aplicació

El control dels eixos és farà per medi de procreadors de posicionament i targes de control electrònic especialitzat. El control és construirà amb un regulador estàndard del tipus  $PID$ .

- **L'acció proporcional  $P$**  intentarà corregir la sortida: a més error  $\varepsilon(t) = |L_{ob,OBTINGUT} - L_{ob,DESITJAT}|$  més senyal de correcció. La situació de error nul només s'aconseguiria en règim permanent ideal.
- **L'acció integral  $I$**  modifica la senyal de sortida fins que la variable controlada arriba al valor de la consigna. Elimina l'error en règim permanent, però necessita un cert temps per aconseguir-ho.
- **L'acció derivativa  $D$**  té un efecte anticipatiu, intentarà compensar possibles errors que només intenten aparèixer i compensar les inestabilitats.

El senyal de sortida del regulador vindrà donat per l'equació (Eq 7.3):





$$s(t) = k_p \varepsilon(t) + k_I \int \varepsilon(t) dt + k_D \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (\text{Eq. 7.3})$$

Per evitar oscil·lacions al voltant del punt de consigna degudes a les toleràncies mecàniques, és disposta d'una funció de zona morta al voltant de  $\varepsilon(t)=0$  perquè el regulador no treballi, és a dir, s'acceptarà un error mínim en el posicionament.

### 7.8.1. Dispositius per la lectura de la posició

Els elements que interactuen amb el processador de control són els següents. La seva tria està justificada a l'annex B "mecanisme"

#### *Mesura de desplaçaments angulars.*

El disseny del mecanisme d'obertura pretén que la transmissió del fusell (moviment angular) a la femella (moviment lineal) sigui el màxim de precisa possible. Per això es creu convenient en utilitzar traductors de posició angular (*encoders*) per la mesura dels desplaçaments lineals dels subconjunts mòbils. A l'annex B "mecanisme" es justifica la necessitat d'*encoders absoluts* la raó principal és que, al contrari dels *encoders incrementals* no necessiten un procés d'inicialització.

El fusell necessita donar dos voltes senceres per recórrer la distància des de  $L_{ob,MIN}$  a  $L_{ob,MAX}$ . Per poder realitzar la lectura, l'*encoder* ha d'ésser capaç de llegir més d'una volta. **KUBLER 9081** amb l'eix buit és un *encoder* multivolta. Tenint aquest  $n=13$  bits per volta, la resolució possible en graus ve donada per l'expressió (Eq. 7.5)

La resolució desitjada en la distància d'obertura és de  $\Delta L_{ob,MIN} = 2 \mu\text{m}$  i correspon a un gir del fusell de  $\phi_{MIN}=0,7^\circ$  (Eq. 7.4) L'elecció és bona a nivell de resolució. **La lectura directa de l'obertura es vol fer amb l'encoder absolut** a l'eix del fusell. Ambdós, actuen simultàniament, però se'n llegeix sols un i l'altre, resta per supervisar. En cas de discrepància saltaria l'alarma del sistema.

$$\phi_{POS} = \frac{360^\circ}{2^n} = 0,044^\circ \quad (\text{Eq. 7.4})$$

#### *Mesura de desplaçaments lineals*

En general durant l'engegada i posada a punt és necessari executar un procediment per tal de buscar la posició inicial de l'*encoder*. A més, aquests poden presentar problemes mecànics ja



que la seva fabricació és molt precisa. També són molt sensibles als cops i a les vibracions. Per aquests dos motius, es decideix disposar d'un sistema de mesura lineal redundat a la lectura angular.

Es fica un lector de posició lineal que actuarà com a dispositiu de suport per exemple a l'hora de calibrar el control del mecanisme d'obertura, i per monitoritzar si es creu necessari. Per aquest cas, es vàlid un traductor *LVDT* que serà calibrat per llegir posicions concretes, com per exemple els extrems de cursa.

La seva resolució depèn del sistema electrònic que l'acompanya, poden tenir bona repetitivitat per alguna posició en concret. El problema del *LVDT* és bàsicament la sensibilitat al soroll que mostren. Es podria millorar aquesta instal·lació de suport a nivell resolució amb un dispositiu *Eddy Current* per a la mesura lineal (veure annex B "mecanisme").

### ***Fi de cursa***

Té la missió de parar el funcionament del mecanisme d'obertura just després de que aquest sobrepassi els límits de moviment (5 mm i 25mm). Son tres els dispositius que actuen consecutivament, separats per un  $\delta L_{ob}$  que es decideix a calibratge.

1. La mateixa lectura angular dels *encoders*, dona la senyal de límit de moviment.
2. A una posició d'obertura mes extrema, actuen uns interruptors de precisió que donen la senyal d'interrompre el llaç de funcionament.
3. En cas de que falli el sistema electrònic, uns topalls mecànics s'instal·len a l'estructura principal i s'ajusten per parar el moviment d'obertura. Es considera un cas límit arribar a aquesta situació, doncs un sistema *full tolerance* ja s'ha desenvolupat electrònicament.

### ***Conjunt de mesura longitudinal i fi de cursa. Descripció mecànica .***

El fi de cursa es munta mitjançant un sistema redundat d'interruptors de precisió **OMRON M8 DA 3200** sobre un conjunt de lleves que es mouen linealment, on l'interruptor es simbolitza com un palpador puntual. Com es pot veure al plànol **PFC-BB0**, el xassís que suporta els interruptors i el *LVDT* es solidari a l'estructura, i la que porta els palpadors es mou amb el subconjunt mòbil. Per al calibratge, la posició d'aquests palpadors s'ajusta amb micròmetres d'alta precisió, **MITUTOYO MHC 148-351** solidaris al xassís del conjunt.



### 7.8.2. Diagrama de control. Característiques del processador de posicionament

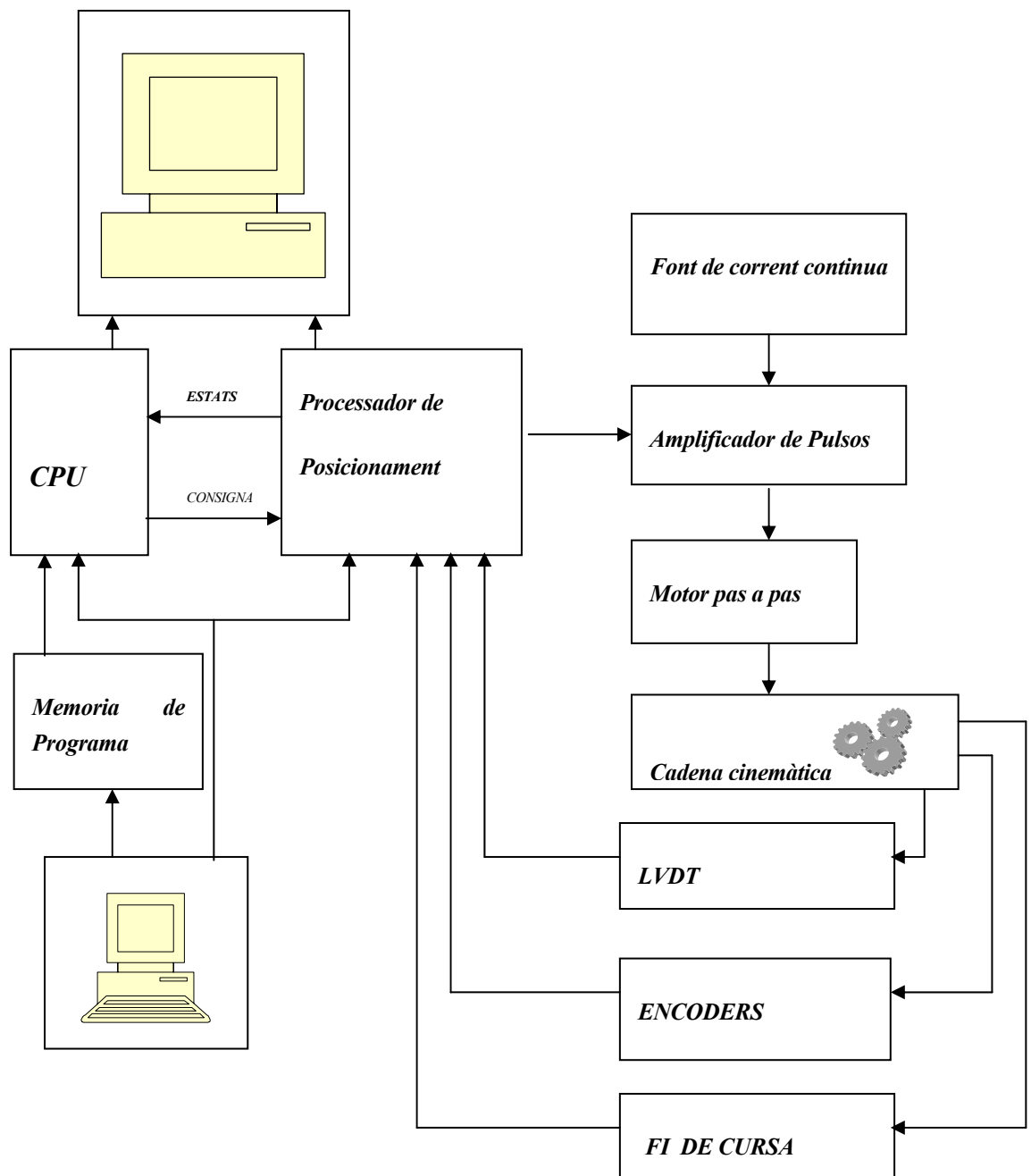


Fig. 7.7. Esquema complet de llaç tancat per l'aplicació

Es pot veure un diagrama més complet del control a la Figura 7.7. El programa carregat al processador és un algoritme de control *PID*. El programa inclou al processador les característiques del motor pas a pas: Tipus, nombre de fases, freqüència de la commutació,



passos per volta i les característiques mecàniques del sistema: relacions de transmissió, punts límits del moviment, valors màxims de velocitat i acceleració, longitud, sentit del desplaçament...

El funcionament del processador pot funcionar de les següents maneres: En **mode manual** rebrà ordres específiques des de la unitat de programació. Per exemple, quan l'usuari entra una nova consigna. En **mode automàtic** rebrà les consignes indicades pel programa principal. Per exemple, quan es fa la realimentació

#### **Característiques del processador:**

- **Tres llaços de control:** *encoders*, final de cursa, i transductor lineal
- **Entrada/Sortida (I/O)** binàries pròpies pel control lògic del moviments: engegada, parada i límits de seguretat.
- **Memoria RAM/ EPROM** per magatzem del programa.
- **Visualització d'estats:** diodes *LED*, Monitor...

#### **7.8.3. Condicions de funcionament.**

En el posicionament amb motors pas a pas s'hi troben implicades tres variables:

- Nombre de polsos que defineixen la longitud del desplaçament.
- La freqüència del polsos que definiran la velocitat del moviment.
- L'*encoder* absolut, indicarà al processador l'espai recorregut.

Segons l'error de posició real el processador genera els trens de polsos, amb velocitat i acceleració programades i les al mòdul de potència del accionament del motor pas a pas: amb un pols, el motor gira  $1,8^\circ$ , amb un tren de polsos el moviment discret és transforma en continu.

El programa de moviments carregat al processador, serà el responsable d'assegurar la posició dels eixos i transmetre els senyals de desplaçament, velocitat i acceleració. El programa tindrà tres blocs:



- **Programa del moviment:** desplaçament en funció del nombre de passos i del sentit de gir.
- **Condicions de control:** Error  $\varepsilon(t)$  imposat en regim permanent, temps de resposta (freqüència de polsos) .
- **Paràmetres de l'aplicació:** resolució, velocitat màxima, constants del regulador *PID*.

El processador mitjançant una tarja controladora tindrà les següents connexions d'entrada/sortida:

- Entrada de les lectures de l'*encoder* absolut (nombre de voltes i posició angular).
- Entrades de senyals no proporcionals procedents dels finals de cursa.
- Entrades analògiques procedents del *LVDT*. Internament farà la conversió A/D.
- Sortida per la indicació de successos.
- Informació d'estats a la *CPU* principal.

L'usuari ha de poder definir les trajectòries mitjançant un conjunt d'instruccions senzilles i orientades a l'aplicació: Desplaçaments amb o sense parada, desplaçament fins que verifiqui una condició o una posició absoluta.

La *CPU* principal és l'encarregada de seleccionar, modificar els paràmetres i visualitzar-los, i si convé el programa, i observar els desplaçaments en temps real.



## 7.9. Conclusions referents al servo mecanisme

Arribat a aquest punt s'han trobat elements mecànics de diversos fabricants per elaborar aquest mecanisme. Aquest es capaç d'incrementar l'obertura amb intervals inferiors a  $1 \mu\text{m}$ , doncs com es pot comprovar amb el full de càlcul, amb un pas de motor l'increment a la distància d'obertura serà de  $0,5 \mu\text{m}$ . Amb aquest disseny cal realitzar 4 passos de motor per poder incrementar  $2 \mu\text{m}$  la distància d'obertura.

El fusell es troba sobredimensionat a càrregues axials, doncs s'ha tingut en compte que actua constantment en tota la vida útil del fusell. El mateix es pot dir per les unitats de rodaments que subjectaran els fusells a l'estructura principal. Tot i així, es sap que hi haurà una deformació degut a la força axial que ara no es té en compte, però es notarà quan es faci el calibratge de la màquina.

El reductor vis sens fi té la missió de convertir el parell que transmet el motor pas a pas amb un parell capaç d'arrossegar mitjançant fusells un pes de 25 kN, durant el temps que sigui convenient. Per això s'ha dubtat a l'hora d'escollir entre un que compleixi numèricament amb parell i potència nominal o bé un de sobredimensionat. El joc queda matat per la força magnètica a ambdós reductors. A l'hora de demanar-los cal especificar que aquests tinguin el mateix joc.

Tal com s'ha pensat, mantenir els fusells fixos es deu al reductor. Son les dents de l'engranament del reductor vis sens fi qui aguanta contínuament el parell que es crea a la sortida, i no es creu necessari cap parell per equilibrar. Per això és convenient el sobredimensionat d'aquest, perquè tant les dents, com els eixos i el carter aguantin sense esforç aquesta sollicitació. El problema no es centra en la vida del reductor, sinó en la possible pèrdua de precisió durant la vida.

El reenviament d'angle i el motor pas a pas s'han sobredimensionat per que es doni una certa relació de proporcionalitat amb els dos reductors. Durant el funcionament de la màquina, el motor pas a pas podria estar sempre està connectat, depenent de com es vulgui realitzar l'operació.

Durant el funcionament, si s'utilitza el fre com a element de seguretat, aquest bloquejarà l'eix del motor, mentre aquest està connectat i transmetent parell. Posteriorment es desconnecta el motor i el fre roman actuant.



## 8. ESTRUCTURA PRINCIPAL

La funció d'aquesta es guiar el desplaçament vertical dels subconjunts mòbils tot suportant-los així com suportar també el mecanisme d'obertura per al moviment d'aquests, els corresponents finals de cursa (mecànics i electrònics) i tot el sistema de buit. El plànol de conjunt *PFC-B00* representa l'estructura, el mecanisme, i els altres elements que hi van muntats.

### 8.1. Disseny de les columnes. Deformacions

La força  $F_T$  i el parell  $T_T$  creat per aquesta, son absorbits pels següents elements i de la següent manera, tal com es pot veure a la Figura 8.1

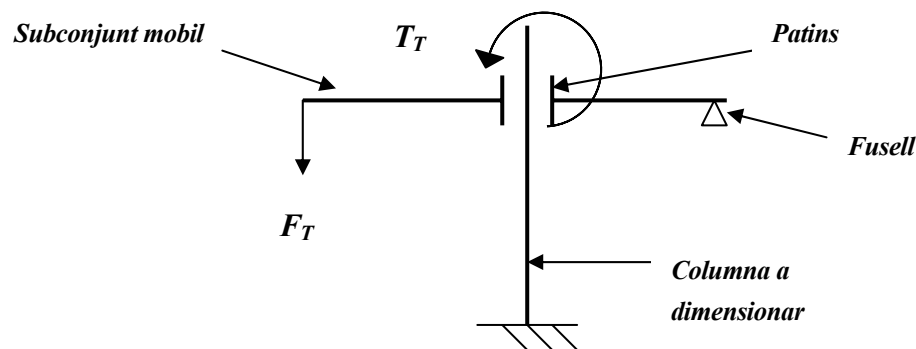


Fig. 8.1. Esquema estructural

- Els patins i la columna absorbeixen el parell  $T_T$  a canvi de deformació angular que s'ha d'avaluar per complir amb la condició de deformació angular exposada a
- El fusell absorbeix tota la carrega axial  $F_T$  mitjançant uns rodaments que el suporten a la columna.

El disseny conceptual de l'estructura comença i acaba en escollir quina serà la secció de les columnes per a que la deformació angular no sobrepassi un cert valor. S'ha de preveure



que hi ha d'haver un mínim d'espai a l'interior per a que el carro que porta la femella del fusell hi circuli.

Tenint en compte que s'aplica un parell  $T_{est}$  a cadascuna de les columnes és  $T_T/2$ , la secció de tall de la columna es deformarà segons la *Hipòtesi de Navier* (Eq. 8.1)

$$\varphi_{est} = \frac{T_{est} \cdot L_{est}}{E \cdot I} \quad (\text{Eq. 8.1})$$

Considerant que la columna es fixa i simètrica a la meitat de la seva longitud. Es pot calcular, per aquesta secció a decidir, mitjançant el *Teorema de Steiner* la inèrcia a l'eix on s'aplica el parell per a que la deformació angular  $\varphi_{est}$  no sobrepassi els 0,02 mrad que queden “a disposar” per complir amb la condició de deformació exposada a l'apartat 6.1.2 a l'equació (Eq 6.1)

La distància entre l'encastament de la columna  $L_{col}$  (veure Figura 9.1) i el punt on s'aplica el parell s'agafa de 450 mm com a valor orientatiu. S'obté el valor de  $I \geq 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$  per a que la deformació angular sigui la permessa. Dues alternatives son estudiades a l'annex A “càlculs”, pag. 39 a l'hora d'obtenir aquesta secció, tenint en compte que a cada meitat de la U, aniran soldades dues orelles per collar els carrils dels patins LRX35.

- Secció a base de calaix a base de perfil normalitzat *UPN*. Un calaix format per dos perfils *UPN* d'una mida entre 260 mm i 300 mm soldats entre ells, compleixen perfectament amb la condició de deformació
- Un perfil en U construït a partir de plaques de 20 mm d'acer al baix carboni. Ofereix una estructura rígida, d'uns 300 mm de profunditat

S'ha estudiat les configuracions possibles per realitzar-ho amb calaix (primera opció) però es mes interessant la segona a nivell de rigidesa, i menys risc de deformació en soldadura, doncs el perfil *UPN* utilitzat seria de 10 mm de gruix com a màxim, i s'ha de tenir en compte que les soldadures de les orelles per als patins han de ser generoses en tamany.

L'opció escollida és mes cara i pesant, però més adient per l'aplicació. Amb el perfil escollit, l'angle de deformació  $\varphi_U$  de la U queda de **0,0072 mrad**. Per l'orella dissenyada se'n calcula també la deformació angular a l'annex A “càlculs” i resulta de **0,0065 mrad** respecte la paret de la columna suposada ara fixa. Es té que la suma d'ambdós és  $\leq 0,02$ . El dimensionat compleix amb la condició de deformació angular.





## 8.2. Despeçament

Es soldarà una base inferior per collar l'*IVU* a un banc d'alineament i una superior per muntar-hi els reductors. S'han d'ubicar suports per als rodaments i les dos columnes s'uneixen entre elles mitjançant calaixos de perfil *UPN*, sense responsabilitat. La fabricació de l'estructura soldada, es molt cara, degut a la precisió dels mecanitzats i el seu gran tamany, doncs s'ha de ficar a una maquina de grans dimensions per la realització dels mecanitzats.

Per fer l'estructura soldada, es segueix el mateix procediment de fabricació i material que s'ha seguit per la biga externa. El plànol de l'estructura és el ***PFC-B10*** on s'indica les superfícies de referència i els mecanitzats necessaris. L'objectiu de les toleràncies funcionals es aconseguir la planitud dels reductors respecte la base, que es per on es colla l'estructura a l'hora de fer els mecanitzats i la perpendicularitat amb les superfícies on hi van els patins.

A cadascuna de les columnes, hi van soldades unes orelles simètriques. Aquestes permeten collar la cambra de buit a l'estructura mitjançant els ajustos necessaris, com es pot veure al (plànol ***PFC-BA0***) i grapar-ho un cop es a la posició correcta. La cambra de buit es pot desplaçar en el seu eix longitudinal, gràcies als patins que s'escolleixen del catàleg d'*IKO*. Els *LRK15* amb precàrrega normal son adients. El conjunt cambra de buit + patins + suport es guiat amb un sistema de clavetes i les mateixes grapes, que apreten tot el conjunt a les orelles soldades.

En l'estructura principal s'hi desplacen linealment els subconjunts mòbils amb els patins *IKO LRK35* calculats anteriorment a deformació. La unió cargolada dels carrils d'aquests amb l'estructura principal, es comprova a l'annex A "càlculs" pag. 43, perquè es sospita que la unió de placa contra placa (carril-estructura) sigui crítica i s'arriba a la conclusió de que s'han d'adquirir els carrils amb la meitat de la distancia estàndard entre cargols. Això permet collar amb 12 cargols tipus *CHC NF E 27-161 (allen)* fent la juntura segura.

El sistema electrònic i el mecànic de final de cursa del mecanisme d'obertura son fixats a l'estructura principal.



## 9. SISTEMA DE BUIT

El sistema de buit (cal tenir a la vista el plànol **PFC-D00**) esta compost bàsicament per la cambra de buit, manxes, els cons d'adaptació aigües amunt i aigües avall, un sistema de bombejat e instrumentació de mesura. La funcionalitat del sistema és mantenir un buit aproximadament de  $7 \cdot 10^{-7}$  Pa (ultra-buit) a l'entorn de les matrius.

Es defineixen quatre tipus d'estat de buit, que s'assoleixen consecutivament [Chambers, Fitch i Halliday, 1998]

- **Buit normal o mecànic:** de la pressió atmosfèrica  $\rightarrow$  100 Pa
- **Buit mitjà:** 100 Pa  $\rightarrow$  0,1 Pa
- **Buit alt:** 0,1 Pa  $\rightarrow$   $10^{-6}$  Pa
- **Ultra-buit:**  $10^{-6}$  Pa  $\rightarrow$   $10^{-10}$  Pa

### 9.1. Elements del sistema de buit

#### 9.1.1. Cambra de buit

El pre-dimensionat d'aquesta ve donat pel tamany de les bigues internes, el conjunt d'imants i els seus contenidors com s'ha dit a l'apartat 5. Es interessant, que la secció del cilindre dimensionat, correspongui a algun diàmetre de brida hermètica normalitzat, i així el tub amb la que es fabrica la cambra pot ser un tub comercial. Serà possible, i les brides que delimiten el diàmetre de la cambra de buit son les **DN270CF** amb un diàmetre interior de 269 mm. La cambra de buit tindrà un gruix de 3 mm (valor típic)

Ha de tenir les portes suficients distribuïdes al llarg de tota la seva longitud, i sempre aquestes de diàmetres estàndard per soldar-hi brides per collar-hi la instrumentació. Al plànol de peça **PFC-D10** es contempla la geometria de la cambra dissenyada, amb totes les portes, i al de conjunt **PFC-D00** els elements de compra muntats. La cambra de buit es fabrica a partir de tub d'acer comercial **UNE F-3534**.

Es tindrà en compte que no tingui cap tipus de defecte a la paret on s'hi fa el buit, i es polirà després de soldadura. Totes les soldadures que es realitzen en el sistema de buit (portes, brides



fixes, rotatives... etc.) és fan mitjançant soldadura *TIG* perquè es la més neta a nivell d'impureses i porositats. Aquest paràgraf anterior formaria part del plec de condicions de l'ondulador en buit. L'aspecte final es similar al de la Figura 9.1

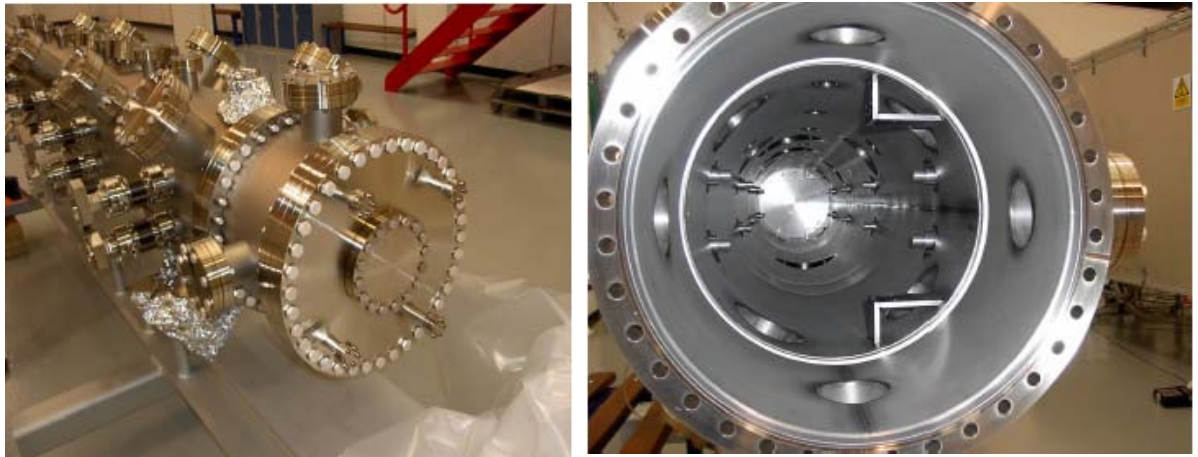


Fig. 9.1. Cambra de buit de l'Ondulador de Daesburv (UK)

Aigües amunt i aigües avall de la cambra de buit es munten dos cons d'adaptació, la finalitat dels quals es adaptar la secció de la cambra de buit de l'IVU a les següent i anterior connectades. Hi van muntats en ells uns blocs circulars de coure *Cu-FHRC* per absorbir radiació. Es veurà a l'apartat següent.

### 9.1.2. Manxes

La funció d'aquestes es delimitar la zona “fora de buit” amb la zona “en buit”. Per dins d'aquestes hi passa el cilindre de connexió intern, i la propietat d'elasticitat de la manxa permet que aquest es desplaci en direcció vertical transmetent el moviment dels imants dins la cambra de buit, fixa.

Les manxes són d'acer *F-3534*, per ser més resistents a les altes temperatures, i segons la dimensió del cilindre de connexió intern, la mida *DN40* és l'adient. El recorregut que ha de tenir aquesta manxa, és de 10 mm. El catàleg, mostra diferents longituds en unitats de mesura per convolució. Escollint una manxa de 10 convolucions, aquesta pot treballar lliurement entre 7 mm i 17 mm. A l'annex A “càlculs” pag. 18 s'ha considerat la força de reacció que transmet la manxa al subconjunt mòbil quan aquesta esta comprimida. A nivell de força total, no es considera a efectes de càlcul.



### 9.1.3. Sistema de bombejat

La filosofia de disseny que es pren en els sistemes de bombejat per als *IVU*, es basa en ficar la màxima quantitat de bombes d'ultra-buit possible al llarg de la longitud de la cambra. Aquestes, hi estan instal·lades permanentment, i realitzen el buit mitjançant reacció química per a l'absorció de partícules. En la instal·lació, n'hi ha de dos tipus diferents:

- **Bombes iòniques:** S'instal·len 3 *VALCON PLUS 300/s Starcell* de *VARIAN* a la part davantera i una *VALCON PLUS 500/s Starcell* en mig de les dues columnes estructurals. S'han dissenyat uns pedestals per aquestes bombes amb acer d'ús general. Es collen al calaix de suport del banc d'alineament.
- **Bombes de sublimació de titani:** Estan formades per un filament de titani muntat a una brida *NW35CF*. Se n'instal·len dues entremig de les bombes iòniques de 300 l/s dins d'una recambra d'acer *F-3534*.

Durant la instal·lació de l'*IVU* es realitza el primer buit a la cambra mitjançant un sistema de bombejat mecànic que es connecta temporalment a la cambra de buit. El motiu per instal·lar una proporció més gran de bombes que en les cambres de buit de la resta de l'anell d'emmagatzematge, és perquè l'ensamblatge dels imants i els seus contenidors estan plens d'intersticis d'aire que cal que sigui evacuat al màxim per un bon funcionament de l'*IVU*.

### 9.1.4. Instrumentació de lectura

- Per al rang de mesures que va del buit mecànic al buit mitjà s'utilitza una sonda *Pirani* muntada en una brida *NW16CF*. El model utilitzat serà el *AML-PVB2*. La finalitat d'aquesta serà mesurar des de la pressió atmosfèrica fins a 0,1 Pa. La seva lectura es complementa amb la mateixa lectura del sistema de buit mecànic.
- Per al rang de mesures del buit mitjà fins a l'alt serà mesurat directament per les bombes iòniques (es mesura la intensitat de corrent i es transforma en pressió).
- Per l'ultra-buit, s'instal·len dues sondes de tipus *Bayard-Alpert*. El model escollit és el *VARIAN UHV-24p*. Aquestes, van instal·lades sobre un colze estàndard i el filament treballa com una antena. Aquesta sonda es capaç de mesurar des de  $6,7 \cdot 10^{-10}$  Pa fins a 0,1 Pa.



## 10. DISPOSITIUS DE PROTECCIO TERMICA

S'explica breument quin son els aspectes tèrmics importants a resoldre en el disseny de l'ondulador, i com s'han resolt en el disseny conceptual. La base està en protegir les matrius d'imants de les altes temperatures.

### 10.1.1. Protecció dels imants durant el calentament de la cambra de buit

Com es veurà més endavant, per realitzar el buit extrem a la cambra, aquesta s'ha de posar a punt augmentant la seva temperatura a uns 200°C. El problema sorgeix en mantenir refrigerats els imants per sota de 120°C, doncs per sobre d'aquestes temperatures perden les seves propietats magnètiques. Per solucionar aquest problema, la idea principal es basa en mantenir refrigerada la biga interna a una temperatura determinada mitjançant un serpentí de coure *UNE L-6820* molt apte per circuits bescanviadors de calor [Riba, 1998b, p.25] perquè aquesta absorbeixi el calor que reben els imants.

Es per això important que els contenidors d'aquests siguin fets d'un material d'alta conductivitat tèrmica, i d'aquí la funcionalitat del serpentí de coure que envolta la cambra de buit. El dimensionat del serpentí i el model tèrmic de la biga interna es troben a l'annex A "càlculs" pag. 50. També es verifica que l'elongació de la biga interna degut al canvi de temperatura (de temperatura ambient a 120°) sigui acceptable.

### 10.1.2. Protecció dels imants del calentament degut al feix d'electrons

Es fica una cinta de Coure-Niquel *C-9215*, per assegurar la conductivitat a dins la cambra de buit. El corrent altern sinusoidal que s'esdevé en l'ondulador, fa que la intensitat es concentri a les superfícies (efecte *skin*) augmentant la temperatura dels imants. El gruix de la cinta serà suficient (50 µm) per protegir els imants d'aquest escalfament (veure plànol *PFC-CA0*)

### 10.1.3. Absorció de la radiació provenint del dipol anterior.

L'ondulador en buit es situat al centre d'una secció recta en l'anell d'emmagatzematge, amb la brida d'aigües amunt de la cambra de buit a una distancia de 1m del dipol d'aigües amunt més pròxim.



Una part de la radiació emesa per aquest dipol, arribarà a l'ondulador a través de l'interior de la cambra de buit i n'escalfarà l'estructura. Per interceptar aquesta radiació, s'instal·la un dispositiu absorbent, Consta d'un bloc de coure circular de coure C-1100, apte per la seva elevada conductivitat tèrmica amb una obertura d'unes dimensions determinades i un serpenti per refrigerar-lo dins del con d'adaptació aigües amunt. (veure plànol **PFC-D00**) Un altre dispositiu absorbent al con d'aigües avall s'instal·la per interceptar la radiació que passa pel forat aigües amunt.

Coneixent la densitat de radiació que emet un dipol d'ALBA integrada en direcció vertical i calculant l'angle de vista  $\theta$  mesurat des del feix d'electrons es pot trobar la potencia en forma de calor que ha d'ésser capaç d'absorbir cada dispositiu, i a partir d'aquí dissenyar-ne el sistema de refrigeració. La representació de com afecten les línies de radiació del dipol anterior a l'ondulador en buit que s'ha dissenyat es veu a la Figura 10.1

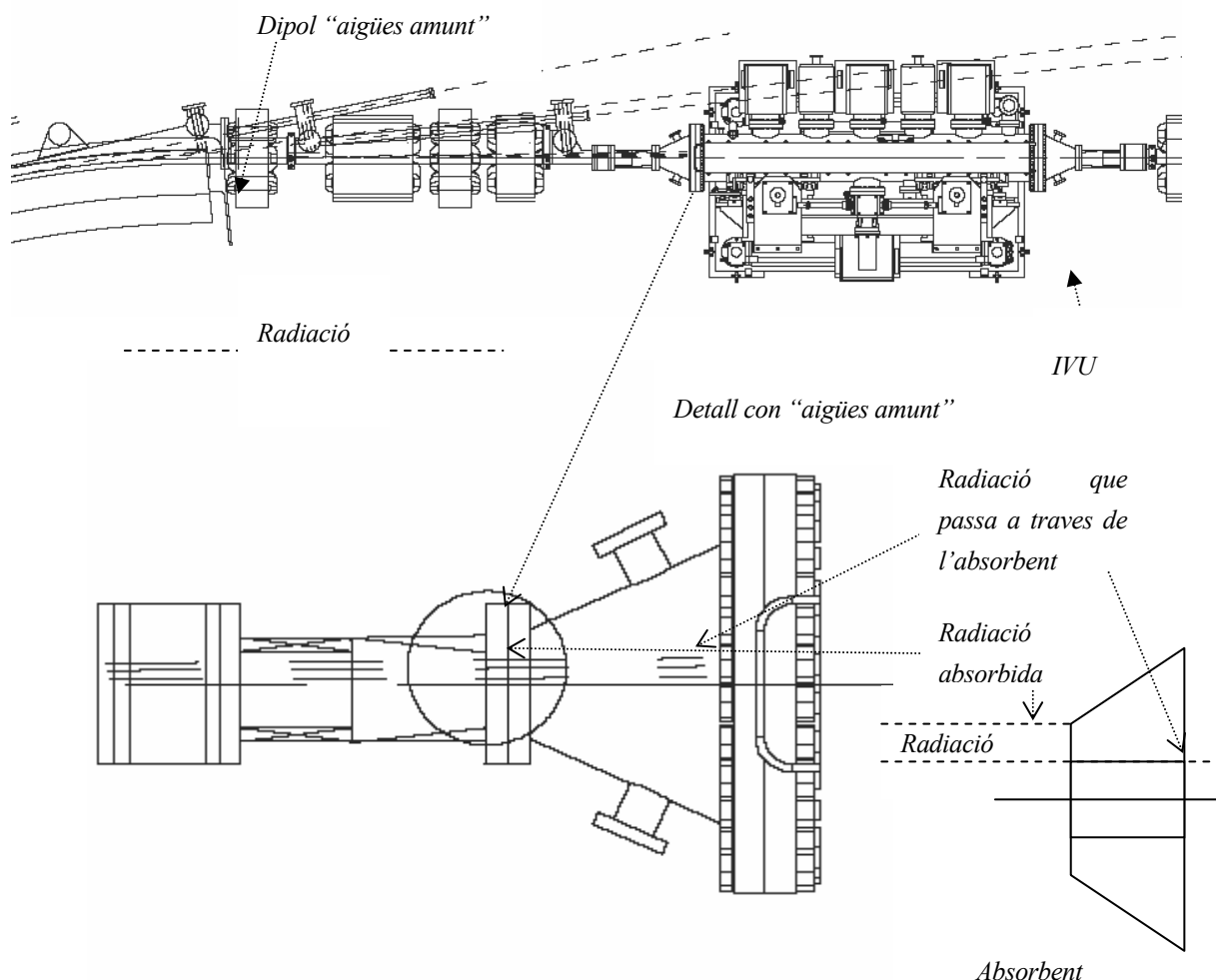


Fig. 10.1. L'ondulador dissenyat sotmes a radiació del dipol anterior



Una alternativa a aquest disseny és interceptar la radiació mitjançant una lamina de coure refrigerada (*crotch*) aigües amunt just després del dipol, deixant passar només un mínim de radiació sobrant.



## 11. BANCS D'ALINEAMENT

L'alineament en els elements de l'accelerador és bàsic per optimitzar al màxim les prestacions d'aquest i les de l'anell. (Es recomana mirar l'annex C "Banc d'alineament", doncs complementa necessàriament les explicacions següents)

### 11.1. Alineament de l'ondulador en buit com a cas particular.

#### 11.1.1. Alineament general

Per l'alineament d'un *ID* primerament es defineix *l'eix de simetria magnètic*. Aquest, és definit per l'intersecció entre el pla d'obertura i el pla que defineix la simetria de les matrius d'imants. *L'eix de simetria magnètic* (indicat al plànol *PFC-C00*) es pot representar amb dos punts  $P_1$  i  $P_2$  de tres coordenades respecte el centre de l'anell d'emmagatzematge.

*L'òrbita nominal* es un conjunt de coordenades absolutes que defineixen respecte el centre de l'anell d'emmagatzematge la trajectòria que segueixen els electrons. Per a un segment recte on hi ha instal·lada una *ID*, es defineix una recta posicionada mitjançant un punt d'aplicació i un vector.  $(P_N, V)$  Com indica a la figura 11.1

Geomètricament parlant, s'ha de fer que els punts  $P_1$  i  $P_2$  que corresponen a *l'eix de simetria magnètic*, formin part de la recta  $(P_N, V)$ ,

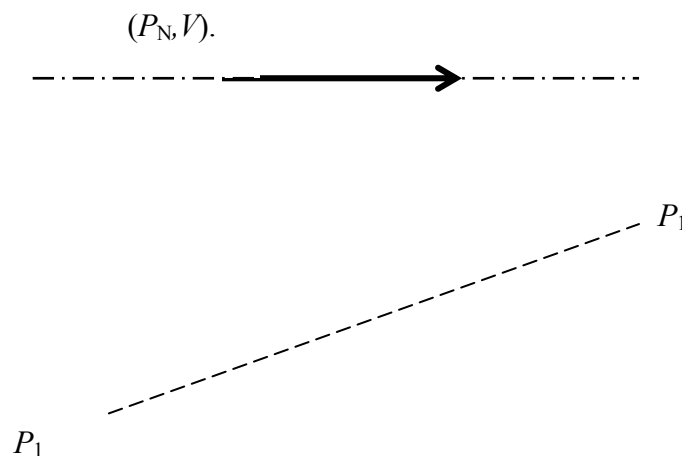


Fig. 11.1. Eix de simetria magnètic i òrbita nominal





*l'eix de simetria magnètic*, a la realitat mai formarà part de *l'òrbita nominal*. Els motius principals perquè inicialment no es doni aquesta coincidència són la tolerància mecànica i les deformacions per pes propi i en funcionament. Ambdós es corregeixen durant el calibratge inicial de la màquina o bé en el primer alineament, però els moviments del terra faran que una *ID* (com qualsevol element de l'anell d'emmagatzematge) s'hagi d'alinejar periòdicament.

Els punts  $P_1$  i  $P_2$  pertanyen al pla d'obertura i corresponen als extrems de les matrius d'imants. Es referencien a l'estructura de la *ID* sobre la biga externa mitjançant *monuments de referència*, instal·lats pel grup de treball que es dedica a l'alineament. (no estan inclosos en els plànols).

La posició desitjada de l'eix de simetria magnètic (recta  $P_{N,V}$ ) es sap gràcies *referències interiors* ubicades a la paret del túnel complementades amb *punts de control* i es mesura amb la instrumentació adequada des dels *pilars interiors* a l'edifici. L'alineament de l'ondulador relatiu a la resta dels elements de l'anell d'emmagatzematge es complementa amb instrumentació de precisió, presentada a l'annex C "banc d'alineament"

#### **11.1.2. Posicionament final en l'ondulador en buit. Requeriments mínims.**

El feix d'electrons en el pla té un perfil aproximable a una Campana Gaussiana, on el radi teòric equival a la desviació típica  $\sigma$ . Hi ha un *punt òptim de funcionament*  $\mu$ , on el feix té la màxima intensitat i aquest coincideix amb el centre (mitjana) d'aquesta campana. En el cas de l'ondulador en buit, quan *l'eix de simetria magnètic* està ja alineat amb el segment d'òrbita nominal que li correspon, s'ha de desplaçar paral·lelament i en direcció vertical fins que coincideixi amb aquest punt de mínima pèrdua d'intensitat  $\mu$ . **Aquest és el requeriment mínim de posicionament final que necessita l'ondulador en buit.**

Aquesta operació es duu a terme fent un escombrat mecànic en direcció vertical de *l'eix de simetria magnètic* amb una resolució desitjada de l'ordre d'1  $\mu\text{m}$  tot avaluant la intensitat al punts  $P_1$  i  $P_2$ . Es deixarà ubicat allí on la diferència d'intensitat entre aquests sigui mínima. La desviació típica es de l'ordre de  $10^{-1}$  mm. La pèrdua d'intensitat de l'ordre de mA.

La raó d'aquest posicionament vertical, és en el cas de l'Ondulador en buit que el feix de radiació està en contacte directe amb les matrius d'imants. Si el feix es troba en una posició asimètrica, el desgast seria desigual en una filera que en l'altra. En el pla horitzontal, no es considera crític aquest posicionament a nivell de desgast. Aquest escombrat, és necessari realitzar-lo des de fora del túnel de l'accelerador, doncs s'ha de realitzar amb el sincrotró en funcionament.



### 11.1.3. Graus de Llibertat

Un cop sabent les necessitats que requereix l'alineament i els paràmetres que hi intervenen, es pot comptabilitzar els mínims graus de llibertat que es necessita donar a l'ondulador en buit per al seu alineament correcte. Es representa a la Figura 11.2. Es defineix globalment 6 GL per alinear correctament un ondulador en buit. 5 GL per l'alineament general i 1 GL per al posicionament final.

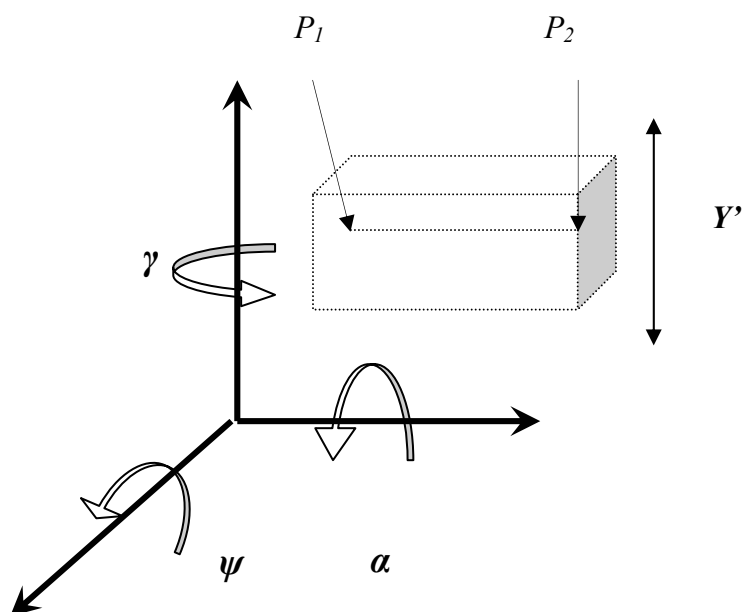


Fig. 11.2. Triedre. GL per l'alineament

- Per l'alineament general, es necessita la translació horitzontal  $X$ , i la vertical  $Y$  dels dos punts  $P_1$  i  $P_2$ . L'orientació d'aquests dos  $P_N$  definirà les rotacions corresponents al capcineig  $\gamma$ , la guinyada  $\psi$ .
- El balanceig  $\alpha$ , (gir sobre l'eix de simetria magnètic) també s'ajusta sota una tolerància, i es el que defineix el paral·lelisme del *pla d'obertura* respecte el terra.
- Per poder desplaçar verticalment i paral·lelament l'eix de simetria magnètic respecte l'òrbita nominal es necessita 1 GL ( $Y'$ )



- La translació  $Z$  al llarg de *l'eix de simetria magnètic* en principi no es considera com a grau de llibertat d'alineament, tot i que també s'ajusta per emplaçar l'ondulador a l'anell.

## 11.2. Criteris previs a disseny. Plànols d'estudi.

En l'evolució del projecte del sincrotró *ALBA* a dates d'avui no es sap quin sistema es vol per alinear i posicionar els *ID's*. (diferents sistemes son explicats als primers apartats de l'annex C "Banc d'alineament"). Es saben quines son les toleràncies d'alineament general per als elements d'emmagatzematge, doncs aquestes venen determinades pel feix d'electrons, però de cara al posicionament particular de l'*IVU*, no es coneixen les necessitats.

### *Opció 1*

La simplicitat de disseny i funcionament i a la vegada cost reduït, a l'hora de presentar un banc d'alineament per aquest ondulador, la solució decanta cap a un **banc d'alineament general totalment manual i posicionament final motoritzat** mitjançant *gats* que cobreixi els requeriments mínims de posicionament de *l'eix de simetria magnètic* sota la tolerància necessària definits a l'apartat 11.1 .

Es descriurà com a **opció 1** el disseny i funcionament d'un banc d'alineament d'aquest tipus. Es contempla l'ondulador instal·lat a aquest en el plànol *PFC-000*, on també s'indiquen els rangs de moviment per a de cadascuna de les etapes.

### *Opció 2*

Es pot tenir la necessitat de realitzar alineaments periòdics amb la màquina en funcionament. Apart, depenent de l'experiment que es realitzi a la *linea experimental* on vagi instal·lat l'ondulador, pot sorgir la necessitat puntual d'obtenir una tolerància en l'alineament en tots els graus de llibertat més precisa (al nivell de la de posicionament).

El disseny d'un banc que permeti **5 graus de llibertat motoritzats** d'alta precisió es presenta com a segona opció, degut a que segons com,

Es defineix com a **opció 2** un banc que permet posicionar, tots els graus de llibertat motoritzats amb alta resolució, l'ondulador en buit. Es basa en un sistema d'excèntriques. Es presenta a l'annex C "banc d'alineament", pag 12. Es plantejaran els principis cinemàtics de moviment i el funcionament .



La motivació principal n'és la bellesa dels seus moviments rotatius i el planteig geomètric per poder controlar informàticament els moviments de *l'eix de simetria magnètic*. El plànol **PFC-000\_2** indica com va muntat l'ondulador sobre un banc d'aquest tipus, i les constants geomètriques necessàries per poder raonar geomètricament la posició dels punts  $P_1$  i  $P_2$  de l'eix de simetria magnètic en funció dels angles girats per les excèntriques. També s'indiquen quin són els rangs de moviment per les etapes d'alineament manual i motoritzat.

### 11.3. Requeriments generals.

- **Graus de llibertat:** *l'eix de simetria magnètic* s'ha d'orientar amb 5 GLL:  $(X, Y, \alpha, \gamma, \varphi)$ . Un cop orientat, aquest s'ha de poder posicionar amb 1GLL ( $Y'$ )
- **Tolerància d'alineament:** Per ara, les especificacions generals que es tenen per l'alineament d' *ALBA* són les següents:
  - *Desviació estàndard* de  $\pm 0,1$  mm en l'alineament relatiu entre els elements de l'accelerador, en les direccions  $X, Y$ .
  - *Desviació estàndard* de  $\pm 0,1$  mrad en inclinació horitzontal.
  - *Precisió submilimètrica* per l'alineament absolut.
- **Resolució general:** S'ha de poder donar moviments al banc amb una resolució més petita de 0,1 mm. (degut a les especificacions anteriors)
- **Moviment precís:**  $\Delta L_{el,MIN} = 1 \mu\text{m} \rightarrow$  es necessita poder proporcionar un moviment vertical  $Y'$  lent, precís i motoritzat, (apart del possible moviment  $Y$  manual) amb una resolució desitjada que acostuma a ser per realitzar el posicionament final de *l'eix de simetria magnètic*.



## 11.4. Centre de gravetat.

Considerant tota la màquina com un sòlid rígid, es creu convenient que les potes que l'han de suportar es centrin simètricament respecte el *CG*. Així tots els elements que actuen de suport estaran sol·licitats amb la mateixa carrega axial, i ajuda a que les característiques de funcionament siguin les mateixes per cada pota. El centre de gravetat de l'ondulador en buit amb tots els seus components sense comptabilitzar el banc d'alineament es calcula amb una fulla de càlcul i es presenten els resultats a l'annex A "càlculs" pag.57 on s'aplica el teorema de *Pappus-Guldin* a tots els seus components.

Per a calcular el *CG* de cada component, es fa mitjançant el mateix programa de disseny 3D amb el que es treballa (*I-DEAS*). Com a origen de coordenades (0,0,0) s'agafa el punt mig de l'eix de simetria magnètic.

L'ondulador es una màquina aproximadament simètrica. Sols els finals de cursa situats a la seva dreta trenquen aquesta simetria. Això es reflexa en els resultats de càlcul del seu centre de gravetat, on apareixen els següents valors

$$X_{CG} = -129 \text{ mm}, Y_{CG} = -77 \text{ mm}, Z_{CG} = -0.5 \text{ mm}$$

La massa total de l'ondulador també resulta calculada amb el valor de 3101,3 kg i l'aproximarem tenint ara en compte el pes de tots els elements que no s'han comptabilitzat i sumant una estimació el pes que tindrà el mateix banc d'alineament

$$m_T = 3200 \text{ kg}$$

Els signes negatius indiquen que el sentit de les coordenades es l'invers al que s'ha definit a l'origen. Ens interessa la projecció horitzontal d'aquest centre i no es considerarà la coordenada  $Z_{CG}$ . Es tindrà en compte sols la coordenada  $X_{CG}$  i el banc es dissenyarà simètricament a la projecció vertical d'aquest *CG*, doncs no afectarà a la coordenada  $X_{CG}$



## 11.5. Primera opció. Banc manual amb elevador motoritzat.

Si les necessitats son les bàsiques, s'aposta per aquest Aquest banc (veure plànol *PFC-A00*) cobreix a baix cost a nivell de control l'alineament d'un element sota tolerància de  $\pm 10^{-1}$  mm Generalment, es manual i es necessita l'accelerador aturat per realitzar tot l'alineament. Disposa, però, d'un servo que permet elevar amb molta precisió ( $\mu\text{m}$ ). Es defineix:

- **Primera etapa:** Tots els graus de llibertat es proporcionaran manualment a base de potes amb rosca sobre un terra lliscant. Els elements roscats d'ajust han de ser capaços de proporcionar moviments de dècimes de mil·límetre.
- **Segona etapa:** El posicionament precís es basaria amb un *esquema d'elevació* format per actuadors i un sistema motor per a tots ells amb la reducció necessària per obtenir la resolució requerida. Amb la mateixa justificació que al mecanisme d'obertura s'utilitza un motor pas a pas

### 11.5.1. Segona etapa: Disseny conceptual. Possibles solucions.

Es comença a dissenyar el banc d'alineament per la segona etapa, que es tracta bàsicament d'una distribució d'actuador-reductors, on es convertirà el moviment rotacional amb longitudinal, i etapes de reducció per poder ser accionades en principi amb un mateix motor.

Aquest, pels mateixos motius exposats en el disseny del mecanisme d'obertura, ha d'ésser un motor pas a pas. Varies solucions han estat plantejades com a possibles en aquest inici del disseny: (*NOTA:* en els esquemes plantejats, l'elevació es donaria en un vector perpendicular al paper)

#### **ESQUEMA 1. Un sol motor i esquema amb un eix de simetria.**

Aquesta es una solució similar a la aplicada a *ESRF* on un sol motor pas a pas i una caixa de distribució transmeten la rotació als 4 actuadors que situats als extrems. Dos d'aquests (1,2) son reductors amb una relació de reducció determinada que tenen un eix conductor i dos conduïts: Un dels dos eixos conduïts és un roscat amb un determinat pas que converteix la rotació en un moviment de translació. Els altres eixos conduïts transmeten el moviment als actuadors (3,4).

L'actuador en aquest esquema està dissenyat a partir d'un reductor de precisió amb engranatges de tipus cònic la qual cosa facilita que el gir es pugui transmetre en  $90^\circ$ . La



irreversibilitat al mecanisme, o es pot donar amb el motor pas a pas convenientment sobredimensionat connectat constantment transmetent el parell necessari per que els actuadors romanguin a la mateixa posició sota carrega axial, amb algun sistema de bloqueig incorporat al reductor, amb un sistema de bloqueig a l'eix conductor del motor, o combinacions d'aquestes possibles solucions. L'esquema es veu a la Figura C.7, annex C, pag 13.

### ***ESQUEMA 2. Un sol motor, esquema asimètric.***

Es similar a l'anterior, però la irreversibilitat s'aconsegueix en el tipus de reductor utilitzat en l'actuador. Ara enlloc de tenir un reductor d'engrenatges cònics es té un vis sens fi (1,2,3,4) que pot donar la irreversibilitat al mecanisme d'una forma eficient i segura malgrat el seu baix rendiment. L'esquema es veu a la Figura C.8, annex C, pag. 14

Per poder transmetre el moviment a partir d'un sol motor pas a pas, cal recórrer a dos arbres exactament iguals on l'asimetria es dona a l'arbre conductor. Per transmetre el moviment als dos arbres elevadors es faria amb dues caixes de reenviament d'engrenatges cònics, i a una d'elles connectada el motor. El principal inconvenient que es veu a primera vista d'aquest mecanisme és que un gir molt petit s'ha de poder transmetre a través d'arbres de llarga longitud.

### ***ESQUEMA 3. Mecanisme amb dos motors i dos eixos de simetria***

Tot i que de bon principi la idea és controlar tot el mecanisme amb un sol grup motor, també es contempla la possibilitat de separar-lo en dos sub-mecanismes iguals. Aquests són completament simètrics segons *l'eix de simetria 1*, (veure annex) i a cadascun d'ells, el gir es transmet a través d'un reenviament d'angle. Al funcionar simultàniament, aquesta configuració separada també permet un grau addicional de llibertat de gir  $\alpha$  en *l'eix de simetria 2*, (veure annex) L'esquema es veu la Figura C.9, annex C, pag 14.

L'avantatge principal, es la simetria doble que es dona als quatre punts d'accionament, podent aproximar igual el rendiment de cada branca de transmissió i la potencia neta que arriba a cada actuador-reductor serà la mateixa. Caldrà tenir en compte a nivell de control que d'angle gir proporcionat per cada un dels motors pas a pas sigui exactament el mateix, quan es vulgui donar  $Y'$



### 11.5.2. Elecció de l'esquema i planteig.

La possibilitat de poder tenir la irreversibilitat incorporada al mecanisme fa descartar l'*ESQUEMA 1*, on aquesta s'aconsegueix a partir de mecanismes addicionals. S'opta per l'*ESQUEMA 3* ja que es una millora considerable de l'*ESQUEMA 2*. **Un mecanisme simètric assegura el funcionament per igual dels quatre actuadors-reductors a nivell de càrrega, eficiència i potència que hi arriba.**

En l'*ESQUEMA 3* s'obre la possibilitat d'afegir un  $GL-\alpha'$ , que correspondria a un balanceig motoritzat i d'alta resolució, sobre l'eix de simetria 2. L'ús o no d'aquest grau de llibertat amb resolució es presenta com a possibilitat, i es tindrà en compte depenent de les necessitat, ja que encareix el sistema de control. El centre de gravetat de l'ondulador es situarà a la intersecció entre els dos eixos de simetria

S'escolliran els elements d'aquest mecanisme tenint en compte el parell necessari que s'ha de transmetre per aixecar el pes de l'ondulador i la resolució que es requereix en el moviment vertical. El recorregut establert per aquest moviment, però no serà superior a  $\pm 5\text{mm}$ . La velocitat de moviment màxima per anar d'un extrem a l'altre no serà superior a  $v=1\text{mm/s}$ .

### 11.5.3. Primera etapa: Disseny conceptual. Esquemes i esborranys del disseny.

La primera etapa del banc es basarà en quatre potes amb cargol fixades a una placa que es desplaça sobre un pla horitzontal fixa al terra. El moviment de tot el conjunt respecte el pla horitzontal s'aconsegueix a base de roscar els cargols d'ajust. El gir de les quatre potes roscades sobre la maquina que s'ha d'alinear, permet l'elevació d'aquesta respecte el terra.

- **Moviment vertical Y:** actuant les quatre potes per igual
- **Balanceig:** actuant sobre les potes
- **Capcineig:** actuant sobre les potes
- **Moviment horitzontal X:** actuant sobre els cargols
- **Moviment horitzontal Z:** Es pot donar d'una forma anàloga a l'anterior, pero no es considera un grau de llibertat per l'alineament, doncs la posició sobre Z va determinada per el muntatge de la cambra de buit en la seva respectiva anterior i posterior





- **Guinyada:** actuant sobre els cargols.

Es representa en el dibuix  $\frac{1}{4}$  d'aquest esquema, doncs és simètric a dos eixos. L'esquema es veu a l'annex "C" Banc d'alineament, a la Figura C.10 , pag 15

La **resolució** que es necessita per fer aquests moviments es de l'ordre d'uns 0,1 mm. En les rotacions, vindrà definida per la donada en els cargols de les potes. Pel que fa al recorregut total de les potes, es deixaran uns centímetres de marge per fer una primera aproximació de *l'eix de simetria magnètic a l'òrbita nominal*,

#### 11.5.4. Sol·licitacions

Cadascuna dels 4 punts d'apoiament ha d'ésser capaç d'aguantar i elevar sota una càrrega de

$$F = \frac{32000}{4} = 8000 \text{ N a una velocitat màxima de } v = 1 \text{ mm/s.}$$

Es prepara un full de càlcul on es pot avaluar a partir de les característiques dels elements que es van escollint i etapes de reducció la *resolució possible*, els passos de motor necessaris per obtenir la *resolució desitjada*, els parells necessaris i potències als eixos de distribució i als motors. Cada meitat del grup elevador esta formada per dos unitats d'actuador-reductor, un grup motor format per un motor i un reenviament i les transmissions i acoblaments necessaris, com a elements de transmissió de moviment. La disposició dels elements es contempla en el plànol **PFC-A00**

#### 11.5.5. Actuador reductor

La funció d'aquests ha de ser contribuir en elevar el conjunt a partir de la rotació del seu eix d'entrada. El tipus de transmissió es de vis sens fi i la sortida te un roscat amb femella La femella anirà fixa al terra relatiu a la segona etapa i l'actuador-reductor haurà de ser solidari a l'ondulador perquè al girar es doni el desplaçament vertical.

S'escull un actuador-reductor vis sens fi del catàleg de **PFAFF-SILBERBLAU**, una firma especialitzada en mecanismes d'elevació. Aquesta ofereix molts accessoris per a aquests components, com femelles amb boles per a l'eix roscat, sistemes d'autoblocatge, i també *encoders* per la lectura directa del desplaçament *Y'* adaptats a l'eix de sortida. Es d'interès que aquest superi àmpliament la força màxima d'elevació a canvi d'un pas de rosca mínim i una reducció raonable.



L'actuador reductor *MERKUR M3* té una capacitat d'elevació de carrega axial que supera àmpliament la sol·licitació que es té i presenta dues reduccions, una llarga i una curta. Característiques principals:

**PAFF MERKUR M3** amb una força màxima d'elevació de  $F_{el,max} = 25$  kN i  $i_{red}=24$ .  $F_{el,max}$  és la capacitat de carrega axial que l'actuador es capaç d'elevació, i com es pot veure es molt superior a la que es necessita, però un d'un tamany immediatament més reduït queda ajustat, i com en el cas del mecanisme d'obertura, aquest reductor haurà d'estar contínuament aguantant la força  $F$ .  $\Delta L_{el}/rev$  fa referència a la longitud elevada per volta donada a l'eix d'entrada.

La femella de l'actuador serà de boles, pels mateixos motius exposats al mecanisme d'obertura i serà embridada, com a element accessori de *MERKUR M3*, La càrrega axial a elevar  $F$  es constant en tota condició de funcionament, i mata sempre en la mateixa direcció el possible joc que hi pugui haver entre el roscat i la femella de boles.

#### 11.5.6. Reenviament d'angle.

Per al muntatge d'un sistema elevador amb reductors de la gamma *MERKUR* el catàleg ens recomana usar un reenviament ja preparat per aquest cas concret, que seria el **NORMA M3**. Aquest es pot adquirir amb moltes configuracions, i es pot collar a la posició que es vulgui. Els diàmetre i l'altura de l'eix de sortida coincideix amb el del reductor escollit anteriorment. Es caracteritza perquè no presenta reducció i la seva relació de transmissió sols pot ser de 1:1. Aquest fet fa pensar que la primera reducció s'haurà d'incorporar en forma de caixa reductora al mateix motor pas a pas. La configuració que s'escollirà es la C. No es presenta la possibilitat de tenir sistema d'embridament pel motor.

#### 11.5.7. Motor

Per raons anàlogues al disseny del mecanisme d'obertura i com ja s'ha comentat anteriorment, els motor que s'ha d'utilitzar es un pas a pas. Aquest, pot treballar amb dos règims de funcionament. Per una banda, transmetent moviment a la cadena cinemàtica, i per altra banda, transmetent constantment el parell necessari i amb repòs si es creu convenient. Tot i així, per als actuadors-reductors escollits la càrrega esta per sota dels valors nominals, doncs com en el mecanisme, no es considera que sigui necessaria l'entrada de parell al reductor per equilibrar la força deguda al parell helicoidal aplicada a la *serp* del vis sens fi.

*PHYTRON* ofereix motors que treballen a 200 passos per volta, i és possible d'adquirir-los amb una caixa reductora relació de reducció que va de 3:1 a 9:1 amb una sola etapa de



reducció. Aquesta, a la vegada d'augmentar la resolució en el moviment, augmentarà també el parell possible que pot donar l'eix motor en unes condicions de funcionament. Es valorarà que la reducció necessària es pugui dur a terme mitjançant una sola etapa de reducció. La decisió final del motor es justifica al següent apartat.

### 11.5.8. Parell a l'eix motor. Càlculs

En aquest moment es vol saber quin és el parell que el motor ha d'ésser capaç de transmetre, tenint en compte a la velocitat aproximada a la que volem que treballi. En aquesta decisió hi entra en joc la reducció que portarà incorporada el motor, i s'ha d'aconseguir una resolució possible superior a la demanada.

En l'annex A "càlculs" pag 59 es desenvolupen els càlculs de parells i potències a totes les etapes.  $T_{mot} = 0,4 \text{ N}\cdot\text{m}$  Amb aquestes dades s'escull un motor pas a pas del catàleg de *PHYTRON*. El **ZSH87/2.200.5**

Per l'arrancada en servo-operació d'un esquema elevador el catàleg ens recomana aproximar el parell necessari com  $T_{arr} = 1,3 \cdot T_{mot}$ . El motor pot proporcionar aquest parell i es correcte per l'aplicació.

### 11.5.9. Resolució

Es calcula mitjançant la fulla de càlcul la *resolució possible* (desplaçament amb un pas complet de motor) introduint la següent expressió

$$\Delta L_{el,POS} = \frac{P_h}{i_{mot} \cdot i_{dist} \cdot i_{red}} \cdot \frac{1}{N_p} = 0,25 \text{ }\mu\text{m/pas} \quad (\text{Eq. 11.1})$$

La qual cosa indica que es necessitaran  $n = 4$  passos complets de motor per complir amb el mínim de resolució desitjada  $\Delta L_{el,MIN} = 1 \text{ }\mu\text{m}$ . Els elements de mesura per el control de la posició i velocitat (*encoders*) subministrats com a accessoris de l'actuador-reductor son solidaris a l'eix d'entrada d'aquest. Existeix però, la possibilitat de solidaritzar el gir de l'encoder directament amb el gir de la rosca de l'actuador-reductor, i aquesta es l'opció més interessant de cara a realitzar una mesura precisa.



Per això cal saber també a quin angle de gir  $\Phi$  de la rosca correspon a un desplaçament  $\Delta L_{el,MIN}$ :

$$\Phi = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta L_{el,MIN}}{P_h} = 0,001 \text{ rad} = 0,06^\circ \quad (\text{Eq. 11.2})$$

Aquest haurà de ser el valor mínim de gir que l'*encoder* incorporat a l'actuador-reductor sigui capaç de captar, per complir amb la resolució desitjada. Es consultarà sobre aquesta especificació a *PFAFF-SILBERBLAU*.

#### 11.5.10. Segona etapa. Plàtera corredissa i plàtera terra fixa

El disseny d'aquesta etapa és relativament senzill, doncs no ha d'ésser més que una plàtera corredissa lliscant respecte una al terra fix, solidaria al pla horitzontal (X,Z). S'utilitzen els cargols hexagonals que rosquen al la plàtera terra fixa per poder empènyer i posicionar la corredissa amb tot l'ondulador a sobre en el pla horitzontal.

Teòricament, els cargols hexagonals de posicionament han de tenir contacte puntual amb el cantell de la plàtera, doncs aquests seran de fabricació especial, a partir d'un espàrrec amb cap hexagonal de Ø16 amb un xamfrà mecanitzat a la punta, i se l'hi farà un pas de rosca de 0,5 mm

En els punts d'apoiament i per la cara inferior, la plàtera corredissa presenta unes peces de qualsevol acer endurit, la superfície de les quals es mecanitzarà per que el coeficient de fricció amb la terra fixa sigui el més baix possible. (evidentment, també es mecanitza les superfícies d'aquesta en aquests punts per la cara superior). S'immobilitza la corredissa respecte la fixa mitjançant grapes a pressió.

#### 11.5.11. Potes. Alternatives

Hi ha la possibilitat d'adquirir peus catalogats d'acer inoxidable amb una ròtula esfèrica que connecta la tija amb la base. Es una solució bona fins que es sap que el pas normalitzat segons *ISO* per una tija roscada tipus *M20* o *M30* és de 2,5 mm per un roscat normal i 1,5 mm per un roscat fi.

La possibilitat d'adquirir un roscat mes fi a aquesta tija existeix, però econòmicament surt més a compte fer un disseny propi per aquesta pota, amb un casquet amb grapa a la punta i un roscat *M30*, però amb un pas reduït fora de normativa (1mm/volta). per complir amb la



resolució. Es pot mecanitzar roscar mes fi (pas de 0,5 mm) sense cap problema, però es tem que una rosca tan fina es faci malbé al aguantar un pes de 1000 kg. Es veu al plànol **PFC-A00**

*L'eix de simetria magnètic* de l'ondulador sigui posicionat a 1400 mm del terra, és una de les especificacions de l'*IVU* per al sincrotró *ALBA*.

### 11.5.12. Estructura

La seva missió es suportar l'*IVU*, la segona etapa del banc d'alineament amb els conjunts d'elevació o *gats*. Aquesta es una estructura soldada i simètrica de perfil normalitzat, tal con es pot veure al plànol **PFC-AA0** formada per dos bigues longitudinals compostes per un perfil *HEB260* tancat lateralment amb plaques de 10 mm. Les transversals, són calaixos de perfil *UPN260* acabades amb unes tapes d'acer de 20 mm on es collen els *gats*. Al centre, es situa un tub quadrat de costat 140 mm per suportar els motors.

S'han ficat perfils *HEB* on s'aguanta el pes de tot l'ondulador, amb el moment d'inèrcia màxim orientat de tal manera que la fletxa deguda a la deformació sigui el més mínima possible. Sobre els perfils *HEB* hi van unes plaques de 5 mm d'acer soldades i posteriorment mecanitzades sota tolerància la planitud i el paral·lelisme entre elles.

Cal ficar també sota tolerància la perpendicularitat entre aquestes cares i les superfícies mecanitzades on van collats els *gats* i així es te que els eixos de les potes es creuin perpendicularment amb *l'eix de simetria magnètic*, sota una tolerància donada per la que es te en l'estructura del banc d'alineament, més l'estructura principal i els subconjunts mòbils. Els calaixos d'*UPN* aporten rigidesa al conjunt i a un d'ells es collen els pedestals que aguanten el pes de les bombes iòniques.

Tot el calaix és d'acer i es construeix mitjançant soldadura amb un posterior relaxat de tensions. Després es realitzaran els mecanitzats corresponents. (no es fa plànol d'aquesta estructura) No es comptabilitza la deformació que es dona en banc d'alineament.



### 11.5.13. Gat

És el conjunt d'elevació pertanyent a la primera etapa i a la segona d'aquest banc d'alineament. La seva funció es bàsicament transmetre moviment vertical i es basa en un mecanisme de dos graus de llibertat, com es pot veure a la Figura 11.3

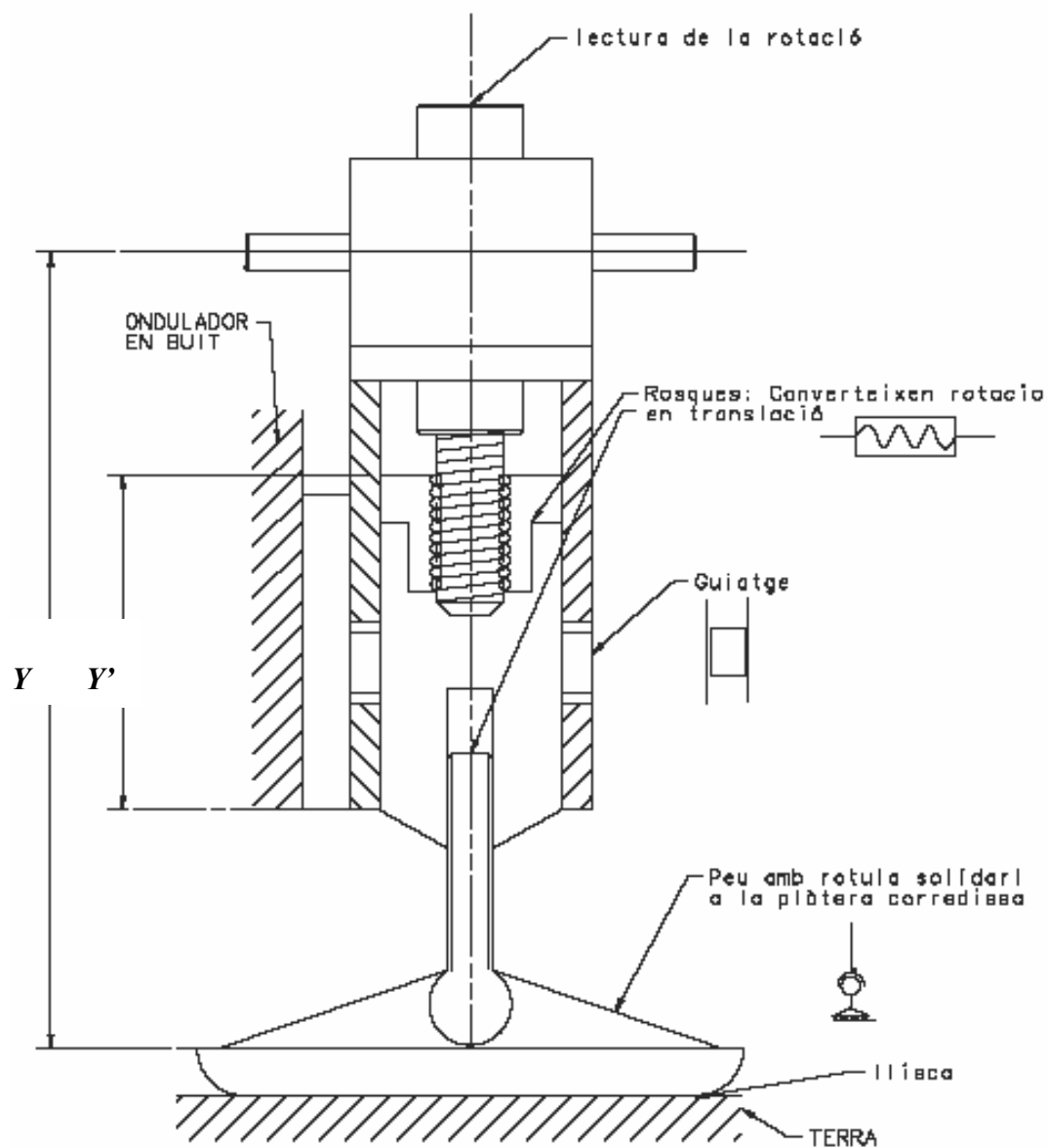


Fig. 11.3. Gat



- **De la primera etapa:** El desplaçament del peu  $Y$  respecte al gat es un moviment continu i la resolució d'aquest depèn del pas de rosca del peu. Amb aquest moviment es desplaça en sentit vertical els següents components: Gat, estructura del banc i segona etapa, i ondulator. El recorregut total dependrà de la llargada de la tija que es mecanitzi. Amb aquest banc d'alineament instal·lat, l'eix de simetria magnètic queda posicionat a  $1400 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$  (veure especificacions i plànol d'estudi **PFC-000**)
- **De la segona etapa:** El gir de l'actuador-reductor proporcionarà al conjunt format per una femella de boles collada a un cilindre un desplaçament  $Y'$ . Però com que aquests son fixats a una altura determinada gràcies al gir del peu, el que es desplaça és l'actuador-reductor juntament amb el xassís del gat, que com que està collat a l'estructura del banc, mou amb la resolució indicada tot l'ondulator en direcció vertical. Per garantir aquest funcionament, s'ha d'impedir el gir del cilindre a la vegada que ha d'estar guiat. Es tindrà un recorregut de  $\pm 5 \text{ mm}$

La peça cilíndrica e interior del gat es pot fabricar amb acer inoxidable *F-1250*, (ideal per arbres sol·licitats) [Riba, 1998, p.103] i el seu xassís a partir d'un bloc d'acer estructural mecanitzat. El guiatge del cilindre respecte el bloc exterior es duu a terme mitjançant clavetes. Aquestes es poden fabricar amb acer d'ús general.

L'ajust als claveters, ha d'ésser precís sense anar forçat, i el del cilindre respecte el bloc exterior amb tolerància ampla per poder deixar pas a una pel·lícula d'oli. La mateixa femella de boles té una entrada de lubricació que s'ha de fer coincidir amb una entrada feta al xassís del gat.

El sistema de final de cursa de palpador puntual (interruptor) és similar al del mecanisme d'obertura. (veure plànol **PFC-BB0**) Si aquests fallessin, el mateix claveter de guiatge fa de topall mecànic. No s'espera arribar mai a aquesta situació, doncs el sistema de control és capaç de controlar els finals de cursa amb seguretat.

#### 11.5.14. Elements auxiliars

##### *acoblaments i eixos*

- **reductor-reenviament:** Els eixos de transmissió serien similars als del mecanisme d'obertura a nivell de rigidesa i materials. Sols canviaria la geometria, que s'adaptaria a les puntes del reductor i del reenviament. Totes elles tenen un diàmetre 16mm. Els acoblaments, seran similars als del mecanisme d'obertura: de joc zero i que permeten



desalineaments petits en muntatge. el tipus **MSTS 40k-16x16** amb claveter, farà correctament la seva funció.

- **reenviament-motor:** El diàmetre de l'eix motor es de 20 mm, s'ha dissenyat una peça d'adaptació amb acer *F-1140*, (apte per a petits eixos poc sol·licitats) que converteix la punta de l'eix d'entrada al reenviament de 16mm a 20 mm. Es convenient que el claveter en aquesta peça vagi apretat per matar el joc. S'utilitzarà l'acoblament **MSTS 50k-20x20**

### **suport pel motor**

Ni mes ni menys que un perfil normalitzat *L120x10* mecanitzat i amb quatre colius que permetran fixar el motor a una posició determinada.

### **unions cargolades.**

Cargols de cap *allen* (tipus *CHC*) excepte els que serveixen d'ajust en la plàtera corredissa. No es troben cargols compromesos excepte els que suporten els gats a l'estructura, quatre *CHC M12x35* que suporten a cisalla la força de 2 kN cadascun d'ells.

### **11.5.15. Aspectes dinàmics de moviment.**

Es veu clar com es poden donar les translacions a aquest mecanisme. Respecte a les rotacions, es raona que suposant una rotació  $\theta$  qualsevol en un dels dos eixos horitzontals que passin pel centre del banc, cinemàticament són dos els moviments que s'han de donar al gat (veure figura C.11 annex C "Banc d'alineament" pag 16)

- Variacions de les longituds  $Y$  per igual de cadascun dels gats.
- Desplaçament del peu en direcció horitzontal (el gat i l'estructura del banc formen un angle rígid de  $90^\circ$ ).

Per donar aquest desplaçament, es necessari vèncer la força de fricció que es crea degut al pes que suporta cada un dels gats. aquesta força de fricció es supera gràcies a la força que s'oposa a la deformació del gat que es donaria al executar els  $\Delta Y$  (definitos anteriorment) a cada gat si el desplaçament horitzontal  $X$  fos restringit.

El desplaçament horitzontal dels gats es donarà a partir del moment en que  $F_{def} > F_r$ . Pot ser que per desplaçaments verticals molt petits, el valor d'aquesta força de deformació no superi





el valor indicat de fricció, doncs no es produirà el moviment horitzontal. S'arriba a la conclusió que durant tot el procés d'alineament manual, quan es donin les rotacions  $\alpha$  i  $\psi$  la plàtera corredissa ha d'estar lliure per permetre aquesta translació.

#### 11.5.16. Mètode de funcionament.

Amb el sincrotró en parat i partir de les *referències interiors*, els *pilars interiors*, els *punts de control* i l'instrumentaria adequada per les mesures relatives i la inclinació, es troben els desplaçaments que s'han de realitzar al punts  $P_1$  i  $P_2$  per tenir l'ondulador alineat. Per l'alineament general, s'opera manualment i per separat en ambdós costats del banc:

1. Afluixar les grapes i ajustar els moviments sobre el pla  $XZ$ . A posteriori, afluixar els cargols d'ajust  $XZ$ .
2. Ajustar les posicions i les inclinacions amb els gats. Permetre el desplaçament de la plàtera corredissa si convé.
3. Tornar a ajustar  $XZ$  si es creu convenient i collar les grapes de fixació
4. Es presenta la possibilitat d'ajustar la inclinació  $\alpha$  si es necessita fer-ho amb més resolució mitjançant el sistema motoritzat d'elevació.
5. S'apreten les contrafemelles dels gats. Ara el conjunt format per l'ondulador, el cos cilíndric del gat la contrafemella, la tija de la pota i les plateres formen un sòlid rígid apoiat al terra.
6. El posicionament final, es dona amb amb el sincrotró en funcionament i des de *l'àrea experimental*. El sistema de control anirà proporcionant polsos als dos motors per igual fins que les pèrdues d'intensitat entre el punt  $P_1$  i  $P_2$  sigui mínimes. El sistema pot romandre apagat un cop realitzat l'ajust, o be si es tanca el llaç de realimentació el posicionat final pot ser constant.



## 11.6. Segona opció: Banc amb actuadors d'excèntriques

- Independentment de quina sigui la *tolerància d'alineament*, de l'anell d'emmagatzematge pot ser que determinats experiments necessitin una línia de llum en la que els dispositius que la condueixen necessiten ser alineats amb un marge molt més restringit (pocs  $\mu\text{m}$ ).
- Pot ser que es tingui la necessitat d'alinejar els elements contínuament, i la parada de l'accelerador es una pèrdua de "beneficis".

La solució a les dos qüestions anteriors juntes o per separat està amb un banc d'alineament d'altíssima precisió, (no essent aquesta una solució particularment barata a nivell de control)

Aquest banc d'alineament està inspirat en el disseny que hi ha a *SLAC* (Canadà) [Bowden, 1995] per solucionar el problema de l'alineament. Es tracta d'un conjunt d'actuadors compostos per eixos amb una excèntriques que giren mitjançant motors pas a pas i reductors. (*Veure plànol PFC-E00*) A base de combinacions d'aquests moviments, permet a l'ondulador, d'una forma molt precisa, les translacions  $(X, Y)$  i les rotacions  $(\alpha; \gamma; \varphi)$

El posicionament amb excèntriques va complementat amb un banc senzill i manual (amb potes roscades i cargols) Tal que:

- El banc manual corregeix desviacions importants degudes, als desviaments deguts a les toleràncies mecàniques de fabricació i muntatge i deformacions degudes a pes propi.
- El banc d'excèntriques motoritzat serveix per:
  - Sempre que sigui necessari, corregir els moviments del terra que afecten a l'alineament de l'anell d'emmagatzematge amb l'accelerador funcionant
  - Augmentar la resolució en l'alineament si l'experiment ho requereix.

### 11.6.1. Avantatges e inconvenients d'un disseny d'aquest tipus

L'avantatge principal d'aquest tipus de mecanisme es que permet 5 graus de llibertat d'una forma molt compacta amb una resolució de l'ordre de  $\mu\text{m}$ . Si es vol implementar un algoritme de control automàtic que romanguí iterant, l'alineament i el posicionament final es poden realitzar contínuament.



En aquest tipus de muntatge, l'IVU i el banc són peces independents, i el nexa d'unió són uns palpadors solidaris a l'estructura principal. L'única força que fa que l'ondulador romangui restringit es la gravetat, i no son necessaris limitadors de recorregut per protegir el fi de cursa, doncs aquest ve donat per les característiques cinemàtiques del mecanisme.

L'ondulador es pot treure del banc i tornar-lo a apoiar i aquest quedarà sempre a la mateixa posició, doncs quan aquest està sobre el banc, queda completament sota restricció cinemàtica i sense cap enllaç redundant. (sistema estàtic). La seva geometria es molt compacta i segueix el principi de la *Restricció de Kelvin* . S'explica a l'apartat següent.

En el moviment dels palpadors i les excèntriques no es produeix lliscament, i com que es basa tot moviments de rodadura, tot el joc queda reduït al mínim.

El principal inconvenient es cost per controlar 5 servomotors a la vegada i es necessita obligatòriament més instrumentació. **Aquest banc es dissenya, es construeix i es calibra si l'aplicació ho requereix, no s'usa com una solució sistemàtica.** S'ha de tenir la necessitat per que sigui rentable dissenyar, construir i controlar bancs d'aquest tipus per tots els elements de l'anell d'emmagatzematge.



### 11.6.2. Característiques geomètriques.

Els palpadors es basen en superfícies que formen un angle de  $45^\circ$  respecte el pla horitzontal. Així, en els moviments de translació dels palpadors, l'angle de gir  $\theta$  de l'excèntrica té el mateix efecte tant per  $X$  com per  $Y$ . El disseny té la següent geometria, representada a la Figura 11.4

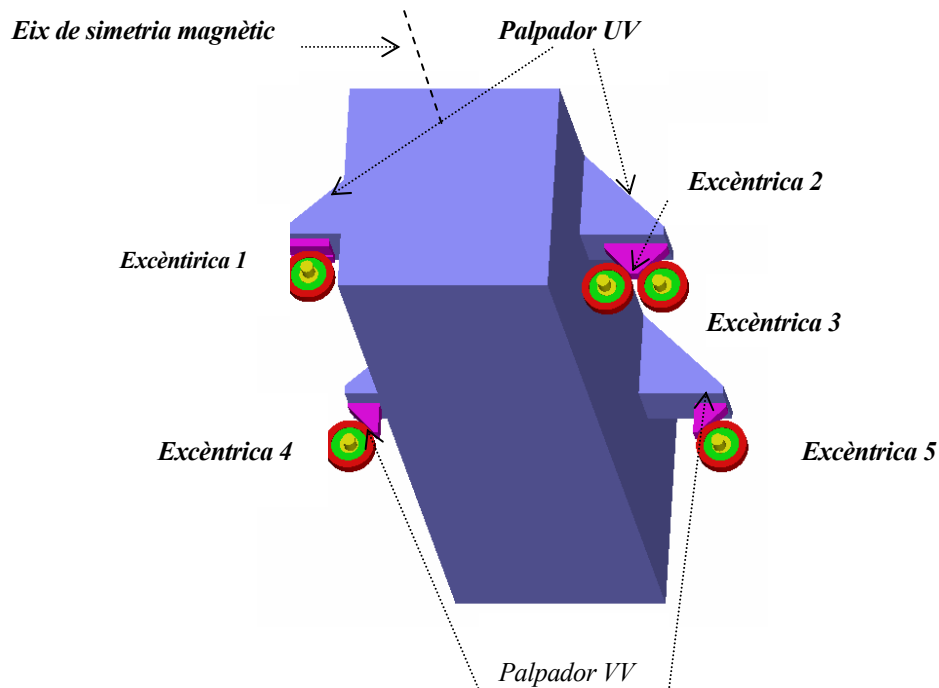


Fig. 11.4. Banc d'alineament, segona opció. Esquema general

- El palpador davant se l'anomena “palpador UV”. el palpador posterior se l'anomena “palpador VV”. El palpador UV, el palpador VV i l'eix de simetria magnètic forma un sòlid rígid.
- Els angles de posició de les excèntriques s'anomenen  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ . Els angles de moviment de les excèntriques s'anomenen  $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \Delta\theta_4, \Delta\theta_5$ .  $e$  n'és l'excentricitat i  $R$  el radi. Totes les excèntriques del banc tenen la mateixa geometria.
- La geometria segueix el principi de la *Restricció de Kelvin*, “la restricció mínima i suficient per immobilitzar un sòlid sobre un altre es pot donar a partir d'un canal rectilini, un pla i una punta cònica”: El palpador U, representa la superfície plana, el U el UV, la punta cònica i el V del VV, el canal rectilini. [J E Furse, 1981]



### 11.6.3. L'excèntrica: Característiques cinemàtiques i Posició inicial.

Es vol realitzar un estudi dels moviments de l'IVU a partir dels angles girats per les excèntriques. Cinemàticament, es poden donar els 5 graus de llibertat amb aquest sistema, de la següent manera. Per entendre-ho be, cal tenir clar que la lleva excèntrica, per si sola té tres graus de llibertat (veure Figura 11.5)

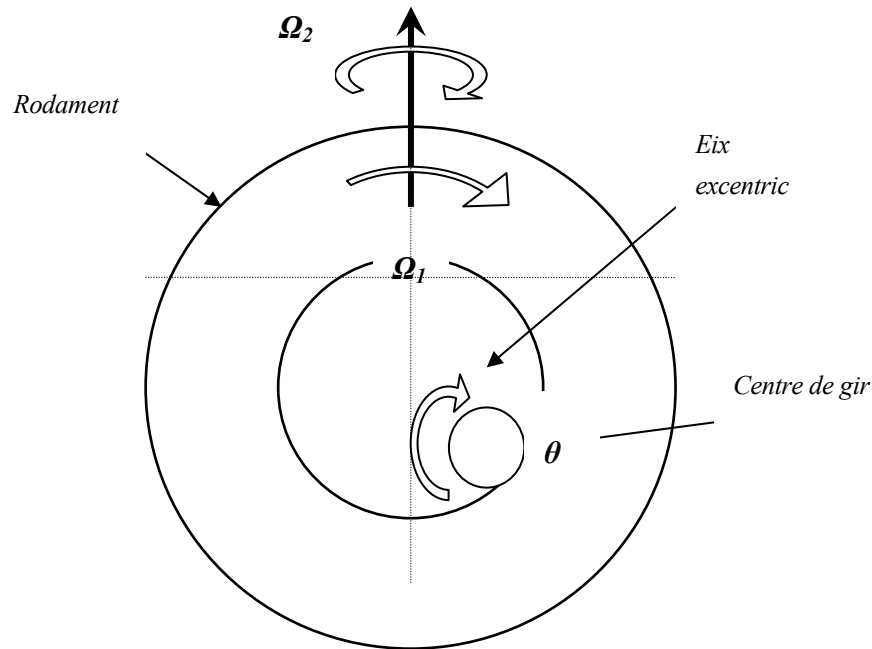


Fig. 11.5. Graus de llibertat de l'excèntrica.

L'eix excèntric de gir, té una coberta que és bàsicament un rodament de dos fileres de corrns cònics amb rotula a l'anell exterior (tipus SC) i aquest té dos eixos lliures de gir (Cal veure la Figura 11.5 juntament amb el plànol **PFC-EE0**) Mecànicament el rodament pot girar lliurement ( $\Omega_1$ ) respecte el centre el de la circumferència que la defineix, i també ( $\Omega_2$ ) respecte qualsevol eix perpendicular a l'axial. Això transforma els lliscaments en moviments de rodadura. Moviments angulars  $\theta$  sobre l'eix d'excentricitat. Es defineix posició inicial de moviment quan  $(\theta_{1,0} \theta_{2,0} \theta_{3,0} \theta_{4,0} \theta_{5,0}) = (0, 45^\circ, 135^\circ, 45^\circ, 135^\circ)$



#### 11.6.4. Els moviments longitudinals per separat.

##### *Equacions de moviment*

A l'annex C "banc d'alineament" pag. 17-27 s'ha realitzat un estudi cinemàtic dels moviments dels palpadors solidaris a l'eix de simetria magnètic en funció de els angles de gir de les excèntriques.

Les equacions d'enllaç geomètriques relacionen les coordenades de posicionament  $(x, y, \alpha)$  dels punts  $P_1$  i  $P_2$  respecte la seva posició inicial amb la posició final de les excèntriques donades per els angles  $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)$  de gir respecte el pla horitzontal.

La conclusió d'aquest es que els moviments d'aquest mecanisme son possibles, i que per qualsevol posició al voltant de la inicial definida anteriorment i dins del rang de moviment. Es compleix per aquest sòlid que:

- Un desplaçament  $\Delta x$  es dona girant en el mateix sentit les excèntriques 2,3,4,5 el mateix angle. L'excèntrica 1 roman immòbil i el palpador UV roda sobre ella.
- Un desplaçament  $\Delta y$  es dona girant totes les excèntriques el mateix angle amb la 2,4 i 3,5 en sentits oposats respectivament. L'excèntrica 1 corregeix la verticalitat
- Un balanceig  $\alpha$  es dona a partir de moviments combinats de totes les excèntriques.
- Els moviments angulars  $\psi, \varphi$  venen donats per les combinacions de moviments longitudinals per separat d'ambdós palpadors guiant els punts  $P_1$  i  $P_2$  per separat.
- La translació en l'eix Z roman restringida per l'emplaçament

A l'annex C "banc d'alineament" es troba un esquema que permet veure a per inspecció visual que el sistema funciona. També s'hi troba el raonament geomètric i les equacions d'enllaç que s'han deduït per descriure aquests moviments.

##### *Rang de moviments*

L'Excentricitat  $e$  i la geometria del palpador determinarà el rang de moviment  $X$  i  $Y$  de l'eix de simetria magnètic. Es considera que les excèntriques sempre estaran en contacte amb la superfície del palpador i els límits del moviment sempre vindran donats per els següents angles de posició d'aquestes



- Límits de moviment vertical: venen donats per  $\theta_{1,\dots,5}=\pm 90^\circ$
- Moviments horitzontals:
  - Màxim a dretes:  $\theta_{2,4}=+135^\circ$ ,  $\theta_{3,5}=-45^\circ$
  - Màxim a esquerres:  $\theta_{2,4}=-45^\circ$ ,  $\theta_{3,5}=+135^\circ$

Així doncs, els límits de moviment ens els dona (Eq. 11.3)

$$X_{\text{MAX}}=\pm\sqrt{2}e, Y_{\text{MAX}}=\pm e \quad (\text{Eq. 11.3})$$

### 11.6.5. Disseny conceptual. Característiques del banc.

Es planteja la construcció i funcionament d'un banc d'alineament d'aquest tipus. L'aspecte final que s'obté, es pot veure al plànol **PFC-E00** i l'acoblament de l'IVU al banc mitjançant *palpadors UV* i *UU*.

#### ***Excentricitat i diàmetre***

S'escull una excentricitat de  $e = 2$  mm. Això permet un rang de moviment  $Y_{\text{MAX}} = \pm 2$  mm,  $X_{\text{MAX}} = \pm 2,828$  mm, segons Eq. (11.3) suficient per posicionar *l'eix de simetria magnètic*, segons els desplaçaments provocats per la vibració del terra.

#### ***Resolució, i velocitat de moviment.***

Cadascuna de les excèntriques ha d'ésser capaç de proporcionar desplaçaments de horitzontals i verticals al voltant de  $1 \mu\text{m}$  al seu corresponent palpador. Segons l'equació de l'excèntrica, aquest desplaçament correspon a  $0.03^\circ$  en l'angle de gir. Es vol una velocitat de rotació de  $\omega = 1 \text{ min}^{-1}$ , que permetrà moure's entre posicions extremes en un temps inferior a 30 s.

#### ***Etaques de reducció en l'actuador***

Per complir amb la resolució indicada a l'apartat anterior, s'escull per a cada actuador: una  $i_{\text{red}}=39$  al reductor vis sens fi (rendiment al voltant del 40%) i un motor pas a pas de  $N_p = 200$  pas/volta amb possibilitat de treballar amb mitjos passos, i amb una caixa de reducció de dues etapes (rendiment a voltes del 85%) que proporciona  $i_{\text{mot}} = 25$ .



Amb aquestes etapes de reducció, la resolució possible serà donada per (Eq 11.4)

$$\Delta\theta_{N,POS} = \frac{360^\circ}{N_p} \cdot \frac{1}{i_{red} \cdot i_{mot}} \quad (\text{Eq. 11.4})$$

- $\Delta\theta_{N,POS} = 1,84 \cdot 10^{-3} \text{°/pas}$  amb el motor treballant a pas sencer.
- $\Delta\theta_{N,POS} = 0,92 \cdot 10^{-3} \text{°/pas}$  amb el motor treballant a mig pas.

#### 11.6.6. Esforços

Les sol·licitacions als palpadors es representen a l'annex A "càlculs". Es considera els palpadors estan en posició horitzontal. La força màxima aplicada en una de les excèntriques és d'uns 11 kN. El parell que s'ha d'aplicar a cadascuna de les excèntriques és d'uns 22 N·m.

#### 11.6.7. Parell motor. Tria elements.

Segons les reduccions aplicades i la  $\omega$  que es vol a l'excèntrica, correspon a una velocitat del motor de  $\omega_{mot} = 975 \text{ min}^{-1}$ , que esta dins del rang òptim per als motors de la marca *PHYTRON*. El parell que ha de proporcionar l'eix de sortida del reductor és el calculat anteriorment,  $T_{red} = 22 \text{ kN}$ . No es te en compte la fricció en els rodaments de l'actuador. El parell a l'eix del motor es calcula a l'annex A "càlculs" i val **0,07 N.m**

Qualsevol motor de la sèrie *ZSH* de *PHYTRON* és capaç d'operar en aquestes condicions. Com es pot veure a les fotos exposades a l'annex C "Banc d'alineament" els motors aplicats a aquests casos no son exclusivament grans, doncs com que es necessiten reduccions molt elevades, el parell resulta desmultiplicat a l'eix del motor.

El motor pas a pas *PHYTRON ZSH 57/1* amb reducció de 1:25 és l'escollit per l'aplicació així com el reductor vis sens fi *ATLANTA 59 01 039* aquest amb brida, així el motor pas a pas hi pot anar instal·lat directament.

#### 11.6.8. L'actuador. Despeçament

L'elevada rigidesa n'és la principal característica d'aquest actuador, perquè com tot mecanisme d'aquesta màquina, no es lluita contra la fatiga, sinó contra la pèrdua de precisió deguda a l'ús. Els seus components principals es contemplen al plànol *PFC-EE0*.





Aquest esta format per un bloc de qualsevol acer estructural mecanitzat on hi entra l'eix amb excèntrica collat amb rodaments de corrons, del tipus 30KB22 en disposició "O".Les càrregues divergeixen cap a l'eix del rodament, augmenta la rigidesa del conjunt i és una disposició en un tipus de rodament ideal per aguantar la carrega radial necessària. [Niemann, 1981, p.294] Una brida centradora proporciona el centrat i posicionat d'aquest eix al bloc, amb una mica de llum per assegurar el falcament del rodament.

Sobre l'excèntrica, s'hi munta un rodament de ròtula oscil.lant tipus 45SC22 que es el que permet la rodadura en els moviments al mecanisme. Aquest es de doble filera de corrons cònics, molt adequat per absorbir càrrega radial. La coberta d'aquest, te el gir permès respecte l'eix axial i el vertical per no deformar els palpadors a l'hora de realitzar moviments  $\psi, \varphi$ .

L'eix excèntric ha d'estar fabricat d'un material rígid per fabricar arbres i a la vegada amb la suficient mecanitzabilitat per poder donar els acabats superficials sota tolerància necessaris. Per exemple, F-1270 és vàlid. La coberta defineix un diàmetre exterior per l'excèntrica, i mitjançant la *teoria de superfícies en contacte de Hertz*, a l'annex A "càlculs" s'arriba a la conclusió de que per un diàmetre de 120mm qualsevol material es vàlid per la construcció del sistema lleva-palpador. Es construiran també d'acer F-1270 que permet la fabricació peces dures gràcies a la seva trempabilitat. [Riba, 1998, p.103]

El reductor va centrat sobre el bloc de l'actuador i te una campana que fa de brida per a la instal·lació del motor pas a pas. A l'altra punta de l'eix, per raons anàlogues al sistema de control de l'obertura, s'hi fica un *encoder* absolut d'una sola volta **KUBLER 5876** per a fer mesures directes de les posicions angulars. La resolució d'aquest és de 14 bits, que correspon a una lectura mínima possible de  $0,02^\circ$ , amb el que compleix amb la resolució desitjada ( $\Delta\theta_{N,MIN} = 0,03^\circ$ ).

En aquest disseny hi ha tres actuadors simples i un de doble. L'actuador doble, segueix la mateixa filosofia que el simple, amb la diferència que el bloc suport de ferro es més ample i conte tots els elements per duplicat.

### 11.6.9. Palpadors

Aquests serien d'acer de bonificació també de F-1270 i es cargolen a un calaix de perfil normalitzat solidari a l'estructura. Es fabriquen sota tolerància  $\pm 0,01$  en planituts i paral·lelismes. Els palpadors son completament rígids, i s'han de collar a un calaix de perfil normalitzat solidari a l'estructura.



Per a moviments  $\psi$ ,  $\varphi$  de l'ordre d'1 mrad, el mateix joc del rodament que fa d'excèntrica permet que el palpador formi un angle respecte l'excèntrica en la projecció horitzontal. Per aconseguir moviments mes amples, a altres instal·lacions s'han desenvolupat palpadors amb graus de llibertat respecte de l'element a alinear, fotografies dels quals es troben a l'annex C "banc d'alineament"

#### 11.6.10. Suport i sistema d'anivellació manual.

Com s'ha explicat a l'apartat 9, el banc motoritzat necessita estar complementat amb un de manual, que proporcioni als moviments una resolució no necessàriament tant elevada. Es munten quatre apoiments sobre un calaix fet de perfil normalitzat centrats en el  $CG$ , aquest cop actuades per separat sols amb un actuador-reductor *MERKUR M3* de *PFAFF-SILBERBLAU*.

S'actua a mà i mitjançant una clau i dona la resolució necessària per aquest moviment. (0,25 mm/volta). Les potes necessiten ésser amb acoblament esfèric, per permetre moviments angulars. S'utilitzen potes d'acer inoxidable tant l'espiga com la base, del fabricant *EGANA* acoblades a la rosca del reductor. L'alineament en el pla  $XZ$  té la mateixa solució que la adoptada al banc anterior. Sobre aquest calaix, hi van collats els actuadors de lleva. L'altura de l'ondulador sobre aquest banc, es pot ajustar a 1400 mm

#### 11.6.11. Funcionament.

Primerament s'alinea tot l'equip per corregir les toleràncies mecàniques i les deformacions degudes al pes propi per mitjà de potes mecàniques o gats de precisió amb les respectives referències, amb les excèntriques a la seva *posició inicial de moviment*. Es deixa calibrada així l'instrumentaria necessària per la lectura constant:

Quan apareix la necessitat d'alineat sense parar el funcionament del sincrotró, es pren mesura de la posició final on ha d'anar l'element mitjançant aquesta instrumentació i d'altra i el desviament actual que existeix. Ara, es pot realitzar alineament sota tolerància d'ultra precisió, sabent quins son els desplaçaments que ha de realitzar cada punt donat per  $P_n(x,y,\alpha)$  amb  $n = 1, 2$  que s'ha de corregir.

S'apliquen les equacions geomètriques deduïdes a l'annex C "banc d'alineament". El *posicionament final* de l'ondulador queda ja cobert, doncs s'ajusta *l'eix de simetria magnètic* accionant els motors. La resolució la determina la instrumentació de mesura i la repetitivitat, amb la gran avantatja que es pot fer des de fora del túnel.



Es pot tractar també com un sistema realimentat, a partir d'una instal·lació de sistemes d'increments de mesura lineals *LVDT*. S'entraria la tolerància d'alineament necessària com a marge.



## 12. MUNTATGE, CALIBRATGE I POSADA A PUNT

El muntatge d'una màquina on l'alta resolució en el seu funcionament i la precisió en la fabricació les peces és important, obliga a un muntatge acurat i precís, de totes les peces que el componen.

### 12.1. Estructures

El muntatge de l'IVU comença en collar les bigues externes mòbils a l'estructura principal. La unió cargolada dels patins amb l'estructura, s'ha comprovat a l'annex A "càlculs" pag 43 i també se n'ha extret un valor orientatiu del moment de muntatge ( $M_M \approx 8 \text{ N}\cdot\text{m}$ ) Els carrils es poden collar a l'estructura amb el corresponents patins muntats a la biga externa, doncs el seu recorregut total es prou llarg per tenir accés a tots els cargols. Cal també muntar els patins llargs que porten les platerets de connexió.

Es fan passar els fusells i s'enrosquen les femelles sense collar-les als carros. es presenta la unió amb els rodaments de suport i es fa el muntatge amb una posició "distància d'ensamblatge" que correspon a la màxima obertura (veure plànol **PFC-B00**).

Es munta el mecanisme d'obertura centrant al màxim els elements. El grup fusell-reductor-*encoder* es presenta i quan esta alineat s'apreta. Es segueix la mateixa filosofia per el servomotor (motor, distribució i arbres).

Els *encoders* han d'estar inicialitzats de fàbrica, i els reductors convenientment lubricats. Cal netejar al màxim les superfícies interiors dels acoblaments i les puntes dels arbres S'afegirà una gota d'oli a les unions cargolades d'aquests.

Es fa la primera prova de que el mecanisme d'obertura funcioni amb la resolució desitjada i el joc quedi matat tal com s'ha previst. Es fa una prova dels finals de cursa a partir d'interruptors elèctrics i es calibren els corredius palpadors mitjançant els micròmetres. El fi de cursa mecànic es prova sols un cop, per avaluar com respon la cadena si es donés aquesta situació de parada mecànica.



## 12.2. Muntatge de la zona “en buit”.

Per a que la ona sinusoïdal que defineixen els electrons al passar pel pla d'obertura sigui el més uniforme possible, cal que el mòdul del camp magnètic de cadascun dels imants sigui el mateix que el del seu simètric, i que les direccions dels camps magnètics entre ells siguin el més perpendiculars possibles.

Com que la fabricació i magnetització de l'imant no és mai perfecta, és necessari ajustar aquestes petites imperfeccions durant el muntatge. El procés de posada apunt dels blocs magnètics s'anomena trimatge (*shimming*) i comença en l'avaluació del camp als imants per separat, amb bancs de mesura al Laboratori de *IDs*

### *Trimatge*

S'ha d'igualar el camp magnètic de cadascun d'ells amb el seu corresponent ubicat a la biga interna paral·lela. S'aconsegueix de dues maneres consecutives amb el següent ordre:

1. S'avalua amb els procediments i l'instrumentaria adequada el camp magnètic de cadascun dels imants per separat i s'agrupen en parelles d'igual mòdul i direcció. S'han d'emparellar els imants de manera que entre ells es corregeixin al màxim les desviacions en les direccions de camp. Es munten les matrius paral·lelament a les bigues internes.
2. Es reajusta el mòdul i si convé la direcció introduint material magnètic en forma de cilindre al les cavitats cilíndriques que hi ha mecanitzades als contenidors. (veure plànol *PFC-C00*) La situació s'exemplifica a la Figura 12.1.



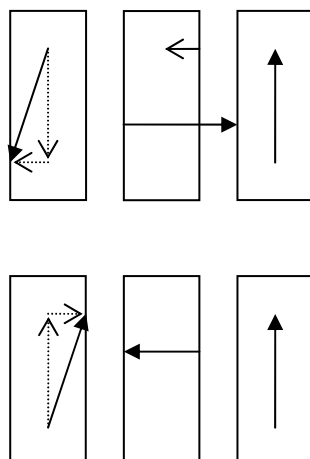


Fig. 12.1. situacions probables en el muntatge dels imants

A la Figura 12.1 s'exposen 3 situacions diferents per exposar el procés de trimatge:

- Al conjunt de l'esquerra s'ha agafat dos imants amb el mateix defecte: La direcció del camp magnètic està desviada respecte la vertical. Si es munten simètricament, es cancel·la la component horitzontal de desviació.
- En l'ensamblatge del conjunt del mig, no s'ha trobat un imant amb el mateix camp magnètic, doncs s'opta per corregir l'excés de camp amb un cilindre ubicat dins del forat del contenidor-H.
- L'ensamblatge de la dreta està format per dos imants exactament iguals. No cal tocar res més

Cal tenir en compte de fer net al màxim a tots els elements mecànics que van muntats dins la zona de buit. El muntatge de la zona "dins del buit" és necessari fer-lo a una àrea completament neta dins del laboratori de *IDs*

### ***Cilindres de connexió interns, muntatge del buit***

Les bigues internes ensamblades es posen dins la cambra de buit amb una bancada que es dissenya per tal fi. Aquesta bancada ajudarà a definir correctament el plà d'obertura. Es passen els cilindres de connexió i es collen amb clau plana sota un moment de muntatge  $M_M$  impositat. Collar amb un excés de moment, podria malmetre el filet de rosca fet a l'alumini, ja que aquest és un material tou. Collar amb defecte de moment podria ser la causa d'una unió



poc segura. Es creu convenient collar amb un moment de muntatge  $M_M \approx 16 \text{ kN}\cdot\text{m}$  i aquest s'ha extret d'un càlcul precís fet a l'annex A "càlculs"

Per la fixació dels cilindres de connexió externs abans se'ls ha passat la grapa per fixar-los als platerets fixats a la biga externa. Un cop muntats, s'ajustarà per cada biga interna l'altura d'aquests cilindres a partir d'un cilindre de referència mitjançant un rellotge comparador. La distància sotmesa a ajust és entre la superfície superior de la biga interna i la cara posterior del cilindre de connexió extern. S'ajusta l'altura girant la femella d'aquest. Es marca ara la posició relativa dels cilindres de connexió externs respecte dels interns. Es collen les manxes.

En aquest moment es fa un ensamblatge de la cambra de buit amb les bigues internes suspeses mitjançant els cilindres de connexió i les manxes. Es realitzen els escombrats suficients per acabar de repassar el calibratge el mecanisme d'obertura, abans de tancar i segellar la cambra de buit. Ara es munta el grup de buit a l'estructura principal, ajustant la cambra mitjançant les orelles d'ajust (plànol *PFC-BA0*).

### 12.3. Calibratge, posada apunt

L'ondulador es munta sobre el banc d'alineament, i posteriorment s'hi fiquen les bombes i instrumentació de buit. Si es fa el conjunt corresponent a la opció 1, aquest va directament collat sobre el banc, amb l'aspecte resultant indicat a *PFC-000*. Si s'opta per un banc dissenyat a la opció 2, es munta sobre un calaix on hi van els palpadors. L'ondulador reposarà sobre el banc d'alineament amb l'aspecte que s'indica a *PFC-000\_2*. un cop estigui a l'anell d'emmatzematge.

Quan el sistema de buit està completament muntat, i se n'ha provat la seva estanqueïtat es realitza el buit extrem dins la cambra en particular. Es munta a cada extrem els cons "aigües amunt" i "aigües avall" amb unes vàlvules d'ultra-buit que romandran tancades fins que no estigui ensamblat a la resta de l'anell.

Per poder donar el buit extrem, s'ha de realitzar un procés de precalentament de la cambra (*bake out*): Es realitza un buit mitjançant bombes mecàniques, i es recobreix el cilindre amb un serpentí elèctric que escalfarà la cambra fins a 200°C.

D'aquí la necessitat de mantenir els imants refrigerats per sota de 120°C per que no perdin propietats magnètiques. Es connectarà el serpentí bescanviador a un circuit de refrigeració d'aigua corrent, i es mantindrà la cambra a una temperatura de 200°C durant dos dies i dos



nits, amb la cambra escalfant-se i realitzant el buit amb el sistema de bombejat instal·lat a l'ondulador.

Tots els processos indicats fins ara, es realitzen al Laboratori de IDs. Ara, aquest ja està llest per ser instal·lat a l'anell d'emmagatzematge, i continuar fent les proves pertinents.

El procés següent es basa en calibrar el banc d'alineament, per situar *l'eix de simetria magnètic* a una distància de  $1400 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$  respecte del terra, i el pla d'obertura completament paral·lel en el pla horitzontal.

Un cop tot l'accelerador està alineat, l'ondulador en buit ja està llest per funcionar. Cal engegar l'accelerador de partícules, quan estiguin tots els elements preparats, i un cop aquest estigui funcionant, es calibrarà l'IVU fent un escombrat al llarg de tota la distància d'obertura, per trobar els punts discrets d'obertura entre imants on apareix el flux fotònic altament concentrat, característic de l'ondulador en buit.

A la línia experimental on s'operi amb la Llum Sincrotró d'aquest ondulador, hi haurà un paper penjat a la paret amb les diferents distàncies d'obertura que treballa el dispositiu d'inserció.





## 12.4. Fotografies

Es pot veure a la Figura 12.2 un recull de les fotografies més representatives del muntatge de l'ondulador en buit al laboratori de *IDs* a la *Swiss Light Source*



Fig. 12.2. Muntatge de l'ondulador en buit al laboratori de *IDs* a *SLS*





## Conclusions

La comprensió del problema físic que es planteja ha estat el primer pas per entendre la necessitat d'aquests mecanismes ultra-precisos amb peces fabricades sota toleràncies poc generoses.

Respecte en disseny estructural, s'arriba a un resultat bo de dimensionat que compleix amb el rang de deformacions permès. Les toleràncies decidides als plànols s'han ubicat de tal manera que la peça compleixi i resulti el més barata possible. Tot i així, a nivell econòmic és comprova que no resulta barat.

Els mecanismes compleixen sobre paper. Tot i que les sol·licitacions no són exagerades i no es presenta en cap element un cas de fatiga en cicles, s'ha previst qüestions la com pèrdua de precisió, deguda al desgast i augment del joc i per això s'han fet les comprovacions, i si cal, s'ha sobredimensionat en molts casos sota justificació.

Un cop muntat, com en qualsevol servo de precisió s'haurà d'avaluar la repetitivitat d'aquest, i si és necessari s'haurà d'introduir alguna millora, però aquí hi entra en joc el sistema de control. No s'ha avaluat el cost d'aquest a l'estudi econòmic, però si s'han estimat els elements muntats a l'ondulador. Un objectiu seria poder estandaritzar aquesta estructura per tots els dispositius d'inserció en la mateixa instal·lació.

Respecte el sistema de buit, no s'ha realitzat cap càlcul sobre ella. S'ha limitat a una descripció dels elements que el componen.

S'ha plantejat el disseny de dos bancs d'alineament diferents, tots dos vàlids per al funcionament a la realitat, doncs son sistemes que estan funcionant. Cal avaluar molt bé quines són les especificacions necessàries per l'alineament de l'ondulador en buit, doncs es tractaria d'estandaritzar al màxim els bancs d'alineament de tots Dispositius d'Inserció.





*Monitorització frontal de la Llum Sincrotró emesa per un Ondulador en buit*





## Agraïments

- S'agraeix principalment l'ajuda aportada per Pep Campmany, físic responsable i client intern del projecte d'*IDs* a *CELLS*.
- Divisió d'enginyeria de *CELLS*, en particular a: Barbara Calcagno, Maripaz Casas, Marcos Quispe, Jose Ferrer, Eshraq Al-Dmour i Lluís Miralles, cap de divisió.
- Julio Lucas, pels aclariments i explicacions donades sobre el disseny conceptual.
- Com no, al tutor d'aquest *PFC*, Mateu Martín i Batlle
- Gràcies a tu si has llegit el document.





## Bibliografia

### Referències bibliogràfiques

BALCELLS, J., *Autòmats programables*, Marcombo Ed 1997.

BOWDEN, G. [et al.] *Precision magnet movers for the final focus test beam. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 1995

CAMPMANY, J., *El sincrotró de Barcelona*, Revista de Física, 1r semestre de 1997

CARDONA, S., CLOS, D. *Teoria de màquines*. Barcelona, Edicions UPC, 2000, p. 38-42

CHAMBERS, A., FITCH, R. HALLIDAY, B. *Basic Vacuum Technology*. IOP Publishing Ltd 1998

FENOLLOSA, J. *Unions cargolades*. Edicions UPC, 2000.

FENOLLOSA, J., MARTINEZ, J., *Quadern CMI. Fallada, unions, pressions de Hertz*, CPDA, 2002, p-56-63

FURSE J. *Kinematic design of fine mechanisms in instruments J.Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol.14, 1981.

INCROPERA, F., DeWITT, D. *Fundamentos de transferencia de calor*. Prentice Hall hispanoamericana, S.A. 1996 p. 420-455

RIBA, C, *Disseny de màquines IV, Selecció de materials 1*, Edicions UPC, 1998a, p.51-53, 81-111,

RIBA, C, *Disseny de màquines IV, Selecció de materials 2*, Edicions UPC, 1998b, p.18-31.

RIBA, C, *Selecció de motors i transmissions en el projecte mecànic*, CPDA, 1999, p.148





## **Bibliografia complementària**

CANADIAN LIGHT SOURCE. *Mechanical and Vacuum aspects*

[[http://www.lightsource.ca/machine/pdf/5.8.25.2.Rev.0-In-](http://www.lightsource.ca/machine/pdf/5.8.25.2.Rev.0-In-Vacuum_Undulator_Support_Structure_and_Vacuum_Chamber-Blomqvist.pdf)

[Vacuum\\_Undulator\\_Support\\_Structure\\_and\\_Vacuum\\_Chamber-Blomqvist.pdf](http://www.lightsource.ca/machine/pdf/5.8.25.2.Rev.0-In-Vacuum_Undulator_Support_Structure_and_Vacuum_Chamber-Blomqvist.pdf)]

CHEVALIER, A. *Dibujo industrial* Mèxic, Ed. Limusa S.A, 2002

CONSORCI PER LA CONSTRUCCIO I ELABORACIO DE LLUM SINCROTRÓ

[<http://www.cells.es/AboutUs>]

MARGHITU D. *Mechanical Engineer's Handbook*. Academic Press, 2001











