

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

Universitat Politècnica de Catalunya

Departament d'Enginyeria Elèctrica

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona

TESI DOCTORAL

**NOVES APLICACIONS DE LA TROMPA D'AIGUA O
TROMPA DELS PIRINEUS: ELEVACIÓ D'AIGUA,
AIRE COMPRIMIT I GENERACIÓ D'ELECTRICITAT**

Tesi presentada per obtenir el
títol de Doctor per la Universitat
Politécnica de Catalunya (UPC)
Dins el programa de doctorat en
Enginyeria Elèctrica.

Autor: Víctor Fuses i Navarra

Director: Dr. Ricard Bosch i Tous

Barcelona, juny 2010

Resum

La trompa d'aigua o trompa dels Pirineus és el giny hidropneumàtic pel qual s'introduïa aire al forn en el procediment català d'obtenció directa del ferro a partir dels seus minerals, o de la Farga Catalana. En aquest treball es recopilen, analitzen i valoren totes les referències bibliogràfiques sobre la trompa d'aigua a què s'ha pogut accedir.

S'ha construït un model pilot de trompa d'aigua a escala 1:3 en el laboratori del Departament d'Enginyeria Elèctrica (DEE) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) i se n'ha modelitzat el funcionament. Es presenten altres aplicacions del mateix principi funcional, com la trompa de buit, el compressor hidràulic d'aire, o la bomba d'elevació d'aigua per emulsió amb aire.

Amb la intenció de recuperar l'energia del doll d'aigua de la trompa, s'ha construït i assajat un prototip de màquina elèctrica especial amb entreferro inundable que podria integrar la turbina o hèlix a l'interior del rotor. Es tracta d'una màquina d'inducció, amb un alt nombre de pols, de baixes revolucions, bifàsica, de molt baixa tensió i alta corrent per espira, debanat de simple capa i un conductor per ranura i fase.

Paraules clau o descriptors

Trompa d'aigua, trompa dels Pirineus, farga catalana, compressor hidràulic d'aire, bomba d'elevació per aire, màquina elèctrica d'un conductor per ranura i fase, hèlix integrada en el rotor, entreferro inundat.

Abstract

The water trompe or trompe of the Pyrenees is the hydro-pneumatic widget which was used to introduce air in the bloomery furnace of the catalan method for obtaining iron from his ores, or Catalan Forge. In this document, all the founded bibliographic references to the water trompe have been collected, analyzed and evaluated.

A pilot model of the water trompe has been made in a 1:3 scale, at the laboratory of the Department of Electric Engineering (DEE) of the Polytechnic University of Catalonia (UPC), and his operation has been modelled. Other applications of the same functional principle are presented, as the vacuum trompe, the hydraulic air compressor, or the air lift water pump.

With the intention of recovering the energy of the water jet of the trompe, a prototype of a special electric machine has been built and tested. It could integrate the turbine or propeller into the rotor, with a flooded air gap. It's an induction type machine, of a high number of poles, low revolutions, biphasic, very low voltage and high current per turn, with a simple layer winding and only one conductor per slot and phase.

Keywords or descriptors

Water trompe, trompe of the Pyrenees, Catalan forge, hydraulic air compressor, air lift pump, electric machine with only one conductor per slot and phase, propeller integrated into the rotor, flooded air gap.

Prefaci

Agraïments

El Dr. Ricard Bosch i Tous va ser la primera persona amb qui vaig aconseguir entreveure un camí per aconseguir abordar les meves inquietuds d'investigació. Li agraeixo que hagi confiat en mi des del principi i que m'hagi prestat la seva col·laboració per aconseguir dur a bon port aquesta aventura.

En començar tenia la idea que elaborar una tesi doctoral era una tasca individual i solitària, per influència, sens dubte, de la tipologia de títol que s'obté, el doctorat, pel qual es reconeix que una persona ha assolit el darrer nivell de l'estructura educativa establerta. La meua experiència m'ha fet canviar radicalment d'idea, i per això voldria agrair els comentaris i col·laboració de moltes persones que han aportat el seu gra de sorra: Sr. Robert Capella, Jordi Bosch, Pepe López, Marc Martí, Albert Peregrina, Rossend Àvila, Carles Bou, i als mestres de taller Lluís i Quim.

L'elaboració d'una tesi s'acaba immiscint en tots els racons de la vida del doctorand. És d'agrair la comprensió i suport de les persones més properes que ho han acabat patint, sobretot pel temps i dedicació que he hagut de manllevar-los per aconseguir la fita. En aquest entorn emocional, familiar i d'amistat, és on es troba sovint el veritable motiu d'haver engegat aquest projecte.

Agraeixo especialment la dedicació i el suport de l'Eva, que sovint m'ha fet tocar de peus a terra i m'ha transmés el sentit pràctic necessari per resoldre el dia a dia.

Suports

El present treball s'ha dut a terme amb el suport del Departament d'Universitats, Recerca i Societat de la Informació (DURSI) de la Generalitat de Catalunya i del Fons Social Europeu, a través d'una beca predoctoral de formació d'investigadors, 2006-FI-01446.

La Societat Catalana de Tecnologia (SCT), filial de l'Institut d'Estudis Catalans (IEC, c. del Carme núm. 47, 08001 - Barcelona), va proporcionar l'any 2000 les bombes centrífugues que s'han utilitzat per a la recirculació de l'aigua en la trompa pilot realitzada.

Per altra banda, els estudis s'han realitzat dins el marc del programa de doctorat del Departament d'Enginyeria Elèctrica (DEE) de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), essent el tutor el Dr. Ricard Bosch i Tous.

Premis i publicacions

BOSCH, R.; FUSES, V. «*Model pilot de trompa d'aigua o trompa dels Pirineus*», a: *El patrimoni industrial de les Terres de l'Ebre. Actes de les VII jornades d'Arqueologia Industrial de Catalunya, Tortosa, 19, 20 i 21 d'octubre de 2006. Edició a cura d'Àngels Solà i Lluís Virós*. Barcelona: Associació del Museu de la Ciència i de la Tècnica i d'Arqueologia Industrial de Catalunya, i Associació d'Enginyers Industrials de Catalunya, 2009.

BOSCH, R.; FUSES, V. *La trompa d'aigua. Recuperació al laboratori del principi funcional per aplicacions de bombament al tercer món*. Conferència a l'Institut d'Estudis Catalans (IEC), dins de la Societat Catalana de Tecnologia (SCT), filial de l'IEC. Data: 16 de maig de 2007. Lloc: IEC, c. del Carme 47, Barcelona.

BOSCH, R.; FUSES, V. «*La trompa d'aigua a la farga*». A: *Primeres Jornades sobre el ferro i la farga al Pirineu i l'Alt Urgell*, organitzades pel Consell Comarcal de l'Alt Urgell, la UPC i el "Grup del Ferro i la Farga de Catalunya", el 2 i 3 de juny de 2007 a la Seu d'Urgell.

BOSCH, R.; CASALS, P.; FUSES, V.; GRAU, R.; PELEGRINA, A. Nominació pel concurs *Ciència en Acció – Science on Stage*, àmbit sostenibilitat, en la seva 8a. edició. Saragossa: 19, 20 i 21 d'octubre de 2007

BOSCH, R.; FUSES, V. *La Farga Catalana: mines, farga i molí d'Hostalric*. Conferència realitzada a l'Institut d'Estudis Secundaris d'Hostalric el 22 d'abril de 2008.

ARASA, J.; FUSES, V.; GARCIA, E.; SERRA, M. «*La farga i el ferro a la vall del riu Sénia: el cas de la Fàbrica del Ferro*», a: *Lo Senienc. Memòria, natura i llengua*. La Sénia: Centre d'Estudis Seniencs, 2008, Núm. 5. Inclou una conferència realitzada a la Sénia el 20 d'agost de 2008.

BOSCH, R.; FUSES, V. «*La trompa de agua o trompa de los Pirineos. Recuperación del principio funcional para aplicaciones de bombeo. Aproximación mediante las ecuaciones electromagnéticas*» a: *11a Conferencia Hispano-Lusa de Ingeniería Eléctrica*. Saragossa: [Pòster] 1-4 de juliol de 2009.

FUSES, V. «*L'aixecament d'una frontera: entre la Farga Catalana del segle XVII i la mineria a Escaró del segle XX*», a: *Els Pirineus: Frontera i Connexio? VI Col·loqui d'Estudis Transpirenecs*. Santuari de Núria (el Ripollès), 2,3,4 d'octubre de 2009.

Motivació

El present document de tesi doctoral és la memòria d'una realització eminentment pràctica en què s'ha pretès conjuminar diverses disciplines i àrees de la tècnica per tal d'assolir una realització innovadora en el camp de l'enginyeria elèctrica.

El punt de partida és un treball en el camp de l'Arqueologia Industrial, concretament en l'àmbit de la farga catalana. Entre els anys 1997 i 2000, el DURSI¹ va donar suport a la Xarxa temàtica "L'home i el Ferro a Catalunya" per a l'estudi, recerca i recopilació de la història de la farga. El "Grup del ferro i la farga de Catalunya", format per tècnics i científics de diferents àmbits i entitats (UPC, UB, CSIC, IEC)², va elaborar i publicar "La Farga" (V.V.A.A., [CR-ROM], 2000) que recollia els coneixements recopilats i elaborats durant el treball.

La farga, mètode català d'obtenció directa del ferro, es caracteritza, entre d'altres coses, per la utilització d'un giny hidràulic anomenat trompa d'aigua o trompa dels Pirineus. Es tracta d'un giny hidropneumàtic que a partir d'un salt determinat d'aigua comprimeix un cert cabal d'aire, el qual és portat fins al forn com a comburent pel carbó vegetal i la reducció del mineral de ferro.

En el CD-ROM "La Farga" queden paleses les mancances en relació a la caracterització del funcionament d'aquest giny, situació que es repeteix en la majoria de documentació i bibliografia consultada, i fins i tot, en museus que disposen de maquetes o reproduccions al natural de les trompes d'aigua.

La recuperació al laboratori del principi funcional de les trompes, mitjançant la construcció d'un model pilot, podria ser d'interès per a diverses aplicacions actuals, des de la minigeneració hidroelèctrica fins a la depuració d'aigües residuals, l'aeració de l'aigua de piscifactories, la dessalinització, o la elevació d'aigua a partir d'aire comprimit. L'estudi del flux bifàsic aire-aigua també pot tenir aplicació en la disminució de la fricció viscosa dels vaixells.

En base a aquest plantejament, es va presentar una sol·licitud de beca predoctoral a l'AGAUR³ de la Generalitat de Catalunya sota el títol provisional de "Sistema d'elevació d'aigua usant el principi de la

¹ DURSI: Departament d'Universitats, Recerca i Societat de la Informació de la Generalitat de Catalunya.

² UPC: Universitat Politècnica de Catalunya; UB: Universitat de Barcelona; CSIC: *Consell Superior d'Investigacions Científiques*; IEC: Institut d'Estudis Catalans.

³ FI: Formació d'Investigadors; AGAUR: Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca.

trompa d'aigua o dels Pirineus propi de la farga catalana, i dessalinització d'aigua", que va ser concedida l'any 2006.

L'anàlisi energètic de la trompa i la construcció del model pilot al laboratori va portar a deixar de banda la dessalinització i desviar el rumb cap a la generació elèctrica i l'aprofitament dels fluxos bifàsics. Es va pensar en el desenvolupament d'una màquina elèctrica especial, la qual podria ser la continuació de desenvolupament realitzats en tesis anteriors. D'aquesta manera s'aprofitava millor el bagatge propi del Departament d'Enginyeria Elèctrica (DEE) de la UPC, en el si del qual s'ha realitzat el present treball. El gener de 2008 es va presentar el projecte de tesi sota el títol "Noves aplicacions de la trompa dels Pirineus: elevació d'aigua, aire comprimit i generació d'electricitat".

En la trompa d'aigua, bona part de l'energia es dissipa pel xoc de l'aigua contra una pedra plana, podent arribar a representar el 80% del total. Es va plantejar el desenvolupament d'una turbina que quedés integrada en el rotor de la màquina elèctrica. La idea no és nova: en el sector dels vehicles elèctrics, alguns motors a roda integren el rotor i la llanda; alguns ventiladors típics de sostre integren el rotor de gàbia d'esquirol amb els àleps del ventilador; i recentment, en el sector de la propulsió naval elèctrica, s'estan presentant productes comercials d'hèlix en tovera, sostingudes i propulsades per la perifèria, sense eix, en què el suport dels àleps és directament el rotor de la màquina elèctrica; fins i tot, alguns aerogeneradors prescindeixen del multiplicador i munten el rotor directament a la base de les pales.

Pel que fa al tipus de turbina, la problemàtica del fluid bifàsic és similar a la de les hèlix de superfície de motonàutica de competició, pensades per girar amb una part submergida i l'altra a l'aire.

Per a la realització dels assajos hidràulics s'havia plantejat la utilització de la trompa d'aigua com a bancada de laboratori de cabal confinat. Els resultats experimentals i la possibilitat d'aplicació a propulsió naval varen aconsellar l'adaptació de la llanxa híbrida que s'està desenvolupant en el laboratori del DEE per a les proves de cabal no confinat, fins a una velocitat d'entre 10 i 20 nusos (18 – 36 km/h; 5 – 10 m/s).

Finalment el prototip no ha passat del pas previ imprescindible de la caracterització electromagnètica. Degut a les seves reduïdes prestacions i a la configuració final donada al prototip, no s'han arribat a muntar els àleps de l'hèlix en el rotor. Per tant, tampoc s'han utilitzat la trompa ni la llanxa per als assajos.

La recopilació del treball realitzat i dels resultats obtinguts constitueix el motiu de la present memòria.

Objectius

Els objectius principals de la tesi són l'anàlisi del funcionament de la trompa dels Pirineus, el desenvolupament de noves aplicacions del seu principi funcional, i el càlcul, construcció i assaig d'una màquina hidroelèctrica de geometria especial que integri l'hèlix en el rotor, sense eix convencional.

Aquests objectius generals en concreten en els següents objectius parcials, segons la disciplina a la qual s'associen:

a) Arqueologia Industrial:

- Recopilació, anàlisi i avaluació de la bibliografia disponible sobre la farga catalana i les trompes d'aigua, pel que fa a la seva construcció i funcionament.
- Construcció, assaig i caracterització d'un model pilot de trompa d'aigua a escala 1:3.
- Realització d'una maqueta demostrativa transparent de trompa d'aigua a escala 1:10.
- Modelització del flux bifàsic (aire i aigua) que caracteritza la trompa dels Pirineus, i del funcionament del giny en conjunt.

b) Enginyeria Elèctrica:

- Construcció i assaig d'una màquina elèctrica d'inducció que pugui integrar els àleps a l'interior del rotor, que pugui treballar submergida, i susceptible de ser usada com a generador en la trompa d'aigua.

c) Sostenibilitat i Tecnologies per al Desenvolupament:

- Estudi dels sistemes duals de trompa d'aigua i sistema d'elevació d'aigua per emulsió amb aire (flux bifàsic).
- Avaluació d'altres possibles aplicacions de la trompa.

Sumari

Resum.....	i
Paraules clau o descriptors.....	i
Abstract.....	ii
Keywords or descriptors.....	ii
Prefaci.....	iii
Agraïments.....	iii
Suports.....	iv
Premis i publicacions	v
Motivació.....	vi
Objectius.....	viii
Sumari.....	ix
Llista de figures.....	xiii
Llista de taules	xvii
Llista d'abreviacions i símbols	xix
Capítol 1. Les referències bibliogràfiques sobre la trompa d'aigua	1
1.1 La Farga Catalana.....	2
1.1.1 Les primeres matèries.....	2
1.1.2 El procediment i els seus elements.....	4
1.1.3 Organització productiva	8
1.1.4 Breu història de la farga	9
1.1.5 Implantació geogràfica i terminològica.....	10
1.1.6 Un exemple: les fargues de la Vall Ferrera i d'Andorra.....	10
1.1.7 Decadència i desaparició	13
1.2 Aportacions a la història de la Farga Catalana.....	14
1.2.1 La fàbrica del ferro de la Sénia (Montsià).....	14
1.2.2 La farga d'Hostalric (la Selva).....	17
1.3 La trompa d'aigua o trompa dels Pirineus	18
1.3.1 Breu història de la trompa d'aigua	18
1.3.2 Els elements de la trompa.....	20
1.3.3 Referents contemporanis de la trompa d'aigua.....	22
1.3.4 Descripció de la trompa de referència, segons T. Richard	24

1.3.5	La tina o trompa de tina.....	30
1.4	Les fonts històriques: la trompa d'aigua al llarg del temps	32
1.4.1	Singularitats de la trompa de Giovanni Branca (1629)	33
1.4.2	Trompes sense espiralls.....	34
1.4.3	La trompa del Delfinat i la trompa del País de Foix, segons l' <i>Encyclopédie</i>	39
1.4.4	La trompa dels Alps: una altra varietat geogràfica.....	42
1.4.5	Les trompes al s. XIX: els intents d'explicar i millorar el seu funcionament.	43
1.4.6	El declivi de la utilització de la trompa en la farga.....	51
1.4.7	Teoria de la trompa: formació del fluid bifàsic.....	51
1.4.8	Les trompes als inicis del s. XX: les trompes gegants de Charles H. Taylor (Canadà).....	54
1.5	Altres realitzacions en base al principi funcional de la trompa.....	58
1.5.1	La trompa de buit de laboratori.....	58
1.5.2	El polvoritzador	59
1.5.3	Els injectors i els ejectors	59
1.5.4	El transport de fluids bifàsics.....	60
1.5.5	La font d'Heró (10 - ~70 dC).....	61
1.5.6	La bomba d'elevació per aire comprimit.....	62
1.5.7	Les mescles bifàsiques per a la reducció de fricció de lliscament líquid-sòlid.....	68
Capítol 2.	Construcció i modelització d'una trompa d'aigua	69
2.1	Construcció d'una trompa pilot per al laboratori	70
2.1.1	Maqueta en metacrilat de la de la trompa de referència	70
2.1.2	Construcció de la trompa pilot a escala 1:3	70
2.2	Càlculs hidràulics de la trompa pilot i la recirculació	76
2.2.1	Fonaments teòrics: conduccions a pressió	76
2.2.2	Compressió isotèrmica	79
2.2.3	Cas de la trompa d'aigua amb els espiralls totalment tancats.....	81
2.2.4	Trompa amb els espiralls oberts: l'escanyall com a element regulador del cabal.....	82
2.2.5	Flux bifàsic omplint totalment l'arbre: ràtio aire-aigua absolutament variable	85
2.2.6	Flux bifàsic en mescla constant: compressor volumètric d'aire	87
2.2.7	Efecte de la temperatura, humitat i solubilitat de l'aire en el funcionament de la trompa....	98
2.2.8	Càlculs hidràulics de la recirculació d'aigua en la trompa pilot	102
2.3	Resultats dels assajos.....	105
2.3.1	Assaig amb tubs de pocs mil·límetres de diàmetre	105
2.3.2	Posada a punt de la trompa pilot	106
2.4	Resum de les possibles aplicacions de la trompa d'aigua.....	107

Capítol 3.	La màquina elèctrica especial: el prototip VF1	109
3.1	Motivació.....	110
3.1.1	La generació hidroelèctrica.....	110
3.1.2	La propulsió naval i l'electricitat	111
3.1.3	Participació en el desenvolupament del bot Ras.	113
3.1.4	La connexió Scott.....	115
3.1.5	Definició dels requisits que ha de complir el prototip VF1 i metodologia emprada.....	116
3.2	Definició	117
3.3	Materials i construcció.....	118
3.3.1	Materials conductors: tubs i xapa de coure.....	118
3.3.2	Doblat i conformat dels tubs de coure per constituir les espiras	119
3.3.3	Adaptació del nucli magnètic de l'estator	123
3.3.4	Transformadors toroïdals d'intensitat.....	124
3.3.5	Materials dielèctrics i mecànics	127
3.3.6	Col·locació de les espiras.....	128
3.3.7	Conformat i col·locació de les planxes de coure del estator	128
3.3.8	Circuit d'evacuació de calor i d'homogeneïtzació de corrents	130
3.3.9	Rotor.....	133
3.4	Simulacions.....	134
3.5	Resultat dels assajos	137
Capítol 4.	Conclusions i futures línies d'investigació.....	139
4.1	Aportacions i conclusions	140
4.1.1	Anàlisi documental sobre la trompa d'aigua	140
4.1.2	Anàlisi fluídic de la trompa pilot	141
4.1.3	Màquina elèctrica especial: el prototip VF1	143
4.2	Futures línies d'investigació i d'aplicació	144
4.2.1	Anàlisi documental sobre la trompa d'aigua	144
4.2.2	Anàlisi fluídic de la trompa pilot	144
4.2.3	Màquina elèctrica especial: el prototip VF1	145
Capítol 5.	Bibliografia.....	147
5.1	La trompa d'aigua	147
5.2	Enginyeria Elèctrica	160

Annex A.	Sondes Rogowski.....	165
A.1	Descripció.....	165
A.2	Construcció de les bobines Rogowski utilitzades	168
Annex B.	Refredament del prototip amb nitrogen líquid	175
B.1	Càlcul de prestacions i quantitats necessàries	175
Annex C.	Resultats dels assajos realitzats sobre el prototip VF1	177
C.1	Assaig de curtcircuit del torus A.....	177
C.2	Estimació dels valors de resistència i potència dissipada del secundari.....	178
C.3	Mesura del corrent primari.....	179
C.4	Mesura del corrent secundari.....	179
C.4.1	Mesura de la caiguda de tensió en les planxes de coure.....	179
C.4.2	Estimació del corrent secundari per la caiguda de tensió en un tram del circuit.....	180
C.4.3	Repartiment del corrent entre les onze espiras en paral·lel.....	181
C.4.4	Mesura del corrent secundari per mitjà de sondes Rogowski.....	181
C.4.5	Repartiment del corrent secundari pel neutre	182
C.5	Influència del doblat de les planxes de coure.....	183
C.6	Primers assajos.....	184
C.6.1	Correlació entre algunes magnituds mesurades	185
C.6.2	Corbes parell velocitat per diferents corrents del primari (50 Hz).....	187
C.7	L'acumulador cinètic d'energia elèctrica (ACEE).....	188

Llista de figures

Figura 1-1. Esquema de les matèries implicades en el procés de la farga.....	3
Figura 1-2. Reproducció ideal d'una farga, segons J. Mateu (1993)	6
Figura 1-3. Planta esquemàtica de la fàbrica del ferro de la Sénia.	15
Figura 1-4. Vista de l'interior de l'edifici des de la porta d'entrada.	15
Figura 1-5. Murs de la bassa de la farga d'Hostalric.....	17
Figura 1-6. Túnel que portava l'aigua a la farga des de la riera d'Arbúcies.....	17
Figura 1-7. Plànol de situació de la farga d'Hostalric (dins el cercle blau).	17
Figura 1-8. “Spiritale” de G.Branca (1629) usat pel funcionament d'un orgue.....	19
Figura 1-9. “Spiritale” de G.Branca (1629) aplicat a una forja.	19
Figura 1-10. Forn català i trompa reconstruïda en el Science Museum de Londres.	21
Figura 1-11. Maqueta del Musée National des Arts et Métiers de París, construïda al s. XVIII.....	21
Figura 1-12. Trompes d'Andorra al mitjans de comunicació.....	23
Figura 1-13. Alçat de la trompa d'aigua de Montgaillard, de T. RICHARD (1838).....	25
Figura 1-14. Plànols d'una trompa d'aigua, segons J. FRANÇOIS (1843).....	27
Figura 1-15. Tina de J. FRANÇOIS (1843) a l'esquerra, i de T. RICHARD (1838) a la dreta, i pesavents....	30
Figura 1-16. “Spiritale” de G.Branca (1629) aplicat a una forja.	33
Figura 1-17. Trompa de Kircher (1641), que seria del tipus descrit pel pare Schotte.....	34
Figura 1-18. Trompes de Kircher (1650).....	35
Figura 1-19. Trompa de Kircher (1664) per ventilar una mina	35
Figura 1-20. Trompa descrita en el <i>Journal de Scavans el 1666</i>	36
Figura 1-21. Trompa de Mariotte (2) i de l'Isera (3 i 4), segons BÉLIDOR (1739)	36
Figura 1-22. Trompa de Mariotte (D i F) i de Bélidor (E).	37
Figura 1-23. Trompa descrita per Gamboa (1761).....	37
Figura 1-24. Trompes de della Fratta de l'any 1670.....	38
Figura 1-25. Gravat de la <i>trompa del Delfinat</i>	39
Figura 1-26. Gravat de la <i>trompa del País de Foix</i>	40
Figura 1-27. Divisió provincial de França abans de l'any 1789.	41
Figura 1-28. Trompa de la vall de l'Isera de Bélidor i trompa de la farga d'Alésinaz.....	43
Figura 1-29. (a) Trompa de la farga de Poullaouen (1804); (b) Trompa de la farga de Vicdessos (1823); (c) Trompa de la mina de Rancié (1828).	45
Figura 1-30. Diferents propostes de trompes (1831).....	49
Figura 1-31. Trompa per alt forn segons Gruner (1875)	49
Figura 1-32. Trompa d'aigua de la farga, dibuix obra de Joaquim Mateu	50

Figura 1-33. Elements dels experiments de Rodwell (1864).....	52
Figura 1-34. Compressor d'aire patentat el 1878 per J. P. Frizell (1878).....	54
Figura 1-35. Compresors de Taylor del tipus construït a Magog i Ainsworth (esquerra), i del tipus construït a “Victoria Mining C.” i “Ragged Chutes” (dreta) .	55
Figura 1-36. Compressor d'aire d'una mina a Michigan, de 3,7 MW.	56
Figura 1-37. Diferents representacions de la trompa de buit de laboratori.....	58
Figura 1-38. Principi funcional del polvoritzador per aire a pressió.	59
Figura 1-39. Elevació d'aigua per l'efecte <i>vena contracta</i>	60
Figura 1-40. Ejector d'aire comprimit per elevar aigua	60
Figura 1-41. Diferents tipus de flux bifàsic líquid-gas en canonada horitzontal o vertical.	60
Figura 1-42. Diagrama del tipus de flux bifàsic entre un líquid i un gas en funció de la seva velocitat superficial.	61
Figura 1-43. Bomba per bombolleig i flux pistó de líquid refrigerant	61
Figura 1-44. Esquema del funcionament de la font d'Heró.....	62
Figura 1-45. Tres esquemes de bombes d'elevació de líquids per acció de l'aire comprimit de finals del s. XIX als EEUU. Per ordre d'esquerra a dreta: McKnight (1864), Frizell (1880), Pohlé (1892).	63
Figura 1-46. Flux en l'interior de la bomba d'aire de Frizell (1880) respecte la de Pohlé (1892).....	64
Figura 1-47. Bomba d'aigua en una sola etapa, amb reducció de velocitat de l'emulsió.....	65
Figura 1-48. Bombament multietapa equilibrat.	65
Figura 1-49. Bombament dúplex o compost, proposat per J. G. Pohlé, multietapa desequilibrat.	65
Figura 1-50. Dues possibles disposicions dels tubs d'aire i aigua.	66
Figura 2-1. Geometria del separador de gotes de la caixa de vents. Càlcul de la secció pas d'aire.	72
Figura 2-2. Corbes de característiques de les bombes centrífugues de recirculació.	73
Figura 2-3. Croquis amb les principals dimensions i elements de la trompa d'aigua construïda	75
Figura 2-4. Cabal d'aigua respecte la càrrega d'aigua per diferents obertures de l'escanyall.	84
Figura 2-5. Cabal-pressió de l'aire sortint de la trompa, segons el model de ràtio aire-aigua variable	85
Figura 2-6. Rendiment pneumàtic de la trompa, segons el model de ràtio aire-aigua variable.	86
Figura 2-7. Cabal d'aire respecte la càrrega d'aigua, pel model de compressor volumètric.	89
Figura 2-8. Pressió màxima de la trompa en funció de l'alçada d'aigua sobre l'escanyall.	91
Figura 2-9. Pressió màxima que pot subministrar la trompa respecte el cabal d'aire.	93
Figura 2-10. Rendiment pneumàtic màxim de la trompa de 3 m respecte l'alçada d'aigua en l'escanyall.	94
Figura 2-11. Rendiment de compressió respecte el cabal d'aire, per diferents valors dels paràmetres.....	94
Figura 2-12. Rendiment màxim de compressió respecte la càrrega d'aigua.	95
Figura 2-13. Rendiment de compressió de l'aire respecte el salt hidràulic mínim necessari.	96

Figura 2-14. Repartiment de l'energia hidràulica inicial.....	97
Figura 2-15. Repartiment en la trompa per una pressió en la caixa dels vents del 40% de la màxima.	97
Figura 2-16. Corbes cabal/pressió de la trompa amb recirculació (arbre de 3 m de longitud)	103
Figura 2-17. Corbes cabal/pressió de la trompa amb recirculació (arbre de 6m de longitud).	103
Figura 2-18. Corbes cabal/pressió de la trompa amb recirculació (arbre de 9 m de longitud).	104
Figura 2-19. Trompa d'aigua construïda. Any 2007. Dreta: vista general de la trompa amb un arbre de 3 m de longitud. Centre: detall de la caixa de vents i les bombes de recirculació. Esquerra: detall de la part superior de la trompa, de l'escanyall i de la finestra transparent per observar el flux.....	106
Figura 3-1. Propulsors navals elèctrics fabricats per Fischer-Panda.	111
Figura 3-2. Diferents models de propulsors marins elèctrics, en tovera i arrossegats per la perifèria comercialitzats per <i>Marine Systems Van Der Velden</i>	112
Figura 3-3. Diferents models de propulsors elèctrics marins elèctrics, en tovera i arrossegats per la perifèria, del tipus <i>E-Jet Electric Drive</i> comercialitzats per <i>L.+W. Bieschewski GmbH</i>	112
Figura 3-4. Bot Ras a sobre del remolc, abans de les proves en la bassa del parc central de Nou Barris (Barcelona, 06/2009).	114
Figura 3-5. Esquema de la connexió Scott i representació d'un sistema de tensions trifàsic i bifàsic.	115
Figura 3-6. Disposició bàsica de les espines de l'estator i requeriments geomètrics.....	120
Figura 3-7. Utilitatges per al conformat de les espines, i espines acabades.....	121
Figura 3-8. Secció transversal del tram recte del tub de coure i col·locació dins la ranura.	122
Figura 3-9. Planxa magnètica i guies d'apilament	123
Figura 3-10. Dimensions característiques de la planxa magnètica.	124
Figura. 3-11. Torus magnètic A del varivolt trifàsic utilitzat per fer el prototip.	125
Figura 3-12. Resultats de l'assaig de buit en corrent altern dels tres torus magnètics.	126
Figura 3-13. Simulació del repartiment de corrent en una planxa de coure de 1 mm de gruix, segons disposició particular del prototip VF1. Simulació realitzada en Ansys10. Imatge esquerra: distribució de tensió. Imatge dreta: repartiment de corrents.	134
Figura 3-14. Fragment central del model geomètric en 3D del prototip VF1, realitzat en ANSYS10	135
Figura 3-15. Resultat de la simulació en 2D d'un fragment del prototip. Es representen les línies d'igual potencial magnètic i la densitat de corrent en cada punt, segons el codi de colors indicat en la llegenda.....	136
Figura A-1. Bobina Rogowski encerclant un conductor pel qual circula una intensitat I	166
Figura A-2. Bobina Rogowski d'una sola capa amb espira de retorn.	166
Figura A-3. Esquema del sistema de bobinat de les sondes Rogowski amb el torn.....	169

Figura A-4. Disposició dels elements per bobinar: torn i elements auxiliars.	169
Figura A-5. Bobines en diferents moments de construcció: (a) bobina de capa simple; (b) bobina de doble capa després d'esmaltar; (c) BR6, amb recobriment de cotó i vernís, text identificatiu i BNC.	170
Figura A-6. Transformador TS d'altres corrents del laboratori d'Enginyeria Elèctrica de l'ETSEIB	173
Figura A-7. Rectes de calibrat de les sondes Rogowski.....	174
Figura A-8. Dues captures de pantalla de l'oscil·loscopi durant el calibrat de BR1, BR2 i BR3. El corrent del secundari del TS és en cada cas de: (a) 1,42 kA; (b) 6,11 kA.	174
Figura C-1. Oscil·lograma de l'assaig de curtcircuit del torus A.....	178
Figura C-2. Caigudes de tensió entre diferents punts de la planxa de coure de la fase del torus B, de la fase del torus C i de la solució numèrica.	180
Figura C-3. Captura de pantalla de l'oscil·loscopi pel repartiment dels corrents secundaris pel neutre. .	182
Figura C-4. Oscil·logrames de tensió i corrent del primari, abans i després de modificar el secundari...	183
Figura C-5. Relació lineal entre el corrent i la tensió del primari.....	185
Figura C-6. Tensió del secundari respecte el corrent primari.....	186
Figura C-7. Evolució de la proporció de caiguda de tensió en una espira respecte la tensió del secundari, en funció del corrent primari.....	186
Figura C-8. Corba de parell pel rotor bloquejat en funció del corrent primari.....	187
Figura C-9. Corba de velocitat en funció del corrent primari i diferents parells resistents.	188
Figura C-10. Intensitat que pot proporcionar el generador del ACEE al prototip VF1 en funció de la freqüència.	189
Figura C-11. Evolució de la relació entre intensitat primària i secundària, en funció de la freqüència. ..	190
Figura C-12. Oscil·lograma de l'assaig realitzat a 135 Hz alimentant des de l'ACEE.....	191
Figura C-13. Oscil·lograma de l'assaig realitzat a 26 Hz alimentant des de l'ACEE.....	191

Llista de taules

Taula 1-1. Comparativa entre les trompes descrites a l' <i>Encyclopédie</i> i la de Montgaillard.	42
Taula 1-2. Característiques dels compressors realitzats per Taylor.	55
Taula 2-1. Característiques de les bombes centrífugues de recirculació.	73
Taula 2-2. Valors adoptats per als coeficients hidràulics de pèrdues per fregament.	78
Taula 2-3. Cabals d'aigua en una trompa sense espiralls, per diferents arbres i escanyalls.	81
Taula 2-4. Cabal d'aigua en una trompa amb espiralls, per diferents càrregues d'aigua i escanyalls.	83
Taula 2-5. Pressió de saturació del vapor d'aigua i constants d'Henry de l'oxigen i el nitrogen en aigua, per diferents temperatures.	99
Taula 2-6. Característiques teòriques de l'aire sortint del compressor de Ragged Chutes.	100
Taula 2-7. Resultats dels assajos realitzats amb una trompa de 3 mm de diàmetre.	105
Taula 3-1. Propietats físiques del coure electrolític recuit.	118
Taula 3-2. Característiques dels tubs de coure utilitzats, segons norma ASTM 280-99.	119
Taula 3-3. Magnituds característiques del paquet magnètic.	123
Taula 3-4. Característiques de les bobines toroïdals usades com a transformador d'intensitat.	124
Taula 3-5. Resum del comportament dels torus magnètics, segons els assajos realitzats.	126
Taula A-1. Característiques de les bobines Rogowski implementades.	172
Taula B-1. Característiques físiques del nitrogen (N ₂) líquid.	175
Taula C-1. Magnituds mesurades en l'assaig de curtcircuit del torus A.	177
Taula C-2. Estimació de la resistència i potència dissipada en el secundari del prototip VF1.	178
Taula C-3. Magnituds mesurades en els primers assajos del prototip VF1.	184
Taula C-4. Parell d'arrencada del prototip VF1 en els primers assajos.	184
Taula C-5. Resultats de la mesura del parell d'arrencada del prototip VF1 quan ja tenia la forma final.	185

Llista d'abreviacions i símbols

a	Coeficient de temperatura per la resistivitat elèctrica (K^{-1})
a	Alçada (m; mm)
A	Àrea delimitada per una espira (m^2)
b	Longitud de la base d'un rectangle (m; mm)
c	Calor específica ($J/(kg \cdot ^\circ C)$)
c_m	Calor específica màssica ($J/(kg \cdot ^\circ C)$; $J/(kg \cdot K)$)
c_n	Calor específica molar ($J/(mol \cdot ^\circ C)$; $J/(mol \cdot K)$)
C_p	Calor específica a pressió constant ($J/(kg \cdot ^\circ C)$)
d	Densitat (kg/m^3)
D	Diàmetre (m)
f	Coeficient de fricció (-)
g	Acceleració de la gravetat ($9,81 m/s^2$)
h	Alçada o cota (m; m.c.a.)
h	Gruix (mm)
h	Coeficient de transmissió de calor per convecció entre aire i aigua ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$)
H	Alçada (m; m.c.a.)
H	Intensitat de camp magnètic (A/m)
H_{l-v}	Entalpia de vaporització (J/mol)
I	Intensitat (A)
I_0	Intensitat de buit o d'excitació (mA)
J	Densitat de corrent (A/m^2)
k	Rugositat absoluta de la superfície d'una canonada (m)
k	Conductivitat tèrmica ($W/(m \cdot K)$)
l	Longitud (m)
L	Longitud (m)
m	Massa (kg)
m.c.a.	Metre de columna d'aigua
M	Inductància mútua (H)
n	Número de mols (mol)
n	Densitat lineal d'espires (espires/m)
N	Número d'espires
$N_{planxes}$	Número de planxes
N_{ran}	Número de ranures

p_i	Pressió relativa en la secció i (Pa)
P	Pressió (Pa)
$P_{abs\ i}$	Pressió absoluta en l'instant i (Pa)
$P_{el.}$	Potència elèctrica (W)
$P_{hidr.}$	Potència hidràulica (W)
$Pot_{.\Delta T=0}$	Potència de compressió en condicions isotèrmiques.
Q	Calor (J)
Q	Cabal (volumètric: m^3/s ; màssic: kg/s)
Q_{vol}	Cabal volumètric (m^3/s)
R	Resistència elèctrica (Ω)
R_{Fe}	Resistència equivalent a les pèrdues en el ferro (Ω)
R_h	Radi hidràulic (m)
R_{in}	Radi interior
Re	Número de Reynolds ($Re = (v \cdot D) / \nu$)
s	Superfície (m^2)
S	Àrea de la secció transversal d'un conductor o canonada (m^2)
S	Potència elèctrica aparent (VA)
t	Temps (s)
T	Temperatura (K; $^{\circ}C$)
T_f	Temperatura de fusió (K; $^{\circ}C$)
T_v	Temperatura de vaporització (K; $^{\circ}C$)
v	Velocitat (m/s)
v_{aigua}	Velocitat de l'aigua (m/s)
v_{aire}	Velocitat de l'aire (m/s)
v_{ll}	Velocitat de lliscament de les bombolles d'aire respecte l'aigua (m/s)
v_{LL}	Velocitat de lliscament de les bombolles d'aire respecte l'aigua (m/s)
\bar{v}	Velocitat promig de les dues fases en un flux bifàsic (m/s)
v_{sup}	Velocitat superficial d'una de les fases d'un flux bifàsic en una canonada (m/s)
V	Tensió (V)
V_i	Velocitat mitja del flux en la secció transversal i . (m/s)
x	ràtio de cabals volumètrics d'aire i d'aigua que es mesclen en l'escanyall.
X_{μ}	Reactància de magnetització (Ω)
Z_i	Cota vertical respecte una alçada de referència (m; m.c.a.)

α	angle que formen dos vectors
α_i	Coefficient de correcció de la distribució no uniforme de la velocitat
ϕ	Flux magnètic (Wb; V·s)
γ	Pes específic del fluid: $\gamma = \rho \cdot g$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$; N/m^3)
φ	Angle de desfasament entre tensió i corrent.
λ_k	Coefficient de fregament corresponent al fenomen local k.
μ	Viscositat dinàmica del fluid ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)
	- per aigua a 15°C: $1,139 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
	- per aire a 15°C: $0,018 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
μ_0	Permeabilitat electromagnètica del buit ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H}/\text{m}$)
ν	Viscositat cinemàtica del fluid: $\nu = \mu / \rho$ (m^2/s)
	- per aigua a 15°C: $1,139 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
ρ	Densitat del fluid (kg/m^3)
	- per aigua a 15°C: $999,1 \text{ kg}/\text{m}^3$
	- per aire a 15°C: $1,22 \text{ kg}/\text{m}^3$
ρ	Resistivitat elèctrica ($\Omega \cdot \text{m}$)
\emptyset	Diàmetre (m)

CSIC	Consell Superior d'Investigacions Científiques
DEE	Departament d'Enginyeria Elèctrica
DURSI	Departament d'Universitats, Recerca i Societat de la Informació
ETSEIB	Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona
FNB	Facultat de Nàutica de Barcelona
IEC	Institut d'Estudis Catalans
SCT	Societat Catalana de Tecnologia
UPC	Universitat Politècnica de Catalunya

p.	pàgina, pàgines
s.	segle
v.	veure

Capítol 1. Les referències bibliogràfiques sobre la trompa d'aigua

En aquest capítol es fa un recorregut ordenat i exhaustiu per la història de la farga catalana, centrant especialment l'atenció en els aspectes que tenen relació amb les trompes d'aigua i la seva evolució al llarg del temps.

Després de realitzar una recerca i recorregut exhaustiu per totes les publicacions a què he pogut accedir, s'arriba a la conclusió que solament a partir d'unes poques fonts es podrien reconstruir de manera fidedigna les trompes d'aigua que havien existit en les fargues. En les referències més antigues no es descriuen les trompes amb precisió degut possiblement al poc risc de la seva desaparició en aquell moment, mentre que les més modernes (s. XIX), ja es troben amb la dificultat de la seva escassetat, dificultat que s'afegeix al secretisme practicat pels artesans per protegir la seva professió. Dues d'aquestes fonts fidedignes s'adopten com a referència per a la construcció del model pilot al laboratori.

A més de la recerca bibliogràfica, he tingut ocasió de col·laborar amb altres investigadors en treballs relacionats amb la història de la Farga Catalana i en l'estudi *in situ* de fargues, que han arribat fins als nostres dies en millor o pitjor estat de conservació, com la de la Sénia o la d'Hostalric. Les restes arqueològiques de trompes són escasses, o bé perquè la fusta s'hagi degradat, o bé perquè s'hagi reaprofitat per altres usos *a posteriori* del tancament de la farga.

Finalment, en el darrer apartat, es presenten diferents aplicacions del principi funcional de la trompa que s'han desenvolupat en un moment o altre de la història, com les bombes d'elevació per aire, o les trompes de buit, entre altres.

1.1 La Farga Catalana

El procediment català o de la farga catalana és un mètode directe d'obtenció de ferro a partir del mineral, per mitjà de la combustió del carbó vegetal, amb unes particularitats pròpies i distintives. Igualment, s'entén per farga catalana l'establiment on s'aplicava aquest procediment, i en general, tota farga situada a Catalunya.

Els mètodes directes permeten obtenir ferro o acer a partir del mineral en una sola etapa. Els mètodes indirectes, al contrari, es fonamenten en l'obtenció a major temperatura i en un alt forn d'una colada de metall, anomenada arrabi, i el seu posterior afinat, principalment mitjançant la utilització de convertidors. Aquesta divisió en dues etapes és la que li dona l'apel·latiu d'indirecte.

1.1.1 Les primeres matèries

Els materials extrets de la mina es seleccionen en funció de la riquesa que presenten en les substàncies d'interès: la fracció de material extret aprofitable rep el nom de mena, mentre que la part que es rebutja s'anomena ganga.

Es qualifiquen com a menes de ferro els materials geològics, siguin minerals o roques, que poden ser aprofitats per al benefici del ferro. La mena conté substàncies fèrriques en major o menor proporció, barrejades amb altres materials no fèrrics. Dins d'una important diversitat, les menes de ferro estan formades principalment per òxids, com el mineral hematites o la roca limonita, i també per carbonats, com el mineral siderita. La limonita ha constituït sovint la principal mena de ferro a Catalunya.⁴

La limonita és una roca formada per la mescla de diferents minerals, principalment goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), i en menor grau lepidocrocita (HFeO_2) i siderogel⁵ ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Es qualifica d'òxid de ferro hidratat degut a la seva composició química promig. Era una de les menes preferides per a la farga degut a la seva major fusibilitat⁶. La seva riquesa en ferro varia entre el 45% i el 55% del seu pes. Encara que pot tenir des de un color groc clar fins a un to bru o rogenc, la ratlla⁷ es marró groguenca. També s'anomenava hematites

⁴ MATA-PERELLÓ, J.M. «Capítol 3.2. Els minerals i les roques de ferro. Les menes de ferro», a: *La Farga* [CD-ROM], 2000.

⁵ El siderogel també s'anomena turgita.

⁶ HENRION, M. A. (1881, p.114-164.)

⁷ La ratlla es pot practicar amb una fulla d'acer. El color de la pols obtinguda cal contrastar-lo sobre paper blanc.

bruna o hematites groga. Comparativament, l'hematites (Fe_2O_3) té una riquesa teòrica en ferro de fins al 70%, i la seva ratlla és vermella, tal com indica el seu nom.

El carbó vegetal s'obtenia dels boscos. Els carboners recollien la fusta que els feia falta, en feien piles en una clariana, la tapaven de terra i rames verdes tot deixant els forats de respiració i hi calaven foc. La regulació de l'aire que entrava a la pila permetia controlar el procés de carbonització, o de combustió incompleta amb manca d'oxigen a temperatures d'entre 400°C i 700°C. El resultat era el carbó vegetal: un material porós, fràgil, amb un alt contingut en carboni, molt més lleuger que la fusta però amb bona part de la seva calor de combustió.

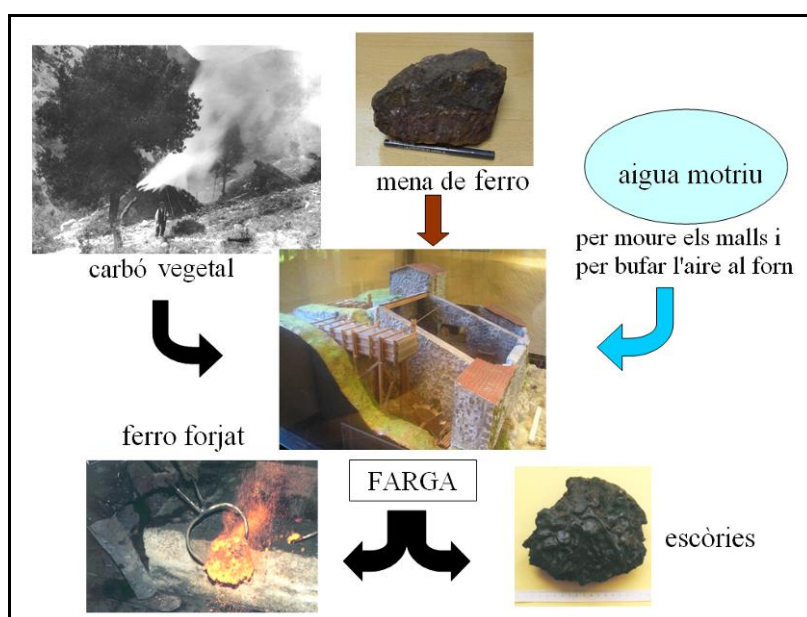


Figura 1-1. Esquema de les matèries implicades en el procés de la farga⁸.

La massa del carbó podia representar el 25% de la de la fusta inicial, mentre que el seu volum podia reduir-se a la meitat. De promig, en el procés de carbonització, es perdia un 50% de la calor de combustió de la fusta, però en contrapartida, es duplicava el seu poder calorífic⁹.

⁸ Per ordre d'esquerra a dreta i de dalt a baix, les fotografies de la figura corresponen a:

- Carboner, carbonera i barraca (1918), a Llorona (Alt Empordà), Arxiu Mas. (*La Farga*, [CD-ROM], 2000)
- Mostra de limonita. (*La Farga*, [CD-ROM], 2000)
- Maqueta de la farga Pyrène de Montgaillard, al museu del mateix nom, foto: V. Fuses.
- Masser experimental a la sortida del forn. (*La Farga*, [CD-ROM], 2000)
- Escòries del bosc de Virós (Vall Ferrera). (*La Farga*, [CD-ROM], 2000)

⁹ El poder calorífic del carbó vegetal val entre 29 i 35 MJ/kg, mentre que el de la fusta es considera d'entre 12 i 21 MJ/kg. La variabilitat respon al grau d'humitat, al tipus de fusta i al grau de combustió del carbó. El poder calorífic inferior de l'antracita és d'uns 26 a 33 MJ/kg, el de la hulla és de 20 a 36 MJ/kg, el del gasoli és de 45 a 48 MJ/kg, i el del metà és de 55 MJ/kg.

El procés de carbonització podia durar entre una setmana i dos mesos segons la mida de la carbonera. La producció es comptava en **cargues** de carbó, que equivalien a 120-125 kg. La producció d'una carbonera podia oscil·lar entre 15 i 150 cargues de carbó, és a dir, entre 1,8 t i 19 t de carbó¹⁰.

Respecte a Andorra, Olivier Codina (2006) exposa que els carboners s'organitzaven al voltant de les **cabanades**, que són els espais on es muntaven les carboneres d'un mateix sector de tala, i era també la unitat administrativa utilitzada en concessions d'explotació. La producció també es comptabilitzava en cargues de carbó, però en aquest cas les cargues eren d'uns 80 kg cadascuna. Les cabanades petites donaven unes 250 cargues (20 t), i les grans, fins a 750 cargues (60 t).

En aquest tipus d'instal·lacions, **l'aprofitament de l'aigua** dels cursos naturals era un factor clau per la producció del ferro. L'aigua es retenia mitjançant una presa per desviar una part del cabal cap un canal de derivació. En arribar a l'emplaçament de la farga, es disposava d'una bassa superior de regulació per garantir la disponibilitat d'aigua en els moments de major consum. L'energia hidràulica s'emprava d'una banda per moure les rodes, de pales o calaixos, que accionaven al seu temps els malls, els martinets i les manxes, si n'hi havia, i d'altra banda, per alimentar també les trompes d'aigua. Aquesta és la màquina de bufar que caracteritza la farga catalana, malgrat que algunes fargues usaven les manxes.

1.1.2 El procediment i els seus elements

Un magnífic estudi metal·logràfic sobre el procediment és el de J. Simó (1992). Vinculat a aquest estudi també es va realitzar un forn experimental per reproduir el procés de la farga, tal com queda palès en la comunicació de J. Simó, M. Marsal i J. Tartera al Primer Simposi Internacional sobre la Farga Catalana celebrat a Ripoll el 1993 (V.V.A.A, 1995).

Un cop aportades les matèries primeres a peu de farga, calia escalfar el forn durant diversos dies o, si ja estava calent, carregar el forn per iniciar una fargada. L'operació sencera amb el forn calent durava entre sis i vuit hores, es consumien entre 300 i 400 kg de mineral de ferro i una quantitat similar de carbó vegetal. Com a resultat del procés s'obtenia una quantitat de ferro d'entre 75 i 125 kg de pes, a la vegada que una bona quantitat d'**escòries** formades per material vitri i per material porós de rebuig, que calia abocar o vendre per altres usos.

Les proporcions de mena, carbó i ferro implicades en el procés estan subjectes a una forta variabilitat en funció del tipus de mena, del tipus de carbó, de les condicions de temperatura i humitat de l'aire, de

¹⁰ ZAMORA I ESCALA, Jaume Enric «Capítol 6.1. El carboneig i la farga», a: *La Farga* ([CD-ROM], 2000)

l'habilitat dels fargaires, del tipus de forn, de la manera com s'ha carregat el forn i de com evoluciona la seva combustió, entre d'altres factors. Sense voler ser exhaustiu, les principals fonts consultades donen els següents valors de referència:

- Carlos Mas (2000, p.362), indica que el consum mig de les fargues de la Vall Ferrera per a produir un quintar català de ferro (41,6 kg) era d'uns 300 kg de mineral i d'uns 700 kg de carbó vegetal. És a dir, calien uns 7,2 kg de mineral i 16,8 kg de carbó per obtenir 1 kg de ferro.
- Geneviève Gavignaud (1977, p.177), cita una altra obra¹¹ on és diu: “dans l'arrondissement de Céret, les forges font six feux par vingt-quatre heures pour produire 84 kg de fer. Dans l'arrondissement de Prades, elles font quatre feux par jour 168 kg de fer; les premières utilisant 250 kg de charbon, les deuxièmes, 500 kg”. És a dir, calien uns 3 kg de carbó per 1 kg de ferro.
- Pere Molera (1983) diu que la producció normal d'una farga era d'unes 8 t de ferro al mes, per un consum de 30 t de mena i 50 t de carbó. És a dir, calien 3,8 kg de mena i 6,3 kg de carbó per 1 kg de ferro. Per la farga de Grau de Campdevànol, entre 1866 i 1878, es van requerir de promig 2,8 t de mena i 5,2 t de carbó per cada tona de ferro produïda, amb una forta variabilitat anual.
- T. Richard (1838) diu que en unes 6 h s'obtenia 151 kg de ferro en barres, a partir de 487 kg de mena, 544 kg de carbó, 2.800 kg d'aire (6 m³/min), i 106 kg d'aigua evaporada portada per l'aire de la trompa. És a dir, calien 3,2 kg de mena i 3,6 kg de carbó per obtenir 1 kg de ferro.
- Olivier Codina (2001): a Andorra, el màxim de producció del s. XVIII es va donar l'any 1780, amb 575 t de ferro produït, i es va comptabilitzar un consum de 1.930 t de mineral recuit i 2.150 t de carbó, és a dir, 3,4 kg de mena i 3,7 kg de carbó per 1 kg de ferro. A la farga Rossell, entre 1845 i 1876 (dels quals 5 anys va estar tancada), en 244 setmanes de treball, es van produir 798 t de ferro repartits en 4.698 massers, pels quals van fer falta 2.300 t de mineral i 2.700 t de carbó¹². El pes resultant d'escòries va ser de 1.160 t. Aquests valors representen 2,9 kg de mena, 3,4 kg de carbó i 1,5 kg d'escòries per 1 kg de ferro, amb un promig de 170 kg de ferro per masser. La productivitat havia augmentat considerablement en el s. XIX, segurament degut a l'augment de la càrrega del forn.

¹¹ JALABERT, F. *Géographie du département des P.O.*, Paris, 1819, p.42.

¹² CODINA (2006) dona uns valors diferents pel consum de mena i carbó per al mateix any respecte els publicats l'any 2001 pel mateix autor: 800 t de ferro procedents de 3500 t de mena i 3650 t de carbó, és a dir, 4,4 kg de mena i 4,6 kg de carbó per kg de ferro. Aquests valors indicarien una baixada de la productivitat respecte el segle anterior. Es pot tractar d'un error d'impremta, o bé es pot interpretar com una disminució de la productivitat per baixada de la qualitat del mineral per un possible exhauriment dels meners.

Una explicació simplificada del procediment és la que segueix¹³:

- a) La mena de ferro ben triturada, per tal d'eliminar la ganga i augmentar la seva superfície, s'introdueix en el forn juntament amb el carbó vegetal en una disposició característica.
- b) El foc, atiat pel corrent d'aire que prové de la trompa o de les manxes, permet que s'assoleixi una temperatura al voltant dels 1200°C. El principal agent reductor és el monòxid de carboni (CO), que és producte de la combustió incompleta del carbó. Existeixen altres subproductes i reaccions que contribueixen també a la reducció del ferro.
- c) Progressivament es va produint la reducció del mineral a ferro i es generen les escòries a partir de la resta de substàncies que conté el mineral. Es va conformant una massa esponjosa anomenada masser, que conté el ferro reduït, al roig viu, amb una consistència entre sòlida i pastosa, i les escòries en estat líquid repartides pel seu interior.
- d) Amb el mall, mitjançant operacions successives de forja i de reescalfament, s'aconsegueixen expulsar les escòries del masser fins a conformar un bloc de ferro consolidat.

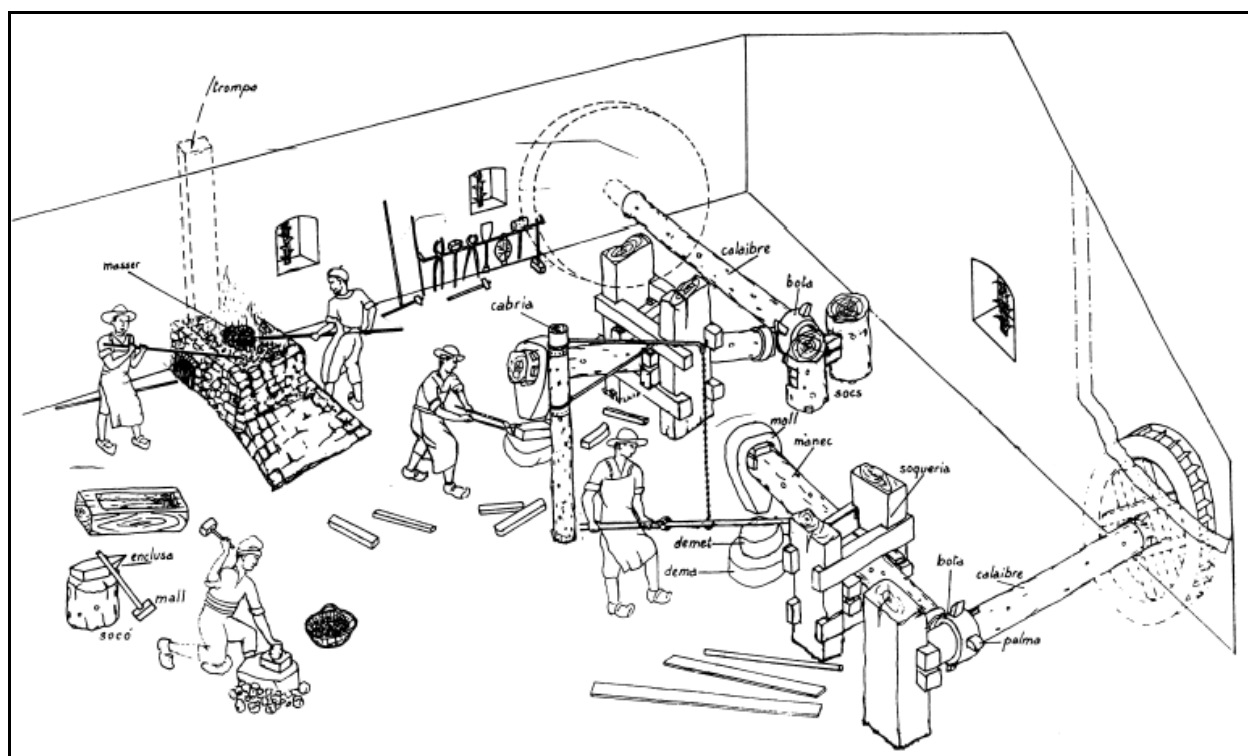


Figura 1-2. Reproducció ideal d'una farga, segons J. Mateu (1993)¹⁴

¹³ Realitzada en base a l'article TOMÀS (1999), amb aportacions d'altres fonts.

¹⁴ Una longitud característica per interpretar una farga són els 10 m. Aquesta és aproximadament l'alçada des de la bassa fins al punt de desguàs, i també el llarg i l'ample necessaris per poder disposar el forn, el mall, etc.

El forn consistia en un forat troncocònic a nivell de terra -baix forn- de menys d'un metre de costat i de poca profunditat, recobert de pedra i planxes de ferro que s'anaven consumint a poc a poc i que calia refer sovint. En el forn, a mesura que s'escalfa el mineral, els silicats i els carbonats es combinen amb material fundent afegit o contingut en el mateix mineral. Una part de les impureses s'escola al fons del forn i s'extreu per un forat. Són les escòries. Es tracta d'un líquid fosc i roent que es solidifica ràpidament en forma vítria, de color negre i d'aspecte sovint brillant. També s'anomena cagaferro.

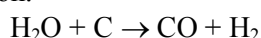
A mesura que continua el procés, els òxids de ferro del mineral es descomponen i es va formant el masser. La temperatura que es pot assolir amb el procés de la farga catalana no és suficient per fondre el ferro, ni tampoc és desitjable que ho faci. La colada de ferro, amb un contingut més elevat de carboni, perd la ductilitat. La consistència sòlida del ferro evita que el carboni es difongui en excés per la seva estructura cristal·lina. En contrapartida, el masser reté les impureses en el seu interior.

Quan es donen les condicions adequades, els operaris extreuen el masser del forn amb unes llargues tenalles i palanques per portar-lo a sota del mall i, per martelleig, s'aconsegueix expulsar les escòries que conté.

El masser es va refredant sota el mall i cal tornar-lo al forn per recuperar temperatura i poder repetir el procés. Per no treballar amb una massa tan gran, el masser inicial es divideix en dues porcions o massoques, i aquestes sovint, en dues porcions més o massoquetes. D'aquesta manera mentre es colpeja un fragment, els altres s'escalfen. En diverses operacions successives d'escalfament i martelleig s'obté ferro forjat. Aquestes operacions eren les més dures per als fargaires i també les que requerien el treball coordinat de tots els treballadors.

La trompa d'aigua no era solament un mecanisme per aportar oxigen al forn, sinó que la naturalesa més humida del seu vent havia d'influir d'una forma o altra en el procés de reducció. Aquest aspecte va atreure l'atenció de molts estudiosos de la farga i de la metal·lúrgia al llarg dels anys. Percy (1864) integra els coneixements sobre aquest tema, basant-se principalment en els estudis realitzats per J. François (1843) sobre la composició dels massers i dels gasos present en el forn. Una cita més moderna sobre aquest tema, força simple però prou significativa, és la següent:

“The blast from the trompe is saturated and no doubt the water vapour takes part in a water-gas reaction:



The hydrogen formed accentuated the reducing reaction in the higher levels and produced a more steely iron. It has been found that the use of blowing cylinders instead of the trompe results in a more ductile iron”

(TYLECOTE 1987, p.167)

Gamboa (1761) valora la influència de la humitat de la trompa, que anomena “Arte de Agua”, com a positiva o negativa en funció del metall de què es tracti:

“(…) este Arte (...) no es siempre el mas à proposito; porque con metales recios, frios, y margagicosos, seràn frequentes las Trompas de el Horno por la humedad de el viento, que aprovecharà por el contrario à los metales cobrizos.”

(GAMBOA, 1761, p. 400)

Pere Molera (1983) dóna una breu explicació sobre la resistència a la corrosió del ferro de la farga. Ho atribueix a una capa de magnetita (negra i densa) que es forma a la superfície, i també al fibrat del ferro fruit de la forja, que dificulta el progrés de les picadures.

1.1.3 Organització productiva

Normalment no es treballava durant tot l'any¹⁵, degut a la duresa del clima, als règims dels rius, a la presència de neu o gel, o a l'alternança amb la temporada d'extracció de mineral o amb els treballs del camp. Però un cop començava la temporada, es treballava sense parar fins a cobrir les comandes d'aquell any. Era necessari treballar seguit, per mantenir el forn calent, ja que les primeres fargades sovint no produïen un bon masser.

L'estructura laboral dins una farga estava fortament jerarquitzada. Trobem la propietat, que exigia resultats i cobrava lloguer; l'explorador que gestionava la compravenda, el finançament, els sous, els contractes, l'organització i la resta d'aspectes externs a l'obrador; i el personal de la farga. El mestre fargaire especificava com havia de ser el forn, les característiques de les màquines, organitzava les accions de la resta de personal i el moment adequat per fer cada operació. Els operaris movien els materials, alimentaven el forn i arrossegaven el ferro entre el forn i el mall i a l'inversa. Algun aprenent ajudava als operaris i normalment l'aprenent més jove controlava els cabals d'aigua i d'aire i vigilava el forn quan els altres no hi eren.

Els mestres fargaires eren persones especials, tal com si es regissin pel seu propi instint, possiblement amb la intenció de mantenir en secret el seu coneixement i protegir-se de la competència. Si no se'n trobaven a prop, no era estrany que els mestres fargaires es fessin venir dels Pirineus catalans o francesos o, fins i tot, del nord d'Itàlia.

¹⁵ GAVIGNAUD (1977) indica que les fargues funcionaven 7 o 8 mesos a l'any, entre tardor i primavera, i atribueix l'aturada estival a la manca d'aigua durant l'estiatge.

1.1.4 Breu història de la farga

Pere Molera (1983) fa una breu però completa explicació de la història de la farga, des de la importància que ha tingut el ferro al llarg de la història, fins a la seva obtenció en els alts forns. Situa l'inici de l'explotació del ferro cap a l'any 1500 a.C. quan es descobreix com expulsar l'escòria de la massa esponjosa que resulta de la reducció del mineral, mitjançant la forja. El procediment va anar millorant, sempre sobre la mateixa essència, a través de diferents civilitzacions. Els primers en aprofitar les possibilitats de l'acer foren els hitites, poble indoeuropeu establert a Anatòlia, o Àsia Menor (actual Turquia) cap al segon mil·lenni a.C. Després es cita el domini del ferro per part dels ibers, i posteriorment per part dels romans com a antecedents immediats de la farga catalana. La primera referència a una farga a Catalunya la situa en la venda d'una fàbrica, fàbrega o farga de Montanet o de Piera, l'any 1031.

Durant l'Edat Mitjana, les fargues es van situar en emplaçaments estables, al costat dels cursos d'aigua, dels boscos i de les mines. Marta Sancho (1999, 2005a i 2005b) va realitzar l'excavació de la farga de la Fabregada, a Sant Esteve de la Sarga (Montsec), amb una cronologia d'entre els s. XI i XIII. A partir de les seves investigacions, planteja una evolució tècnica de la farga resumida en les següents quatre etapes:

- a) Fins al s. IX, eren forns itinerants d'abast local que es col·locaven a peu de mina, moguts a força de braços, sovint per aprofitar afloraments pobres de mineral.
- b) s. IX i XIII, els emplaçaments ja eren estables, se situaven al costat dels cursos d'aigua per aprofitar la seva força en el mall, i a prop de qualsevol jaciment, per pobre que fos. El bufat del forn era manual. L'excavació de la Fabregada correspondria a una instal·lació d'aquesta etapa.
- c) s. XIV i XV, els emplaçaments ja no se separen dels rius, però es busca la proximitat a grans jaciments de mineral i l'abundància de massa forestal. El mall era hidràulic i el bufat era per manxes.
- d) s. XVI i XIX, s'introdueix la trompa d'aigua i les explotacions creixen en producció i productivitat.

Diversos factors marquen aquesta evolució. D'una banda, la creació de xarxes comercials estables permet abandonar les explotacions més pobres i fixar l'emplaçament de les fargues. D'altra banda, es prima la proximitat al mineral o al carbó, que són els dos materials imprescindibles i de major cost de transport.

Les fargues van quedar vinculades als cursos d'aigua de cabal i desnivell suficients, primer per moure els martells, i després per bufar aire al forn. D'aquesta manera es va satisfer la creixent demanda d'utensilis de ferro. El naixement del què coneixem com a mètode català es situaria en la darrera etapa, de major tecnificació del procés.

1.1.5 Implantació geogràfica i terminològica

El mètode es va implantar en un territori extens, però sobretot al Pirineu català i francès. En altres llocs, com ara a Astúries, al País Basc o als Alps, l'obtenció del ferro es feia de manera similar però amb variants pel que fa a la forma del forn o a les màquines usades per insuflar l'aire. En aquests llocs, sovint coexistien diferents tipus de fargues al mateix temps, de manera que aquesta distinció entre el mètode català i els altres podia quedar reflectida en la documentació que hi feia referència. D'aquesta manera s'han descobert llocs on va arribar sota el qualificatiu de català. Sabem que arribà a Còrsega, als Països Baixos, a Alemanya, a Finlàndia, a les Índies Orientals, a Madagascar, a les conques de l'Orinoco i del Mississipi¹⁶, entre altres llocs.

Estanislau Tomàs (1999) intenta explicar els possibles motius de l'acceptació i pervivència del terme allà on s'implantava, d'entre els que destaquen que aportava realment una millora de productivitat respecte els altres mètodes, que va permetre la coexistència durant força anys del mètode directe en competència amb els indirectes, i que era un dels pocs mètodes que estava explicat detalladament en documents escrits.

Molts topònims i noms de lloc a Catalunya conserven la seva arrel en aquest tipus d'activitat, com ara la Fabregada (Pallars Jussà), la Vall Ferrera (Pallars Sobirà) o la Farga de Moles (Alt Urgell), Martinet (la Cerdanya), etc. La llista de les fargues de Catalunya és extensa, i sovint s'amplia després de noves investigacions. Diversos autors n'han fet recopilacions, com ara : Gallardó i S. Rubió, P. Molera i C. Barrueco, Joaquim Mateu, Eudald Graells, Carlos Mas o Marta Sancho, entre d'altres.

1.1.6 Un exemple: les fargues de la Vall Ferrera i d'Andorra

Un exemple singular i representatiu que permet entendre la farga en la seva època d'esplendor, és el de la Vall Ferrera. L'historiador Carlos Mas (2000) situa definitivament la Vall Ferrera en la història de la Siderúrgia i en la història econòmica de Catalunya.

A banda d'Andorra, de les quatre zones ferreres més importants del Pirineu català (el Ripollès, la Vall Ferrera, el Rosselló i la Cerdanya), dues passen a mans franceses amb el tractat dels Pirineus (1659), quedant reduïda l'oferta de ferro en terres catalanes. Carlos Mas (2000, p.57), exposa que es tractaria de repensar el tractat des de la perspectiva siderúrgica, i que aquest dèficit hauria portat al Ripollès a guanyar molta més importància, i a la proliferació de fargues a la Vall Ferrera, i posteriorment a Andorra.

¹⁶ MOLERA (1983) i TOMÀS (1999).

Eudald Graells, investigador i erudit de la farga catalana, aporta la següent reflexió al respecte: “Els nostres historiadors en comentar les riqueses dels territoris cedits ometen esmentar la gran riquesa que, sense deixar-ho entendre, més cobejaven els francesos: el ferro de les fargues (...). Consumada l'annexió, la producció de ferro a les comarques del Principat va quedar reduïda a una tercera part.”¹⁷

Igualment Núria Sales també afirma que “la penúria metal·lúrgica de les quatre províncies, l'economia bàsicament agrícola de la plana rossellonesa, fan que oblidem sovint que la zona muntanyenca de la Catalunya Nord ha estat de tot temps terra ferrerera.”¹⁸

La població de la vall es va gairebé duplicar amb posterioritat a la signatura del tractat, des dels 500 habitants el 1518 fins als més de 900 el 1787. Aquest creixement es pot atribuir a l'entrada en funcionament de les fargues que hi van progressar.¹⁹ Un cop les fargues entraren en decadència, la població passà a ser inferior a la de dos-cents anys enrere.

Els fargaires de la Vall Ferrera procedien principalment del comtat de Foix. La dificultat de l'ofici feia que s'heretés només de pares a fills i a través d'una llarga experiència²⁰, fet que explica que malgrat el pas dels anys, els fargaires continuessin procedint d'aquests llocs. Quan en cas de conflicte, com en la Guerra del Francès, calia trobar alternatives en el País Basc o als Alps, la campanya resultava més difícil.

A la farga de Llavorsí, de les quasi 300 persones que figuraven sota un o altre concepte, 9 treballaven a la farga, 15 eren miners, 18 es dedicaven al carboneig, mentre que 258 (86% del total) feien el transport de carbó i de mineral. Aquestes proporcions canviaven en funció de la temporada, de la proximitat de les carboneres, de les mines i d'altres factors.²¹

Pel que fa als costos de producció, Carlos Mas en realitza una excepcional avaluació pel cas de la Vall Ferrera. Quan la demanda era elevada, la campanya s'allargava i els salaris fijos representaven menys part del total, mentre que el mineral prenia més importància. Els anys de menys producció i de campanyes més curtes porten al sobredimensionat de la partida dels sous. Sobre el preu del ferro a peu de farga, de

¹⁷ GRAELLS, E. (1990, p.61)

¹⁸ SALES, Núria. *Senyors bandolers, senyors ferreters senyors alt-justiciers. Senyors bandolers, miquelets i botiflers. Estudi sobre la Catalunya dels segles XVI al XVII*. Empúries: 1984, p.65.

¹⁹ MAS (2000, p.46)

²⁰ MAS (2000, p.111, 115-116)

²¹ MAS (2000, p.212-220)

promig, el 48% corresponia al cost del carbó, el 23% al del mineral, el 20% als salaris i 9% restant a altres conceptes²², amb oscil·lacions molt importants segons la temporada.

Les fargues de la Vall Ferrera i d'Andorra tenien molt bona sortida cap a Catalunya. El ferro comprat a Alins es podia vendre a Tarragona per via fluvial des de la Pobla de Segur fins a Tortosa, i per mar fins a Tarragona. Els raiers van tenir un paper destacat en aquest aspecte, tant a la vessant nord com a la sud dels Pirineus. El preu del ferro l'any 1834 s'incrementava en una mica més d'un 30% en portar-lo des d'Alins fins a Tarragona²³. És remarcable la càrrega que representa el transport en la producció preindustrial.

Les fargues de la Vall Ferrera van tancar progressivament durant el segle XVIII degut a la competència del ferro forani que arribava al Principat. La dificultat que aquest ferro arribés al Pirineu, va permetre que proliferessin les fargues andorranes, proveïdores d'aquest mercat més proper. La millora de la productivitat posterior va permetre la seva permanència durant el segle XIX.

En el segle XVIII, la brigada de fargaires a Andorra estava formada per un foguer, un maller, dos escolans, dos picameners i un administrador o factor. La gran majoria d'aquest personal provenia de l'Arieja, i uns pocs de Catalunya. Posteriorment s'afegeixen dos vaillets que ajudarien als escolans en la reducció del ferro en el baix forn, i s'inclou un martinet, per tal de produir peces acabades o semiacabades. Des d'inicis del segle XIX i fins al 1860, els treballadors relacionats amb la siderúrgia representaven entre el 10 i el 15% de la població andorrana. La majoria eren temporers i provenien de l'Arieja.

L'any 1753 es compten a Andorra el màxim nombre de fargues en funcionament simultani, amb 7 establiments, que representen la contractació de 49 fargaires provinents de l'Alta Arieja. La màxima producció anual de ferro del s. XVIII es dona cap al 1780 amb 575 t. Les matèries primeres eren proporcionades per uns 300 carboners i per uns seixanta miners organitzats en set companyies. En total són unes 400 persones. Els traguers que feien falta per moure mineral, carbó i ferro, podien representar 200 persones més amb diferents graus de dedicació i de viatges per persona.

La màxima producció anual del s. XIX a Andorra es va donar cap al 1830 amb unes 800 tones de ferro. Donat que algunes fargues havien hagut de tancar, es pot deduir que la seva productivitat havia augmentat, principalment per haver augmentat la càrrega del forn per obtenir més quantitat de ferro en cada fargada. Es va produir una concentració de companyies mineres, de manera que menys companyies

²² MAS (2000, p. 244-247)

²³ MAS (2000, p. 280-289)

més grans feien una campanya més llarga. I pel que fa al carbó, es van multiplicar les concessions de cabanades.

1.1.7 Decadència i desaparició

Els mètodes directes van ser desplaçats pels indirectes cap a finals del segle XIX. La farga catalana desapareix com a mètode competitiu d'obtenció de ferro en aquesta època, en el moment en què la seva productivitat era màxima. La major abundància de carbó vegetal i mineral del nord d'Europa va conduir al desenvolupament d'explotacions molt més grans i, sobretot, a inventar un mètode que permetés fondre el ferro i obtenir una colada contínua mentre s'alimentés el forn de mineral i combustible. La invenció dels convertidors a principis del segle XIX va permetre poder convertir aquesta fosa en acer i inclús en ferro dolç. D'aquesta manera es completava aquest nou procés anomenat Alt Forn que substituiria progressivament a les fargues catalanes i la resta de processos utilitzats a Europa.

L'augment de la producció de les fargues va comportar un consum excessiu de fusta com a combustible per al forn en molts llocs de Catalunya, i les consegüents protestes de la població que depenia d'aquestes explotacions forestals.

Al Conflent i al Vallespir la situació va ser més extrema. L'explotació durant segles, i principalment en el s. XIX, havia exhaurit els boscos de tota l'Arieja fins a l'estatge subalpí, és a dir, esgotant els boscos naturals de coníferes situats entre els 1600 i els 2300 m d'altitud. Degut a l'augment de preu del carbó, l'activitat estava amenaçada. També indica de manera aproximada que, en el s. XIX, cada forn necessitava l'equivalent en carbó de 15 tones de fusta a la setmana, 1.575 m³ de carbó vegetal a l'any, que sortien de 1.417 ha de bosc.²⁴

En el punt àlgid de la producció de ferro a Andorra, l'any 1830, es van produir 800 tones de ferro. La quantitat de carbó vegetal necessari va ser de 3.650 tones. Si es tractava de carbó de frondoses toves o de coníferes, la seva densitat aparent podia ser de 0,2 t/m³, de manera que van fer falta 18.250 m³ de carbó vegetal. Segons la productivitat del bosc que s'infereix del paràgraf anterior (1,1 m³ carbó/ha) van fer falta 16.591 ha, que es correspon al 36% de la superfície total d'Andorra, de la qual, no tota és de bosc, ni tota és explotable.

Un altre factor que perjudicava el preu del ferro del Pirineu era el sobrecost degut al transport a través de vies de comunicació antiquades.

²⁴ GAVIGNAUD (1977)

1.2 Aportacions a la història de la Farga Catalana

Durant el període que ha durat aquest treball, he tingut l'ocasió de col·laborar amb altres investigadors en treballs relacionats amb la història de la Farga Catalana. A continuació es presenten les principals aportacions que s'han realitzat.

1.2.1 La fàbrica del ferro de la Sénia (Montsià)

Durant l'any 2008 he col·laborat en la investigació sobre l'anomenada "Fàbrica del ferro" situada al terme municipal de la Pobla de Benifassà (comarca del Baix Maestrat), a la carretera de la Sénia al pantà d'Uldecona, juntament amb tres altres persones, Jordi Arasa Centelles, Eva Garcia Lleixà i Manel Serra Heredia, del Centre d'Estudis Seniencs, que ha conduït a l'elaboració i publicació d'un article²⁵ en una revista local, la realització de dues visites guiades obertes al públic en general i la realització d'una presentació o xerrada al mateix poble.

En aquest estudi s'ha posat en relació la farga amb unes mines de ferro properes, amb el riu Sénia com a font d'energia motriu, i amb la fusta dels boscos dels Ports. Les mines en qüestió estan situades a la carena de les muntanyes situades entre la Sénia i el Pantà d'Uldecona, entre la Tossa i la Moleta del Terme. Es poden reconèixer fragments d'hematites i limonita entre el material de rebuig que s'amuntega en tarteres a l'exterior de les diferents bocanes de mina.

A nivell històric, el Monestir de Benifassà va gaudir del monopoli d'explotació dels recursos naturals d'aquestes terres fins a la desamortització de Mendizàbal, el 1835, de manera que era qui administrava l'explotació minera de la zona. Es coneixen documents del segle XVI que fan referència a l'arrendament per part del monestir de diverses mines per a l'explotació del ferro, i també d'altres molins fariners i fargues que aprofitaven el cabal del riu Sénia. Es té referència de la construcció d'un martinet cap al segle XVIII, i del seu arrendament a un veí de la Sénia l'any 1774. Però malgrat aquests antecedents, no és fins al 1845 que apareix la primera referència a la Fàbrica del Ferro en el Diccionari de Madoz (1845). No es té notícia ni de quan es va construir, ni de quan es va deixar d'explotar. Es coneix que entre el 1910 i el 1920 l'edifici ja tenia usos agrícoles o ramaders. Actualment el terreny i l'edifici són de propietat privada²⁶.

²⁵ ARASA, J.; FUSES, V.; GARCIA, E.; SERRA, M. «La farga i el ferro a la vall del riu Sénia: el cas de la Fàbrica del Ferro», *Lo Senienc. Memòria, natura i llengua*. núm. 5. Centre d'Estudis Seniencs, 2008.

²⁶ Agraeixo a la família Vidal-Verge, actual propietària del terreny, que ens permetessin fer l'estudi aquí citat.

Un canal encara existent al costat de l'actual carretera portava l'aigua procedent del riu fins a la bassa. Aquest mateix canal alimentava altres molins situats al llarg del riu. La bassa es va reomplir de terra a principis del segle XX per convertir-la en horta, i posteriorment es va convertir en l'aparcament i jardí d'un restaurant que es va fer a peu de carretera. Encara se'n poden reconèixer els murs perimetrals i el que hauria estat el sobreeixidor cap al riu.

L'edifici està situat entre la bassa i el riu, a una cota d'entre 8 i 10 metres per sota la bassa i d'uns 5 metres per sobre de la llera del riu, de manera que retalla el que seria el perfil natural de la riba. El mur que hauria estat de contenció del terreny està constituït en bona part per excavació en roca natural, de manera que no va necessitar contraforts. En canvi, aigües amunt de l'edifici, on la roca natural no aflora, la riba es va organitzar en feixes per contenir el terreny i per proporcionar terreny per al cultiu de l'horta.

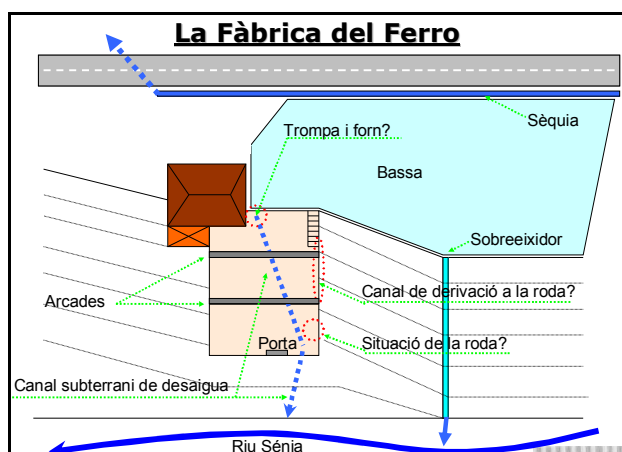


Figura 1-3. Planta esquemàtica de la fàbrica del ferro de la Sénia.



Figura 1-4. Vista de l'interior de l'edifici des de la porta d'entrada. Foto: Eva Garcia, 2008.

L'edifici, malgrat no tenir teulada, està en molt bon estat de conservació. La seva planta és gairebé quadrada, i queda dividida en tres zones per dues arcades de mig punt que abasten tota la seva amplada. Al seu capdamunt es reconeix la forma dels assentaments de les bigues de la coberta, ara desaparegudes. Les arcades estan fetes amb carreus ben escairats de pedra tosca. Per similitud de color i textura, aquesta pedra podria provenir de la mateixa excavació que es va fer en la roca natural per encabir-hi l'edifici.

Al peu del mur de contenció, i de l'extrem de la bassa, hi ha les restes de la caixa dels vents, feta de pedra i parcialment enterrada. Just a sobre, a la paret queden marques que es podrien relacionar amb els arbres de les trompes. Durant el temps en què va funcionar el restaurant, es va tancar la sortida de l'aigua de la caixa dels vents i es va reconvertir en fossa sèptica.

En el mur lateral d'aigües amunt es reconeixen els forats que haurien servit d'ancoratge de les bigues del canal que hauria portat l'aigua des de la bassa fins a la roda hidràulica del mall. En les dues arcades

s'identifica el forat per on hauria passat aquest canal. Un forat cec en el mur reforçat per un arc de mig punt serviria per encastar a la paret el suport de l'eix de la roda, anomenat calaibre en la terminologia vinculada al mall de la farga. A poca distància hi hauria el desguàs per a l'aigua de la roda, que es va obstruir amb terra i pedres en algun moment del s. XX per evitar l'entrada d'aigua i humitat.

El desguàs de la trompa i de la roda era per galeria subterrània de pedra amb volta de canó, d'uns 0,8 metres d'alt i mig metre d'ample. Passa uns dos metres per sota de la porta d'entrada, quedant uns 2 o 3 metres per sobre de la llera del riu. Aquesta diferència de cota pot semblar excessiva avui en dia, però no ho deuria ser en el moment de construcció de l'edifici, atès que cap a mitjans del s. XX es va construir una resclosa a la capçalera del riu Sénia, la del pantà d'Uldecona.

De moment no hi ha cap projecte de modificació del seu estat actual.

1.2.2 La farga d'Hostalric (la Selva)

Durant l'any 2008 he col·laborat en un treball de camp relacionat amb la farga d'Hostalric (la Selva). Es va validar la informació que es tenia sobre la localització i traçat dels túnels i galeries subterrànies que hi portaven l'aigua des de la riera d'Arbúcies, i es van fer unes xerrades divulgatives sobre la farga en general, i la d'Arbúcies en particular.

Actualment queden els contraforts i el mur de contenció de la bassa. La farga estava situada a la dreta d'aquests murs, segons es veu a la figura 1-5, a sobre de la llera del riu Tordera. A simple vista no s'identifica cap element que permeti situar l'edifici, però s'hi han trobat restes de ferro i escòries.



Figura 1-5. Murs de la bassa de la farga d'Hostalric

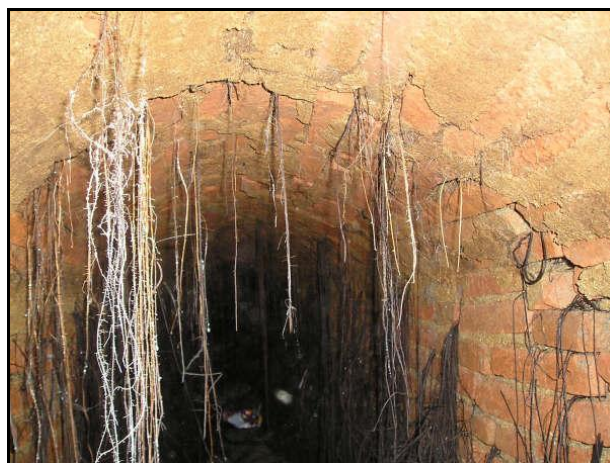


Figura 1-6. Túnel que portava l'aigua a la farga des de la riera d'Arbúcies.

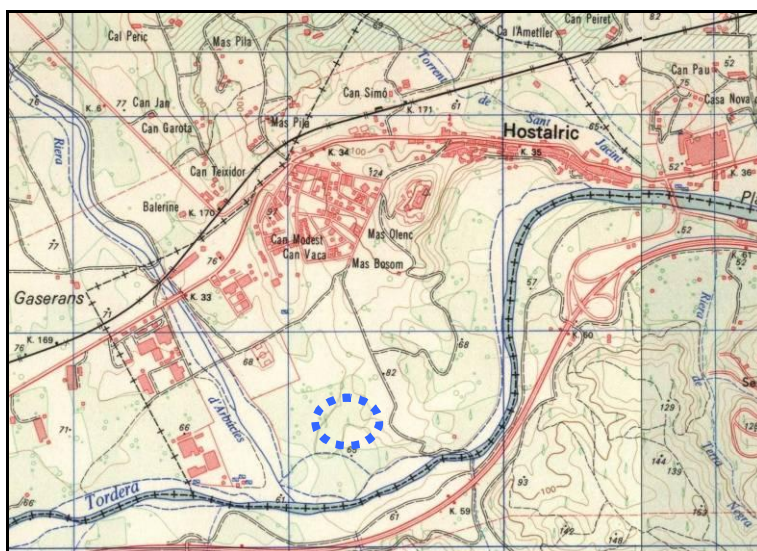


Figura 1-7. Plànol de situació de la farga d'Hostalric (dins el cercle blau).

1.3 La trompa d'aigua o trompa dels Pirineus

La trompa d'aigua o trompa dels Pirineus és una màquina hidràulica per la qual a partir d'un cabal d'aigua suficient i un desnivell d'entre cinc i dotze metres²⁷, s'obté un cabal continu i sostingut d'aire a la pressió adequada per a injectar-lo al forn, per alimentar la combustió del carbó. També s'anomena "aizearka" (caixa de vent) al País Basc i "roncadera" a Lleó. A Itàlia s'anomenà "trombe idroeoliche", a Àustria i Alemanya, "wassertrommel", i en anglès i francès, "trompe".

1.3.1 Breu història de la trompa d'aigua

Sobre l'origen de la trompa, Bruno Boni (1958) proposa que el domini romà de l'aigua, en base als aqüeductes, a les canonades de plom, a les fonts i als jocs d'aigua, hauria estat un bon fonament per a la invenció de la trompa. Cita antecedents clàssics com Plini o Vitruvi, amb aparells per bufar aire a un orgue, o Leonardo da Vinci, amb un aparell per refrescar una sala.

L'absència de la trompa en l'obra d'Agricola (*Re metalica*, 1555)²⁸, i en altres obres que tracten el tema de l'obtenció dels metalls²⁹, podria justificar que la trompa no s'hauria aplicat encara a la metal·lúrgia fins aquell moment. La primera referència explícita a les trompes usades en una forja de ferro apareix en l'obra de Della Porta de 1569³⁰, i la primera representació gràfica (veure figura 1-9) procedeix de la publicació de G. Branca (*La Machinae*, 1629), a la qual fa referència amb el nom de "machina spiritale pro folle fornacis". Amb aquests dos antecedents, Bruno Boni reivindica com a mèrit italià la introducció de la trompa a la metal·lúrgia.

A partir de la primera menció explícita de l'any 1627³¹ de "le trombe che servono in luogo delli mantexi" en un inventari d'una farga situada en el riu Orba de Ligúria (Itàlia), BELHOSTE (2001) explica que

²⁷ Piaskowsky (1995) indica que, segons uns càlculs d'Aubuisson de 1828, les trompes tenen un rendiment d'entre un 10 i un 15% per una altura mínima d'entre 3,36 i 3,76 m. Ignacio González (1992, p.98) indica que es requereix un desnivell mínim de 5 m per funcionar.

²⁸ En aquesta obra s'inclou un capítol dedicat a la ventilació de mines. Hassenfratz (1812) fa la mateixa reflexió.

²⁹ Es cita l'obra de BIRINGUCCIO, (*De la pirotechnia*, Venezia: 1540).

³⁰ Giovambattista Della Porta (1535-1615) es refereix explícitament a les forges de ferro (en llatí "ferreas fucinas") de la regió de Roma. El paràgraf en què es cita la trompa porta per títol "Quomodo aer vices follium expleat", i explica com aconseguir bufar aire a un foc a partir de deixar caure aigua dins una cavitat a través d'un embut, de manera que quedi una sortida per a l'aire i una per a l'aigua.

³¹ Aporta la referència bibliogràfica de BARALDI, CALEGARI (*La forge à la génoise comme facteur de l'écosystème des Apennins en Méditerranée septentrionale (XVe-XVIII e siècles) in congrès ripoll 1993, 1995*, nota a peu de pàgina 4): Exposa els primers antecedents sobre la trompa en metal·lúrgia: Della Porta (1589) no li posa nom però les situa en les "ferreas fucinas" en substitució de les manxes; Branca (1629) l'anomena "machina spiritale"; Fa

s'hauria difós ràpidament cap a Gènova, Còrsega i el Alps. Posteriorment arribaria a l'Arieja, Catalunya i al País Basc.

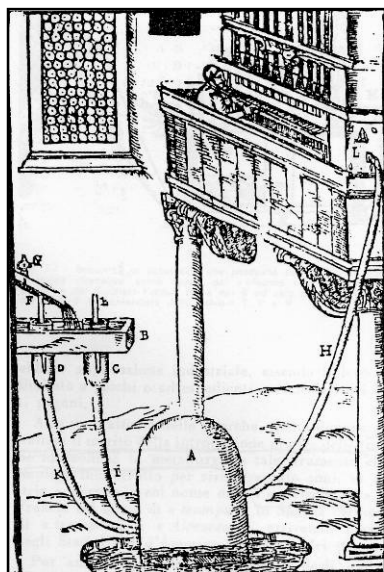


Figura 1-8. “Spiritale” de G.Branca (1629) usat pel funcionament d’un orgue.

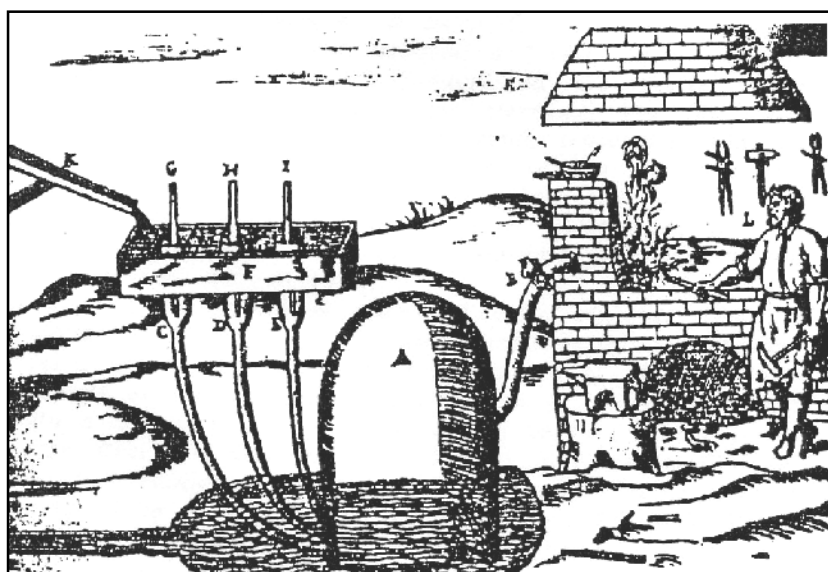


Figura 1-9. “Spiritale” de G.Branca (1629) aplicat a una forja.

El 1843, J. François afirma que la trompa procedeix de Ligúria, al nord-oest d'Itàlia, i que s'hauria inventat cap al 1640³². Segurament fan aquesta afirmació en base a Grignon (1775), que dona l'any de 1640 com a any de la invenció, a la vegada que atribueix el nom de trompa al fenomen meteorològic que es dona en el mar o a terra sota vents de direcció oposada, és a dir, les actuals mànigues. Carlos Mas aporta moltes referències al respecte i conclou que entre 1640 i 1670 la trompa seria present al Pirineu en coexistència amb el sistema de manxes³³.

Ignacio González afirma que la trompa s'hauria inventat a les muntanyes italianes cap a l'any 1500 i que hauria estat introduïda a través del Camí de Sant Jaume, a l'igual que moltes altres innovacions tecnològiques. Aporta la referència que Pablo Antonio de Rivadeneyra hauria obtingut el privilegi per beneficiar les mines de ferro sense manxes a Biscaia l'any 1633³⁴. La primera menció que s'ha trobat

també referència a la construcció el 1623 d'una farga a Maresca (Apenins italians) en què es cita “i Bottini ossiani Soffioni ad acqua” (trad.: el botí, és a dir, bufants d'aigua). Després troba una referència a una trompa en una acta de 1634 que parla d'una “ferreria a la genovese” situada a Còrsega. Finalment aporta la referència a l'inventari de 1627 de la forja del riu Orba de Ligúria, en què s'usa l'expressió “le trombe che servono in luogo delli mantexi”.

³² FRANÇOIS (1843), PERCY (1864, p 493).

³³ MAS (2000, p 77)

³⁴ GONZÁLEZ (1992, pag 97): aporta una cita del llibre de Gabriel HENAO (*Averiguaciones de las antigüedades de Cantabria*. Salamanca: Eugenio Antonio Garcia, 1689), en què es dona aquesta referència a Rivadeneyra. També

d'una trompa als Pirineus es troba a Andorra, en un contracte d'obra de la farga de Canillo del 1643³⁵. En canvi, Pere Molera situa la seva aparició a Lieja l'any 1340, i indica arriba als Pirineus 60 anys més tard³⁶.

Finalment, Belhoste cita les referències que indiquen que la trompa s'hauria utilitzat en fargues o "bloomeries" a Nova Jersey cap a finals del s. XVIII, al Brasil el 1813, i a Nova York el 1825.

1.3.2 Els elements de la trompa

La trompa d'aigua consisteix en un conducte vertical, possiblement un tronc buidat interiorment, pel qual es deixa caure l'aigua des del canal superior que l'alimenta. En general no es presenta un sol conducte, sinó dos o tres en paral·lel. A aquests conductes se'ls anomena *arbres*. A una certa distància per sota del canal, dins de cada arbre, el conducte s'estreny en l'anomenat *escanyall*, i l'aigua s'accelera. Uns forats practicats a aquella alçada, els *espiralls*, permeten l'entrada d'aire i el seu arrossegament pel doll d'aigua. La barreja d'aigua i aire recorre tota la llargada de l'arbre fins introduir-se a la *caixa dels vents*, on el cop contra una pedra o fusta perpendicular al doll, anomenada *banqueta*, facilita l'alliberament de l'aire.

La caixa dels vents té per funció separar l'aire de l'aigua. L'aigua flueix per un forat practicat sota la superfície de l'aigua per evitar que l'aire s'hi escapi. La sortida prevista per l'aire està situada a l'altre extrem de la caixa dels vents, per tal de dificultar l'arrossegament de gotes d'aigua cap al forn. L'aire surt per la part alta d'un sobresortint de la caixa dels vents, el qual rep el nom d'*home* o *centinella*. D'allí es conduït a través de diferents conductes de secció cada cop menor, fins a la *tovera* que comunica amb el forn.

La trompa és un aparell de bufar aire de concepció robusta: donat que no té parts mòbils, requereix poc manteniment i rarament era causa d'aturada del procés, en contraposició a les manxes, que requerien ajustos i reparacions amb més freqüència. Un altre avantatge de les trompes és la constància del cabal d'aire, enfront de la variabilitat pròpia del sistema alternatiu de les manxes. Això permetia obtenir una temperatura més elevada i constant en el forn, i possiblement reduir el temps de cada fargada. Alguns autors assenyalen que el consum de carbó i mineral també es veurien reduïts³⁷.

Bruno Boni cita un text de Joaquín ALMUNIA Y DE LEÓN (*Notas para una historia de la siderurgia española*, 1951), en què s'explica que el 1641 Rivadeneyra hauria portat la trompa de les muntanyes de Gènova, però que no donaven el resultat esperat, atès que es consumia més carbó per obtenir menys quantitat de ferro.

³⁵ V.V.A.A (*La farga Rossell. Un exemple de farga a la catalana*, 2004)

³⁶ MOLERA (1983). Potser es tracta d'un error d'impremta, ja que la majoria de fonts ens diuen que va ser cap al 1640, i no cap al 1340.

³⁷ CANTELAUBE (1992), segons es cita en MAS (2000, p. 75, nota a peu de pàgina 35)

Les característiques de temperatura i humitat de l'aire injectat eren diferents en un i altre cas. Pel que fa a la trompa, sembla que una temperatura de l'aire possiblement menor i un major contingut en aigua, ja sigui en forma de vapor o en forma de petites gotes, podia afavorir el procés de reducció del mineral i conferir al ferro alguna propietat diferenciadora.

D'altra banda, a les darrereries de l'estiu normalment es reduïa l'activitat a les fargues, tot aprofitant per fer tasques de manteniment. Aquesta disminució s'ha atribuït a la compaginació de l'ofici de fargaire amb les tasques del camp, però també s'apunta la possibilitat que a les èpoques de més calor l'aire de les trompes fos perjudicial per al procés.

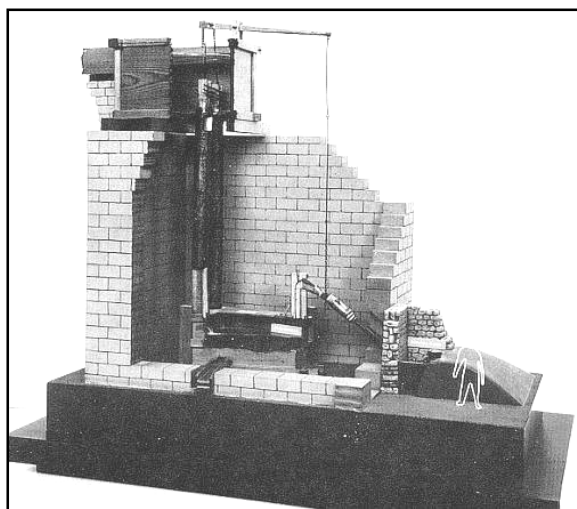


Figura 1-10. Forn català i trompa reconstruïda en el Science Museum de Londres. (*La farga*, [CR-ROM], 2000)

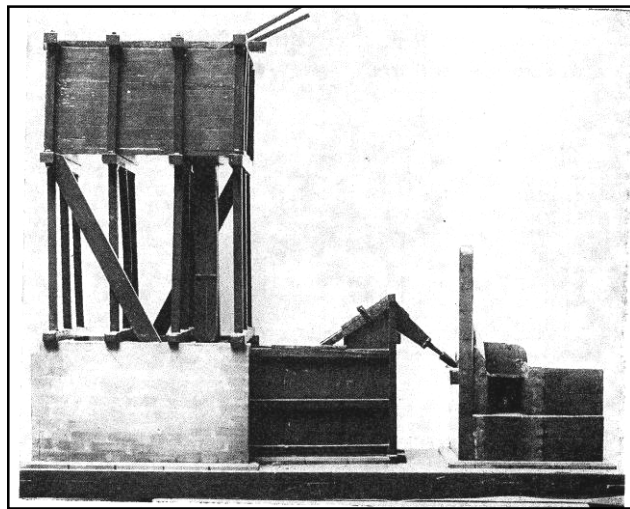


Figura 1-11. Maqueta del Musée National des Arts et Métiers de París, construïda al s. XVIII. (LAPASSAT, 1983)

L'adaptació de la trompa a les instal·lacions del Pirineu sembla que va ser ràpida, gràcies al fet que els rius tenen desnivells i cabals suficients, i també al menor cost tant d'instal·lació³⁸ com de manteniment respecte les manxes. Els inconvenients que van frenar la seva adopció en altres llocs sembla que són la seva necessitat de salts més grans que els que necessiten les rodes, i el seu major consum d'aigua³⁹.

³⁸ Segons Bruno Boni, en Marco Antonio della Fratta (*Pratica Minerale*, 1670), s'indica com un dels avantatges de la trompa el seu menor cost de fabricació, tot comparant el cost de 500 escuts per unes manxes respecte el cost de 25 escuts per unes trompes, per fer el mateix servei.

³⁹ MAS (2000, p. 78) aporta una referència bibliogràfica, BALBOA DE PAZ, J. A. (*Hierro y herrerías en el Bierzo preindustrial*, León: 1990, p.27), per la qual al Bierzo s'adoptà als anys 20 del segle XIX possiblement a causa dels incendis freqüents de què eren objecte les manxes.

Tylecote⁴⁰ indica que va existir una maqueta d'un forn i d'una trompa de la farga catalana al Science Museum de Londres. Graells (1990) coincideix en donar aquesta referència, i amplia la llista d'entitats que han tingut reproduccions del procediment siderúrgic català fins a vuit: Museu de la Ciència i de la Tècnica de Terrassa, Museu de Vilafranca de Conflent, Museu del Castell de Cotlliure, Museu de Munic, Museu d'Arts et Métiers de París⁴¹, Centre Pompidou de París i Arxiu Museu de Ripoll. En contrapartida, Simons (1967) cita en la seva *Història dels Metalls* el procediment directe de la farga catalana tot vinculant-lo a la utilització de manxes.

1.3.3 Referents contemporanis de la trompa d'aigua

Actualment existeixen diversos exemples de trompa d'aigua que han sobreviscut al pas del temps. El desenvolupament de projectes museogràfics en aquests àmbits permet veure restes restaurades o reconstruccions de trompes en diversos llocs, com ara: la farga Palau de Ripoll, la farga Rossell d'Andorra, la farga de Compludo a Ponferrada, la ferreria d'Olaberría al País Basc, la forja de Pyrène a Montgaillard (al costat de Foix), entre altres. Existeixen altres restes o testimonis de trompes en vies de desaparició, com les de la farga de Banyoles.

1.3.3.1 La farga Palau de Ripoll i la farga de Banyoles

A Catalunya han existit trompes en funcionament fins a principis del segle XX. Sembla que a principis de segle, a la farga Palau de Ripoll, que no era de ferro, sinó d'aram, es va substituir la trompa d'aigua per un ventilador⁴² degut al mal funcionament de la mateixa. Possiblement un augment en la contaminació de l'aigua va afavorir la generació d'escumes en la trompa i el desajust del seu comportament.

Sobre la farga d'aram de Banyoles, Lluís Privat (1995) ens diu que la trompa estava formada per dos arbres de secció interior quadrada de 120 mm de costat. L'escanyall estava constituït per una peça ceràmica en forma d'embut, i possiblement n'hi havia més d'una al llarg de l'arbre. La caixa dels vents, de 2,25 m³ de volum, estava feta de llosa de pedra. La profunditat de l'aigua en el canal era de 1,20 m, però just a sobre dels arbres, es feia més profund. Aquest rebaix del canal rebia el nom de botasset. Els arbres feien solament 2 m de llarg, i la banqueteta estava situada a 3,5 m per sota de la solera del canal, de manera que el salt d'aigua venia a ser de 4,70 m. El volum de la bassa exterior era de 1.260 m³.

⁴⁰ TYLECOTE (*Història de la Metal·lúrgia*, 1988, p. 87) presenta una làmina (la figura núm. 72) sota el títol «*Catalan hearth and trompe* ("Crown Copyright, Science Museum, London")».

⁴¹ LAPASSAT (1983) aporta una fotografia de la trompa en aquest museu amb el següent peu de foto: "Feu catalan pour la réduction du minerai de fer, muni d'une soufflerie à trompe d'eau. Maquette construite au XVIIIe siècle. Musée du Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris. Photo G. Lapassat", que es pot veure en la figura 1-11.

⁴² MATEU (2004)

1.3.3.2 *Les trompes d'aigua a Andorra: la farga Rossell i la farga d'Areny*

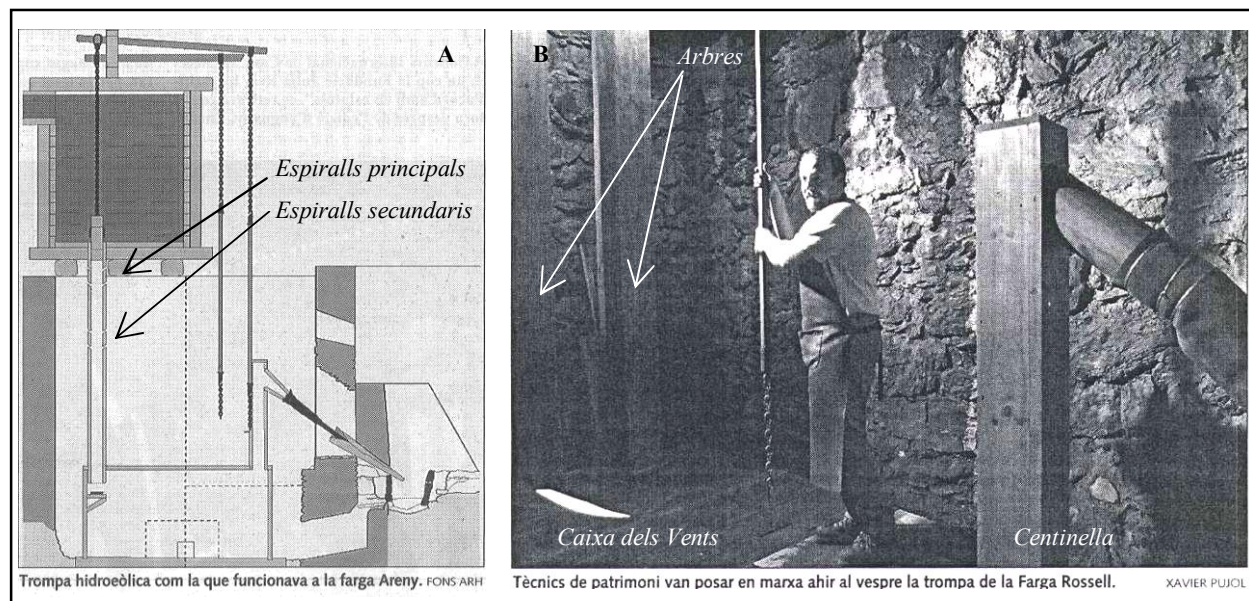


Figura 1-12. Trompes d'Andorra al mitjans de comunicació⁴³

A Andorra, a la farga Rossell d'Ordino es va posar en funcionament l'any 2003 una trompa d'aigua reconstruïda d'un tipus similar al descrit per T. Richard, malgrat que els arbres no són fets per buidat d'un tronc sinó a partir de fustes planes (veure figura 1-12, B). Segons els croquis que s'han publicat⁴⁴ d'aquesta trompa, el conducte interior dels arbres és de secció quadrada de costat 225 mm, s'introdueixen 200 mm dins de la caixa dels vents, i la separació que deixen amb la llosa de la banqueta és de 110 mm.

També a Andorra, de les excavacions de la farga Areny va sortir publicat un croquis de la trompa que hi havia hagut. Aquesta farga es va començar a construir el 1748, i va estar en actiu fins el 1877. D'aquest croquis cal destacar la presència de quatre parells d'espirlalls situats a diferents alçades, dos parells situats a l'alçada de l'escanyall, i dos parells més situats abans de la meitat de l'arbre. Aquests darrers serien els anomenats espirlalls secundaris (veure figura 1-12, A).

1.3.3.3 *Les "aizearkas" del País Basc*

Al País Basc existeix un terme propi per definir les trompes d'aigua. Són les "aizearkas". A finals del segle XVIII, la *Real Sociedad Bascongada de Amigos del País* va organitzar unes comissions per tal de

⁴³ Origen de la imatge A: REDACCIÓ, *Les excavacions a la farga Areny posen al descobert un conjunt "excepcional"*. Ordino: Diari d'Andorra, 01/05/2003, p.34.

Origen de la imatge B: LUENGO Andrés, *La Farga Rossell posa en funcionament l'única trompa hidràulica dels Pirineus*. La Massana: Diari d'Andorra, 06/06/2003, p.16.

⁴⁴ V.V.A.A. *La Farga Rossell, un exemple de farga a la catalana*. Ordino: 2004.

millorar els processos d'obtenció de ferro i van recollir dades estadístiques i qualitatives de l'estat de l'art a diferents llocs d'Europa. Com a punt de partida pretenien classificar les trompes en funció dels dos tipus definits en l'*Encyclopédie*, malgrat que les trompes que van trobar interessants tenien aspectes propis i particulars. Proposen un model de trompa en què l'escanyall té una obertura de 2/3 de la de l'arbre (67%), amb trompilles per a l'aspiració d'aire, i sovint també amb espiralls.

En les conclusions dels seus treballs quedava destacat el menor cost de manteniment de les trompes respecte les manxes, malgrat que es decantaven per les manxes pel seu menor consum d'aigua.

1.3.4 Descripció de la trompa de referència, segons T. Richard

La font utilitzada com a referent, pel seu detall i exhaustivitat és la descripció que en fa T. Richard, enginyer de fargues i alts forns, el 1838. Entre 1832 i 1836 es va encarregar dels assaigs de perfeccionament de les fargues del departament de l'Arieja. A continuació es presenta un resum de la descripció que fa de la trompa de Montgaillard, poble a pocs kilòmetres de Foix (França). (fig. 1-13)

En general, la trompa es compon de:

1. Una bassa superior mantinguda constantment plena, la *peixera* o *peixeró* (fr. "peicherou").
2. Un, dos o tres arbres verticals buidats interiorment amb una secció normalment quadrada.
3. Una caixa hermèticament tancada, la caixa dels vents.
4. Un tub vertical sobresortint anomenat *home* o *centinella* per on surt l'aire a pressió, situat allunyat de la caiguda de l'aigua per evitar l'arrossegament de gotes d'aigua.
5. Un bec, allargat mitjançant un tub de pell de be, que rep el nom de *burro* o *buirac*, adaptat a un tub de ferro, anomenat *busca* o *canó del buirac*, que condueix l'aire fins a la tovera que a la vegada comunica amb l'interior del forn.
6. Un conducte de sortida de l'aigua de la caixa dels vents.

Pel cas descrit, la bassa d'alimentació es manté a una cota d'aigua de 1,5 m per sobre de la solera, que representa uns 2 m per sobre dels espiralls.

Els arbres són troncs que s'han tallat i buidat longitudinalment. Les dues meitats es mantenen fortament unides mitjançant virolles de ferro, i les seves juntes es calafaten per aconseguir l'estanquitat necessària. Generalment, la secció interior resultant és quadrada, i en aquest cas té 190 mm de costat. La secció quadrada s'adopta tant per la facilitat que representa a l'hora de fer el buidat amb l'aixa, com per evitar la rotació del fluid en caure pel seu interior com a manifestació de l'acceleració de Coriolis, fet que

facilitaria la formació de xuclets, per on es podria escapar l'aire de la caixa dels vents. La seva llargada és d'uns 7,3 m, de manera que el salt total d'aigua és d'uns 9 m.

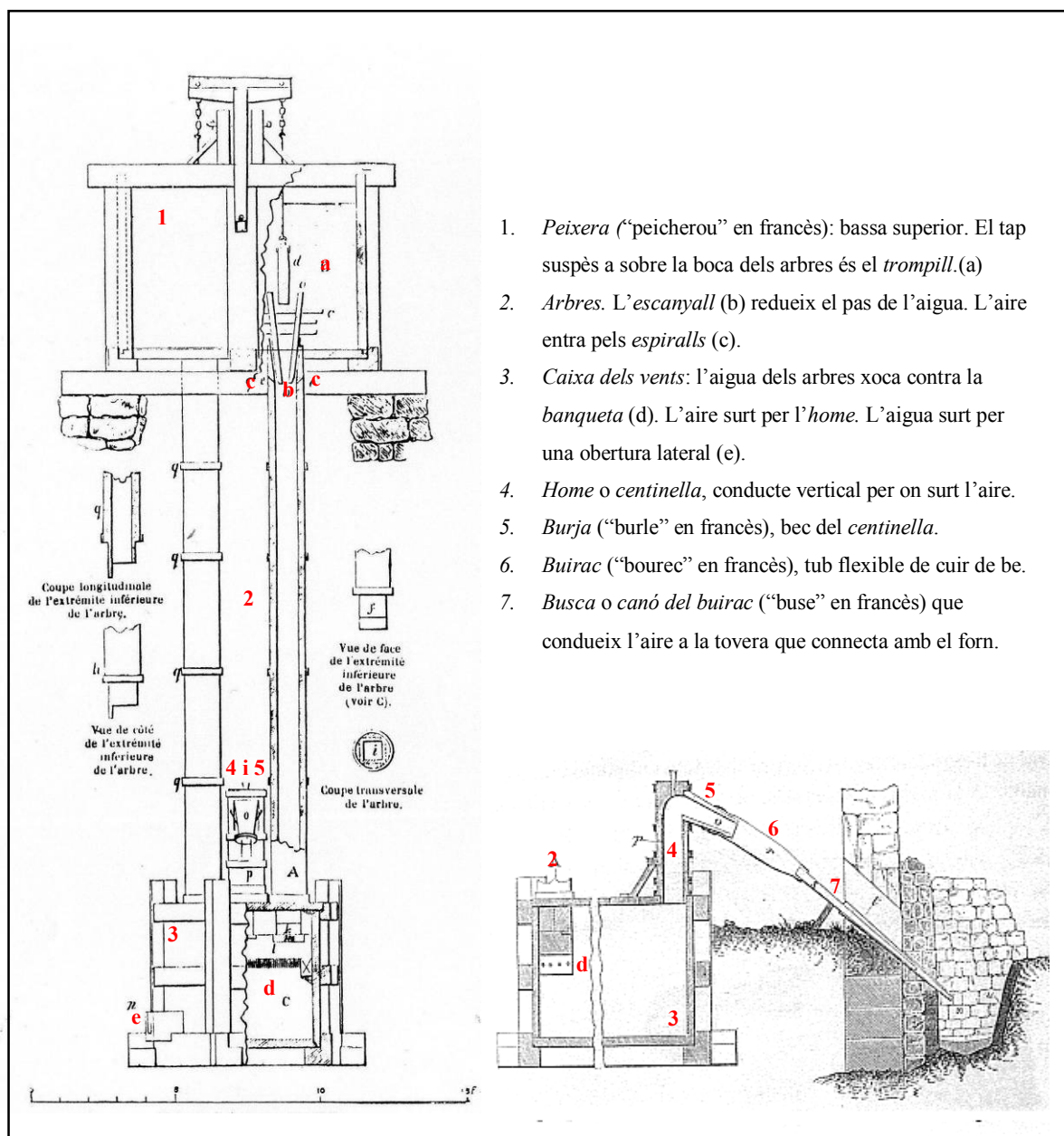


Figura 1-13. Alçat de la trompa d'aigua de Montgaillard, de T. RICHARD (1838).⁴⁵

L'aigua que cau pels arbres es pot bloquejar i regular mitjançant un tap que s'ajusta a les parets d'un embut existent a l'embotadura dels arbres. Aquests taps s'anomenen *trompills*⁴⁶. Estan suspesos d'una

⁴⁵ Figura extreta de TOMÁS (1999)

⁴⁶ T. Richard (1838) els anomena, en francès, "cors" o simplement "coins" (traduït per "tascons"). En alguns documents s'anomenen *trompilles* als cons d'entrada d'aire que estan col·locats a l'embotadura dels arbres en substitució dels espiralls, tal com es mostra en la fig. (1-26) de la trompa del País de Foix de l'Encyclopédie. També anomenen *trompils* o *trompills* als conductes o embuts que s'acoplen exteriorment als espiralls, potser per evitar o

cadena que es pot controlar des del costat del gresol, per tal de poder regular el buf de la màquina des d'allí.

A l'embocadura dels arbres hi ha unes planxes obliqües encaixades a la cavitat quadrada dels arbres, a mode d'embut. Aquestes planxes estan fortament fixades per unes varetes distanciadores. El punt més estret de l'embut s'anomena *escanyall*, de manera que el pas per a l'aigua queda reduït a una secció rectangular de costats 60,9 mm i 190 mm. Unes falques allargades de fusta ajustades amb una maça permeten fixar i regular finament l'obertura de l'*escanyall*.

A 0,36 m de la part superior de l'arbre existeix un altre escanyament, a la base del qual existeixen dos forats rectangulars anomenats *espiralls* per on entra l'aire. Els espiralls tenen una inclinació de 40° a 50° respecte de l'horitzontal i una secció de 80 mm per 50 mm (horitzontal per vertical). En una zona intermèdia dels arbres, a 2,10 m per sota, existeixen uns altres forats quadrats o *espiralls secundaris* de 40 mm de costat pels quals sovint hi surt aigua i sempre de manera intermitent. El paper d'aquests espiralls secundaris és qüestionat per T. Richard i arriba a la conclusió que es poden tapar sense afectar al correcte funcionament de la trompa, malgrat que moltes en disposen. Les proves que s'han fet al laboratori indicarien que afavoreix l'augment del cabal d'aire, malgrat que es perdi una petita quantitat d'aigua.

L'aigua barrejada amb aire cau per l'interior dels arbres fins a la *caixa dels vents*, caixa trapezoïdal amb unes dimensions d'uns 3,30 m de llarg, 1,5 m d'ample a la part de les trompes, i 1 m d'ample a la part del centinella, i 1,30 m d'alçada. Té la funció de facilitar la separació de l'aigua i de l'aire per tal que aquest darrer no s'escapi de la caixa arrossegat per l'aigua. La sortida de l'aigua consisteix en una obertura en la part inferior d'un dels laterals de la caixa dels vents, sovint situada a sota de la banqueta, per obligar a l'aigua a fer un recorregut més llarg i millorar la separació de l'aire a dins la caixa dels vents.

Els arbres s'encasten a la caixa dels vents una longitud de 135 mm. Aquest espai que queda entre la boca dels arbres i el sostre de la caixa constitueix una reserva d'aire que pretén facilitar la decantació de les gotes d'aigua per no ser arrossegades per l'aire. Richard dibuixa detalladament la forma com acaben els arbres a dins de la caixa dels vents, ja que els fusters donaven molta importància a aquest aspecte (figura 1-13). A uns 112 mm per sota de la sortida dels arbres, existeix una pedra o planxa de fosa, recolzada sobre una fusta plana, anomenada *banqueta*, contra la qual xoca l'aigua. La pedra o planxa de fosa que rep el doll d'aigua evita el desgast de la fusta. Unes fustes verticals col·locades obliquament als dos

reduir la sortida d'aigua quan es produeixen retorns o refluxos, com en la figura 1-23. Potser l'adopció del nom trompill per al tap prové d'un error d'interpretació.

costats de cada doll recolzen el pes de cada arbre sobre la banqueta i dirigeixen l'aigua cap a l'interior de la caixa dels vents. Aquestes fustes s'anomenen *contravents*⁴⁷.

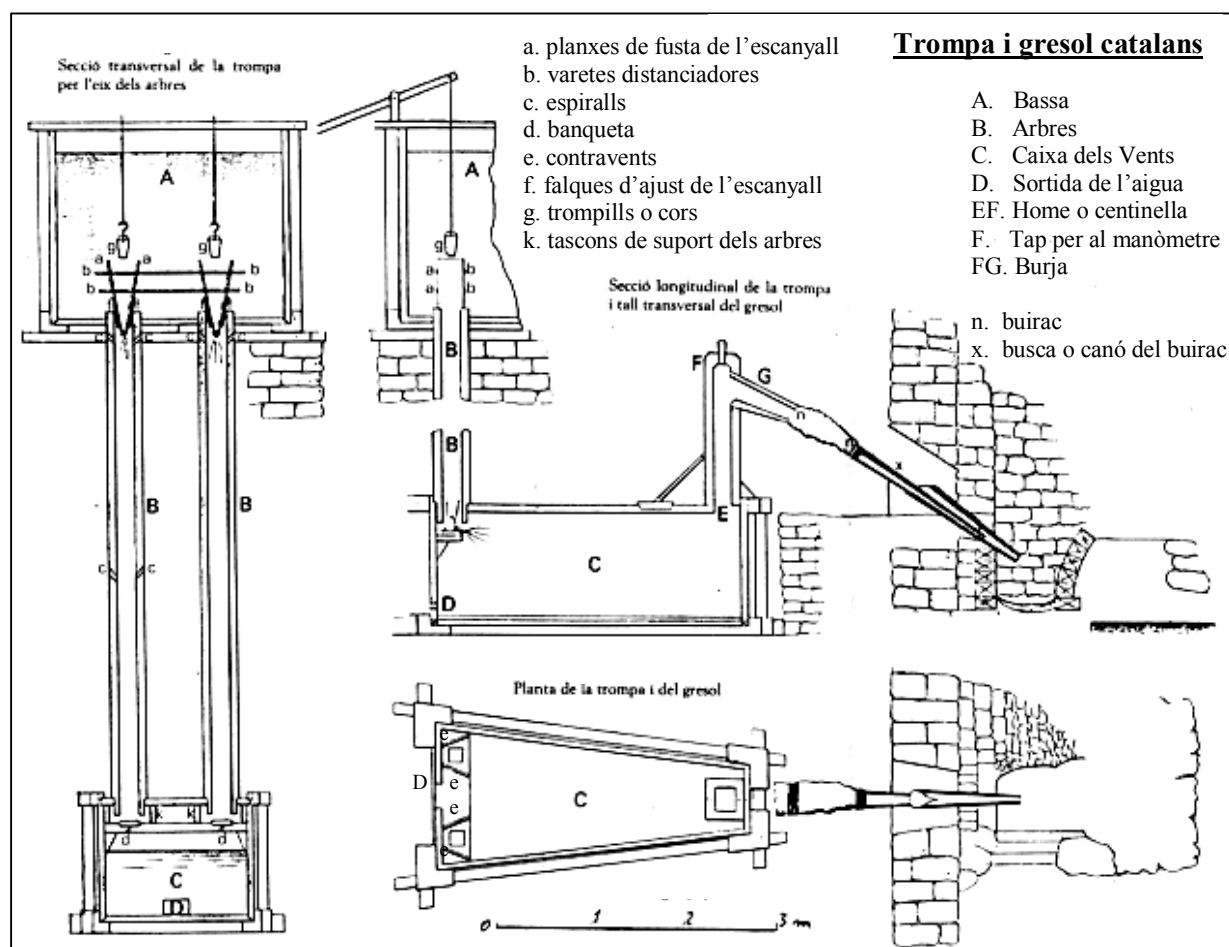


Figura 1-14. Plànols d'una trompa d'aigua, segons J. FRANÇOIS (1843).⁴⁸

L'aire s'acumula en la *caixa dels vents* i surt per l'altre extrem de la caixa, per una part més elevada anomenada *centinella* o *home*. En aquest cas té una secció interior quadrada de 0,26 m de costat, i una alçada de més d'un metre. Té aquesta alçada per tal que les gotes d'aigua no siguin arrossegades per l'aire, i els esquitxos regalimin cap avall. Al seu capdamunt hi ha un petit forat on es posava un manòmetre de columna de mercuri i tub de vidre, anomenat *pesavent* en aquella època. Es tractava d'un instrument delicat, i el mercuri era considerat un metall preciós. Per aquests motius, s'enretirava després d'ajustar la trompa i s'hi posava un tap en el seu lloc.

⁴⁷ Una de les funcions de la banqueta és la de retenir la columna d'aire i aigua a dins de l'arbre per evitar que l'aire de la caixa dels vents rebuï cap a l'arbre. La banqueta també evita que el doll caigui directament sobre l'aigua, fet que tornaria a arrossegar aire cap a la massa d'aigua de la caixa dels vents. Els contravents, que tenen forma de tovera divergent, afavoreixen que la velocitat del doll disminueixi i que augmenti la seva pressió a l'entrada a la caixa dels vents.

⁴⁸ Traducció de Ricard Bosch, extret de *La Farga*, ([CD-ROM], 2000)

A partir d'aquí, un seguit de conductes anomenats la *burja*, el *buirac* o *burro* i la *busca* o *canó del buirac*, condueixen l'aire fins a la tovera i fins al gresol. Aquests conductes havien de ser prou curts per tal d'evitar al màxim les pèrdues per fregament, però prou llarg com per allunyar el gresol de la zona humida en què se situen els arbres i la caixa dels vents.

La *burja* és el bec del *centinella* on es fixa la conducció flexible següent. En francès s'anomena "burle". El traductor⁴⁹ indica que s'ha adoptat el nom de *burja* per la semblança de forma amb l'estri d'arrencar el suro de l'alzina surera. El forat que l'uneix a l'home és de secció rectangular de costats 0,18 m i 0,20 m. El forat de l'altre extrem que comunica amb el buirac és circular de 37 mm de diàmetre.

El *buirac* és una mànega de cuir de be, flexible, necessària per poder acostar i enretirar la busca de la tovera. El *buirac* s'infla amb la pressió de l'aire de manera que és difícil aconseguir l'estanquitat en ambdós extrems. Cal un lligat fort i curós per mantenir-lo unit a la *burja* i a la *busca*. Els autors francesos l'anomenen "bourec". A la farga Rossell d'Andorra l'anomenen "bourrec". Segons el traductor, s'ha adoptat el nom de *buirac*, per la semblança que té amb el carcaix de dur les fletxes. Altres autors catalans també l'han anomenat "burro"⁵⁰.

La *busca* o *canó del buirac* és un tub metàl·lic de forma cònica que encaixa dins la tovera. En francès es coneix com "buse", o "buze" antigament. Té 1,61 m de llargada amb un forat de sortida d'uns 35 mm de diàmetre. Aquest es pot introduir més o menys a la *tovera*, que és una mena de cucurull o con aixafat d'aram vermell, d'obertura en forma d'el·lipse d'eixos 130 mm el vertical per 230 mm l'horitzontal. Desemboca dins el gresol amb una secció rectangular força irregular, d'entre 30 i 45 mm de costats. L'extrem d'aquest element es va consumint degut a la proximitat amb el foc, de manera que cal canviar-lo o reparar-lo sovint.

El buirac ha de ser flexible i tenir la longitud suficient per poder enretirar el canó del buirac de la tovera. Un motiu és el de tenir la possibilitat d'acostar o allunyar la busca del gresol, segons l'evolució del foc. Un altre motiu és el de poder fer el manteniment o la substitució del mateix canó, que es podia deformar al llarg de les fargades, o anar consumint. Igualment, quan es canviava la tovera es requeria l'espai immediat entre el mur i la caixa dels vents. Finalment, la trompa sempre bufava una certa quantitat d'aire, degut a la poca estanquitat dels trompills. La manera d'evitar aquest vent residual era enretirar la busca de la tovera.

⁴⁹ BOSCH, R. («Apartat 6.2 Infraestructures hidràuliques», a: *La Farga Catalana*, CD-ROM, 2000).

⁵⁰ MOLERA, P. («Apartat 2.1 Estructura de la farga », a: *La Farga Catalana*, CD-ROM, 2000).

La caixa dels vents tenia una obertura per entrar-hi a fer el manteniment. Aquesta forat estava situat al costat de l'home, i normalment estava obstruït amb una tapa fortament bloquejada per un puntal recolzat obliquament a l'home. Aquest forat solia ser el més petit possible mentre hi pogués entrar el fuster o l'aprenent, per tal d'evitar que altres persones poguessin prendre-li l'exclusivitat del manteniment de la trompa, és a dir, per reduir la competència⁵¹.

Un dels ajustos importants consistia en fixar l'alçada de la banqueta respecte la terminació dels arbres a l'interior de la caixa dels vents. Es feia mil·límetre a mil·límetre en funció de la pressió que indicava el manòmetre, per tal que aquesta fos màxima. A més, la banqueta no havia de quedar inundada per l'aigua, ja que perdia totalment la seva eficàcia, l'aigua arrossegava molt més aire cap a l'exterior i es perdia bufera.

Era important mantenir el nivell de l'aigua a l'interior de la caixa dels vents, per sobre de l'obertura de sortida, per evitar la fuga d'aire. Segons Richard, els fusters tenien moltes dificultats per determinar la secció adequada de la sortida de l'aigua, de manera que sovint es col·locava una comporta corredissa per poder-la modificar. Per a les tines, Richard accepta que era molt més difícil mantenir el nivell de l'aigua, i per això es solia disposar un sífó extern amb sobreeixidor regulable que deixava sempre inundada la sortida, i que a la vegada, permetia modificar el nivell de l'aigua dins la tina. Si aquest sífó no es feia servir amb les caixes trapezoïdals, l'ajust de la secció de la sortida deuria resultar suficient⁵².

Un altre aspecte que calia regular eren les dimensions de l'*escanyall*, per ajust de les planxes de l'embocadura dels arbres. Un cop fixat en una posició, la regulació del cabal es feia per obstrucció del pas de l'aigua amb el trompill. Aquesta era la manera d'ajustar el cabal d'aire que arribava al forn en cada una de les etapes de la fargada: un vent fluix al principi, mitjà cap a la meitat del procés, i fort cap al final. A més, el fargaire podia necessitar un "cop de vent" en algun moment del procés.

La pressió obtinguda es mesura en graus, cadascun dels quals equival a 4,51 mm de Hg (601 Pa). La pressió de treball màxima habitual era de 18°, que són 81,2 mm de Hg (10,82 kPa).

Per aquesta trompa, el cabal d'aigua necessari per a donar la màxima pressió d'aire és de 0,153 m³/s d'aigua, per dos arbres que té, és a dir 0,0765 m³/s per cada arbre. El salt d'aigua d'aquesta trompa és d'uns 9 m entre la superfície lliure del canal i la cota de la banqueta on xoca el flux. Sota aquestes condicions de funcionament i per una temperatura i pressió ambientals de 20°C i 760 mm de Hg, s'obté

⁵¹ RICHARD, T.(1838)

⁵² MUTHUON (1802): es descriuen les fargues de Guipúscoa tot dient que usen indistintament manxes i trompes, però de les trompes diu que necessiten un home que vagi regulant contínuament l'alçada de l'aigua dins la tina.

un cabal d'aire de 8,9 kg/min (0,1783 kg/s), de densitat 1,309 kg/m³, que representa un volum de 6,8 m³/min d'aire (0,113 m³/s). El rendiment, entès com la relació entre la potència pneumàtica de l'aire i la potència hidràulica de l'aigua, varia entre el 8% i el 15% segons el punt de treball.

1.3.5 La tina o trompa de tina

T. Richard (1838) descriu breument la *tina* com una màquina que solament difereix de la trompa en la forma de la caixa dels vents. En lloc de ser trapezoïdal, consisteix en una mena de tona o bóta col·locada vertical, a la qual s'encasten els arbres i de la qual sobresurt l'home o centinella.

Degut al menor volum interior de la tina respecte les caixes de vents trapezoïdals, sembla que es feia més difícil regular el nivell de l'aigua del seu interior. Per això, normalment es disposava un sifó a la sortida de l'aigua amb un vessador regulable en alçada.

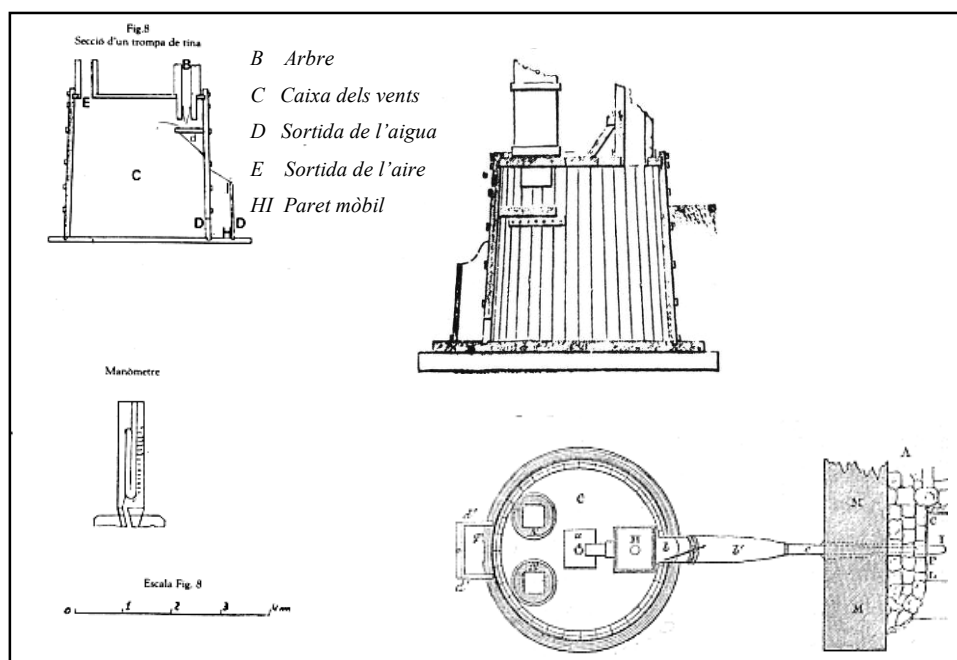


Figura 1-15. Tina de J. FRANÇOIS (1843) a l'esquerra, i de T. RICHARD (1838) a la dreta, i pesavents.

Les dimensions característiques de la tina descrita per Richard són molt similars a la de la trompa de Montgaillard: arbres de 5 m de longitud, amb una secció interior quadrada de 207 mm de costat, escanyall rectangular d'obertura igual al 31% de la secció de l'arbre, i espiralls de secció equivalent al 31% de la secció de l'arbre. En canvi, la càrrega d'aigua sobre l'escanyall és de 0,9 m, i la separació entre la desembocadura dels arbres i la banqueta és superior, de 180 mm.

J.François, cinc anys més tard, també a l'Arieja, explica que les trompes trapezoïdals, que qualifica d'antigues, són menys utilitzades que les tines. Ho justifica dient que són més fàcils de construir i que poden funcionar amb un salt d'aigua menor. Tenen l'inconvenient que l'aire arrossega més quantitat d'aigua en estat líquid. Proposa una sèrie de modificacions per evitar aquest fenomen, com l'augment de la secció transversal de l'home, o la interposició d'elements separadors de les gotes.

1.4 Les fonts històriques: la trompa d'aigua al llarg del temps

No existeix un únic model de trompa. Al llarg del temps diferents autors van descriure amb major o menor detall diversos tipus de trompes. Normalment s'havien classificat en funció del seu origen geogràfic. Sovint les diferències són simples variacions morfològiques d'un mateix model, mentre que en altres casos canvien els principis funcionals, com ara el mecanisme d'arrossegament de l'aire per part de l'aigua, la manera d'aconseguir major pressió, o la manera de separar l'aire de l'aigua.

Jean-François Belhoste (2001) recopila les fonts que parlen dels inicis a Ligúria de la trompa d'aigua en metal·lúrgia, i de la seva ràpida difusió, de manera que allà on s'implantava constituïa un nou tipus de farga, com ara la farga a la Genovesa⁵³. Explica que existeixen diferències notables entre les trompes construïdes als Alps, als Pirineus o a Còrsega⁵⁴, en funció dels materials usats, de la presència de peixeró o no, del nombre i alçada dels arbres, de la disposició i nombre dels espiralls o de "trompilles", del tipus d'escanyall o del tipus de caixa dels vents. Atribueix aquestes diferències a les particularitats topogràfiques, al tipus de procés metal·lúrgic, i sobretot, a la perícia dels fusters i dels fargaires.

A través de diferents fonts bibliogràfiques, Belhoste elabora un possible fil històric d'evolució tecnològica. Les més primitives serien les de Còrsega o Gènova, caracteritzades per l'absència de bassa superior o espiralls. L'aire seria simplement arrossegat per la caiguda lliure de l'aigua dins un embut situat a l'entrada de la caixa dels vents. La incorporació d'una bassa per carregar l'entrada dels arbres seria una innovació del segle XVIII atribuïda als fargaires dels Pirineus. Finalment, durant el s. XIX s'hauria immergit la caixa dels vents dins d'una bassa per tal d'aconseguir augmentar la pressió⁵⁵.

⁵³ Per la "forge à la génoise" aporta la referència MATTIOLI («*Les forges à bas foyers de Corse: permanence d'une technologie (1550-1830-40)*»), a: *Dal basso fuoco all'alto forno. Actas del 1º Simposio. Valle Camonica, 1988, Sibrium*. Brescia: Editions Grafo, vol. 20, 1989, p. 255)

⁵⁴ Belhoste aporta fonts que indiquen que a Còrsega les trompes tindrien un sol arbre, als Pirineus en tindrien normalment dos, i als Alps, tres, però l'arbre Cors seria d'uns 10m, el Pirinenc d'uns 8 m i l'Alpi, més curt. Segons MUTHUON (1808) a Còrsega les caixes de vents es farien d'obra de maçoneria, sense bassa superior i amb l'aportació de l'aigua a l'arbre pel seu lateral. Segons GRIGNON (1778, p 198), les caixes dels vents als Pirineus serien de pedra en lloc de ser de fusta com les de Foix. AUBUISSON (1828) dóna cita d'una trompa de Còrsega amb la caixa dels vents feta d'obra de maçoneria, l'arbre de 7m d'alçada i diàmetre interior de 300 mm, amb l'entrada d'aigua pel lateral com en les trompes dels Alps.

⁵⁵ Belhoste no justifica aquesta innovació, però Jules François (1843), proposa com a millora que s'abaixi la caixa de vents fins quedar per sota del nivell de desguàs, malgrat que no diu haver-ho implementat o haver-ho vist. Especifica que aquesta proposta estaria d'acord amb una semblant feta per Tardy i Thibaud (1823), els quals identifiquen aquesta disposició en la trompa de Vicdessos amb la qual experimenten i citen haver-ho vist anteriorment als Alps. Aubuisson (1828) ja en descriu una amb aquesta disposició. Flachet (1846) diu que van millor. Richard (1838) no en diu res.

1.4.1 Singularitats de la trompa de Giovanni Branca (1629)

La trompa de Giovanni Branca (1629) mereix un comentari a part. Malgrat tractar-se de la primera referència a una trompa d'aigua aplicada a la metal·lúrgia (figures 1-8 i 1-9), no segueix el fil històric descrit anteriorment. Més aviat s'hauria d'identificar amb les trompes pròpies del s. XIX, trompes del tipus més evolucionat.

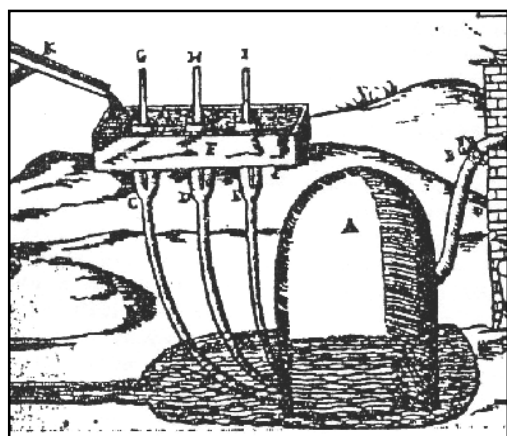


Figura 1-16. “Spiritale” de G.Branca (1629) aplicat a una forja.

Segons es pot observar en la figura 1-16, l'aigua arribaria per una canal (K) fins a una caixa (F) que la reparteix entre tres conductes verticals. L'aire entraria pels tubs (G, H, I) fins a l'escanyall (C, D, E), on seria arrossegat per l'aigua fins a la caixa dels vents (A). Allí se separaria de l'aigua anant a parar a la part superior de la mateixa i aniria per un conducte fins al forn, mentre que l'aigua podria sortir per la part inferior, per sota la superfície de l'aigua d'una bassa feta al terra, des d'on s'evacuaria per un desguàs.

Els tubs d'entrada de l'aire (G, H, I) fan el paper de les “trompilles”, atès que contribueixen a formar l'escanyall a la part inferior d'un embut (C, D, E) i aporten l'aire als mateixos. No es tracta doncs d'una trompa en què l'aire és arrossegat per la caiguda lliure de l'aigua des d'una certa alçada, ni pel gir en remolí de l'aigua en caure per l'embut, sinó per la depressió que es genera pel pas de l'aigua per un escanyall. A més, l'aigua omple la caixa (F), de manera que l'escanyall té sempre una certa càrrega d'aigua al seu damunt.

També és singular que no tingui banqueteta i que l'entrada a la caixa dels vents sigui horitzontal i per sota de la superfície lliure de l'aigua. Una cosa va relacionada amb l'altra. En aquesta disposició, la banqueteta és innecessària. D'una banda, amb l'entrada inundada, l'aire de la caixa dels vents no retornarà cap als arbres. D'altra banda, com que el doll dels arbres no xoca amb la superfície de l'aigua dins de la caixa dels vents, no torna a arrossegat bombolles cap a l'interior de l'aigua.

El fet que l'entrada de l'aigua sigui en horitzontal suprimeix la component vertical de la velocitat i afavoreix una evacuació més ràpida de l'aire cap a la part superior de la caixa dels vents. A més, la il·lustració representa una caixa dels vents amb unes dimensions molt superiors a la secció dels tubs, de manera que la velocitat de l'aigua dins la caixa seria molt baixa i no faria falta banqueteta per afavorir la separació de les bombolles d'aire.

Finalment, es representa la caixa dels vents sense fons i immersida en una bassa d'aigua. Sembla versemblant que la il·lustració representés la superfície de l'aigua a l'interior de la caixa dels vents una mica per sota de la línia d'aigua de la bassa exterior amb la intenció de representar l'efecte de la major pressió de l'aire de l'interior

És singular poder reconèixer les innovacions pròpies de les trompes més eficients de finals del s. XIX en un gravat del s. XVII, situat temporalment molt a prop del moment considerat d'invenció de la trompa.

1.4.2 Trompes sense espiralls

Hassenfratz (1812) indica l'existència de quatre tipus de trompes: la primera explicada pel pare Schotte⁵⁶ a la seva obra "*Hydraulique*", en què a partir d'un corrent d'aigua poc inclinat s'insuflava aire a un orgue; la segona seria la descrita per Mariotte, en què l'aigua arrossega aire en la seva caiguda lliure, per entrar posteriorment a la caixa de vents a través d'un embut; la tercera seria la dels Alps, amb tina, arbre circular, escanyall i espiralls (com la del Delfinat de l'*Encyclopédie*); i la quarta seria la dels Pirineus, amb l'arbre quadrat, la caixa dels vents trapezoïdal i les trompilles per a l'aspiració d'aire (com la del País de Foix de l'*Encyclopédie*).

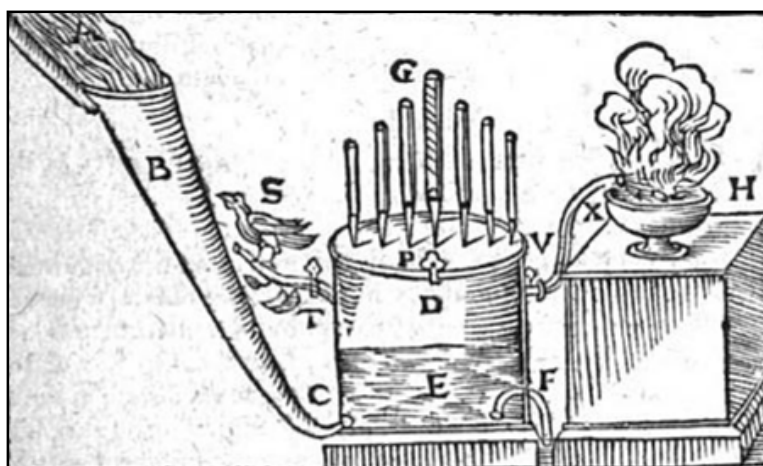


Figura 1-17. Trompa de Kircher (1641), que seria del tipus descrit pel pare Schotte.

Kircher (*Magnes sive de Arte magnetica*, 1641), representa una trompa que alimenta un orgue i que parteix d'un corrent d'aigua lleugerament inclinat, com descriu Hassenfratz (1812) per la trompa del pare

⁵⁶ Possiblement es refereix a Gasparis Schottis (1608-1666). SCHOTTI (1657) inclou dibuixos i explicacions de KIRCHER (1641, 1678)

Schotte. S'explica que com més llarg és el canal piramidal de l'entrada, més aire s'arrossega. A més, es cita que també es fa servir en forges (en llatí, "Vulcani"). (veure figura 1-17)

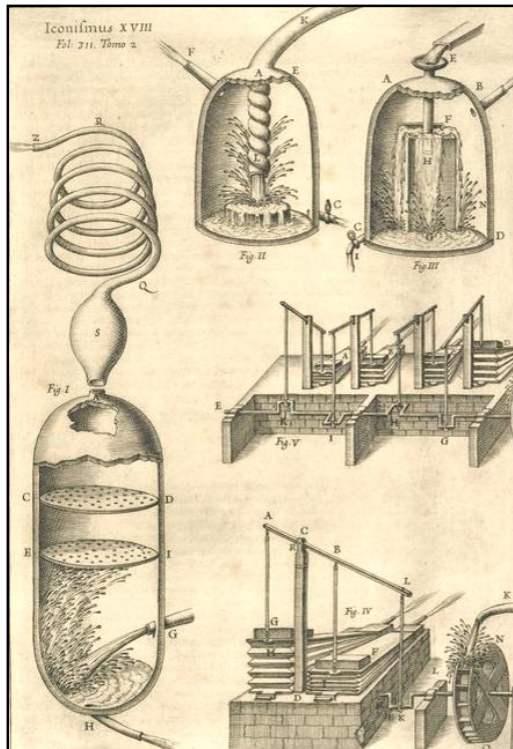


Figura 1-18. Trompes de Kircher (1650).

La segona trompa (centre de la part superior de la figura 1-18) intenta representar la importància que l'aigua entri a la caixa de vents formant un remolí, per arrossegar l'aire, mecanisme que coincideix amb la trompa descrita per Bélidor, explicada més endavant.

Uns anys més tard, en una altra obra publicada per Kircher el 1650 titulada "Musurgia universalis sive Ars magna consoni et dissoni", aporta diverses figures sobre trompes utilitzades per donar aire a un orgue, a la vegada que cita que s'utilitzen en fàbriques de ferro (llatí "organa hydraulica animet, fabris ferrariis"). Aquestes figures són reproduïdes gairebé idèntiques per Gasparis Schotti (1657).

Les trompes de la figura 1-18 tenen singularitats prou importants com per fer-ne el comentari. La primera trompa servia per alimentar un orgue, i es disposen a dins de la caixa de vents un seguit de separadors foradats per evitar que les gotes d'aigua siguin arrossegades cap a l'orgue. No queda representat el mecanisme d'arrossegament de l'aire.

La tercera trompa (part superior dreta de la figura 1-18) intenta representar l'arrossegament de l'aire per la caiguda d'un doll d'aigua sobre l'embut d'entrada a la caixa de vents, mecanisme que coincideix amb la trompa descrita per Mariotte, explicada més endavant.

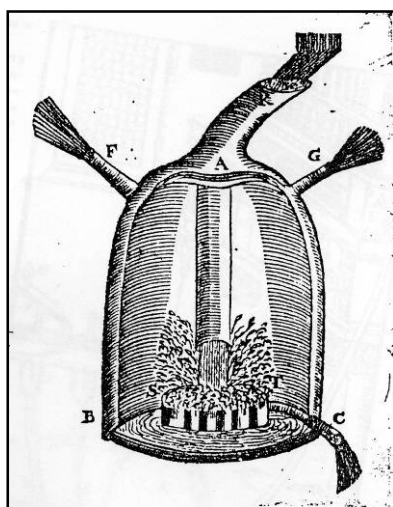


Figura 1-19. Trompa de Kircher (1664) per ventilar una mina (extret de: BONI, 1958)

Finalment, en Kircher (1664) apareix una trompa utilitzada per ventilar una mina similar a les anteriors excepte per mecanisme que utilitza per arrossegar l'aire. En aquest cas l'aigua entra a la caixa dels vents per un canal inclinat i en forma d'embut, del mateix estil que el dibuixat en Kircher (1641) de la figura anterior 1-17. (veure fig. 1-19)

Mariotte (1685) intenta explicar el fenomen meteorològic pel qual la pluja en caure pot generar vent tot explicant la trompa que s'utilitza per “fer fondre la mena de ferro en el forn”. Descriu aquesta trompa com si l'aigua tingués una caiguda lliure d'entre 5 i 10 m abans d'anar a parar a l'embut de la part superior de l'arbre. La longitud de l'arbre seria d'uns 5 m. La caixa dels vents seria de tina.

A la mateixa època apareix al “*Journals des Savants del 5 avril de 1666*” la descripció d'una trompa en una forja de coure a Tívoli, al costat de Roma, per la qual l'aigua d'un canal cauria des d'una certa alçada dins un embut arrossegant aire fins una caixa dels vents. L'aire seria conduït fins al forn i l'aigua sortiria per una obertura situada sota terra. La figura que s'inclou no és massa afortunada, ja que no dibuixa la caixa de vents, però permet entreveure que es tracta d'una trompa sense espiralls del tipus descrit per Mariotte. (veure fig. 1-20)

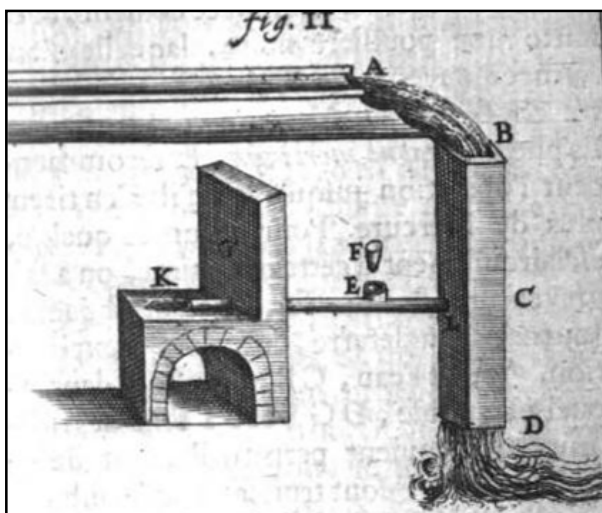


Figura 1-20. Trompa descrita en el *Journal de Scavans el 1666*

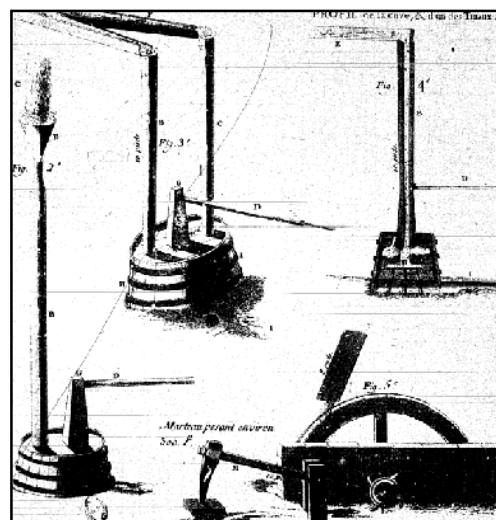


Figura 1-21. Trompa de Mariotte (2) i de l'Isera (3 i 4), segons BÉLIDOR (1739)

BÉLIDOR (1739) cita conèixer una trompa en ús del tipus descrit per Mariotte, en una forja a la muntanya de “Tiburtine” al costat de Roma, que correspon a l'actual Tívoli. Però en descriu una altra utilitzada a la vall de l'Isera⁵⁷, al costat de Grenoble, en què l'aigua no cau des d'una certa alçada sobre un embut, sinó que es porta amb un canal fins a la boca de l'arbre i s'hi deixa caure, sense espiralls ni escanyall. Béliador acompanya les explicacions amb unes figures on representa els dos tipus de trompes (veure fig. 1-21)

⁵⁷ BARTHÉS (1760) mostra exactament la mateixa trompa sense espiralls ni trompilles per unes fargues de la vall de l'Isera, tot explicant que cal que l'aigua faci un remolí en caure per l'arbre (trompa central de la figura 1-22). També inclou una còpia de la trompa de la figura 1-20, del *Journal de Scavans* de 1666.

Hassenfratz (1800) presenta unes figures de la trompa de Mariotte, sense indicació del mode en què l'aigua hi arriba, i de la de Bélidor, amb un canal de vessat sobre l'embut. (figura 1-22)

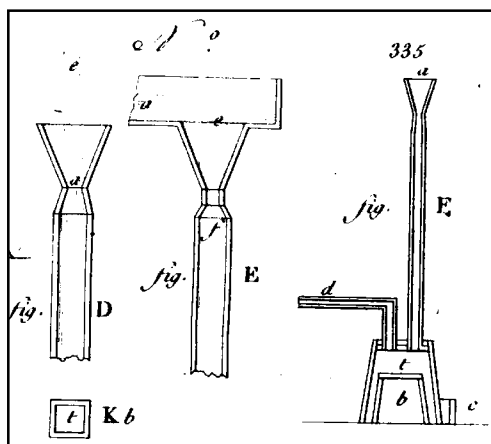


Figura 1-22. Trompa de Mariotte (D i F) i de Bélidor (E). (HASSENFRTZ, 1800)

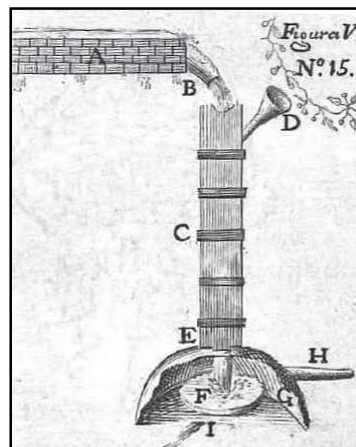


Figura 1-23. Trompa descrita per Gamboa (1761)

Hassenfratz diu que M. Lawis⁵⁸ va provar que els espiralls fets a l'arbre o les trompilles reduïen la quantitat d'aigua finalment arrossegada en trompes en què l'aigua cau sobre l'embut ja mesclada amb aire (tipus descrit per Mariotte), o també en les trompes en què l'aigua fa un remolí en l'embut que xucla l'aire (tipus descrit per Bélidor).

En el llibre “Comentarios a las Ordenanzas de Minas”, publicat el 1761 pel jurista F. J. Gamboa⁵⁹, s'inclou la trompa d'aigua (veure fig. 1-23) com el sistema menys costós de bufar aire a un forn. En la descripció que en fa, s'indica que els arbres, que anomena canons, són de fusta, estan impermeabilitzats amb brea i cenyits amb cèrcols de ferro. L'escanyall (B) té la quarta part del diàmetre interior de l'arbre. A més, se solen posar trompilles (D) per donar “més força a l'aigua i perquè baixi més impetuosa amb el vent”. El pas a l'escanyall representa solament el 6,25% del pas a l'arbre. Les trompilles s'assimilen a espiralls secundaris, ja que si no hi fossin també bufaria. Marca com a principal inconvenient la necessitat de disposar d'un salt suficient, encara que es puguin posar diversos arbres en paral·lel per obtenir més aire.

Apareix un tipus més elaborat de trompes sense espiralls en el llibre de Della Fratta de l'any 1670 titulat *Pratica Minerale*⁶⁰. L'aigua arribaria per un canal horitzontal fins una obertura lateral de l'embut superior de l'arbre. L'aire entraria per la part superior de l'embut, es mesclaria amb l'aigua, i baixaria per un arbre

⁵⁸ HASSENFRTZ (1812, p.61): “M. Lawis” pot ser la mateixa persona que apareix a BEAUNIER, GALLOIS (1803) on s'explica que segons “Læwis”, hi ha dues maneres per tal que l'aigua arrossegi l'aire, segons si l'aigua cau de dalt o del costat. Indica que s'arrossega més aire si l'aigua cau ja mesclada que si s'arrossega pel remolí fet en l'embut.

⁵⁹ GAMBOA («capítol XXII: Del beneficio de los metales; Secció III: Arte de agua», 1761, p.400-401).

⁶⁰ Segons BONI (1958).

que també tindria una forma lleugerament cònica, fins a la tina. En el costat dret de la figura 1-24 es pot observar un petit dipòsit situat en el tub que porta l'aire al forn. Aquest dipòsit serviria per separar les gotes d'aigua que pogués arrossegar l'aire, per tal que no anés a parar al forn. .

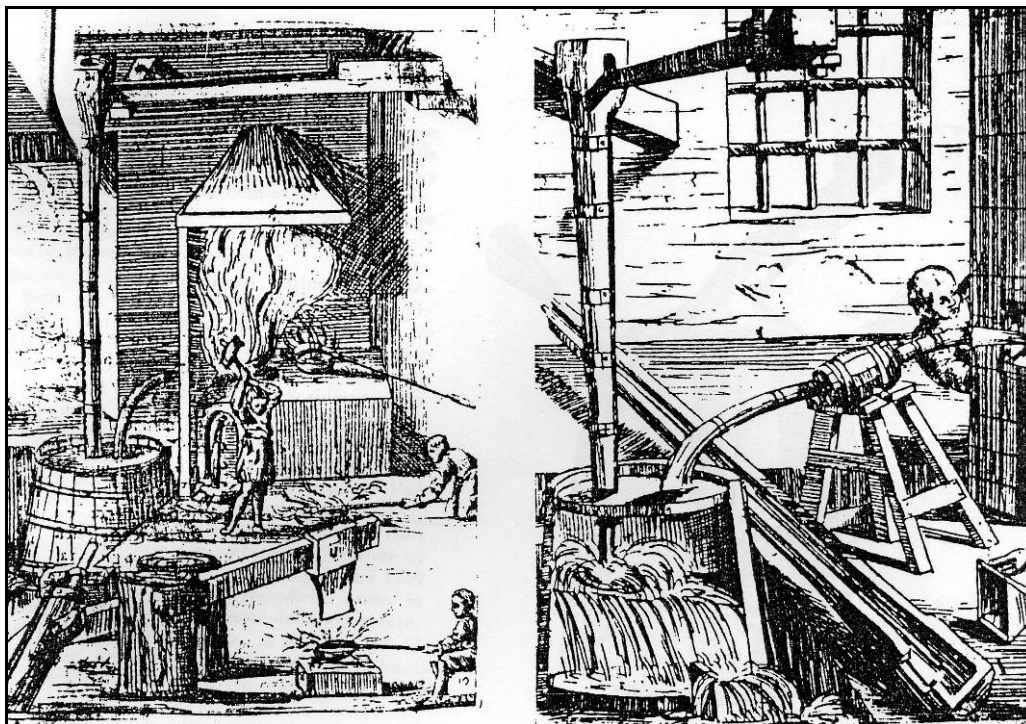


Figura 1-24. Trompes de della Fratta de l'any 1670.⁶¹

Existeix una gran similitud entre aquest tipus de trompes i les trompes anomenades dels Alps, descrites més endavant en el present treball. La diferència rauria en la presència o no d'escanyall i espiralls en la part superior dels arbres.

⁶¹ Segons Boni (1958).

1.4.3 La trompa del Delfinat i la trompa del País de Foix, segons l'*Encyclopédie*

En l'*Encyclopédie* de Diderot i d'Alembert⁶² es descriuen dos tipus de trompes, les del *Delfinat* i les del *País de Foix*. Totes dues tenen l'escanyall en càrrega. En aquest cas s'opta per una distinció en base a l'origen geogràfic, malgrat que en una i altra zona es trobessin trompes híbrides, fruit de la mescla d'elements d'ambdues tipologies.

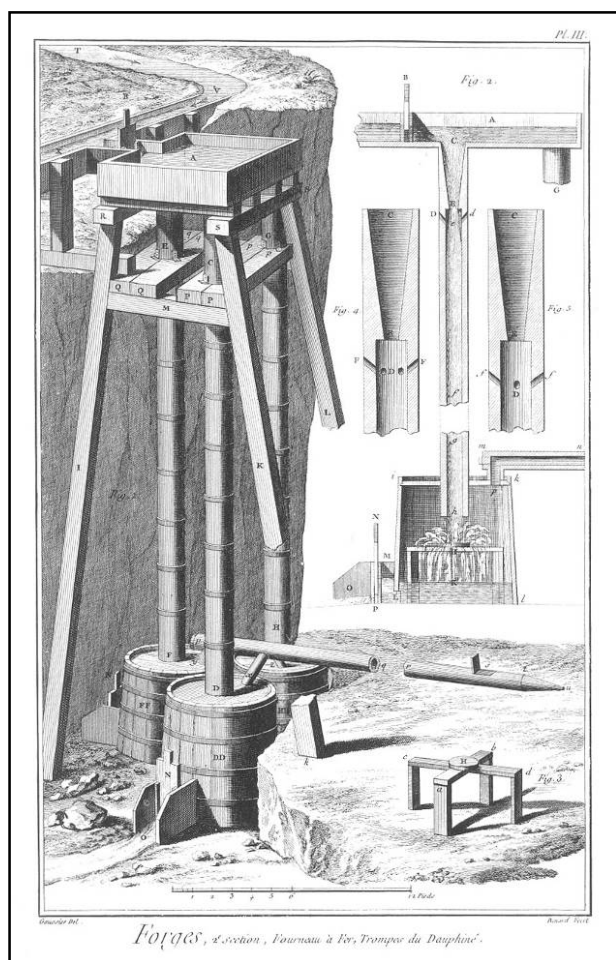


Figura 1-25. Gravats de la trompa del Delfinat (DIDEROT; ALEMBERT. *Encyclopédie*, 1751-1765)

La *trompa del Delfinat* es caracteritza per tenir els arbres de secció circular, amb escanyall cònic i espiralls per a l'entrada d'aire, i per usar una tina en posició vertical com a caixa de vents.

Els arbres estan fets en dues peces de fusta de pi o de roure⁶³ buidades interiorment, pressionades l'una contra l'altra per cercols de ferro, i amb les unions calafatades. L'escanyall és anomenat "étranguillon", i els espiralls, "soupiraux".

La longitud de l'arbre és de 8,2 m, el seu diàmetre exterior és 406 mm, el diàmetre interior en la boca superior és 330 mm, en l'escanyall és 102 mm, i en la resta de l'arbre és 229 mm. L'escanyall està situat a 1 m per sota de l'embocadura, de manera que l'angle de les parets de l'embut és de 6,5° respecte la vertical. Els espiralls són de diàmetre 51 mm, i estan inclinats 40° respecte la horitzontal. Els sis primers tenen el seu forat interior a 203 mm de l'escanyall, i els altres quatre forats estan a 305 mm de l'escanyall.

⁶² DIDEROT; ALEMBERT (1751-1765): existeix una secció d'il·lustracions titulada "Forges ou l'Art du fer" que conté els dos gravats. Segons es mostra en Belhoste (2001), un gravat gairebé idèntic a aquest està present en COURTIVRON, BOUCHU (*L'art des Forges*, Planche V fig 3: *Trompes et haut fourneau du Dauphiné*, desin realisé vers 1717 lors d'une enquête dirigée par Réaumur à l'Académie des Sciences, 1761)

⁶³ BELHOSTE (2001) cita per als Alps i Còrsega, la utilització de fusta de pi o avet, i menys usualment, de roure o castanyer.

La caixa dels vents és un dipòsit invertit en forma de tina. Està instal·lada sobre una llosa de pedra o una base d'argila. Anomena “portavent” al tub que porta l'aire fins al forn, i cita que la tovera del seu extrem és de ferro. El diàmetre del “portavent” és de 254 mm. Cada tina és de 1,82 m de diàmetre, i té la mateixa alçada respecte el terra. L'arbre s'introdueix 0,45 m a l'interior de la tina. La banqueta està situada a 0,91 m del fons de la tina, de manera que queda situada a 0,45 m de la boca inferior de l'arbre. S'indica que la banqueta és de ferro.

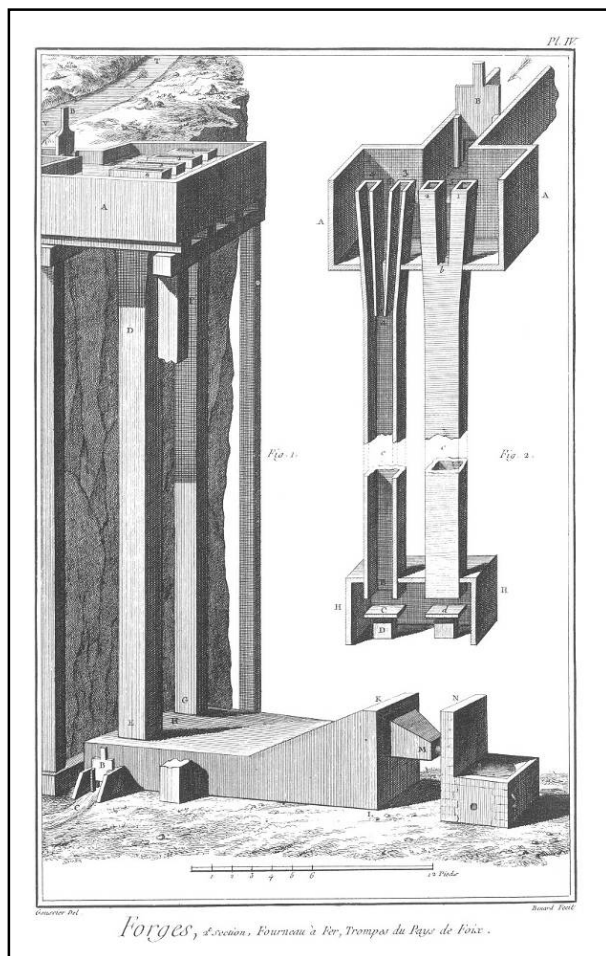


Figura 1-26. Gravat de la trompa del País de Foix. (DIDEROT, ALEMBERT, Encyclopédie, 1751-1765)

Pel que fa a la *trompa del País de Foix*, es caracteritza per tenir uns embuts cònics col·locats a l'embocadura dels arbres en substitució de l'escanyall i els espiralls, per tenir els arbres de secció quadrada i per la caixa dels vents en forma de calaix allargat.

En aquest cas, no es descriuen ni els tipus de fusta usats per a construir els arbres, ni el mètode constructiu⁶⁴, ni tampoc les seves dimensions principals.

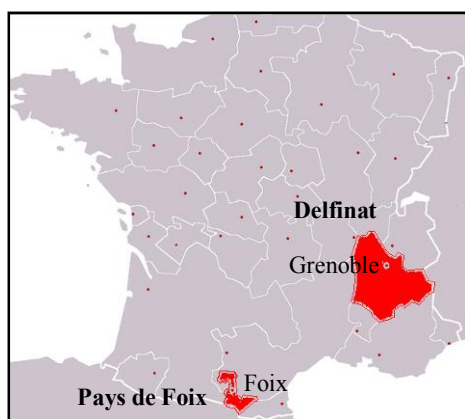
Segons la representació del gravat, la longitud dels arbres és de 8,2 m, la seva secció és quadrada de costat interior 400 mm, i exterior 510 mm. La secció a l'escanyall és rectangular de secció 400 mm per 110 mm. L'escanyall està situat a 0,78 m per sota de la base de la peixera.

Cada arbre té dos embuts cònics per a l'aire de longitud 2 m, amb una secció de pas a la part superior de 620 mm per 140 mm, i a la part inferior, a l'alçada de l'escanyall, de 400 mm per 100 mm.

⁶⁴ En DIETRICH (1786) s'explica que al País de Foix tenien intenció d'introduir els arbres rodons del Delfinat, però que van adoptar la solució de fer una canal quadrada tot al llarg de l'arbre i clavar un tauló pla al damunt per tancar el conducte, de manera que tres costats eren d'una mateixa peça, i el quart era una tapa clavada. Podien tenir trompilles i/o espiralls, i n'existien de pedra que donarien un aire més sec. TARDY, THIBAUD (1823) també descriuen que els arbres de la trompa de Vicdessos estan fets a partir d'un tronc d'arbre buidat de manera que tres dels costats del conducte són d'una sola peça de fusta que es tanca amb una tapa plana que constitueix el quart costat, tot aportant un dibuix de la mateixa. (veure figura 1-29.b)

Els arbres s'introdueixen 305 mm en la caixa dels vents. La banqueta on pica el doll d'aigua és de fosa i està situada a 240 mm per sota de l'extrem de l'arbre. La caixa dels vents mesura 4,88 m de llarg, 1,83 m de llarg. La seva alçada és de 0,91 m en la zona dels arbres i de 2,13 m en la zona de sortida de l'aire.

Segons T. Richard i altres fonts, els embuts per on entra l'aire s'anomenen en francès “*trompils o trompilles*”⁶⁵. L'aigua s'escola per la separació que queda entre els dos embuts cònics de cada arbre. Els embuts sobresurten per sobre del nivell de l'aigua en la peixera, per tal que l'aire pugui arribar a la zona de l'escanyall. L'escanyall està constituït per les parets exteriors dels embuts que estan en contacte amb el doll d'aigua. Aquesta disposició presenta l'avantatge que els embuts no queden mai obstruïts pel gel, com pot passar amb els espiralls. T. Richard indica que per aquest motiu, s'han substituït els espiralls per “*trompilles*” en algunes fargues de muntanya.



Actualment, el País de Foix pertany al departament de l'Arieja, a la regió del Migdia-Pirineus. El Delfinat està comprès actualment en la regió del Roine-Alps.

A continuació es presenta la taula 1-1 amb el resum de les característiques d'aquests dos tipus de trompa en comparació amb les de la trompa de Montgaillard descrita per T. Richard.

<http://es.wikipedia.org>)

Figura. 1-27. Divisió provincial de França abans de l'any 1789.
(de: <http://es.wikipedia.org>)

La trompa de Montgaillard combina la caixa dels vents i la secció quadrada de la trompa del País de Foix, amb la utilització d'arbres buidats interiorment amb els espiralls per a l'entrada d'aire, com les trompes del Delfinat. En canvi, la trompa de tina descrita per Richard és com la del Delfinat, excepte pel fet que la primera és de secció interior quadrada. En cap dels dos gravats de l'*Encyclopédie* queden ben representats els conductes de l'aire constituïts per l'home, la burja, el buirac i la busca.

⁶⁵ Les trompilles es poden confondre amb el trompill, que és com s'anomena el tap suspès sobre l'embocadura de l'arbre i que serveix per regular el cabal de la trompa des de l'interior de l'obrador. Existeixen varies fonts en què s'anomenen trompilles als embuts per a l'aire: LAPASSAT (1983) cita que la font Courtivron, Bouchu (*L'art des forges et des fourneaux à fer*, 1762); RICHARD (1838) en diu “*trompils*”.

Taula 1-1. Comparativa entre les trompes descrites a l'Enciclopèdie i la de Montgaillard.

	<u>Delfinat</u>	<u>País de Foix</u>	<u>Montgaillard</u>
Longitud total de l'arbre	8,23 m	8,20 m	7,30 m
Dimensions de l'escanyall	Ø 102 mm	110 x 400 mm	61x 190 mm
Dimensions de la secció de la resta de l'arbre	Ø 229 mm	400 x 400 mm	190 x 190 mm
Relació entre la secció de pas en l'escanyall i en la resta de l'arbre	19,8 %	27,5 %	32,1 %
Distància entre la base de la peixera i l'escanyall	1,00 m	0,78 m	0,36 m
Dimensions equivalents a la secció del conjunt dels espiralls	Ø 161 mm	400 x 200 mm	100 x 80 mm
Relació entre la secció del conjunt dels espiralls i la secció de l'arbre	49,4 %	50 %	22,2 %
Volum proporcional de la caixa dels vents corresponent a cada arbre	4,7 m ³	5,2 m ³	2,27 m ³
Cabal d'aigua estimat per arbre per 2 m d'aigua sobre l'escanyall	≈ 48 l/s	≈ 250 l/s	≈ 68 l/s

El sistema d'aspiració de l'aire que es descriu en l'enciclopèdia com el propi de les trompes del País de Foix, és a dir, els embuts cuneïformes encastats a l'embocadura dels arbres, és identificat com una disposició particular i molt antiga present solament en una de les fargues que ell va estudiar, la de Villeneuve d'Olmes, poble situat a pocs kilòmetres de Foix. També anomena "trompils" a aquests embuts per a l'aire. En aquest cas, els arbres feien solament 3,6 m de llargària, i s'encastaven en una caixa de vents circular feta de pedra i folrada de plom, a l'estil de les trompes de tina. Jules François identifica a l'Arieja una altra trompa de tina amb "trompils", a la farga de Mas d'Isil, però en dibuixa el detall incloent també espiralls i escanyall, a més dels "trompils".

1.4.4 La trompa dels Alps: una altra varietat geogràfica

Jules François cita l'arribada d'un nou tipus de trompa a l'Arieja que anomena trompa dels Alps⁶⁶. Es tractaria d'una trompa de tina amb algunes disposicions que la fan més simple. Es prescindeix del peixeró, i s'alimenta la trompa directament del canal que porta l'aigua, de manera que la càrrega d'aigua sobre l'embocadura dels arbres és molt menor. El cabal es regula mitjançant un vessador ajustable situat al mateix canal, que redueix el pas de l'aigua. L'escanyall és cònic, el conducte de l'arbre és circular. Indica que tenen l'avantatge que els arbres poden ser més curts.

Jules François presenta una descripció de la trompa de Guillhot. Té tres arbres de 3,7 m de longitud, el conducte de l'arbre és cònic tot al seu llarg, de manera que fa 210 mm de diàmetre just a sota dels escanyalls i 160 mm a la part inferior. La càrrega d'aigua sobre l'embocadura és de 0,3 o 0,4 m. Les embocadures dels arbres són còniques, de longitud 300 mm, diàmetre superior de 290 mm i diàmetre a l'escanyall de 160 mm. La relació entre la secció a l'escanyall i la secció just passat l'escanyall és del

⁶⁶ Segons Belhoste, la trompa dels Alps seria d'una tipologia antecessora de la dels Pirineus, donat que incorpora el sistema d'aspiració sense espiralls propi de les primeres trompes de Còrsega o Gènova.

58%, és a dir, l'obertura de l'escanyall és molt superior a les mostrades fins aquest punt. Té dos espiralls just a sota de l'escanyall de secció 17 mm per 40 mm. La relació entre la secció de pas per a l'aire i la de l'arbre és molt més petita que pels casos anteriors, del 4%, ja que bona part de l'aire deuria entrar directament per l'embut, arrossegat pel gir de l'aigua. Per un salt total de 6,2 m, dóna un vent qualificat com a bo i sec, a 14° de tensió, equivalents a 8,42 kPa.

Lapassat (1983), aporta la mateixa referència a la farga de Guillhot (o Guilhot) pel cas de les trompes dels Alps, i una segona per la farga de "la Mouline", totes dues a l'Arieja. La descripció que en fa coincideix amb la de J. François. A més, indica que poden tenir "trompilles", escanyall i espiralls al mateix temps.

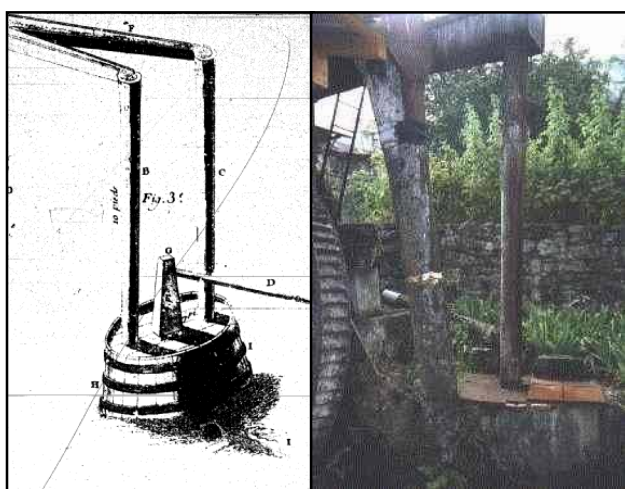


Figura 1-28. Trompa de la vall de l'Isera de Béliador i trompa de la farga d'Alésinaz.

Béliador (1739) cita l'existència d'unes trompes d'un tipus similar a aquestes a la vall de l'Isera, al costat de Grenoble, d'uns 4 metres d'alçada i espiralls a la part superior. Una trompa similar a aquestes existiria en l'actualitat a la farga d'Alésinaz (Les Allues, Saint-Pierre d'Albigny, Savoia), al costat de Grenoble. Belhoste (2001) presenta una fotografia d'aquesta trompa realitzada l'any 1997. En la figura 1-28 es mostra la representació de la trompa de la vall de l'Isera de Béliador al costat de la fotografia de la trompa de la farga d'Alésinaz⁶⁷.

Finalment, Tardy et Thibaud (1823) identifiquen que la caixa dels vents de la trompa de Vicdessos (Arieja) no té tancament de fons, i manté l'estanquitat per estat immersida en una bassa plena d'aigua.

1.4.5 Les trompes al s. XIX: els intents d'explicar i millorar el seu funcionament

Durant el s. XIX es van fer diversos intents per entendre el funcionament de la trompa de cara a millorar-ne la utilitat i el rendiment⁶⁸. Són treballs que reflecteixen l'evolució al llarg d'aquest segle d'aspectes com la comprensió de la naturalesa de l'aire, de la naturalesa de la calor (teoria del calòric), o el desenvolupament de les tècniques de mesura de magnituds fonamentals, com la pressió o el cabal tant de l'aigua com de l'aire.

⁶⁷ Segons unes imatges extretes de <<http://moulinafer.free.fr/Vent.htm>>

⁶⁸ BELHOSTE (2001)

A principis del s. XIX, davant la dificultat de mesurar el cabal d'aire, es fa l'associació de la quantitat d'aire que dona la trompa amb la seva pressió a l'interior de la trompa. No obstant, aquesta magnitud, que anomenen tensió del vent, resulta no mantenir una relació lineal amb el cabal d'aire.

Gràcies als treballs principalment de Daniel Bernoulli (1700-1782) i Giovanni Batista Venturi (1746-1822), es va donar una explicació científica a la major part dels fenòmens que regeixen en funcionament de la trompa. Malgrat això, els intents de millora de la trompa no van resultar massa significatius en comparació amb el nivell aconseguit pels constructors de trompes del s. XVII.

1.4.5.1 Beaunier i Gallois (1804): la trompa de la farga de Poullaouen

La referència més antiga d'un estudi de la trompa és BEAUNIER; GALLOIS (1803). Es tracta de la memòria d'uns experiments duts a terme per aquests dos enginyers de mines sobre les trompes de la foneria de Poullaouen⁶⁹, amb els qual intenten mesurar de cabals d'aigua i aire per deduir-ne l'efecte útil. Casualment, la representació gràfica que conté aquest document (figura 1-29.a) coincideix amb la que apareix en el *Dictionnaire Technologique* (V.V.A.A, 1830), de la figura 1-30, excepte en la pretesa innovació de la tovera convergent-divergent situada a la part inferior de l'arbre en aquesta darrera figura.

La trompa de la foneria de Poullaouen consta de dos arbres de 6,3 m d'alçada i una secció buida interior de 200 mm de diàmetre. Tenen l'escanyall situat a 2,1 m per sota del canal d'aigua, de 100 mm de diàmetre, així que la relació entre ambdues seccions de pas és del 25%. Tenen quatre espiralls situats a sota l'escanyall. La banqueteta està situada a 300 mm del sostre de la tina, la qual té 1,8m d'alçada i també de diàmetre. El cabal d'aire que mesuren és de 208 l/s a una pressió de 48 mm de Hg (0,66 m.c.a. o uns 11°), per un cabal d'aigua de 82 l/s, resultant un efecte útil del 24%. Uns pocs anys més tard rectificuen a la baixa el valor que havien publicat per l'aire, per un valor quatre cops inferior, de manera que l'efecte útil resultava ser inferior al 6%.

Beaunier i Gallois determinen que el sistema que més aire arrossega és el format per l'escanyall i els espiralls, o les trompilles, per davant dels de caiguda lliure d'aigua, o els d'entrada lateral de l'aigua amb remolí en l'embut, i que combinar diversos d'aquests sistemes perjudica el resultat. També determinen que no és necessari situar espiralls al llarg de l'arbre, perquè a partir del segon o tercer nivell d'espiralls, la quantitat d'aire arrossegat no augmenta, mentre que surt aigua abundant per aquests orificis més baixos. Regulant la quantitat d'aigua que alimenta els arbres observen que la relació entre l'aire i l'aigua

⁶⁹ Poullaouen: poble situat a Bretanya (França)

no és lineal, sinó que existeix un cabal òptim pel qual la quantitat d'aire és màxima respecte l'aigua utilitzada.

Malgrat les deficiències dels sistemes de mesura dels cabals, la major part de les conclusions a què arriben seran confirmades per altres estudiosos posteriors amb millors mitjans de mesura, excepte en alguns aspectes que creen controvèrsia i opinions contradictòries al llarg de molts anys. Una d'elles és sobre la utilitat de dividir el doll d'aigua just després de l'escanyall per afavorir l'arrossegament d'aire. Beaunier i Gallois conclouen que és perjudicial, mentre que Aubuisson⁷⁰ ho proposa com a millora, a l'igual que J.François (1843). No és que s'equivoquessin sinó que el fenomen depèn també d'altres factors.

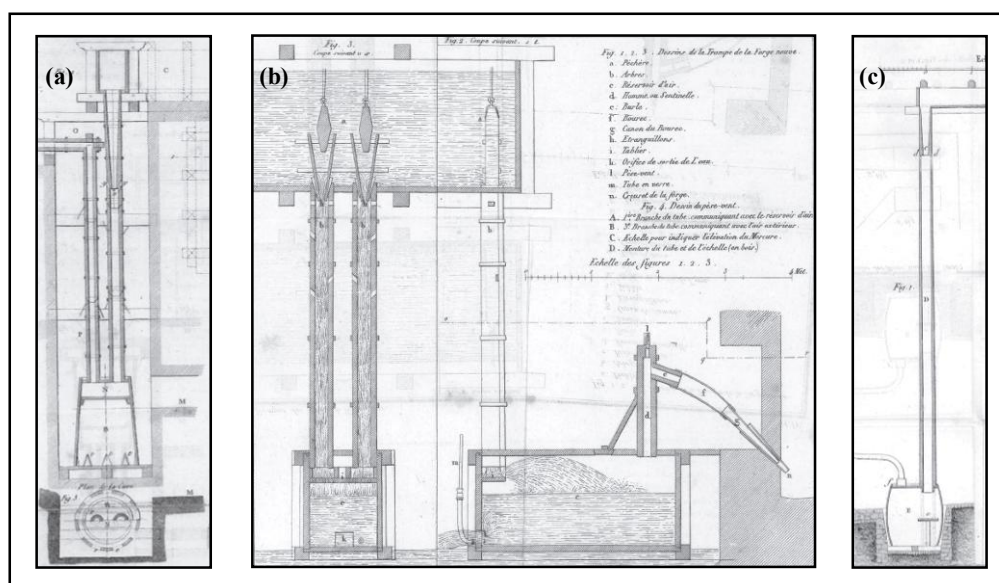


Figura 1-29. (a) Trompa de la farga de Poullaouen (1804); (b) Trompa de la farga de Vicdessos (1823); (c) Trompa de la mina de Rancié (1828).⁷¹

1.4.5.2 Thibaud i Tardy (1823): les trompes de la farga de Vicdessos

Posteriorment, Thibaud, enginyer del cos reial de mines de França, juntament amb Tardy, lloctinent d'artilleria⁷², realitzen experiments similars sobre unes trompes de Vicdessos, l'alçada de la qual és d'uns 6 o 7 m. (figura 1-29.b). Sobre l'obertura de l'escanyall, conclouen que pot ser d'entre un 25% i un 50% de la de l'arbre sense influir gaire en el resultat. Posen l'àrea dels espiralls en funció de l'àrea de l'orifici

⁷⁰ AUBUISSON (1834): Mentre feia proves amb una trompa per usar-la per ventilar la mina de Rancié, va atribuir un augment sobtat del buf de la trompa a l'encallament d'una rama d'un arbre en l'escanyall de la mateixa. Després de reproduir el fenomen amb altres elements, va deduir que l'aire arrossegat augmentava si just a sota de l'escanyall es dividia el doll d'aigua, sobretot si es dirigia aquesta aigua just cap a sota dels espiralls.

⁷¹ (a) segons Beaunier i Gallois (1804); (b) segons Tardy i Thibaud (1823); (c) segons Aubuisson (1828)

⁷² THIBAUD, TARDY (1823)

de la busca, i donen un rang de validesa d'entre 1 i 70, essent els espiralls habitualment 49 cops l'orifici de la busca. Sobre el seu rendiment, conclouen que està sobre el 10% o el 15%.

Una aportació interessant de Tardy i Thibaud (1823) és sobre l'observació que la humitat del vent de la trompa és normalment menor que la de l'ambient a l'estiu, mentre que a l'hivern, la trompa dona normalment un vent més humit que l'aire ambient. Atribueixen aquest fenomen al refredament que a l'estiu indueix l'aigua en l'aire que arrossega, mentre que aquest efecte s'inverteix amb la fredor de l'aire de l'hivern. En AUBUISSON (1828) apareix la mateixa reflexió, i també ho relaciona amb la temperatura inferior de l'aigua respecte l'aire ambient.

1.4.5.3 Aubuisson (1828): La trompa de la mina de Rancié

Aubuisson (1828), enginyer en cap del Cos reial de mines de França, realitza unes proves per tal d'adaptar una trompa per ventilar la mina de Rancié⁷³. Fruit d'aquestes experiències, realitza un treball de certa rellevància en aquell moment sobre el transport d'aire a través de canonades molt llargues. La trompa d'aquesta mina (figura 1-29.c) estava formada per un arbre de 8 m d'alçada, de fusta d'ayet, amb un conducte interior de 213 mm de diàmetre, l'escanyall situat a un metre de la capçalera. Va fer proves amb un escanyall de 150 mm de diàmetre, és a dir, el 50% de la secció de l'arbre, i un altre de 100 mm de diàmetre, corresponent al 22% de la secció de l'arbre. La secció dels espiralls, situats just a sota de l'escanyall, representa un 30% de la secció de l'arbre. Desestima la utilitat dels espiralls secundaris i els obstrueix. El salt total d'aigua és de 9,4 m. El cabal d'aire obtingut resulta ser de 200 l/s per un consum de 85 l/s.

En base a aquestes experiències de Rancié, segons els seus càlculs, aquesta trompa tenia un efecte mínim del 10% i un màxim del 17%, essent el promig del 12%. Dictamina que el rendiment màxim depèn de l'alçada de l'arbre. Així, per un arbre de 5 m seria habitual obtenir un rendiment del 3%, mentre que per un arbre de 10 m d'alçada podria arribar a ser del 17%. Posteriorment, Aubuisson (1834) descriu una trompa amb una caiguda de 5,5 m, que per un cabal de 50 l/s donaria 80 l/s aire. L'efecte útil seria d'entre el 7 i el 10%, tant més alt com major fos la pressió de l'aire.

Aubuisson exposa que a l'estiu el vent de la trompa pot ser més sec que l'aire ambient si fa prou calor i l'aigua és freda, avantatjant a altres màquines de bufar aire al forn, com les de pistons o les manxes. També proposa immernir en una bassa la caixa dels vents tot eliminant el seu tancament inferior.

⁷³ La mina de Rancié està situada a l'Arieja (França).

1.4.5.4 Tom Richard (1838): les trompes de la farga de Montgaillard

RICHARD (1838) presenta un dels estudis més complets de la farga en aquell moment. Coincideix amb els seus antecessors en què el nombre d'espiralls i les seves dimensions no afecten a la tensió del vent de la trompa, sempre que n'hi hagi un mínim. Relaciona la quantitat d'aire amb el cabal d'aigua i reconeix que la relació no és proporcional. Relaciona la tensió màxima de la trompa sobretot amb l'alçada de l'arbre.

Una experiència singular explicada en aquesta obra és la relacionada amb la influència de la terbolesa de l'aigua en el funcionament de la trompa. Exposa el cas d'una trompa que amb l'aigua neta podia donar un vent a 81 mm de Hg, que no donava més que 72 mm de Hg quan l'aigua del riu baixava tèrbola com a conseqüència d'una tempesta. Aquest fet podria estar relacionat amb la formació d'escumes, o amb la disminució de la capacitat de formació de les bombolles.

Un altre contingut prou interessant, que T. Richard atribueix a un treball inèdit de l'enginyer Sr. Mercadier⁷⁴, es refereix a l'efecte de la inclinació dels arbres sobre el vent, segons el qual, el vent es va afloixant a mesura que s'inclinen els arbres, fins arribar a anul·lar-se per inclinacions de 25 o 30°. Una segona observació singular sobre el mateix treball es refereix a l'augment del vent obtingut amb una trompa de dimensions reduïdes en fer passar sorra, blat o altres materials en lloc d'aigua. L'explicació és senzilla: aquests materials granulars tenen un grau màxim de compacitat, de manera que queden espais entre els grans que s'omplen d'aire. L'aire es veu arrossegat gairebé volumètricament pel medi granular, donada la forta despesa energètica que suposaria per l'aire escapar-se tot travessant els espais existent entre els grans. En cas que l'aire tingués suficient energia, es produiria la fluïdització del conjunt, fenomen que no es produeix degut a la poca magnitud de les pressions implicades en l'experiment.

També estudia grollerament l'efecte d'escalfar prèviament l'aire abans de fer-lo entrar al forn. Bona part de la seva obra està dedicada al càlcul de la quantitat d'aire i d'aigua que s'introdueix al forn en funció de la temperatura ambient i de la pressió baromètrica, en base als treballs de Claude-Louis Marie Henri Navier (1785-1836) sobre la hidrodinàmica.

1.4.5.5 Jules François (1843): les trompes de la zona de l'Arieja

Jules François aporta el comentari que, malgrat que les trompes de l'Arieja podien donar una "tensió" de fins a 21° (95 mm de Hg), normalment no es superava la "tensió" de 15° (68 mm de Hg) per tal d'estalviar carbó.

⁷⁴ L'enginyer Sr. Mercadier que cita T. Richard en aquest passatge podria ser el mateix que col·labora un temps més tard amb J. François, Sr. Ferdinand Mercadier, el qual realitza les figures i dibuixos de FRANÇOIS (1843), segons es diu a la portada de la mateixa.

Confirma que la humitat del vent de la trompa és molt alta, però que a l'estiu pot resultar, en humitat absoluta, més sec que el propi aire ambient, pel refredament de l'aire per part de l'aigua. A més, aporta l'observació que l'excés d'humitat en el vent de la trompa, per presència d'aigua particulada, fa perdre homogeneïtat a l'acerat⁷⁵, produeix un ferro pallós⁷⁶ i difícil de fer suar⁷⁷, el foc resulta ser massa fred i vacil·lant. Proposa modificar el centinella donant-li la forma de coll de cigonya, introduint barreres per a les gotes, per evitar el seu arrossegament amb l'aire.

Afirma que dividir la vena fluida en l'escanyall augmenta l'efecte de la trompa en un valor entre 7 i 36 mm de Hg, a l'igual que Aubuisson (1828). Arriba a la conclusió que l'efecte de les trompes creix amb la llargada dels arbres, mentre que decreix a mesura que es carrega d'aigua l'escanyall.

Està també d'acord en els avantatges d'immergir la caixa de vents en una bassa, com Tardy i Thibaud, i també Aubuisson.

1.4.5.6 Flachat (1846): el resum de les aportacions fins al moment

Flachat (1846) presenta un bon resum de les aportacions realitzades fins aquell moment en l'estudi i la definició de la trompa model. Anuncia explícitament que el cabal d'aire que pot proporcionar la trompa és aproximadament igual al cabal d'aigua implicat, per uns 5 m de salt d'aigua. Com a novetat, afirma que les caixes de vents sense fons, immergides en aigua, tenen un millor funcionament.

⁷⁵ Percy (1864) dóna una referència a l'obra de J. François (1843, p.296) segons la qual el procés català, amb trompes produïa un ferro acerat (en francès: "fer fort", en anglès: "steely iron", "natural steel"), mentre que si s'usaven màquines de cilindres produïa ferro dolç (fr.: "fer doux ordinaire", en.: "soft iron"). "Hence, under the ordinary conditions of working in the Catalan furnace the blast of the trompe favours the production of steely iron, and that of blowing cylinders the production of soft iron" (PERCY, 1864, p.309).

⁷⁶ Pallós: "Pailleux" en l'original en francès. Fa referència a la palla, i aplicat al ferro, significa que el metall té alguna palla o defecte. Pot fer referència a una consistència fibrosa, estriada, poc cohesionada, com la de la palla.

⁷⁷ Suar el ferro es refereix a la facilitat d'extreure les inclusions d'escòries del masser per mitjà de la forja.

1.4.5.7 *Altres aportacions de menor importància*

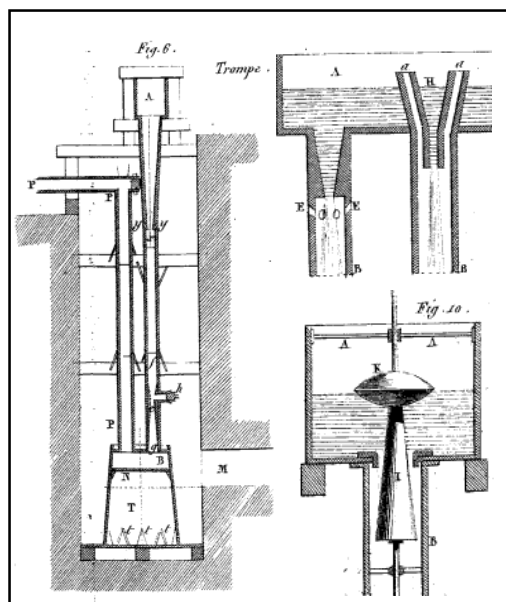


Figura 1-30. Diferents propostes de trompes (1831).

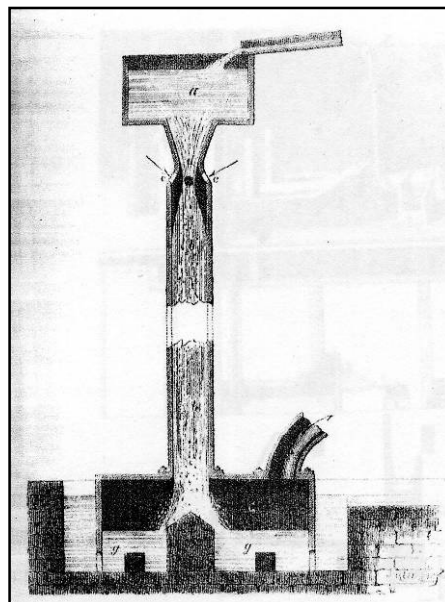


Figura 1-31. Trompa per alt forn segons Gruner (1875)

El 1831, en el *Dictionnaire technologique* es presenten explicacions i dibuixos sobre la trompa (veure figura 1-30) on es pot veure que s'assenten els coneixements adquirits fins aquell moment i es proposen millores de dubtosa eficàcia. D'una banda, la trompa té l'escanyall superior en càrrega, format per un con llarg i de poca obertura, es presenten els dos sistemes d'arrossegament de l'aire, per espiralls i per trompilles, i la caixa dels vents queda immersida en aigua. D'altra banda les suposades millores són l'avantatjosa incorporació de sortides per a l'aigua de la caixa dels vents en forma triangular, d'una tovera convergent-divergent a la base de l'arbre per augmentar l'aspiració d'aire, o d'un flotador unit al con de l'escanyall per garantir que l'alçada d'aigua sobre el mateix sigui constant. Cap d'aquestes innovacions va sobreviure, donat que no estaven ben fonamentades.

1.4.5.8 *Gruner (1875): la trompa a finals del s. XIX*

Alguns alts forns van incloure trompes d'aigua en els seus projectes i en el seu funcionament. Amb l'augment de les seves dimensions, l'ajust de proporcions i el canvi d'alguns elements es va aconseguir augmentar el seu rendiment i reduir l'arrossegament d'aigua cap al forn. La documentació existent al respecte cap a finals del segle XIX és molt més abundant i diversa en comparació amb la d'èpoques anteriors.

Un exemple de la lenta evolució de la trompa és el de la figura 1-31, de GRUNER (1875). Es continua fent referència als estudiosos de la trompa de principis del s. XIX, com d'Aubuisson o Tardy i Thibaud, es

segueixen utilitzant expressions com “la tensió de l'aire”, “l'efecte útil” o “l'arrossegament de l'aire per adherència”, però s'utilitzen uns raonaments més científics per justificar les proporcions dels elements de la trompa.

En aquest cas es proposen arbres d'entre 5 i 10 m de llarg, amb una càrrega sobre l'escanyall d'aproximadament un 10% de la longitud de l'arbre, un escanyall amb una secció de pas (0,15 m de diàmetre) del 62% respecte la secció de l'arbre (0,24 m de diàmetre), per donar un cabal d'aire similar al d'aigua⁷⁸ (uns 60 l/s) a una pressió de 50-60 mm de Hg, amb un rendiment d'entre el 10 i el 12%. Apareix la recomanació explícita que la velocitat de l'aire en els conductes ha de ser inferior als 10 m/s, per evitar excessives pèrdues de càrrega, valor de referència que encara es fa servir per a un càlcul groller d'una canonada d'aire. S'utilitza una caixa dels vents immergida en aigua i sense fons per evitar pèrdues en l'evacuació de l'aigua. A més, la banqueteta té una forma que pretén reduir les pèrdues que es donen en el xoc del doll amb la banqueteta.

1.4.5.9 Altres dissenys i construccions

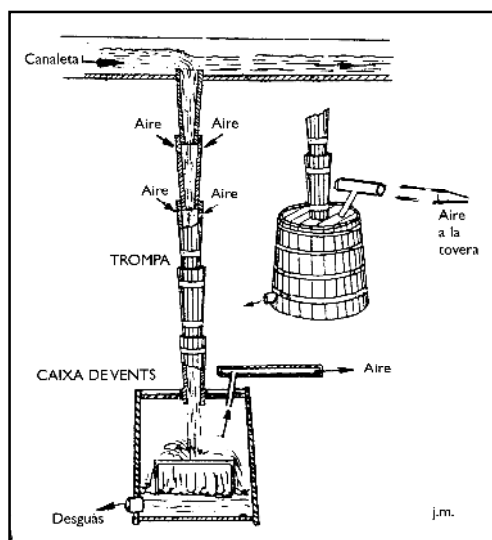


Figura 1-32. Trompa d'aigua de la farga, dibuix obra de Joaquim Mateu (MATEU, 2004, p. 21).

Joaquim Mateu (2004, p. 21) representa la trompa d'aigua de la farga per mitjà del dibuix presentat en la figura 1-32. Es tracta d'una trompa de tina alimentada directament des del canal, sense bassa superior, feta amb cons truncats de fusta endollats entre ells i reforçats amb dovelles de ferro. La part estreta del con constitueix l'escanyall. Uns forats situats just a sota de l'escanyall constitueixen els espiralls.

Aquesta trompa destaca per la singularitat de la constitució de l'arbre, i malgrat no haver trobat referències bibliogràfiques anteriors que la descriguin, sembla plausible que pugui funcionar.

⁷⁸ Ignació González (1992) indica que proporcionen aproximadament un colum d'aire de 1 m³ per cada metre cúbil d'aigua gastada per un salt total d'uns 6 m.

1.4.6 El declivi de la utilització de la trompa en la farga

Les trompes es van mantenir en actiu malgrat el seu mal rendiment. Els seus principals avantatges eren el tenir molt poc cost de construcció i manteniment, i no necessitar altra font d'energia que l'aigua. Els seus principals inconvenients eren la necessitat de salt suficient i el major consum d'aigua, respecte altres competidors. La principal alternativa contemporània eren les manxes. Posteriorment es van anar desenvolupant bombes de pistons, introduïdes a França al s. XVIII, ventiladors⁷⁹, de major rendiment, però major cost i avaries més freqüents. Aubuisson (1825), recomana la conservació de les trompes pels seus avantatges malgrat que tècnicament havien estat superades.

Al *Journal de mines* (V.V.A.A., 1814) apareix un informe sobre la vall de Rives al departament de l'Isera en què s'explica que ja feia més de 30 anys que les trompes havien estat substituïdes en totes les fargues i foneries, excepte una trompa de 15 m que encara s'utilitzava en una d'elles. El motiu adduït per fabricants i fargaires per haver-se desfet de les trompes era el de l'excés d'humitat del seu vent.

La substitució de la trompa va anar lligada a les majors necessitats de ventilació dels alts forns, a la humitat del seu vent. A l'igual que en alguns llocs no es va arribar a usar, el altres va sobreviure molts anys en competència amb altres sistemes, en un vaivé constant gairebé des de que va aparèixer per primera vegada.

1.4.7 Teoria de la trompa: formació del fluid bifàsic

L'aspecte que més intrigat va tenir als estudiosos de la trompa és el poder explicar el fenomen de formació del fluid bifàsic, de la mescla d'aire i aigua, a la capçalera de les trompes. Un cop l'aigua arrossega l'aire, es comprimeix al llarg de l'arbre i es decanta en la caixa dels vents. L'aigua disposa d'una sortida sifònica que determina la pressió màxima de l'aire dins de la caixa dels vents.

Percy (1964) elabora un apartat anomenat "*Teoria de la trompa*", en el qual es resumeixen les aportacions fetes fins aquell moment per explicar el fenomen que permet l'arrossegament d'aire per part de l'aigua en la trompa. Degut a la concisió del text, crec interessant citar-lo a continuació:

"Theory of the trompe. — Venturi, in 1800, accounted for the blast by the motion which he supposed the falling stream of water communicated to the surrounding air in contact with it. Thibaud and Tardy give the following explanation: the water in its descent through the trees increases in velocity, diminishes in horizontal sectional area, and leaves a vacuum,

⁷⁹ Hassenfratz (1812): presenta una comparativa de les diferents màquines bufadores del moment.

into which air rushes through the aspirators, and is carried down by the water. Richard confesses his inability to present a satisfactory theory. In 1848, Magnus, Professor of Physics in the University of Berlin, affirmed that the true physical cause of the rushing down of the air was still quite unknown. This distinguished philosopher, however, is led from his experimental researches on the motion of liquids to conclude that in the trompe the same action occurs as when water is poured into a glass, and bubbles of air become entangled in, and are carried down by, the water.” (PERCY, 1864, p. 291-292)

En aquest paràgraf s'expressa que les equacions de Bernoulli i les aportacions de Venturi no són suficients per explicar la formació de les bombolles en el medi aquós, en funció del joc de pressions i velocitats, o del fregament entre aire i aigua. G. Magnus (1851, p.20-23) intenta completar l'explicació relacionant-ho amb el fenomen superficial que es produeix quan una gota o un raig d'aigua incideixen sobre aigua en repòs. Quan la gota o el raig incident arriben a la superfície en repòs, aquesta es deforma fins a tancar l'aigua incident i l'aire que l'envolta, formant oclusions d'aire que entren en el medi líquid.

Un temps més tard, G. F. Rodwell (1864), justifica quantitativament les observacions de G. Magnus (1851) i afegeix un segon fenomen complement del primer que acabaria d'explicar el funcionament de la trompa. D'una banda insisteix en la importància del xoc entre el raig incident i la superfície de l'aigua dins de l'arbre. D'altra banda, hi afegeix el fenomen d'aspiració que produeix la columna descendent de fluid en l'arbre, a mode de pistó. En la figura 1-33 es representen els elements utilitzats en els experiments i un esquema dels diferents tipus de flux identificats en l'arbre.

. Elements dels experiments de Rodwell (1864).

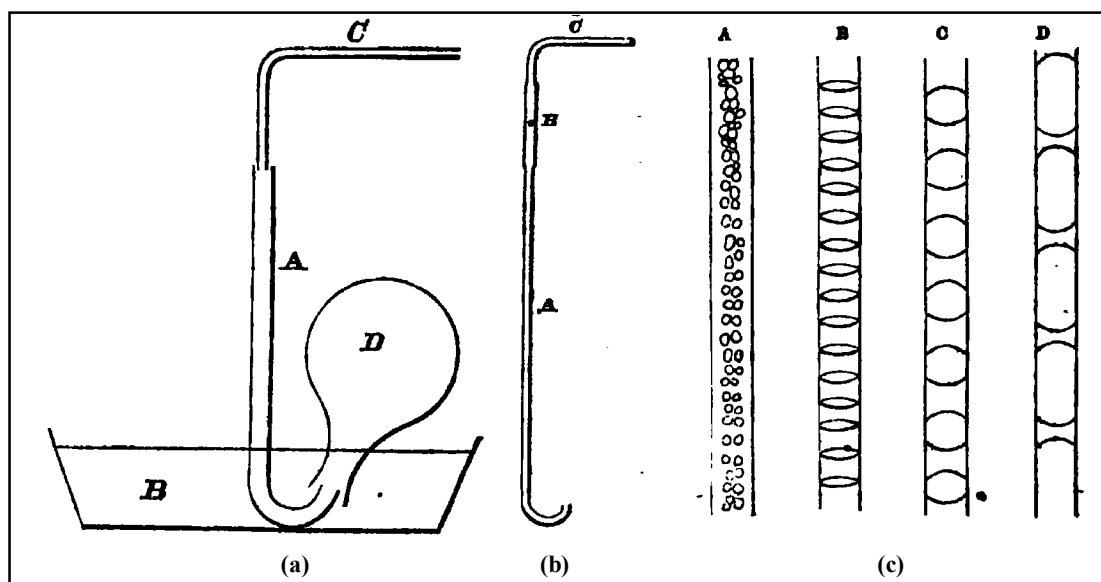


Figura 1-33. Elements dels experiments de Rodwell (1864).

El primer fenomen l'avalua amb els elements (a) de la figura 1-33. L'arbre A rebria l'aigua del tub C, l'aire entraria per l'anell circular que queda per la diferència de diàmetres dels dos tubs, l'aire queda

retingut en l'ampolla D, que té la boca submergida en aigua i l'aigua va a parar al recipient B. Canviant el diàmetre del tub A es pot assajar el que correspondria a l'ajust de l'escanyall en la trompa, i obstruint parcialment la sortida del tub A, es pot regular l'alçada de la columna d'aire-aigua dins del tub, fet que correspondria a l'ajust de l'alçada de la banqueta en la trompa.

Sobre les dimensions de l'escanyall, si el doll és massa petit, no deixa passar prou aigua a l'arbre i les bombolles arrossegades retornen cap amunt en el mateix arbre, atès que la velocitat de l'aigua en l'arbre resulta ser massa petita. Si l'escanyall és massa gran, de seguida omple tota la secció de l'arbre i no arrossega tampoc massa aire. Sembla que el paper principal de l'escanyall és la de regular la quantitat d'aigua que cau per l'arbre, juntament amb l'alçada de l'aigua en la bassa, sobre els escanyalls. Per aquest motiu, una relació d'entre 1/3 i 2/3 entre el diàmetre de l'escanyall i el de l'arbre seria adequada.

Un cop el doll està format a dins de l'arbre, existeix una distància de l'escanyall en què aquest doll es trenca, en què perd la forma de raig, la qual depèn de les dimensions del raig i de la seva velocitat. Mitjançant l'escanyament de la sortida de l'arbre (ajust de la banqueta) es pot fer que aquest doll xoqui amb l'aigua de l'arbre a una alçada o a una altra. D'una banda, si l'arbre està buit i el doll és manté fins arribar a la corba inferior, l'aire arrossegat és gairebé nul. Si el doll xoca amb la superfície de l'aigua a l'interior de l'arbre, l'aire arrossegat és major. El màxim d'aire arrossegat per aquest mecanisme es produiria en fer coincidir la superfície de l'aigua amb el punt en què el doll es trencaria per si sol. Aquest fenomen explicaria l'experiència d'Aubuisson (1834) per la qual dividint el doll a sota de l'escanyall aconseguia un augment de l'aire, i igualment l'experiència de Beaunier i Gallois (1803) per la qual n'aconseguien menys.

En aquests experiments, però, no s'arriba mai a la relació 1:1 d'aire obtingut respecte l'aigua utilitzada, tal com s'expressa sovint en els tractats del segle anterior. La quantitat d'aire obtingut sempre és menor que la d'aigua utilitzada. En canvi, pel segon mecanisme, el de pistó, s'aconsegueix superar aquesta relació per un cabal dins un rang determinat. L'experiment es va dur a terme amb el tub (b) aplicat a la disposició (a) de la figura 1-33. El tub té uns forats en H per a l'entrada d'aire.

En l'experiment es suprimeix l'escanyall i els fenòmens descrits anteriorment, i es regula directament el cabal d'aigua que entra en el tub. La singularitat rau en el fet que a mesura que disminueix el cabal, es passa de la formació de bombolles a l'estratificació del flux en capes d'aire i aigua, on la proporció d'aire va augmentant, segons queda representat en (c) de la figura 1-33. La quantitat màxima d'aire arrossegada per aquest mecanisme, a més, augmenta amb la longitud de l'arbre. Per arbres llargs, aquest fenomen justificaria la invenció dels espiralls secundaris, que sota certes circumstàncies podrien ser d'utilitat.

1.4.8 Les trompes als inicis del s. XX: les trompes gegants de Charles H. Taylor (Canadà)

Entre finals del s. XIX i principis del segle XX es van construir a Canadà unes trompes d'aigua gegantines per proveir d'aire comprimit a unes instal·lacions mineres. L'aire comprimit s'erigia com un vector energètic amb capacitat per ser transportat a llargues distàncies sense unes pèrdues excessives, i amb una potència suficient per alimentar maquinària pesada.

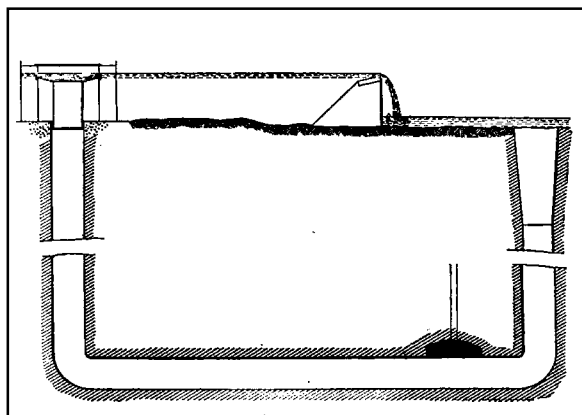


Figura 1-34. Compressor d'aire patentat el 1878 per J. P. Frizell (1878). (FRIZELL, 1901, p.471)

J. P. Frizell (1901, p.426) realitza la patent d'un sistema d'aquest tipus l'any 1878. Es tracta d'una trompa sense espiralls, en que l'aigua es mescla amb l'aire en un embut superior, i és arrossegat per un llarg conducte vertical fins a una profunditat en concordança amb la pressió desitjada, tenint en compte que les bombolles tenen una velocitat ascensional relativa d'uns 0,3m/s, mentre que l'aigua descendeix per la canonada a una velocitat de 1,2 m/s.

En una cambra horitzontal situada a continuació, l'aire es separa de l'aigua cap al seu sostre, per alimentar la canonada d'aire comprimit, mentre que l'aigua retorna cap a la superfície, a una cota inferior que abans. Es fa l'estimació que el seu rendiment hauria d'estar al voltant del 80%.

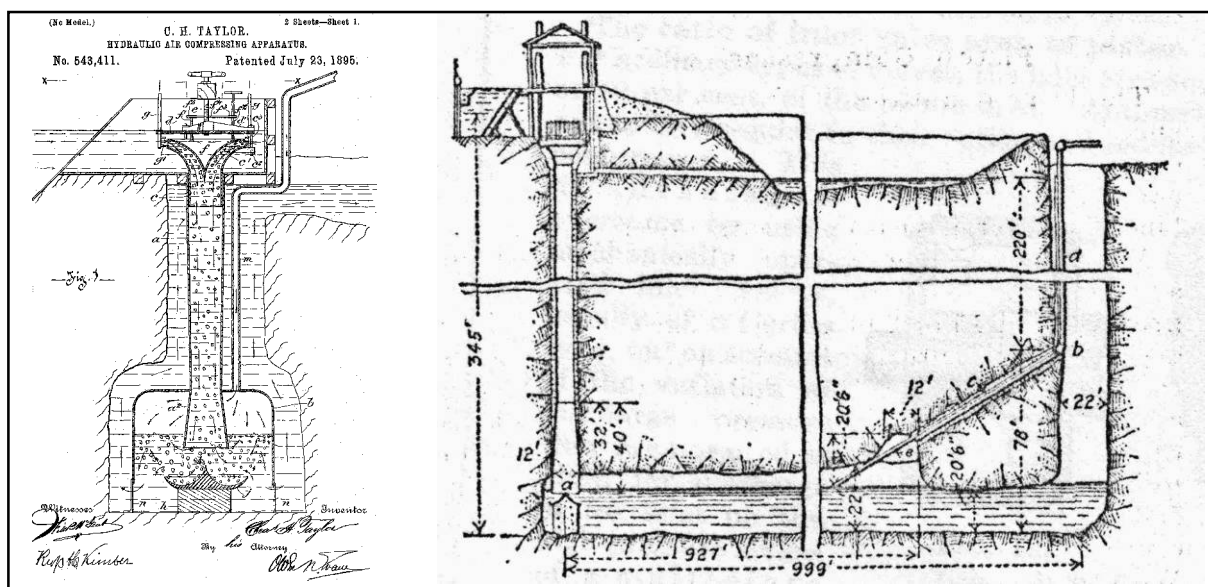
Al cap de poc temps, es van construir trompes o compressors d'aire d'aquest tipus, principalment per part de Charles Havelock Taylor (1859-1953). En la taula 1-2 es presenten les principals característiques d'alguns d'aquests compressors, situats tots, en aquest cas a Canadà.

Sembla ser que la font d'inspiració de C. H. Taylor va ser l'observació del trencament de plaques de gel d'un riu del Canadà per causa de l'aire que s'hi acumulava sota seu. L'aire era introduït sota el gel per una petita cascada situada aigües amunt. El corrent d'aigua s'encarregava d'arrossegar l'aire fins al punt en què el gel s'havia trencat. La comprensió d'aquest fenomen l'hauria portat a idear el compressor hidràulic d'aire.

El principi d'aquests compressors és el mateix que pel model patentat per J. P. Frizell. Els compressors de C. H. Taylor (figura 1-35) "aspiren" l'aire a través d'una munió de tubs de poc diàmetre situats al con d'admissió de l'aigua. El cabal es podia regular des d'un terç del nominal fins al màxim sense que el rendiment global decaigués significativament, per regulació de l'alçada del tap superior. Al llarg de l'evolució d'aquestes màquines, el seu rendiment va anar augmentant, principalment per la millora del sistema d'aspiració de l'aire, els quals sovint eren motiu per demanar una nova patent.

Taula 1-2. Característiques dels compressors realitzats per Taylor⁸⁰.

	Magog (Quebec)	Ainsworth (British Columbia)	Victoria Mining C. (Ontonagon River-Michigan)	Ragged Chute, near Cobalt (Ontario)
Any de construcció	1896	1898	1906	1910
Potència del compressor	83 kW	447 kW	3.200 kW	4.100 kW
Pressió (rel.) de l'aire (hPa.)	3,6 hPa	5,9 hPa	8,0 hPa	8,3 hPa
Pressió de l'aire (m.c.a.)	36,7 m.c.a.-	60,1 m.c.a.	81,3 m.c.a.	84,6 m.c.a.
Eficiència de compressió	70,7 %	62 %	80 %	82%
Desnivell de l'aigua	6 m	26 m	21 m	22,1 m
Cabal màxim d'aigua	2,0 m ³ /s	2,8 m ³ /s	19,4 m ³ /s	23,0 m ³ /s
Cabal nominal d'aire (1 atm)	0,54 m ³ /s-	2,3 m ³ /s-	14,5 m ³ /s	18,2 m ³ /s
Relació de cabals vol. aire / aigua	0,27	0,77	0,75	0,79


Figura 1-35. Compressors de Taylor del tipus construït a Magog i Ainsworth (esquerra), i del tipus construït a “Victoria Mining C.” i “Ragged Chutes” (dreta)⁸¹.

Continua existint la dicotomia entre el sistema sense espiralls de la proposta de J. P. Frizell, a l'estil de la trompa de Bèlidor, i el sistema amb aspiració per multitud de tubs utilitzada per C.H. Taylor, a l'estil de les trompes amb trompilles, però sembla ser que aquest darrer sistema permetia arrossegar més quantitat d'aire amb menors pèrdues.

⁸⁰ Dades procedents de ASME(2007), HAWKING (2009), FRIZELL (1901, p. 470-477), HISCOX (1908, p. 179-187), COMPRESSED AIR MAGAZINE (1963), WEBBER (1901). El llibre de BELL (1906, p. 55-58), a partir de la 4a edició, de 1906 dona una descripció detallada del compressor de Magog. A més, aporta la dada que per una temperatura 18°C per l'aire, i de 19°C per l'aire, per una humitat ambient del 68%, l'aire comprimit tenia una humitat relativa del 35%.

⁸¹ TAYLOR (1895) i ASME MILWAKEE (2007).

L'equivalent a la banqueta és un deflector que dirigeix el flux bifàsic descendent cap als costats i cap amunt, apartant-lo del conducte de baixada i conduint el flux cap a la superfície de la caixa dels vents, per afavorir la separació per decantació de les bombolles d'aire. En aquest no té la funció de mantenir la columna d'aire dins l'arbre, de manera que no requereix regulació. En con divergent de l'extrem inferior de l'arbre fa reduir la velocitat del fluid a la boca de la caixa de vents per fer disminuir les pèrdues per fregament en el xoc amb la banqueta, com els contravents en la trompa.

El major rendiment d'aquests compressors no es pot atribuir a l'augment del cabal d'aire respecte el d'aigua, com es pretenia amb la trompa de la farga. La relació entre el cabal d'aire i el d'aigua no arriba a la unitat en aquest tipus de compressors, mentre que en la trompa podia arribar a ser força superior. Es renuncia a fenòmens complementaris d'arrossegament de l'aire (pistó, posició de la banqueta) per tal de poder augmentar el diàmetre del conducte vertical (arbre) i la seva longitud i augmentar així la pressió.

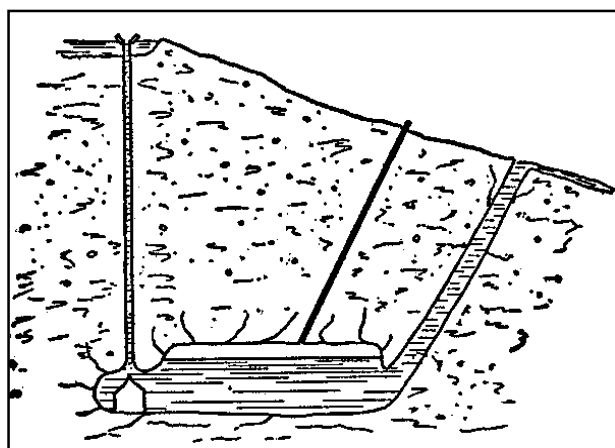


Figura 1-36. Compressor d'aire d'una mina a Michigan, de 3,7 MW. (RUSSELL, 1933, p.92)

Finalment, a més de considerar la saturació de l'aire amb humitat, a la temperatura de l'aigua, Frizell (1901, p. 475) també fa un càlcul estimat de la quantitat d'aire que es dissol en l'aigua i que s'escapa amb ella. Es distingeix entre l'oxigen i el nitrogen, perquè la seva solubilitat per una mateixa temperatura és de l'ordre del doble pel cas de l'oxigen. Segons aquesta diferència es podria justificar el rebuig d'alguns miners a usar aquests compressors adduint que l'aire que expulsen les màquines està enrarit, és a dir, té una deficiència d'oxigen, tot dificultant la respiració.

Els compressors d'aire hidràulics de Taylor apareixen en diverses publicacions durant el segle XX amb anàlisis energètics i de costos, com ara Kamal (1962) o Bidini (1997; 1999).

A principis del s. XX se'n van arribar a construir en altres llocs, com la que apareix citada per Russell (1933, p.90-93) situada a la part nord de Michigan⁸² (EEUU) i utilitzada per a subministrar energia a una explotació minera. En aquest cas es tracta d'un compressor de 3,70 MW per subministrar fins a 17 m³/s d'aire (1 atm.) a una pressió relativa de 7,82 hPa. La profunditat de la cavitat de separació de l'aire era

⁸² Malgrat que les descripcions no són idèntiques, es podria tractar del mateix compressor de les mines Victoria de C.H. Taylor, les quals també estan situades a l'estat de Michigan

d'uns 105 m respecte el punt d'entrada de l'aigua i de 83 m respecte el punt de sortida, de manera que el salt efectiu de l'aigua era d'uns 22 m. No dona les dades del cabal d'aigua necessari, però per un rendiment del sistema del 65%, el cabal hauria de ser d'uns 26 m³/s. La proporció entre el volum d'aire arrossegat i el d'aigua hauria de ser de 0,65. Schulze (1954) presenta la història, inventari i característiques dels compressors hidràulics d'aire als Estats Units, Canadà, i Europa.

També se'n van construir a Europa, segons indica Peele (1910, p.245-246). Es nombren dues instal·lacions en funcionament a Alemanya, de les quals una construïda entre 1907 i 1908, en una mina de plata a Clausthal. Es tractava d'una instal·lació més modesta, de 49,4 kW per proporcionar aire a una pressió relativa de 4,9 hPa, amb un rendiment respecte l'energia hidràulica consumida del 57%⁸³. A més d'aquestes plantes, cita una altra planta desvinculada de la mineria, per a ús general, al riu Shetucket River, a prop de Norwich, a l'estat de Connecticut.

⁸³ Peele (1910, p.247) valora el rendiment de la planta en un 73,6% en base al càlcul de potència necessari per a una compressió adiabàtica de l'aire (38,7 kW). En canvi, la compressió isotèrmica de la mateixa quantitat d'aire (0,167 m³/s) a la mateixa pressió absoluta de 5,91 hPa, requereix teòricament 30 kW. El consum d'aigua essent de 0,0533 m³/s per un desnivell de 100 m, la potència hidràulica disponible és de 52,6 kW, de manera que el rendiment "isotèrmic" és del 57%.

1.5 Altres realitzacions en base al principi funcional de la trompa

Al llarg del temps s'han anat desenvolupant diferents aparells i instruments basats en el mateix principi funcional de la trompa, o bé en el seu invers. A continuació es presenten alguns exemples.

1.5.1 La trompa de buit de laboratori

Amb aquest instrument s'aprofita la capacitat d'aspirar de la trompa per aconseguir un buit de l'ordre del 98% respecte la pressió atmosfèrica, és a dir, fins una pressió d'un 2 kPa, o inclús inferior. Es connecta el recipient en què es vol fer el buit a la zona de l'escanyall, i el doll d'aigua arrossega els gasos que hi pugui haver al recipient. El fluid bifàsic resultant s'evacua tot passant per uns conductes que afavoreixen amb la seva forma l'augment de pressió del fluid.

El grau de buit depèn del cabal d'aigua, i aquest és funció de la pressió d'alimentació, la qual fàcilment pot arribar en qualsevol instal·lació domèstica a 3 o 4 hPa. En comparació amb la trompa de la farga, aquesta pressió equivaldria a una alçada d'aigua per sobre de l'escanyall de 30 o 40 metres, mentre que aquesta alçada solia ser d'entre 1,5 i 2,5 m. El seu rendiment és molt baix, i disminueix a mesura que es va aconseguint un buit més gran en el recipient. Pot ser alimentat des de qualsevol aixeta de tipus domèstic d'aigua de la xarxa. La seva simplicitat i efectivitat li donen vida com a instrument de laboratori.

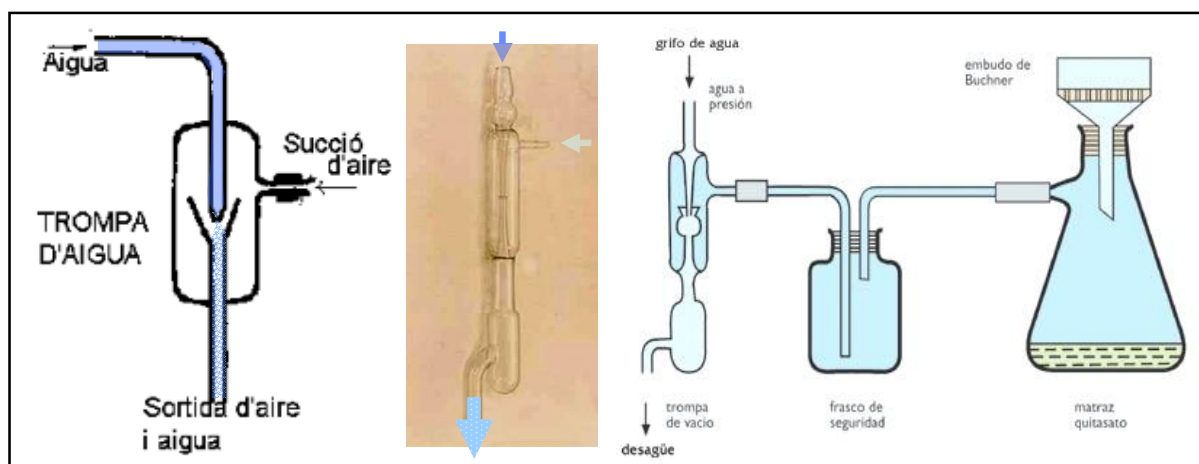


Figura 1-37. Diferents representacions de la trompa de buit de laboratori⁸⁴.

⁸⁴ Figures procedents de: VALLS (2010), i PANREAC (2010).

1.5.2 El polvoritzador

En el polvoritzador, un fluid és impulsat per uns petits orificis a gran velocitat de manera que es produeix una depressió suficient per reduir a polsim un líquid. En la figura 1-38 es representa un polvoritzador en què el fluid impulsor és aire a suficient velocitat com per elevar el líquid des del seu contenidor i polvoritzar-lo. La mescla resultant conté un volum molt més gran d'aire que de líquid.

Els carburadors d'automòbil funcionen per aquest principi. Aquest és un clar exemple de les bones

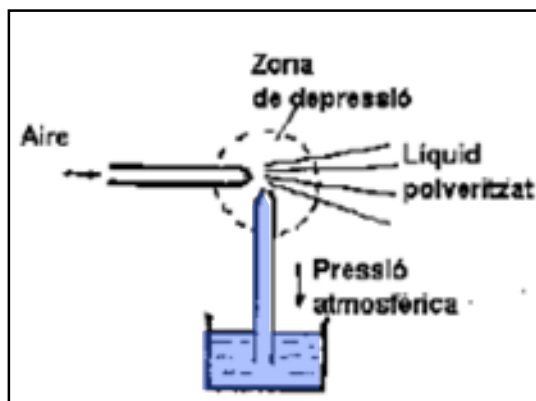


Figura 1-38. Principi funcional del polvoritzador per aire a pressió. (de: VALLS, 2010)

prestacions de dosificació d'aquests dispositius. La velocitat de l'aire determina la quantitat de combustible arrossegada. A la vegada, la velocitat de l'aire és funció del règim del motor, que aspira un major o menor cabal d'aire, i del tancament de la papallona.

En el cas que sigui el líquid el que aporta la pressió, l'alta velocitat amb la què surt per un petit orifici fa que es polvoritzi i es mescli amb l'aire de l'entorn. Seria el cas dels injectors en els motors Diesel.

1.5.3 Els injectors i els ejectors

L'ejector accelera un corrent de fluid produint una depressió o buit. L'ejector també s'anomena exhaustor. S'anomena injector quan es desaccelera in fluid per produir una compressió. El fluid pot ser aigua, vapor d'aigua, aire o qualsevol altre gas. Aquesta depressió es pot utilitzar per elevar un altre fluid, el qual es mescla amb el primer. S'han utilitzat ejectors, per exemple, per introduir aigua en una caldera per mitjà de vapor.

Russell (1933) explicava el funcionament de la trompa d'aigua recurrent al concepte de la "vena contracta", representat en la figura 1-39. És un fenomen similar al què es produeix en els ejectors, però amb una velocitat del fluid molt més alta en el segon cas. En la figura 1-40 es mostra l'esquema d'un ejector d'aire comprimit aplicat per elevar aigua des d'una cota inferior.

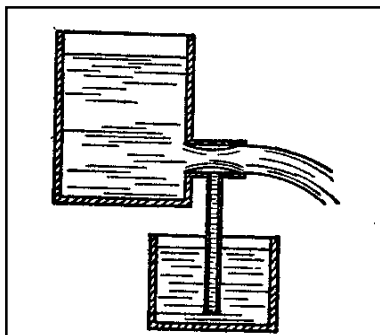


Figura 1-39. Elevació d'aigua per l'efecte *vena contracta*. (RUSSELL, 1933, p.90)

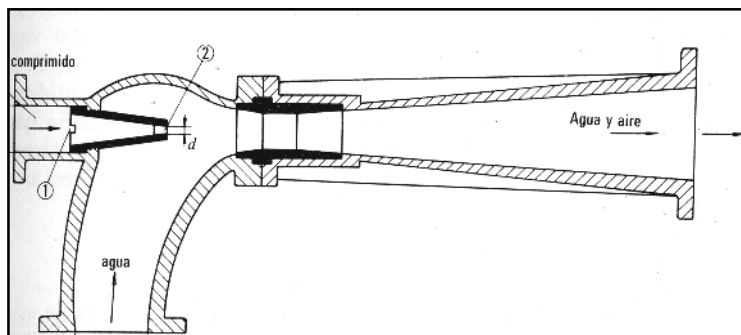


Figura 1-40. Ejector d'aire comprimit per elevar aigua (MATAIX, 1973, p.145)

1.5.4 El transport de fluids bifàsics

El fluid bifàsic que és present en tots els dispositius anteriors, com també en la trompa, ha estat al llarg del temps i també en l'actualitat, objecte d'estudi. Es troba en molts intercanviadors de calor, en calderes, equips de refrigeració, transport d'hidrocarburs, de gas natural o de petrolis, sistemes de depuració d'aigües residuals, plantes de tractament d'aigües, reactors químics, entre molts d'altres.

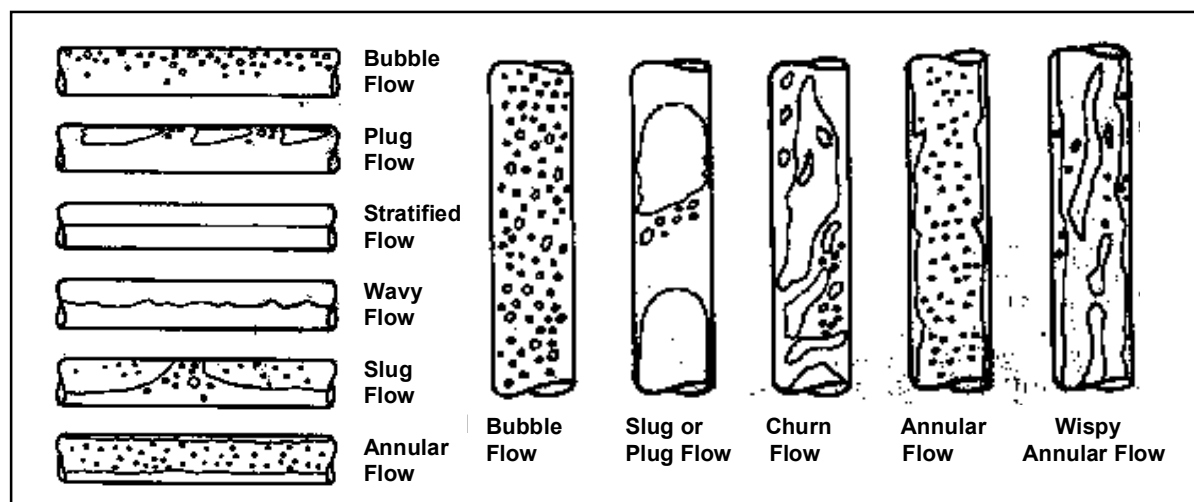


Figura 1-41. Diferents tipus de flux bifàsic líquid-gas en canonada horitzontal o vertical. (WHITE, 2001; SHELTON, 2002)⁸⁵.

En funció de la densitat de cada fluid, de la proporció relativa entre ells i de la velocitat superficial⁸⁶ de cadascun, es poden donar diferents tipus de flux. A mode indicatiu, en la figura 1-41 es presenten diferents tipus de flux bifàsic líquid-gas que es poden donar en canonades horitzontals i verticals.

⁸⁵ La traducció proposada pels termes és, de dalt a baix i d'esquerra a dreta: flux en bombolla dispersa, pistó, estratificat, estratificat ondulat, pulsat, anular; flux de bombolla, pistó o pulsat, agitat, anular i anular turbulent.

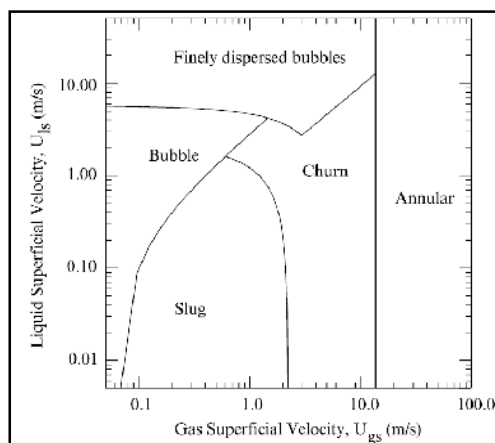


Figura 1-42. Diagrama del tipus de flux bifàsic entre un líquid i un gas en funció de la seva velocitat superficial.
(NENES [et al.], 1996)

Existeixen treballs que relacionen el tipus de flux amb el terme d'energia específica de cadascuna de les dues fases, és a dir, amb el producte de la densitat per la velocitat superficial al quadrat de cada fase (terme $\rho \cdot v^2$). Pel cas de l'aigua, es pot relacionar directament amb la velocitat superficial de cada fase. A mode indicatiu, en la figura 1-42 es presenta el diagrama per als tipus de flux que es donen entre aire i aigua. En general es tracta de treballs empírics, de manera que altres autors donen diagrames força diferents sobre el mateix assumpte⁸⁷

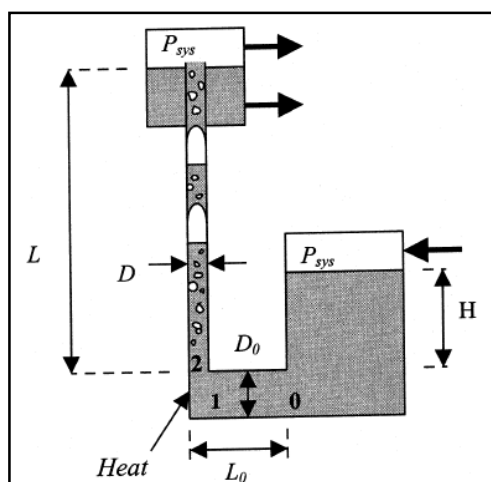


Figura 1-43. Bomba per bombolleig i flux pistó de líquid refrigerant,
(SHELTON, WHITE, 2002).

El flux bifàsic pot estar compost pel vapor del mateix líquid. Per diferència de densitats i per flux pistó s'aprofita en alguns dispositius per afavorir el moviment del fluid. L'ebullició del líquid pot portar a la generació de vapor que arrossegi part de la massa líquida. L'efecte és similar al moviment convectiu que es produeix en una placa solar quan existeix una diferència de temperatura, i de densitat, entre el líquid del dipòsit i el de la placa. En existir vapor, el moviment s'accelera. Aquest fenomen s'aprofita en circuits de refrigeració com el de la disposició que es mostra en la figura 1-43.

1.5.5 La font d'Heró (10 - ~70 dC)

El primer sistema d'elevació d'aigua per compressió de l'aire sembla que va ser la font de Heró d'Alexandria (10 - ~70 dC). Es tracta d'un giny hidropneumàtic pel qual a partir de dos dipòsits estancs d'aigua situats a diferents alçades, s'aconsegueix que l'aigua del dipòsit superior aportí aigua a un

⁸⁶ En aquest àmbit, la velocitat superficial de cada fase és la que tindria si ocupés tota sola la totalitat de la secció transversal de la canonada, és a dir, la relació entre el cabal volumètric de cada fase i l'àrea de la secció transversal.

⁸⁷ El diagrama de la figura 1-42 procedeix de NENES ([et al.], 1996). OERTEL (*Prandtl's essentials of fluid mechanics*, 2004) conté un capítol sencer dedicat als fluxos multifàsics, en el qual es presenten resultats diferents.

sortidor situat a major alçada que ell mateix. L'esquema del muntatge que vaig realitzar l'any 2007 es mostra en la figura 1-44.

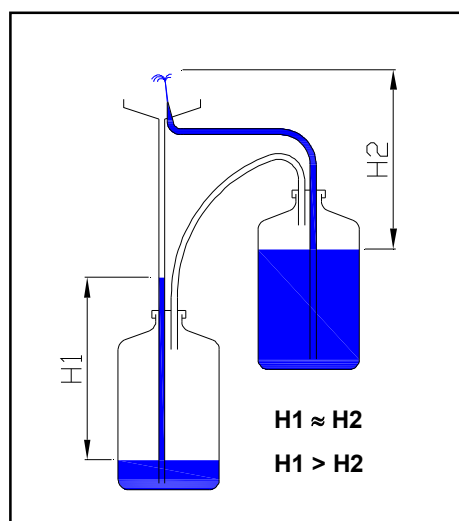


Figura 1-44. Esquema del funcionament de la font d'Heró.

L'explicació és senzilla. L'aigua del sortidor va a parar al dipòsit inferior a través d'un conducte que permet l'entrada de l'aigua al dipòsit, però no la sortida de l'aire del mateix. Un segon conducte comunica les atmosferes del dipòsit inferior i el superior. L'aigua del dipòsit superior disposa d'una sortida submergida per arribar al sortidor, per la qual no pot sortir l'aire del mateix. D'aquesta manera, a mesura que entra aigua al dipòsit inferior, l'aire dels dos dipòsits es va comprimint, i transmet aquesta pressió a l'aigua del dipòsit superior, que alimenta el sortidor situat a major alçada.

Un cop iniciat el moviment, l'energia per vèncer les pèrdues per fregament del conjunt prové de la pèrdua d'alçada que experimenta l'aigua en passar del dipòsit superior a l'inferior. L'aire fa de transmissor de les pressions, i passa del dipòsit inferior al superior amb un guany d'energia potencial uns 700 cops inferior a la que perd l'aigua en fer el camí invers.

1.5.6 La bomba d'elevació per aire comprimit

El principi de la trompa, aplicat a la inversa, és el que explica el funcionament de les bombes que eleven un líquid a partir d'aire comprimit (o un altre gas) sense cap mena de pistó o element mòbil. Moulan (1931)⁸⁸ els anomena pulsòmetres i emulsors, i n'indica la seva difusió en la indústria química per al tractament dels àcids. La definició que dóna d'emulsor és molt simple: un tub obert per ambdós extrems, una part submergida verticalment en el líquid a elevar, i l'altra sobresortint del mateix. En injectar aire comprimit pel seu extrem inferior, el líquid ascendeix per l'interior del tub amb tanta major facilitat com més estret és el tub, com més viscos és el líquid i com més comprimit és l'aire.

És singular que els primers intents de patentar un sistema d'aquest tipus, als EEUU, va ser rebutjat per contradir les lleis de la física i no ser viable la seva realització. A partir d'aquest primer rebuig es van patentar diferents tipus de bombes d'aire, introduint-hi millores i variacions, sobretot pel que fa al tipus de broquet inferior, és a dir, al lloc on es mescla aire i aigua. Davis i Weidner (1911) recullen la història

⁸⁸ MOULAN (*Tratado de mecànica industria*, 1931, p.1137) cita un treball de "Pulhé" sobre aquest tipus de bombes, però es deu referir al Dr. J. G. Polhé, que apareix en el llibre de Hiscox (1908, p.159) com autor de dues patents sobre el mateix tema: POHLÉ (1892).

dels inicis d'aquestes bombes. Es mostren alguns dels esquemes de les primeres patents als EEUU en la figura 1-45.

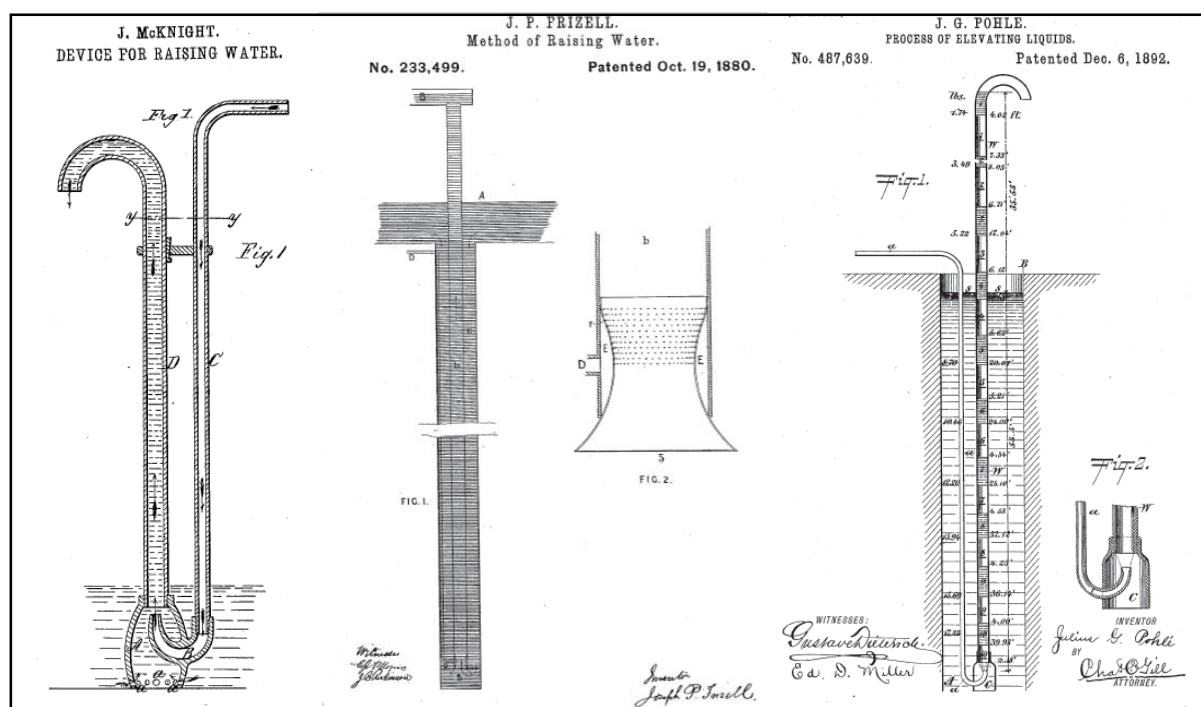


Figura 1-45. Tres esquemes de bombes d'elevació de líquids per acció de l'aire comprimit de finals del s. XIX als EEUU. Per ordre d'esquerra a dreta: McKnight (1864), Frizell (1880), Pohlé (1892).

Existeixen obres de referència exclusivament dedicades al tema del bombament d'aigua a partir d'aire comprimit⁸⁹, i moltes que hi dediquen almenys un capítol sencer. La teoria que permet explicar-ne el funcionament és senzilla en un principi, però degut a la complexitat del fenomen i a la multitud de factors de què depèn, sovint no serveixen per fer prediccions o estimacions del comportament del sistema en canviar un o altre element, de cara a la seva optimització. Una primer element a tenir en compte és el diferent tipus de flux que es pot donar segons les característiques de l'emulsió d'aire i aigua. En IVENS (1914) s'inclou una il·lustració en què es vol mostrar el diferent flux que es dona en una bomba de Frizell, emulsió per bombolleig, i en una bomba de Pohlé, flux pistó o polsat. (veure figura 1-46)

Per una situació ideal d'equilibri, el primer requeriment que s'ha de complir és que la pressió de l'aire ha de ser superior a la pressió de l'aigua a la profunditat en què es troba la injecció d'aire, atès que si no fos així, l'aire no arribaria a sortir del seu conducte. El segon requeriment és que la quantitat d'aire injectat ha de ser suficient per tal que la columna d'emulsió formada dins del conducte vertical pesi menys que la columna d'aigua existent a l'exterior del conducte, atès que si no fos així, l'aigua de la bassa no podria

⁸⁹ DAVIS; WEIDNER. *An investigation of the air lift pump*, 1911. IVENS. *Pumping by compressed air*, 1914.

entrar al conducte per la seva part inferior. La disminució de la densitat conjunta de l'emulsió permet que aquesta arribi a una alçada superior que la de la superfície de la bassa.

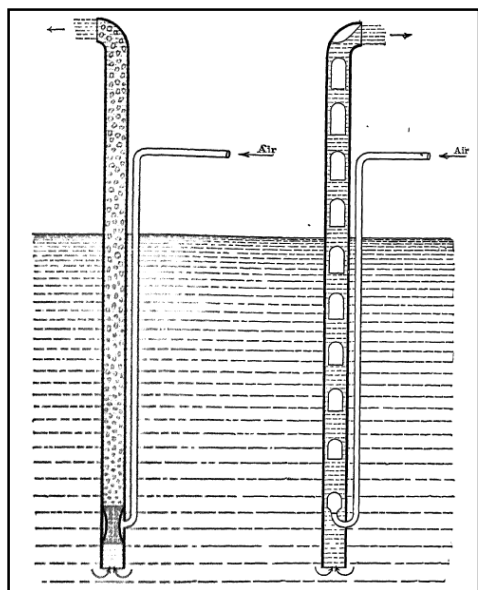


Figura 1-46. Flux en l'interior de la bomba d'aire de Frizell (1880) respecte la de Pohlé (1892).
(IVENS, 1914, p.96)

Segons Pohlé, es tracta d'una màquina d'expansió perfecta de l'aire comprimit, que hauria de permetre assolir rendiments energètics de fins al 80% per grans diàmetres, i habitualment superior al 70%. El secret d'aquest elevat rendiment rauria en l'alta velocitat amb la qual l'aire i l'aigua són evacuats per la part superior del conducte, sense la qual no es produiria el comportament de flux pistó, on cada bombolla d'aire ocupa tota la secció de la canonada i s'expansiona fins a la pressió atmosfèrica. Solament en el cas de tubs de petit diàmetre es pot produir el mateix efecte. En aquest cas la força atractiva de la capil·laritat faria el paper de la velocitat. En ambdós casos, s'aconsegueix minimitzar la quantitat d'aigua que passa d'una capa superior a una d'inferior dins de la canonada travessant la capa d'aire impulsora, és a dir, el que es coneix com a pèrdues per lliscament entre aire i aigua⁹⁰.

L'altre element que indueix pèrdues d'energia és el fregament del fluid amb les parets de la canonada. Com major és la velocitat, majors són les pèrdues per fregament, mentre que a menor velocitat, major són les pèrdues per lliscament. Per aquest motiu, existeix una proporció òptima d'aire en la mescla, que depèn a la vegada del tipus de flux que es desenvolupa dins de la canonada.

Donat que el veritable element impulsor és la pressió de l'aigua de la mateixa bassa, aquest tipus de bombes requereixen d'una submersió important. Moulan (1931, p.1138) dona la recomanació que la submersió sigui de 1,25 cops l'alçada a la qual es vulgui elevar l'aigua, és a dir, que el 56% de la canonada estigui sota el nivell de l'aigua. Peele (1810, p. 443) recull diverses experiències sobre sistemes d'aquest tipus, per diàmetres, cabals, alçades i submersions diferents, i arriba a donar un valor habitual per al seu rendiment energètic 30 al 45%, havent arribat en alguns casos al 50%.

En Hiscox (1908, p.162) es dona una relació entre el rendiment de la bomba i el grau d'immersió del tub que coincideix a grans trets amb els valors indicats en altres obres. El rendiment disminueix a mesura que augmenta l'alçada de bombeig, des d'un 50% per una alçada 0,5 cops la submersió (67% del tub sota l'aigua), fins a un rendiment del 25% per una alçada de 2 cops la submersió (33% del tub sota l'aigua).

⁹⁰ HISCOX. *Hydraulic engineering*, 1908, p.159

Igualment, si l'alçada de bombament és massa gran, el rendiment disminueix encara que es mantingui el grau de submergència. Això es deu al fet que no totes les proporcions de mescla entre aire i aigua són físicament possibles. El cabal d'aire (a pressió atmosfèrica) necessari pot ser d'entre 3,9 i 4,5 cops el cabal d'aigua elevat, o més, per tal que la columna d'emulsió dins de la canonada pesi menys que la columna d'aigua a l'exterior de la mateixa.

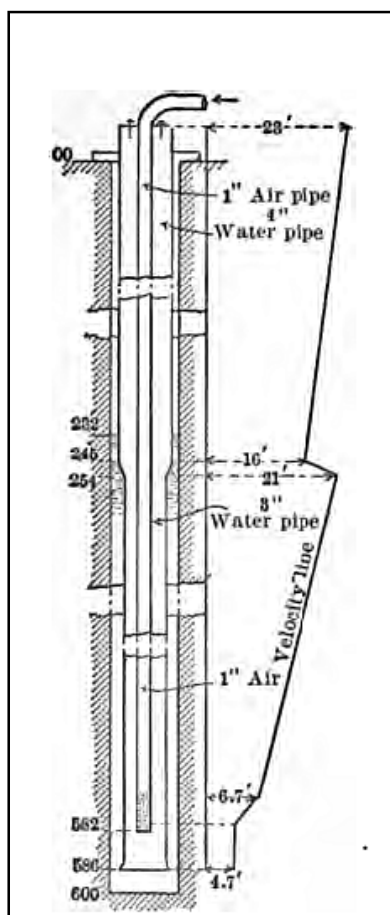


Figura 1-47. Bomba d'aigua en una sola etapa, amb reducció de velocitat de l'emulsió.
(HARRIS, 1910, p.59)

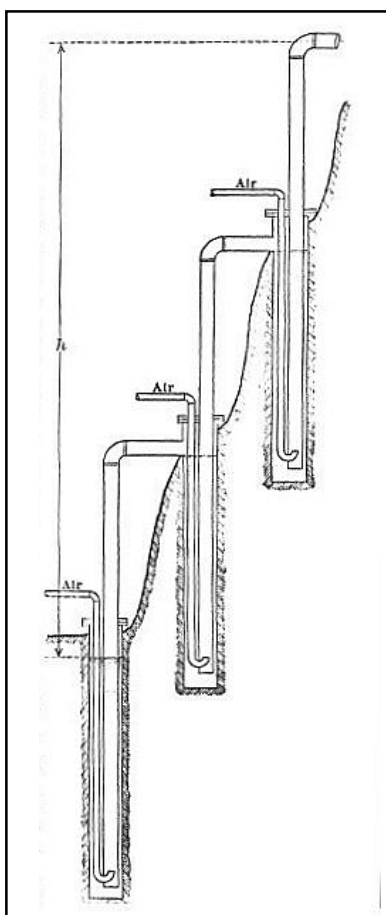


Figura 1-48. Bombament multietapa equilibrat.
(IVENS, 1914, p.109)

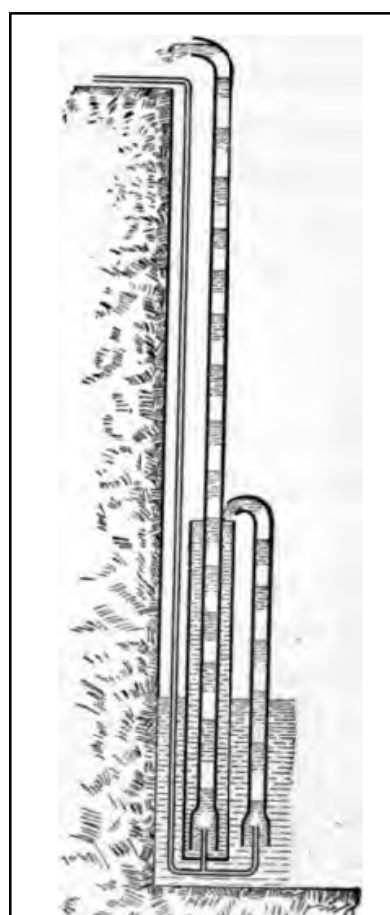


Figura 1-49. Bombament dúplex o compost, proposat per J. G. Pohlé, multietapa desequilibrat.
(HISCOX, 1908, p. 721)

Un cas amb un rendiment superior (50%) al que correspondria per una bomba com les descrites fins al moment, és el que es presenta en la figura 1-47⁹¹. S'aconsegueix reduir les pèrdues per fregament mitjançant l'augment progressiu del diàmetre de la canonada a cotes més elevades. Donat que l'aire

⁹¹ La bomba proporciona 454 l/min, per un consum d'aire 6 cops el cabal d'aigua, 2,7 m³/min, una submergència de 100 m (el 58% dels 170 m de longitud total del tub) i una alçada de bombament de 70 m.

comprimit s'expansiona a mesura que s'eleva en la canonada, la velocitat de l'emulsió augmentaria, i amb ella, les pèrdues per fregament. En augmentar progressivament la secció, la velocitat és menor que si la canonada tingués una secció constant al llarg de la canonada. La disposició recorda als cons divergents dels ejectors, o del tubs venturi, en els quals, la velocitat del fluid disminueix a la vegada que augmenta la seva pressió.

La manera habitual d'aconseguir una major alçada de bombament sense perjudicar el rendiment consisteix en disposar diferents bombes d'aire en sèrie, constituint un bombament multietapa o compost⁹². Normalment es disposa que la pressió d'aire necessària en cada etapa sigui la mateixa per tal que es pugui alimentar des d'un mateix compressor. Es té documentat el cas d'un sistema de bombament d'aquest tipus en un pou d'una mina d'or a Bendigo (Victòria, Austràlia) a finals del s. XIX, ideada per George Lansell, per un desnivell total de 422 m⁹³. El sistema es representa en la figura 1-48.

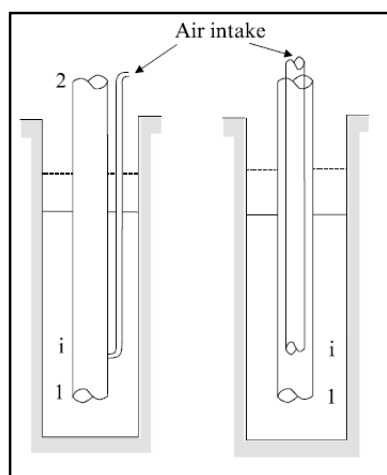


Figura 1-50. Dues possibles disposicions dels tubs d'aire i aigua.

(de: NENES [et al.], 1996)

Per profunditats d'aigua petites, l'alçada de bombament en cada etapa seria també petita i la pressió d'aire requerida pot ser molt inferior a la disponible o òptima. En aquests casos s'opta per un sistema compost desequilibrat per les primeres etapes, és a dir, que funcionen amb una immersió i pressió d'aire menors, les quals alimenten unes segones etapes de major immersió i pressió d'aire. Aquesta disposició és la representada en la figura 1-49.

El fet que el tub d'aire comprimit passi per fora del tub d'elevació, o que passi pel seu interior en disposició concèntrica, afecta de manera important al comportament del conjunt i a les seves prestacions. Aquesta diferent disposició dels elements es representa en la fig. 1-50.

L'arrencada d'un sistema de bombament per aire requereix una pressió d'aire superior a la que es requereix per mantenir-lo en marxa, donat que a l'inici cal proporcionar l'energia cinètica suficient a tota la columna d'aigua que té per damunt. Segons Ivens (1914, p.108) fa falta una pressió equivalent a 2,31 cops la pressió de l'aigua en el punt d'injecció de l'aire, és a dir, a la profunditat d'immersió del tub. Es pot donar el cas que un compressor apte per trafegar el cabal nominal del bombament no tingui la pressió suficient per iniciar el moviment. Existeixen patents que aborden aquest problema i el solucionen per divisió de l'arrencada en dues fases, incorporant una alimentació auxiliar d'aire a una profunditat menor

⁹² En l'original proposa la denominació en anglès "compound" que s'ha traduït com "compost".

⁹³ PENMAN (*Compressed air practice in mining*, 1922, p. 198).

que produeix l'emulsió de la columna d'aigua abans d'injectar l'aire a la part més profunda. Dues d'aquestes patents són: BACON (1895) i HARRIS (1906)

Els compressors hidràulics de Taylor tenen un sistema de seguretat per evacuar l'excés de pressió que actua com una bomba d'elevació per aire comprimit. Si arriba més aire a la "caixa dels vents" del que en surt pel conducte situat a la part més alta, s'acumula tot desplaçant la superfície de l'aigua a una cota inferior. L'element de seguretat consisteix en una segona canonada amb un dels extrems submergit en l'aigua dins d'aquesta cambra fins a la cota límit desitjada per l'aigua i amb l'altre extrem situat just a sota la superfície de l'aigua a la zona de descàrrega del cabal líquid a l'entorn. Quan el nivell de l'aigua baixa sota la pressió de l'aire fins a la cota límit, l'aire pot entrar a la canonada d'escapament i expulsa l'aigua continguda en la canonada formant un guèiser que sobresurt una bona alçada per damunt de la superfície de l'aigua a l'exterior. En el compressor de Ragged Chutes de 1910, malgrat estar en desús des de feia molts anys, es produïa aquesta descàrrega de manera periòdica. Fins a finals del segle XX va constituir un atractiu turístic.

Schulze (1954) cita l'existència d'un compressor hidràulic d'aire en combinació amb una bomba d'elevació d'aigua en funcionament al riu Ebre, als entorns de la ciutat de Saragossa, a principis dels anys 1920. Es tractava d'un bombament en tres etapes per elevar aigua a 7,5 m, a 15 m i a 22,5 m respecte el nivell del riu. Dóna dades referents al seu fabricant, i també sobre els cabals d'aire i aigua implicats.

En l'actualitat es continuen publicant estudis i treballs sobre la teoria, el càlcul, la simulació i l'aplicació pràctica de les bombes d'aire, com ara NENES ([et al.], 1996), WURTS ([et al.], 1994), entre molts altres. També existeixen empreses⁹⁴ que comercialitzen equips d'aquest tipus, per al tràfec especialment de sorres, aigües residuals, fangs, per a ús en piscifactories, etc.

Existeixen altres tipus de bombes, més complexos, que aprofiten alguns dels principis de la bomba d'aire. Un exemple és la bomba en què es van introduint elements sòlids i mòbils en la canonada per tal que confinin aire i aigua i s'eviti el lliscament entre ells. Un altre exemple és l'ariet hidràulic, amb el qual l'energia cinètica de l'aigua en la seva descàrrega per una canonada es converteix en pressió en ser aturada en sec per una vàlvula, la qual s'acumula en una cambra d'aire i impulsa una certa quantitat d'aigua a una alçada superior.

⁹⁴ Algunes empreses ofereixen aquests productes, com Sanitaire (ITT Industries) o Airlift technologies.

1.5.7 Les mescles bifàsiques per a la reducció de fricció de lliscament líquid-sòlid

A mig camí dels coixins pneumàtics o hidrodinàmics, les mescles bifàsiques poden servir per reduir les friccions entre el casc d'una embarcació i l'aigua. Malgrat quedar fora de l'abast del present treball, es coneixen algunes iniciatives en el sentit de generar un flux de bombolles disperses per la superfície del buc. En el saló nàutic de Barcelona de l'any 2008, la drassana Quer de Port de la Selva mostrava un sistema d'aquest tipus per embarcacions esportives.

La injecció d'aire sota la línia de flotació és molt utilitzada en els vaixells trencaglaç per evitar l'efecte ventosa amb la fase sòlida. En aquest cas es tracta d'un sistema trifàsic, per la presència d'aire, aigua i glaç.

La disminució de les forces de fricció pot resultar apreciable, encara que les iniciatives es basen, fins al moment, en estudis empírics amb poc suport documental. Pot tractar-se d'una futura línia de treball, d'interès en la propulsió elèctrica híbrida. Donat que el grup electrogen treballa a un règim constant, els gasos d'escapament es podrien aprofitar per fer aquesta funció, amb uns costos reduïts.

Capítol 2. Construcció i modelització d'una trompa d'aigua

En aquest capítol es descriuen els elements més significatius de la maqueta de trompa a escala 1:9 i de la trompa pilot a escala 1:3 que s'han construït al laboratori del DEE de la UPC. Posteriorment es van realitzar mesures de pressió i cabal per tal de donar fonament a la modelització de la trompa.

El model que millor s'adapta al comportament de la trompa és el del compressor volumètric d'aire, per arrossegament d'aire mesclat amb aigua en proporció constant. Es presenten les corbes de prestacions més significatives de la trompa pilot en les seves possibles configuracions. També s'avaluen, des del punt de vista teòric, les referències trobades en la bibliografia sobre les característiques de l'aire comprimit i de l'aigua sortint de la trompa.

El model de la trompa permet fer-ne l'estudi energètic, que permet fonamentar les possibles aplicacions de la trompa d'aigua, millores, recuperació d'energia i aplicacions del seu principi funcional.

2.1 Construcció d'una trompa pilot per al laboratori

L'objectiu de la construcció d'un model pilot de trompa és el d'avaluar les possibles aplicacions que pot tenir una màquina tan senzilla de construcció en l'àmbit de la sostenibilitat o el desenvolupament. Es tracta de no perdre uns coneixements adquirits al llarg de molts segles sobre l'aprofitament de l'energia hidràulica, en les seves variants geogràfiques i històriques, de cara a noves utilitats en combinació amb altres tecnologies i per altres necessitats.

2.1.1 Maqueta en metacrilat de la de la trompa de referència

S'ha fet una maqueta de metacrilat transparent a escala reduïda 1:9 en base als croquis i plànols de Richard (1838). S'ha escollit un material transparent per a fer la maqueta per tal de fer visibles els fenòmens que es produeixen en cada part del recorregut de l'aigua. Les peces de metacrilat s'han unit entre elles per mitjà del clorur de metil. Les unions s'han reforçat amb visos de 3 mm de diàmetre.

L'aigua que caldria evacuar de la caixa de vents es recircula cap a la part superior per mitjà d'una bomba de poca potència. El cabal mig que ha de proporcionar la bomba és de 1,5 l/s, per un desnivell entre la part sortida de la caixa dels vents i l'escanyall de poc més d'un metre. El cabal es regula per escanyament del conducte a la sortida de la bomba, per tal de mantenir l'alçada de l'aigua per sobre l'escanyall en un valor equivalent al que tindria en una trompa alimentada per un canal d'aportació.

L'escanyall està format per dues planxes també de metacrilat que li donen la forma rectangular. L'obertura es pot regular canviant la posició de les planxes. A sota hi té els espiralls principals. No té espiralls secundaris.

2.1.2 Construcció de la trompa pilot a escala 1:3

La trompa construïda s'ha realitzat a una escala reduïda 1:3 a partir de la descripció que en fa Richard (1832) per tal de poder assajar la màquina amb més comoditat, menor consum d'aigua i menor cost econòmic. Hom vol definir els paràmetres característics del seu funcionament sense haver de recórrer a l'escala natural. Donat que igualment el cabal necessari és força important, d'uns 17 l/s, és a dir, la novena part dels 153 l/s de l'original, s'ha decidit recircular l'aigua des de la caixa dels vents fins a la capçalera mitjançant unes bombes centrífugues.

El dispositiu es compon de:

1. Un conjunt superior que dirigeix l'aigua cap a l'embocadura de l'arbre.
2. Un arbre vertical d'acer estirat.
3. Un dipòsit cilíndric hermèticament tancat, la caixa dels vents.
4. Una sortida per a l'aire encastada a la part superior de la caixa dels vents.
5. Dues bombes centrífugues, que aspiren l'aigua de la caixa dels vents.
6. Dues canonades d'elevació de l'aigua, amb una vàlvula de bola cadascuna.

El conjunt superior consta de dos colzes de PEAD de diàmetre 90 mm de diàmetre exterior i uns 70 mm de diàmetre interior, enroscats a una T de llautó, de 3 polzades de diàmetre, és a dir, 76 mm. A la boca vertical de la T es va enroscar un tap de ferro de 3 polzades al qual es va practicar un forat quadrat de 60 mm de costat, per tal de soldar-hi un tram de 50 cm de tub quadrat d'acer estirat que constitueix l'embocadura de l'arbre. A l'extrem inferior d'aquest tram s'ha soldat una brida rodona de ferro de diàmetre 115 mm, la qual té un forat quadrat al centre de costat 60 mm i quatre forats de diàmetre 13 mm per cargols M12 repartits pel voltant.

La pressió a la capçalera de l'arbre es mesura mitjançant un manòmetre. Es pot regular fins al valor desitjat mitjançant el tancament parcial de les vàlvules de bola de les canonades d'elevació. Es poden assolir pressions d'entre els 0,5 m.c.a. i 2 m.c.a. que correspondrien a la de la trompa original.

A l'interior d'aquest tram de tub quadrat s'han fixat dues làmines de ferro que provoquen un estretiment progressiu de la secció de pas. En el seu extrem inferior és de 57 mm de llarg per 20 mm d'ample, essent aquesta darrera dimensió regulable mitjançant un cargol. D'aquesta manera el flux d'aigua s'accelera en el seu pas per l'estrangulació. S'han practicat dos forats quadrats de costat 20 mm, un a cada costat del tub, just al darrera de les citades làmines. Aquests forats són els espiralls.

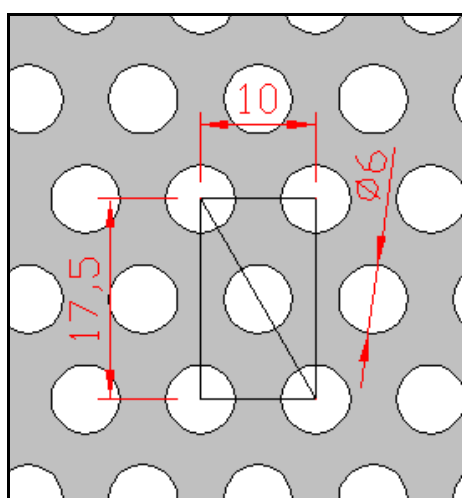
Per tal de visualitzar el comportament de l'aigua i de l'aire en la zona de l'estrangulació, s'han practicat dues obertures a dos costats oposats del tub, a la mateixa alçada, de dimensions 8 cm x 3 cm, s'han cobert amb planxa de metacrilat de 2 mm de gruix, segellat amb silicona i assegurat un element compressor contra el tub. D'aquesta manera es pot mirar a través del doll d'aigua.

L'arbre pròpiament dit està format per tub d'acer estirat de secció quadrada i costat exterior 60 mm. El tram de 50 cm que forma part de la capçalera és la seva part superior. Es disposa d'un tram de 2,5m i dos trams de 3 m de llarg cadascun. Cada tram té una brida rodona en cada extrem, del mateix tipus que la descrita per la capçalera, de manera que es poden muntar un, dos o tres trams consecutius per obtenir un

arbre de 3, 6 i 9 m respectivament. En cada tram s'han practicat unes obertures similars a les descrites per a la capçalera, protegides amb planxa de metacrilat, per tal d'observar el comportament del flux d'aigua i aire. Entre brida i brida es col·loca una junta per evitar fugues d'aigua, que serien més molestes que perjudicials.

La caixa dels vents és un dipòsit cilíndric de ferro col·locat verticalment, de 200 mm de diàmetre i 830 mm d'alçada, amb un forat quadrat de 60 mm en la tapa superior i quatre forats roscats al seu voltant, per fixar-hi l'arbre. A 11 cm per sota de la tapa existeix un disc de tefló amb un forat quadrat central de 60 mm de costat i la resta plena de petits forats distribuïts matricialment que han de permetre el pas de l'aire i impedir el pas dels esquitxos i gotes d'aigua cap a la sortida de l'aire.

Segons s'indica en la figura 2-1, la matriu de forats del disc de tefló representa una secció total de pas de $0,010 \text{ m}^2$, que equival a l'àrea d'un cercle de 114 mm de diàmetre. El disc obstrueix el 68 % de la secció transversal de la caixa dels vents. Aquestes característiques han de permetre que l'aire passi cap a la part superior de la caixa dels vents amb una pèrdua de càrrega prou reduïda, i impedir el pas dels esquitxos de l'aigua. Igualment, l'aigua que s'acumuli a la part superior per arrossegament, podrà tornar a caure a la part inferior.



Coefficient d'emplenament:	67,7 %
Coefficient de pas:	32,3 %
Diàmetre de la caixa de vents:	200 mm
Secció de pas per a l'aire:	10.152 mm^2
Diàmetre equivalent de pas:	114 mm

Figura 2-1. Geometria del separador de gotes de la caixa dels vents. Càlcul de la secció pas d'aire.

La banqueteta es col·loca una mica per sota del disc de tefló. S'han provat diversos tipus de banquetetes: una planxa plana, una planxa corba que dirigia el flux cap a les parets de la caixa dels vents i banquetetes amb altres morfologies.

A la part superior del dipòsit, al lateral, existeix un tub encastat tangencialment al costat del dipòsit de 36 mm de diàmetre, per on surt l'aire de la caixa dels vents. És en aquest punt on es mesura la pressió de

l'aire. Aquest tub es pot tancar totalment o parcial mitjançant una vàlvula de bola, que condueix l'aire cap al sistema de mesura del cabal d'aire.

Just a sota del disc de tefló, a l'alçada de la banqueta, s'ha practicat un forat circular de 140 mm diàmetre, el qual permet accedir a l'interior de la caixa dels vents sense haver de desmuntar tota la resta d'elements. A més, el tancament d'aquesta obertura es fa mitjançant una planxa de metacrilat transparent que deixa veure-hi a través seu.

Taula 2-1. Característiques de les bombes centrífugues de recirculació.

Marca i tipus:	SUIMPE S.L.	CM-50/125B - nº 1157
Dades del fabricant:	Av. Pau Casals, 85-87	Hospitalet de Llobregat (Tel. 93 261 14 16)
Cabal i pressió:	de 200 a 1200 l/min	entre 20,3 i 11,2 m.c.a.
Tensió i potència:	220 / 380 V	3 kW (4 CV)
Intensitat i velocitat nominals:	12,8 / 7,4 A	2.850 r.p.m. (0,95 · 3000 rpm.)

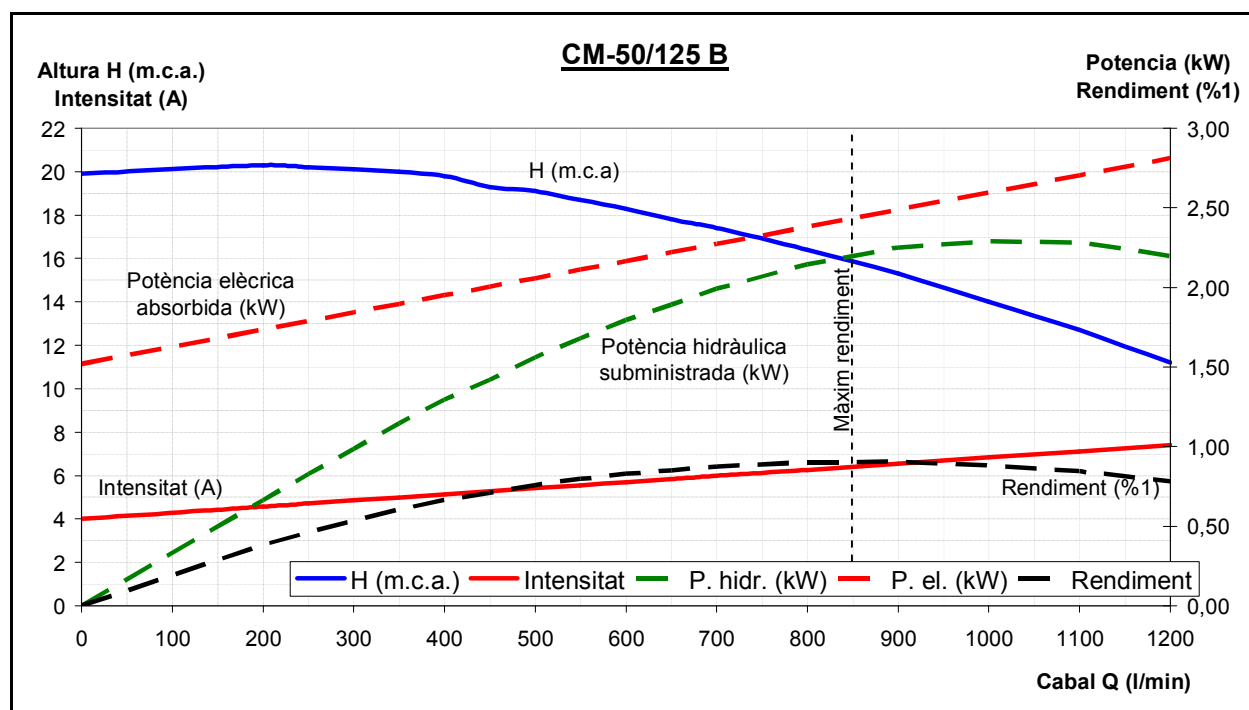


Figura 2-2. Corbes de característiques de les bombes centrífugues de recirculació.

Per altra banda, a la part inferior de la caixa dels vents estan soldades les dues embocadures de les bombes. Aquestes són dues bombes centrífugues de 1.200 l/min i 10 m.c.a. i accionades cadascuna per un motor trifàsic de 3 kW. A la sortida de les bombes existeix una vàlvula de bola de 2 polzades de diàmetre, o bé 51 mm, per tal de poder regular del flux. A través dels corresponents accessoris de llautó, es connecta amb una canonada de PE de 90 mm de diàmetre exterior. Es disposa de 6 trams de tres metres

cadascun, amb els corresponents accessoris de connexió, per tal de poder muntar un, dos o els tres trams d'arbre de què es disposa. Aquestes canonades es connecten al colzes de la capçalera.

Per longituds curtes de l'arbre, amb una sola bomba es pot proporcionar tot el cabal que és capaç d'absorbir l'arbre, mentre que per l'altura màxima, és necessària l'actuació de les dues en paral·lel. L'engegada i parada de les bombes es fa per mitjà del paquet de contactors Télémecanique LE1D12P7, el qual disposa dels corresponents polsadors d'arrencada i parada, i d'un guardamotor de tipus tèrmic. En la línia d'alimentació existeix protecció magnetotèrmica i diferencial (30 mA).

La regulació del cabal es fa per tancament de la vàlvula de bola existent just a la sortida de les bombes, a la impulsió, atès que les bombes centrífugues poden funcionar a cabal de descàrrega nul.

Per altra banda, l'ompliment del sistema, que requereix uns 200 l d'aigua, es pot fer per la part superior per gravetat, o bé des de la connexió de buidat inferior, amb aigua a pressió procedent, per exemple, de la xarxa d'abastament. La quantitat d'aigua necessària és superior a la que hi cap a la caixa dels vents. Per aquest motiu, cal tancar totes les possibles sortides de l'aigua i omplir d'aigua fins la meitat de la llargada dels arbres.

Quan s'arrenquen les bombes, el propi ompliment del circuit de recirculació va buidant la trompa fins deixar la banqueteta al descobert. Al cap de pocs segons de l'arrencada s'assoleix el règim permanent. A continuació cal obrir la sortida de l'aire per evitar que la pressió a la caixa dels vents augmenti i provoqui la sortida de l'aigua pels espiralls.

En aturar les bombes, l'aigua del circuit de recirculació retrocedeix a través de la bomba cap a la caixa dels vents, fent pujar el nivell de l'aigua, la qual arribaria a sortir per la sortida de l'aire. Per evitar-ho, es pot tancar les vàlvules del circuit de recirculació just abans d'aturar les bombes, per tal que no es buidi el circuit, o bé tancar la sortida d'aire i deixar que l'aigua s'equilibri assolint de nou una alçada fins a la meitat de l'arbre. El buidat del sistema es fa per una connexió de 36 mm de diàmetre (1 1/4 polsada) dotada de vàlvula de bola que existeix al fons del dipòsit.

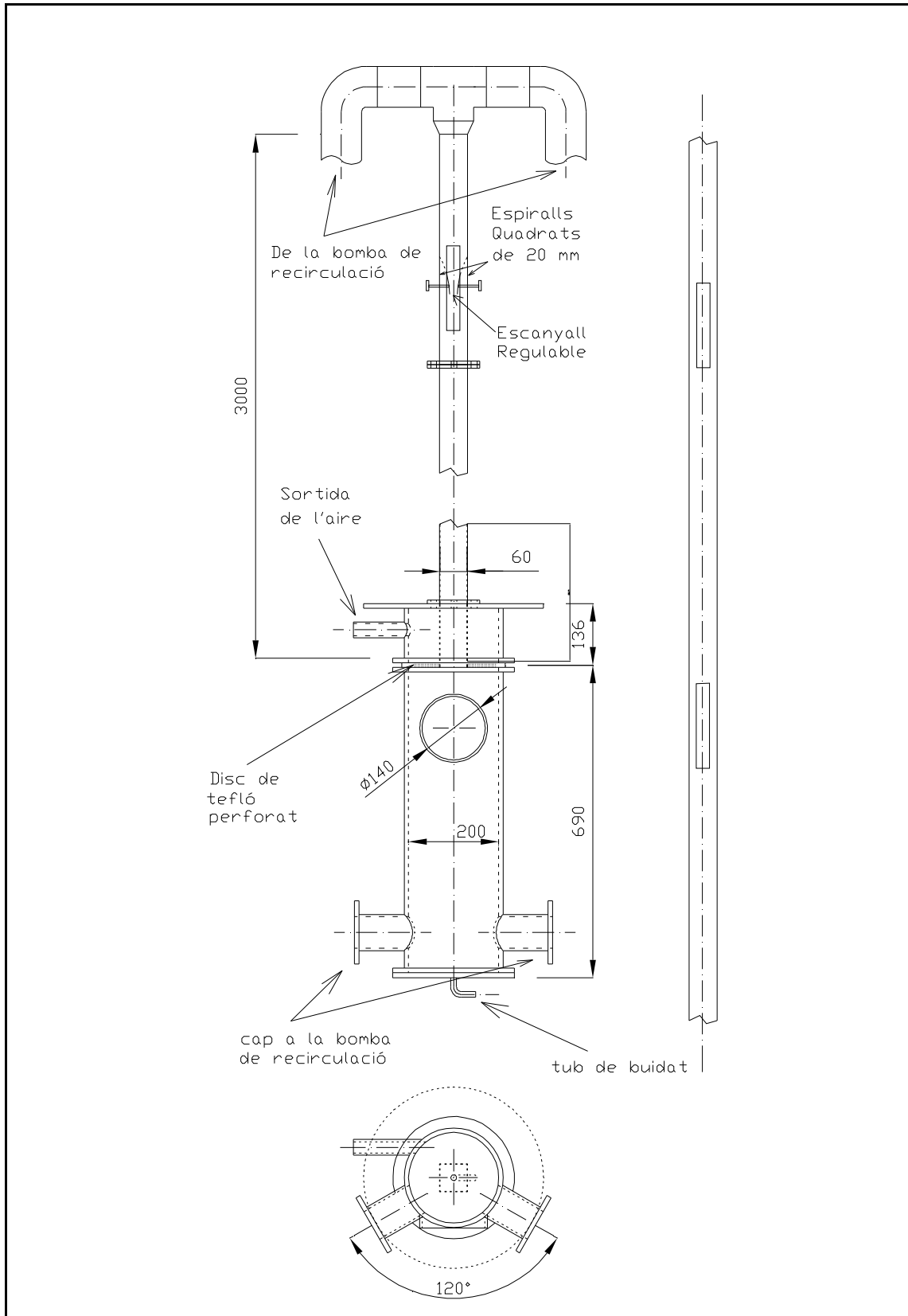


Figura 2-3. Croquis amb les principals dimensions i elements de la trompa d'aigua construïda

2.2 Càlculs hidràulics de la trompa pilot i la recirculació

Cal distingir entre la trompa i el circuit de recirculació. Es donaran els resultats per separat per tal de no desvirtuar l'avaluació de la trompa tal com s'utilitzava a la farga, és a dir, sense recirculació.

La trompa es modelitza de manera senzilla. És un conducte de secció quadrada de 60 mm de costat i 3 m de llargada, que rep l'aigua d'un dipòsit superior. A poca distància de l'embocadura té l'escanyall, on es forma la mescla d'aire i aigua, de densitat inferior a la de l'aigua. L'escanyall és de secció rectangular, amb un costat igual a l'amplada de l'arbre, 60 mm, i l'altre costat més curt, segons el grau d'obertura del mateix. L'arbre desemboca a la caixa dels vents. Allí, el fluid xoca amb la banqueteta i es desvia cap a les parets. L'aigua surt de la caixa dels vents per les embocadures d'aspiració de les bombes. L'aire surt per la part superior de la caixa dels vents.

El circuit de recirculació consisteix, per cada una de les dues bombes, en:

- l'embocadura des de la caixa dels vents fins a la bomba, de diàmetre 70 mm i longitud 0,3 m,
- la sortida de la bomba de diàmetre 50 mm (2''),
- un eixamplament brusc fins a un diàmetre de 74 mm (3''),
- el tub de pujada de PE d'una longitud de 3, 6 o 9 m,
- un colze de PE de 90°, un colze de 45° de ferro (diàm. 80 mm), una T de llautó de 80 mm (3''),
- una adaptació des de la secció circular anterior a la secció quadrada de l'arbre.

2.2.1 Fonaments teòrics: conduccions a pressió

L'equació bàsica utilitzada en tots els càlculs hidràulics a pressió en règim permanent és l'equació de conservació de l'energia o equació de Bernoulli adaptada a les hipòtesis bàsiques del flux a pressió:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H_{1-2} + \Delta H_\lambda$$

Equació 2-1

Essent:

- | | |
|------------|---|
| Z_i | Cota del centre de la secció transversal i respecte a una cota de referència. |
| p_i | Pressió relativa en la secció i. |
| γ | Pes específic del fluid: $\gamma = \rho \cdot g$ (ρ : densitat; g : acceleració de la gravetat) |
| α_i | Coefficient que té en compte la distribució no uniforme de la velocitat en la secció transversal i. |
| V_i | Velocitat mitja del flux en la secció transversal i. |
| g | Acceleració de la gravetat (9,81 m/s ²) |

ΔH_{1-2} Pèrdua d'energia per fregament lineal respecte la longitud de la canonada entre les seccions 1 i 2.

ΔH_{λ} Pèrdua d'energia localitzada entre dues seccions transversals consecutives, degudes a la presència de fenòmens locals com canvis en l'alineació de la canonada, en la seva secció, presència d'embocaments i desembocaments, o presència d'elements que puguin obstaculitzar o alterar les condicions del flux, com és el cas de vàlvules o derivacions.

Per realitzar l'estimació de pèrdues lineals per fregament s'ha utilitzat la expressió de Darcy-Weissbach:

$$\Delta H_{1-2} = \frac{f}{D} \frac{v^2}{2g} L$$

Equació 2-2

on, per a canonades llises o rugoses i en la zona de transició ($2300 < Re < 4000$) o en la zona turbulent ($Re > 4000$), f es dedueix a partir de la fórmula de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k/D}{3,54} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

Equació 2-3

mentre que per la zona laminar ($Re < 2300$), f es dedueix a partir de la fórmula de Poiseuille:

$$f = \frac{64}{Re}$$

Equació 2-4

on:

- f: Coeficient de fricció
- k: Rugositat, en m. (acer comercial: $0,05 \cdot 10^{-3}$ m; PE: $0,01 \cdot 10^{-3}$ m)
- D: Diàmetre interior de la conducció, en m.
- L: Longitud de la canonada, en m.
- Re: Número de Reynolds: $Re = (v \cdot D) / \nu$
- v: Velocitat de l'aigua, en m/s.
- ν : Viscositat cinemàtica: $\nu = \mu / \rho$ (per aigua a 15°C: $1,139 \cdot 10^{-6}$ m²/s)
- μ : Viscositat dinàmica: (per aigua a 15°C: $1,139 \cdot 10^{-3}$ kg/(m·s))
(per aire a 15°C: $0,018 \cdot 10^{-3}$ kg/(m·s))
- ρ : Densitat del fluid, en kg/m³ (per aigua a 15°C: 999,1 kg/m³)
(per aire a 15°C: 1,22 kg/m³)
- g: Acceleració de la gravetat, 9,81 m/s².

Pel que fa a les canonades de secció quadrada, caldria canviar el terme “D” en les equacions anteriors pel terme “4·R_h”. R_h és el radi hidràulic de la canonada i es defineix com la relació entre l'àrea transversal i el perímetre mullat de la secció transversal. Per una canonada quadrada i mullada en tot el seu perímetre, el radi hidràulic val la quarta part de la longitud del costat de la secció. Per aquest motiu, en les equacions solament cal substituir D pel diàmetre de les canonades circulars, o per la longitud del costat en els trams de canonada quadrada.

Per a l'estimació de les pèrdues localitzades s'utilitza l'expressió següent:

$$\Delta H_{\lambda} = \sum_k \lambda_k \frac{v^2}{2g} + \sum_j \lambda_j^{ed} \left| \frac{\Delta v^2}{2g} \right|$$

Equació 2-5

on, a més de les variables ja definides tenim:

- λ_k Coeficient de pèrdues corresponent al fenomen local k.
- λ_j^{ed} Coeficient de pèrdues corresponent al fenomen local j, on es produeix un canvi de velocitat del fluid, com en escanyaments o eixamplaments.

Per al càlcul estimat d'aquestes pèrdues s'assumeixen els següents valors:

Taula 2-2. Valors adoptats per als coeficients hidràulics de pèrdues per fregament.⁹⁵

Tipus de singularitat	λ_k	λ_j^{ed}
Sortida de dipòsit a canonada sense arrodoniment de vores	0,50	
Descàrrega lliure sense arrodoniment	1,00	
Colze de 90° (R _{int} /D=0,5)	0,25	
Colze de 45° (R _{int} /D=0,5)	0,18	
Vàlvula de bola totalment oberta	0,10	
T alimentada per un costat i sortida vertical	0,75	
T alimentada pels dos costats i sortida vertical		0,75
Eixamplament o contracció brusca, en angle recte		1,00
Contracció suau amb un angle entre parets de 15°		0,27

La potència hidràulica d'un cert cabal d'aigua en passar d'una cota superior a una inferior es valora segons la següent expressió:

$$Pot_{hidràulica} = Q_{vol} \cdot \rho \cdot g \cdot \Delta h$$

Equació 2-6

on:

Pot_{hidràulica} és la potència hidràulica total d'un salt d'aigua.

Q_{vol} és el cabal volumètric d'aigua

⁹⁵ Coeficients extrets de TCHOBANOGLOUS (1985) i MATAIX (1973)

ρ	és la densitat de l'aigua en aquelles condicions (999,1 kg/m ³ per 15°C)
g	és l'acceleració de la gravetat (9,81 m/s ²)
Δh	és la diferència de cotes de l'aigua abans i després del salt, a igualtat de pressió i velocitat.

La trompa en la configuració del s. XVII, en què la caixa dels vents no estava inundada i no quedava sota del nivell de l'aigua a la sortida, tenia un salt d'aigua total constant i igual a la diferència de cotes entre la superfície de l'aigua a la bassa i la superfície de l'aigua al canal d'evacuació situat per sota la base de la caixa dels vents. En aquesta configuració es perdia totalment l'energia de pressió de l'aigua en sortir de la caixa dels vents, o bé a través d'un sifó que vessava l'aigua des d'una certa alçada altre cop cap a la base de la caixa dels vents, o bé mitjançant l'escanyament de la sortida per l'aigua de la caixa dels vents, en forma d'energia cinètica que es dissipava per fregament en l'orifici.

La trompa en la configuració en què la caixa dels vents quedava inundada dins del canal d'evacuació de l'aigua, té un rendiment de compressió més elevat, atès que es recupera la pressió de l'aigua sortint de la caixa dels vents en forma d'alçada en el canal d'evacuació. Aquesta va ser l'estratègia en el s. XX per concebre els compressors d'aire de grans relacions de compressió amb un rendiment de fins al 84%.

En la farga catalana, tal com estava concebuda la injecció d'aire al forn, el rang de pressions de treball era bastant ample: per uns conductes i toveres d'aire donats, la necessitat d'augmentar el cabal d'aire anava acompanyant de la necessitat d'augmentar la pressió de l'aire, fet que estava també relacionat amb la necessitat que l'aire entrés a major velocitat al forn, per tal que els productes de la combustió arribessin adequadament a envoltar el masser. En aquestes condicions, no es podia aprofitar al màxim l'augment de rendiment que aportava la inundació de la caixa dels vents.

2.2.2 Compressió isotèrmica

Es considera que la compressió de l'aire per part de la trompa es dona en condicions isotèrmiques. D'una banda, la calor específica de l'aigua és unes 4,18 vegades superior a la de l'aire⁹⁶. D'altra banda, per una mescla volumètrica igual a la unitat, la relació màssica de la mescla a 1 atm i 15 °C és d'un 819 vegades favorable a l'aigua⁹⁷. Si la mescla arriba a l'equilibri tèrmic, per cada 1°C de refredament de l'aire, l'aigua

⁹⁶ A pressió constant i 0°C, la calor específica de l'aire és aproximadament de 1 kJ/(kg·K), mentre que la de l'aigua és de 4,18 kJ/(kg·K).

⁹⁷ La densitat de l'aigua a 15°C s'ha considerat de 999,1 kg/m³, mentre que la de l'aire a 1 atm i 15°C és de 1,22 kg/m³.

s'escalfaria solament $2,92 \cdot 10^{-4}$ °C. És a dir, el canvi tèrmic de l'aigua seria 3.423 vegades inferior al de l'aire.

La superfície d'intercanvi de calor entre aire i aigua és molt gran. Si es considera que l'aire es mescla amb l'aigua formant esferes de 10 mm de diàmetre, existiria una superfície d'intercanvi amb l'aigua de 300 m^2 per cada m^3 d'aire, o el que és el mateix a 15°C i 1 atm, 246 m^2 per kg d'aire. Si les bombolles fossin de 5 mm^{98} , aquests valors es doblarien. En aquestes condicions es pot fer l'estimació que l'aire i l'aigua surten de la trompa en equilibri tèrmic entre ells.

Un càlcul molt conservador seria el següent: per bombolles de 10 mm de diàmetre, un coeficient de convecció (h) entre aire i aigua de $0.010 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, i un temps (t) d'estada de l'aire a l'arbre de la trompa de 1 s, una calor específica de l'aire (C_p) de $1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, i una superfície (s) d'intercanvi per kg d'aire de 246 m^2 , la diferència de temperatura entre l'aire i l'aigua es reduiria en un 92%, segons l'expressió:

$$\Delta T(t) = T_{\text{aire}}(t) - T_{\text{aigua}} = \Delta T_{\text{inicial}} \cdot e^{-(h \cdot s / C_p) \cdot t} \quad \text{Equació 2-7}$$

És a dir, per una diferència inicial de temperatura de 15°C , a la sortida de l'arbre la diferència seria solament de $1,3^\circ\text{C}$, i la temperatura de l'aigua seria pràcticament la mateixa⁹⁹. En realitat, aquesta diferència hauria de ser molt inferior, atès que el coeficient de convecció és bastant més gran, el temps d'estada és normalment major, la mida de la bombolla és menor, i en aquest càlcul estimat s'han deixat de considerar els fenòmens d'intercanvi massic entre ambdues fases, com l'evaporació de l'aigua o la dissolució de l'aire en l'aigua.

La potència necessària en condicions ideals per realitzar una compressió isotèrmica de l'aire és la següent:

$$Pot_{\Delta T=0} = P_{\text{abs } 1} \cdot Q_{\text{vol } 1} \cdot \ln(P_{\text{abs } 2} / P_{\text{abs } 1}) = P_{\text{abs } 2} \cdot Q_{\text{vol } 2} \cdot \ln(P_{\text{abs } 2} / P_{\text{abs } 1}) \quad \text{Equació 2-8}$$

on:

- $Pot_{\Delta T=0}$ és la potència de compressió ideal en condicions isotèrmiques.
- $P_{\text{abs } i}$ és la pressió absoluta de l'aire a l'inici ($i=1$) o al final ($i=2$) de la compressió.
- $Q_{\text{vol } i}$ és el cabal volumètric d'aire abans ($i=1$) o després ($i=2$) de la compressió.

⁹⁸ Howey (2009) considera bombolles de 2.5 mm de diàmetre.

⁹⁹ Howey (2009) considera que en un temps de 0,04 s, les bombolles de 2,5 mm de diàmetre adquireixen la mateixa temperatura de l'aigua dins un marge d'error del 5%, tot i tenir en compte exclusivament la conducció com a mecanisme de transferència de calor.

2.2.3 Cas de la trompa d'aigua amb els espiralls totalment tancats

En el cas que no existeixin espiralls, tot el salt hidràulic s'invertiria en contrarestar les pèrdues per fregament. El cabal que circularia seria molt més gran que l'habitual per una trompa amb les espiralls oberts. Es tracta d'una prova senzilla de realitzar amb la trompa pilot que dona una referència extrema del comportament de la trompa. Es consideren les pèrdues degudes a l'entrada de l'aigua a la part superior de l'arbre, per fregament amb les parets del mateix, per contracció suau en l'escanyall i eixamplament bruscat posterior, i per la desembocadura a la caixa dels vents a pressió atmosfèrica. Per aquest càlcul no es considera el xoc amb la banqueteta.

En la taula 2-3 es dona, per diferents longituds i tipus d'escanyall, el cabal màxim que es podria evacuar per la canonada quadrada de 60 mm de costat, col·locada vertical, sense que es produeixi pèrdua ni guany de pressió ni de velocitat de l'aigua entre la part superior i la inferior. Sota aquestes condicions, la única aportació energètica és deguda a la pèrdua d'alçada de l'aigua en descendir pel tub, i aquesta es correspon amb les pèrdues per fregament amb les parets i amb els elements singulars. Les pèrdues per fregament són equivalents a la pròpia longitud del tub, en m.c.a..

Taula 2-3. Cabals d'aigua en una trompa sense espiralls, per diferents arbres i escanyalls.

Longitud	Obertura de l'escanyall	Cabal d'aigua	Velocitat en el tub	Velocitat en l'escanyall	Pressió en l'escanyall	Pèrdues singulars vs. pèrdues totals
Molt gran	sense escanyall	27,75 l/s	7,71 m/s	7,71 m/s	-1,51 m.c.a.	0,0 %
9 m	sense escanyall	22,57 l/s	6,27 m/s	6,27 m/s	-0,90 m.c.a.	33,4 %
9 m	30 mm (50 %)	19,89 l/s	5,53 m/s	11,05 m/s	-5,72 m.c.a.	47,9 %
9 m	20 mm (33 %)	15,41 l/s	4,28 m/s	12,84 m/s	-8,74 m.c.a.	68,3 %
9 m	10 mm (17 %)	7,92 l/s	2,20 m/s	13,20 m/s	-10,15 m.c.a.	91,2 %
6 m	sense escanyall	20,87 l/s	5,80 m/s	5,80 m/s	-0,73 m.c.a.	42,8 %
6 m	30 mm (50 %)	17,85 l/s	4,96 m/s	9,92 m/s	-4,55 m.c.a.	57,8 %
6 m	20 mm (33 %)	13,29 l/s	3,69 m/s	11,08 m/s	-6,43 m.c.a.	76,2 %
6 m	10 mm (17 %)	6,56 l/s	1,82 m/s	10,94 m/s	-6,87 m.c.a.	93,8 %
3 m	sense escanyall	17,43 l/s	4,84 m/s	4,84 m/s	-0,42 m.c.a.	59,7 %
3 m	30 mm (50 %)	14,18 l/s	3,94 m/s	7,88 m/s	-2,76 m.c.a.	73,0 %
3 m	20 mm (33 %)	10,00 l/s	2,78 m/s	8,33 m/s	-3,51 m.c.a.	86,2 %
3 m	10 mm (17 %)	4,71 l/s	1,31 m/s	7,85 m/s	-3,40 m.c.a.	96,7 %

Per tal que les pèrdues al llarg del tub siguin exactament iguals a la longitud de l'arbre, en m.c.a., es fa necessari que l'energia cinètica de l'aigua sigui aportada abans d'entrada en l'arbre. Fent el símil amb el funcionament de la trompa, aquest cas equivaldria a regular l'alçada de l'aigua en la bassa superior per tal

que sigui igual al terme d'energia cinètica. Pel cas de major velocitat, 7,71 m/s, aquesta alçada seria de 3,03 m, mentre que pel cas de menys velocitat, 1,31 m/s, seria de solament 0,09 m. Sota la condició que l'alçada d'aigua en la bassa fos constant, per exemple de 1,5 m, el cabal resultant seria lleugerament superior pels casos en què la velocitat a la canonada s'indica inferior a 5,42 m/s, i seria lleugerament inferior en cas contrari.

Sota les circumstàncies descrites, de tancament dels espiralls i amb una pressió sobre l'embocadura dels arbres aproximadament equivalent a l'energia cinètica de l'aigua, la pressió en l'escanyall és inferior a l'atmosfèrica en qualsevol dels casos. Per aquest motiu s'associa l'explicació del funcionament de la trompa amb l'efecte Venturi. Fins i tot sense l'existència d'escanyall, la pressió seria lleugerament inferior a l'atmosfèrica en bona part del conducte, en la seva part superior, mentre que en la resta seria superior a la l'atmosfèrica, degut principalment a les pèrdues per fregament que es produeixen en l'embocadura i desembocadura de l'arbre.

En el cas de l'arbre de 9 m i l'escanyall de 10 cm, la pressió manomètrica en l'escanyall seria negativa, de valor 10,15 m.c.a. Aquesta pressió és lleugerament superior a la pressió absoluta nul·la. La pressió d'una atmosfera equival a 101.300 Pa, que representen a 10,33 m.c.a. Els efectes de cavitació de l'aigua apareixerien amb facilitat sota aquestes circumstàncies.

Per arbres més curts, les pèrdues per fregament singulars van guanyant importància respecte el total de pèrdues, mentre que les pèrdues anomenades lineals representen una proporció menor. Per aquest motiu, el rendiment màxim que es pot obtenir d'un sistema de compressió d'aquest tipus augmenta a mesura que els arbres són més llargs, mentre que és més petit per arbres més curts.

En cas que existís banqueteta, la pèrdua d'energia de l'aigua a la desembocadura de l'arbre seria més gran, per un valor en funció del cabal i de la seva posició. Donat que l'energia inicial de l'aigua a la part superior de l'arbre seria la mateixa, el cabal hauria de ser inferior al dels casos anteriors.

Si els espiralls deixen d'estar obstruïts, i la seva secció de pas es va fent major, la pressió en l'escanyall va augmentant. L'aire entra a l'arbre provocant a la vegada que disminueixi el cabal d'aigua.

2.2.4 Trompa amb els espiralls oberts: l'escanyall com a element regulador del cabal

Quan la secció dels espiralls és prou gran, la pressió de l'aire en l'escanyall és pràcticament igual a l'atmosfèrica. El cabal d'aigua disminueix en gran mesura respecte els cabals indicats en la taula 2-3 de l'apartat anterior. El cabal d'aigua resulta ser independent de la longitud de l'arbre i passa a ser solament

dependent de la càrrega d'aigua que existeix a la bassa, de la secció de l'escanyall i de les pèrdues per fregament que pateix en el seu recorregut fins a l'escanyall.

Solament en el cas que existís un excés de pressió en la caixa dels vents o una obstrucció en la desembocadura de l'arbre, com per exemple degut a una posició excessivament elevada de la banqueta, el flux que es desenvolupa al llarg de l'arbre afectaria al cabal d'aigua en l'escanyall.

Taula 2-4. Cabal d'aigua en una trompa amb espiralls, per diferents càrregues d'aigua i escanyalls.

Profund. de l'aigua en la bassa	Alçada d'aigua sobre l'escanyall	Obertura de l'escanyall						Velocitat teòrica
		10 mm (16,7 %)	20 mm (33,3 %)	30 mm (50,0 %)	40 mm (66,7 %)	50 mm (83,3 %)	60 mm (100 %)	
0 m	0,3 m	1,33 l/s	2,67 l/s	3,95 l/s	5,10 l/s	6,08 l/s	6,89 l/s	2,43 m/s
		2,21 m/s	2,22 m/s	2,20 m/s	2,13 m/s	2,03 m/s	1,91 m/s	
0,3 m	0,6 m	1,88 l/s	3,78 l/s	5,59 l/s	7,22 l/s	8,61 l/s	9,75 l/s	3,43 m/s
		3,13 m/s	3,15 m/s	3,11 m/s	3,01 m/s	2,87 m/s	2,71 m/s	
0,6 m	0,9 m	2,30 l/s	4,63 l/s	6,85 l/s	8,85 l/s	10,55 l/s	11,95 l/s	4,20 m/s
		3,83 m/s	3,86 m/s	3,80 m/s	3,69 m/s	3,52 m/s	3,32 m/s	
0,9 m	1,2 m	2,65 l/s	5,34 l/s	7,91 l/s	10,22 l/s	12,19 l/s	13,80 l/s	4,85 m/s
		4,42 m/s	4,45 m/s	4,39 m/s	4,26 m/s	4,06 m/s	3,83 m/s	
1,2 m	1,5 m	2,97 l/s	5,97 l/s	8,84 l/s	11,43 l/s	13,63 l/s	15,43 l/s	5,42 m/s
		4,94 m/s	4,98 m/s	4,91 m/s	4,76 m/s	4,54 m/s	4,29 m/s	
1,5 m	1,8 m	3,25 l/s	6,54 l/s	9,69 l/s	12,52 l/s	14,93 l/s	16,91 l/s	5,94 m/s
		5,41 m/s	5,45 m/s	5,38 m/s	5,22 m/s	4,98 m/s	4,70 m/s	
1,8 m	2,1 m	3,51 l/s	7,07 l/s	10,47 l/s	13,52 l/s	16,13 l/s	18,26 l/s	6,42 m/s
		5,85 m/s	5,89 m/s	5,81 m/s	5,63 m/s	5,38 m/s	5,07 m/s	
2,1 m	2,4 m	3,75 l/s	7,56 l/s	11,19 l/s	14,46 l/s	17,25 l/s	19,53 l/s	6,86 m/s
		6,25 m/s	6,60 m/s	6,22 m/s	6,02 m/s	5,75 m/s	5,42 m/s	
2,4 m	2,7 m	3,98 l/s	8,02 l/s	11,87 l/s	15,34 l/s	18,29 l/s	20,71 l/s	7,28 m/s
		6,63 m/s	6,68 m/s	6,59 m/s	6,39 m/s	6,10 m/s	5,75 m/s	
V / V_{teòrica}		91,1 %	91,8 %	90,6 %	87,8 %	83,8 %	79,0 %	100 %
Energia pèrdues / total		17,0 %	15,8 %	18,0 %	23,0 %	29,9 %	37,6 %	0 %

En la taula 2-4 es mostren els valors de cabal i velocitat de l'aigua que es donarien en l'escanyall, per diferents graus d'obertura i per diferents alçades d'aigua per sobre del mateix. L'escanyall en aquest cas està situat 0,30 m més avall que la part inferior de la bassa. A més, es calcula la relació entre la velocitat de l'aigua en l'escanyall, tenint compte les pèrdues per fregament, i la velocitat teòrica que hauria de tenir en absència de pèrdues per fregament, obtinguda de l'equació de Torricelli¹⁰⁰, fàcilment deduïble de l'equació de Bernoulli. Els primers estudi sobre la trompa del s. XIX utilitzaven aquesta equació per

¹⁰⁰ Evangelista Torricelli (1608-1647) va ser un físic i matemàtic italià, conegut per la invenció del baròmetre.

estimar el cabal que hauria de circular per la trompa, segons la qual, la velocitat teòrica de sortida d'un fluid per un orifici és independent de la densitat del fluid, i ve donada per:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

Equació 2-9. Equació de Torricelli.

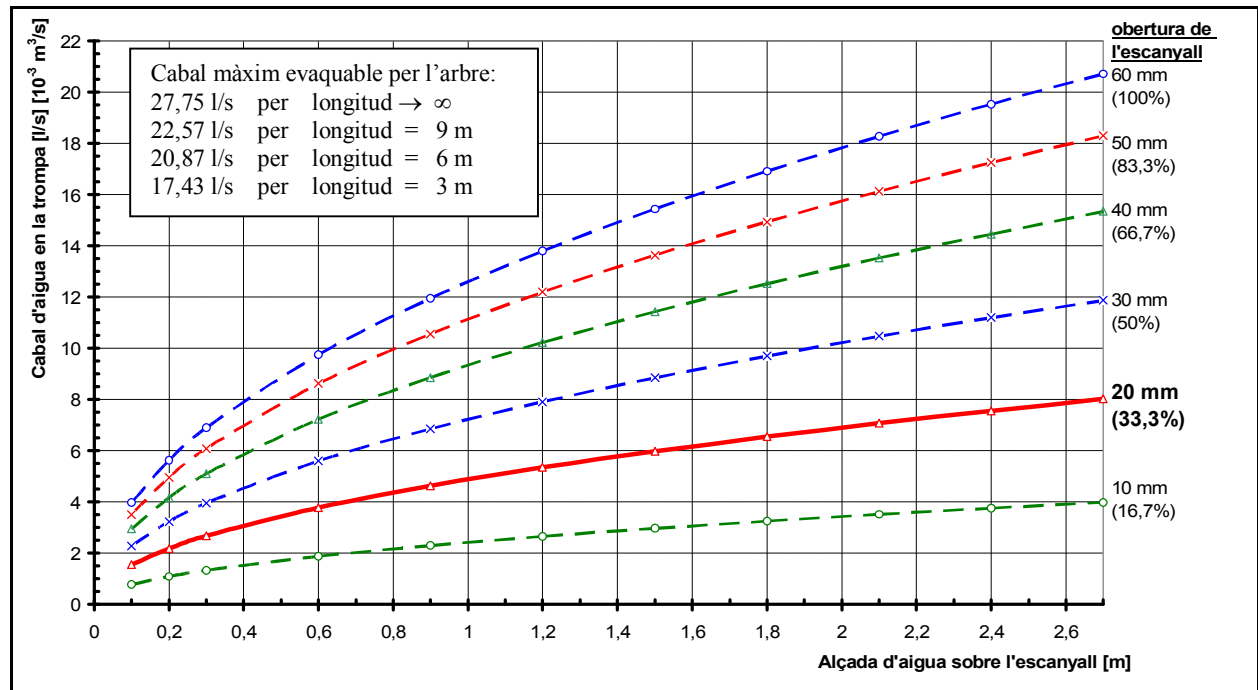


Figura 2-4. Cabal d'aigua respecte la càrrega d'aigua per diferents obertures de l'escanyall.

El cabal efectiu que surt per l'escanyall s'aproxima tant més al teòric com menys pèrdues per fregament existeixen. Per les condicions fixades, existeix un mínim de pèrdues al voltant d'una obertura de l'escanyall de 20 mm (obertura del 33,3 %). Concretament, per una alçada d'aigua de 1,8 m per sobre de l'escanyall, aquest mínim correspon a una obertura de 18,5 mm (obertura del 30,8%). Si l'obertura és més petita, les pèrdues per fregament entre la bassa i l'escanyall disminueixen, mentre que augmenten les pèrdues en el propi escanyall. En canvi, si l'obertura és més gran, augmenten les pèrdues entre la bassa i l'escanyall, mentre que disminueixen en el propi escanyall.

Mitjançant la variació de l'alçada d'aigua sobre l'escanyall es pot aconseguir una variació quasi lineal del cabal d'aigua en la trompa. Aquest no era el sistema utilitzat per regular el cabal, sinó que s'alçava més o menys el trompall per sobre de l'embocadura dels arbres, introduint una major o menor pèrdua de càrrega en l'aigua.

S'ha considerat una alçada màxima d'aigua sobre l'escanyall de 2,7 m. Si l'alçada fos excessiva, es podria arribar al cas que la resta de l'arbre no fos capaç d'absorbir tot el cabal d'aigua, segons s'especifica en l'apartat anterior. Així, segons es mostra en la taula 2-3, per un arbre de 3 m de llarg, el

cabal màxim admissible seria de 17,43 l/s, per un arbre de 6 m seria de 20,87 l/s, per un arbre de 9 m seria de 22,57 l/s, amb un màxim teòric per qualsevol alçada de 27,75 l/s. Per exemple, amb un arbre de 3 m de llarg, una amplada d'escanyall de 50 mm, i una alçada d'aigua de 2,7 m, no entraria gens d'aire pels espiralls, ans el contrari, l'aigua arribaria a sortir pels mateixos.

2.2.5 Flux bifàsic omplint totalment l'arbre: ràtio aire-aigua absolutament variable

Partint del concepte que la capacitat d'evacuació de l'arbre és més gran que el cabal d'aigua que surt per l'escanyall, es pot desenvolupar un senzill model de càlcul per estimar el comportament de la trompa sota diferents condicions de pressió en la caixa dels vents. Es tracta d'un model irreal, donat que les proporcions d'aire i aigua en l'arbre no poden ser qualssevol, però permet posar en evidència un seguit de condicions necessàries per a un model més real.

En aquest model, l'arbre queda sempre completament ple de fluid bifàsic per sota de l'escanyall. La proporció de mescla entre l'aire i l'aigua ve determinada per la pressió que existeix dins la caixa dels vents. A major pressió, essent el cabal d'aigua constant, el cabal d'aire ha de disminuir, per tal que la mescla tingui una major densitat i pugui contrarestar la pressió de la caixa dels vents. En la figura 2-5 es presenten les corbes del cabal d'aire respecte la seva pressió en la caixa dels vents. En la figura 2-6 es presenta el rendiment energètic resultant en cada punt de treball, és a dir, la potència pneumàtica obtinguda respecte la potència hidràulica utilitzada.

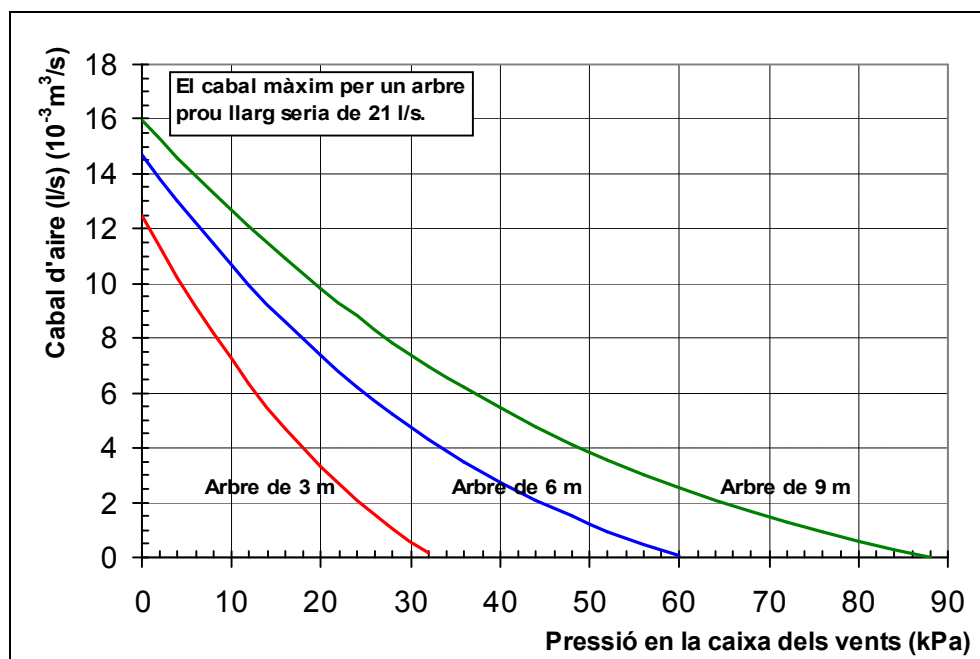


Figura 2-5. Cabal-pressió de l'aire sortint de la trompa, segons el model de ràtio aire-aigua variable

En tots els casos es considera que l'alçada d'aigua per sobre de l'escanyall és de 1,8 m, i que l'escanyall té una secció de pas rectangular de 60 mm per 20 mm, és a dir, del 33,3% de la secció de l'arbre. Si s'incrementa la secció de l'escanyall o s'augmenta l'alçada de l'aigua damunt seu, sota les condicions d'aquest model, les corbes són molt similars, excepte en què augmenta el cabal d'aigua, les corbes de cabal d'aire respecte la pressió es desplacen lleugerament cap a valors superiors i el rendiment energètic disminueix, degut a l'augment de pèrdues per fregament.

Tampoc no es considera el canvi de volum de l'aire en baixar per l'arbre i augmentar la pressió, donat que es tracta d'un model aproximat per arbres curts i pressions reduïdes, lleugerament superior a la pressió atmosfèrica. Si es considerés aquesta disminució de volum, les pèrdues per fregament disminuirien degut a la disminució de velocitat al llarg de l'arbre, i la pressió per un cabal determinat d'aire seria lleugerament superior a la indicada en les figures.

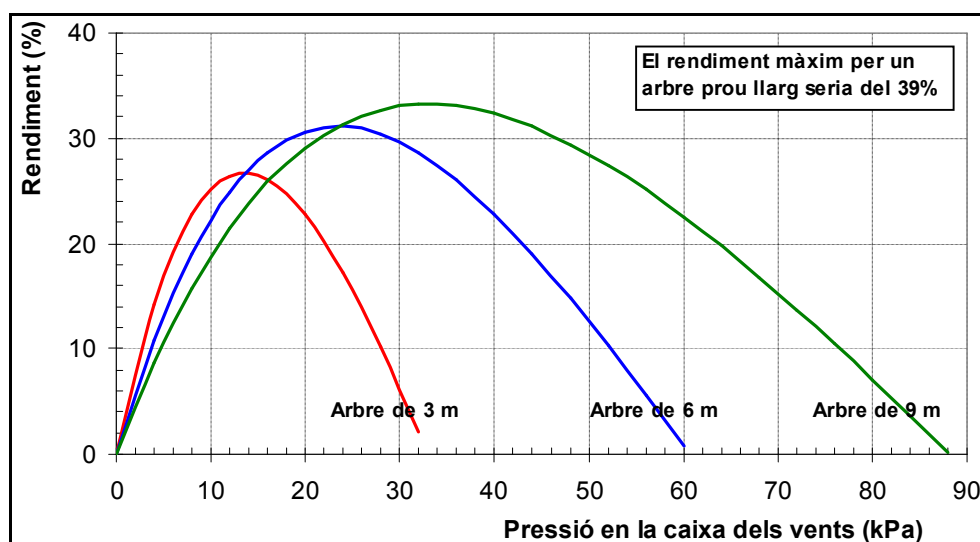


Figura 2-6. Rendiment pneumàtic de la trompa, segons el model de ràtio aire-aigua variable.

La pressió màxima assolible per una trompa d'una longitud determinada és aproximadament equivalent al pes de la columna d'aigua en el cas que la proporció d'aire sigui nul·la. En aquest cas, la trompa funciona com un simple conducte d'aigua, que no aspira gens d'aire. Si la pressió en la caixa dels vents augmentés, l'aigua simplement començaria a sortir pels espiralls.

El cabal màxim d'aire es dona per una pressió nul·la en la caixa dels vents. En aquestes condicions, per un arbre curt de 3 m de longitud, el cabal d'aire aspirat és aproximadament el doble que el cabal d'aigua utilitzat. Per un arbre de 6 m, aquesta relació creix fins a 2,24, i per un arbre de 9 m, la quantitat d'aire a pressió nul·la és de 2,44 cops el cabal d'aigua. Aquesta quantitat no pot créixer indefinidament principalment per les pèrdues per fregament que es donen al llarg del tub. Per un tub molt llarg, aquesta proporció arriba a tenir un valor de 3,2. Si aquesta mescla d'aire i aigua fos estable es podria explicar

aquesta alta proporció d'aire per l'efecte aspirant de la columna bifàsica, en caure per l'arbre. L'estabilitat de la mescla és funció de les velocitats parcials de cada fase dins de la canonada. Quan el diàmetre de la canonada és prou petit com per donar preponderància a l'efecte de la capil·laritat de l'aigua, es poden assolir proporcions encara més elevades d'aire-aigua.

El rendiment de conversió d'energia hidràulica a pneumàtica, en aquest model, creix a mesura que l'arbre és més llarg. El rendiment màxim es dona aproximadament per una pressió en la caixa dels vents equivalent a un terç de la columna d'aigua d'alçada igual a la longitud de la trompa. Aquest rendiment màxim és de 26% per un arbre de 3 m, del 31 % per un arbre de 6 m i del 33 % per un arbre de 9 m. Aquest valor no pot créixer indefinidament. Sota les condicions d'aquest model i per una longitud prou gran, el rendiment creixeria fins a valors propers del 39 %. El punt de màxim rendiment coincideix amb una proporció d'aire respecte el cabal d'aigua propera a la unitat.

2.2.6 Flux bifàsic en mescla constant: compressor volumètric d'aire

El model que s'adequa millor al funcionament de la trompa d'aigua és el del compressor volumètric d'aire. Aquest model posa en evidència la no dependència entre el procés de mescla d'aire i aigua en la zona de l'escanyall i el procés de compressió al llarg de l'arbre. Aquests dos processos no són estrictament independents. Existeixen alguns fenòmens que els relacionen. Segons el grau d'ompliment de l'arbre i segons la distància respecte l'escanyall a la qual el doll d'aigua perd la seva consistència, les bombolles són majors o menors, i igualment la quantitat d'aire arrossegada fins a la caixa dels vents.

En aquest model, la quantitat d'aire que arrossega el cabal d'aigua sortint per l'escanyall es considera constant i solament dependent de la forma i característiques del mateix¹⁰¹. Es considera que la velocitat de l'aire i la de l'aigua són iguals mentre no es formen les bombolles d'aire a l'interior de l'aigua. Pot ser útil fer el símil amb un sistema en què l'aire i l'aigua circulessin a la mateixa velocitat sense mesclar-se, cadascun ocupant una part de la secció total. La ràtio entre aquestes dues seccions seria constant i equivalent a la relació entre cabals volumètrics.

$$x = \frac{\text{volum d'aire arrossegat inicialment}}{\text{volum d'aigua que surt per l'escanyall}} = \frac{S_{\text{aire}}}{S_{\text{aigua}}} \quad \text{Equació 2-10}$$

$$\frac{S_{\text{aire}}}{S_{\text{arbre}}} = \frac{x}{1+x} \quad \text{Equació 2-11}$$

¹⁰¹ Segons BIDINI (1997), la millor relació aire/aigua en un difusor ben dimensionat es dona per una velocitat de l'aigua entorn dels 4 m/s. Altres aspectes relacionats amb aquest tema s'exposen també en BIDINI (1999)

$$\frac{S_{aigua}}{S_{arbre}} = \frac{1}{1+x} \quad \text{Equació 2-12}$$

on:

- x ràtio de cabals volumètrics d'aire-aigua mesclats inicialment en la zona de l'escanyall.
Es consideraran els valors següents: $x = \{ 0,33; 0,67; 1,00; 1,33 \}$ ¹⁰²
- S_a Àrea de la secció que ocuparia l'aire (a=aire) o l'aigua (a=aigua) si ambdós fluids no es mesclessin i la seva velocitat fos igual, és a dir, per un valor de x constant, essent la suma d'ambdues àrees igual a l'àrea total de la secció de l'arbre (a=arbre).

Un cop format el flux bifàsic, s'ha tingut en compte la flotabilitat de les bombolles d'aire quan es troben mesclades amb l'aigua en l'arbre. Aquest fenomen introdueix unes pèrdues anomenades de lliscament, per les quals, com més lent és el flux, menys aire arriba a la part inferior de l'arbre, podent arribar a ser nul per sota d'un cert valor de cabal d'aigua¹⁰³. Per trompes amb una compressió elevada, aquesta velocitat va disminuint al llarg de l'arbre, degut a la disminució del volum de la bombolla. Per als casos aquí considerats, per uns arbres de fins a 9 m de llarg, aquesta velocitat (v_{LL}) s'ha considerat constant i de valor 0,25 m/s, respecte la velocitat de l'aigua.

Aquest fenomen de lliscament es fa visible quan per cabals reduïts d'aigua, la quantitat d'aire que arriba a la caixa dels vents és menor en proporció a la que hi arriba per un cabal més elevat, sense que canviï la ràtio de cabals volumètrics aire-aigua (x) en l'escanyall. El cabal d'aire que arribaria al final de la trompa en relació al cabal d'aigua que surt per l'escanyall valdria:

$$\frac{Q_{aire}}{Q_{aigua}} = \frac{S_{aire} \cdot v_{aire}}{S_{aigua} \cdot v_{aigua}} = x \cdot \frac{v_{aigua} - v_{LL}}{v_{aigua}} \quad \text{Equació 2-13}$$

on:

- x ràtio de cabals volumètrics d'aire-aigua mesclats inicialment en la zona de l'escanyall.
- v_{aigua} velocitat efectiva de l'aigua en l'arbre.
- v_{aire} velocitat efectiva de l'aire en la canonada.

¹⁰² Bidini (1999), per a fer l'anàlisi teòric del rendiment dels compressors hidràulics d'aire, aplica valors de la ràtio de cabals màssics aire-aigua de 0,4 i 0,8, que equivalen a uns valors per la ràtio volumètrica de 0,33 i 0,66 respectivament. En canvi, Webber (1901), en l'anàlisi del rendiment del compressor de Magog P. Q. (Canadà) construït per C. H. Taylor l'any 1896, presenta valors mesurats de la ràtio volumètrica aire-aigua de com a màxim 0,27. En COMPRESSED AIR MAGAZINE (1963) es dona el valor de 0,6 a 0,8 per la ràtio volumètrica aire-aigua, per al compressor de Ragged Chutes (Ontario) construïda per C.H.Taylor l'any 1910.

¹⁰³ En la trompa descrita, per x=1 i v_{LL}=0,25 m/s, el cabal d'aire seria nul per un cabal d'aigua inferior a 0,45 l/s d'aigua.

v_{LL} velocitat de lliscament de les bombolles respecte l'aigua, vertical i cap amunt. Es consideraran els valors següents: $v_{LL} = \{ 0 \text{ m/s}; 0,15 \text{ m/s}; 0,25 \text{ m/s}; 0,35 \text{ m/s} \}$

Respecte el símil de la separació de fases dins la canonada, introduir aquest lliscament equival a superposar un cabal d'aire en sentit ascendent sobre els dos cabals d'aire i aigua, que circularien cap avall a la mateixa velocitat. Aquest cabal ascendent ocuparia tota la secció corresponent a l'aire, i circularia a una velocitat igual a la de lliscament. Aquest cabal ascendent té per valor:

$$Q_{\text{aire ascendent}} = S_{\text{aire}} \cdot v_{LL} = \frac{x}{1+x} \cdot S_{\text{arbre}} \cdot v_{LL}$$

En la figura 2-7 es mostren els resultats calculats pel cabal d'aire que donaria la trompa en funció de l'alçada equivalent d'aigua sobre l'escanyall. L'escanyall té unes dimensions de 60 mm per 20 mm, que representa una obertura del 33% respecte la secció de l'arbre. Es mostren els resultats per diferents valors dels paràmetres x i v_{LL} .

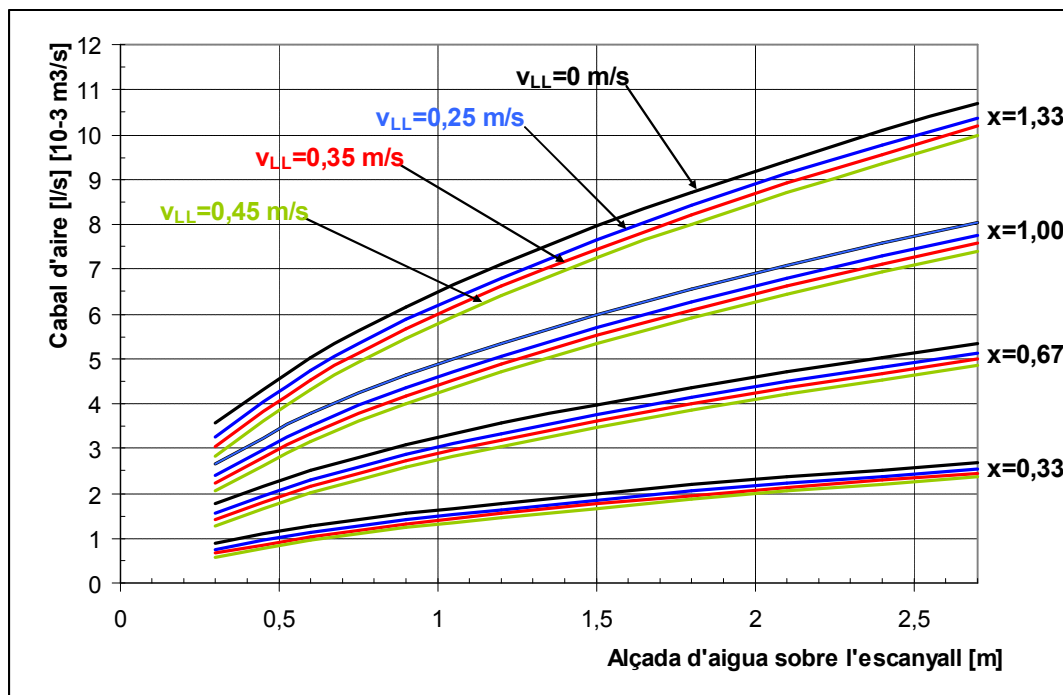


Figura 2-7. Cabal d'aire respecte la càrrega d'aigua, pel model de compressor volumètric.

La velocitat promig del conjunt de la mescla a la part superior de l'arbre seria:

$$\bar{v} = \frac{Q_{\text{aire}} + Q_{\text{aigua}}}{S_{\text{arbre}}} = (1+x) \cdot v_{\text{sup aigua}} - \left(\frac{x}{1+x} \right) \cdot v_{ll} \quad \text{Equació 2-14}$$

$$v_{\text{sup aigua}} = Q_{\text{aigua}} / S_{\text{arbre}} \quad ; \quad v_{\text{sup aire}} = Q_{\text{aire}} / S_{\text{arbre}} \quad \text{Equació 2-15}$$

$$v_{\text{aigua}} = (1 + x) \cdot v_{\text{sup aigua}} \quad ; \quad v_{\text{aire}} = \frac{1 + x}{x} \cdot v_{\text{sup aire}} \quad \text{Equació 2-16}$$

on:

\bar{v}	és la velocitat promig del fluid bifàsic.
x	és la ràtio de cabals volumètrics d'aire-aigua inicials en l'escanyall
$v_{\text{sup aigua}}$	és la velocitat superficial de l'aigua, que correspon a la velocitat que tindria l'aigua si ocupés la totalitat de la secció de l'arbre.
$v_{\text{sup aire}}$	és la velocitat superficial de l'aire, que correspon a la velocitat que tindria l'aire si ocupés la totalitat de la secció de l'arbre.
v_{\parallel}	velocitat de lliscament de les bombolles respecte l'aigua, vertical i cap amunt.
Q_{aigua}	cabal volumètric d'aigua.
Q_{aire}	cabal volumètric d'aire.
S_{arbre}	superfície de la secció transversal de l'arbre.
v_{aigua}	velocitat de l'aigua en l'arbre.
v_{aire}	velocitat de l'aire en l'arbre.

A mesura que la pressió va augmentant, la densitat de l'aire també augmenta, i el volum de les bombolles va disminuint, de manera que el cabal volumètric total al llarg de l'arbre va disminuint. Per aquest motiu, si la secció de l'arbre es manté contant, la velocitat de la mescla aire-aigua també ha de disminuir. Malgrat que per les longituds d'arbre de fins a 9 m d'alçada aquesta disminució és molt petita, s'ha considerat en els càlculs a l'hora de valorar l'energia cinètica a l'extrem inferior de l'arbre, les pèrdues per fregament en cada singularitat i les pèrdues per fregament amb les parets al llarg de l'arbre.

La pressió que pot donar la trompa, dependrà de la longitud de l'arbre i de l'alçada fins a la qual s'ompli amb la mescla d'aire i aigua formada sota l'escanyall. Si la pressió en la caixa dels vents és massa petita, l'acumulació d'aigua a l'interior de la trompa podria arribar a ser nul·la. La pressió màxima teòrica es donaria quan la totalitat de l'arbre estigués ple d'aigua-aire fins a l'alçada dels escanyalls. Tant en el primer cas com en el segon, la situació no pot ser estable. En cas de poca pressió, l'estanquitat de la caixa dels vents es veu compromesa per l'ompliment deficient de l'arbre. En cas de pressió excessiva, l'aigua arribaria a l'alçada de l'escanyall, anul·lant la seva funció, i arribaria a sortir pels espiralls.

Malgrat que en règim permanent no sembla possible que la pressió a la caixa dels vents pugui ser superior a la que pot proporcionar la trompa, aquest fenomen es pot explicar en règim transitori degut a les inèrcies

de l'aigua en moviment, a la seva energia cinètica. A més, possiblement l'eficiència d'arrossegament d'aire pel doll d'aigua en l'escanyall no és constant, sinó que podria tenir un màxim per una alçada de l'aigua propera a l'escanyall. Si fos així, a partir d'aquella alçada, en règim transitori, l'alçada d'aigua en l'arbre seria inestable i la trompa vessaria aire i aigua pels espiralls, tal com passa en realitat.

Per evitar el comportament inestable per poca pressió, es podia regular la posició de la banqueta per introduir una pèrdua de càrrega extra en el doll d'aigua i poder mantenir una alçada d'aigua mínima en l'arbre. Per altra banda, si l'eficiència de l'arrossegament d'aire pel doll d'aigua de l'escanyall varia segons l'alçada de l'aigua en l'arbre, la regulació de l'alçada de la banqueta també permetria optimitzar el cabal d'aire obtingut per una mateixa pressió.

Prescindint dels comportaments inestables i la no constància de la relació entre el cabal d'aire i aigua, la trompa es comporta com una bomba d'aire a pressió variable. El cabal depèn principalment de la quantitat d'aigua que surt per l'escanyall, i la pressió màxima que pot subministrar depèn principalment de la longitud de l'arbre.

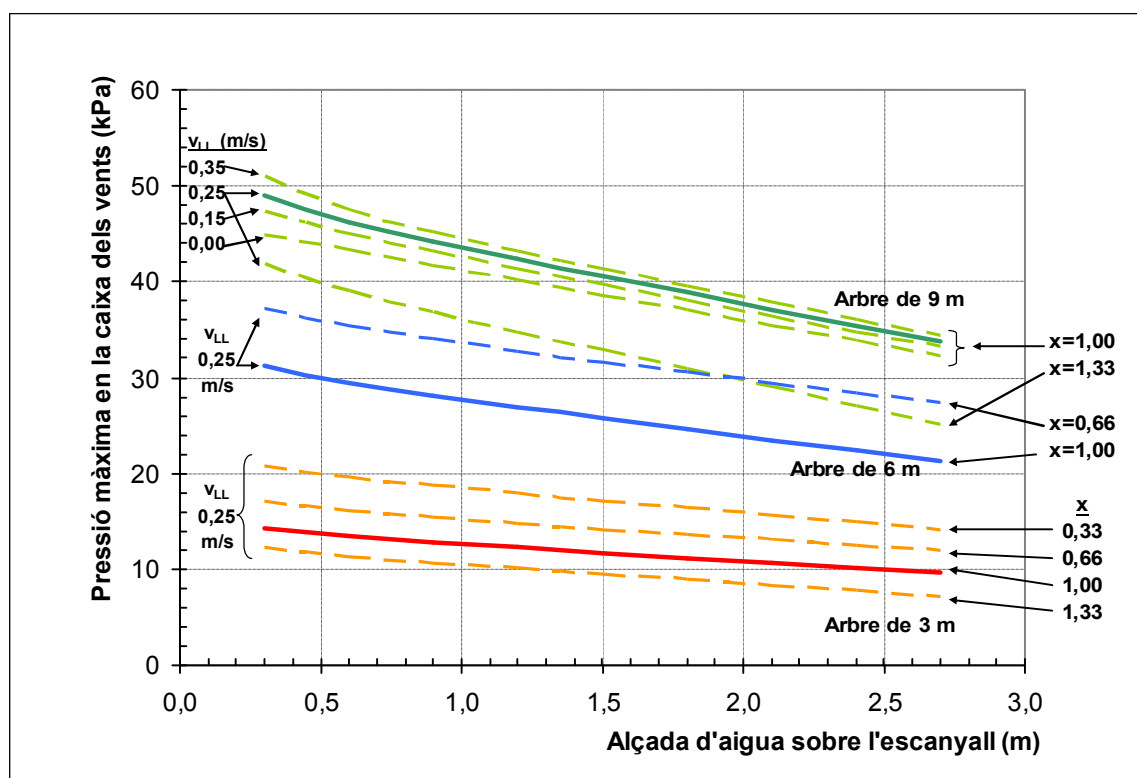


Figura 2-8. Pressió màxima de la trompa en funció de l'alçada d'aigua sobre l'escanyall.

En la figura 2-8 es mostren els resultats que dona el model per la pressió màxima que pot subministrar la trompa en funció de l'alçada d'aigua sobre l'escanyall, la qual determina el cabal d'aigua. La pressió

efectiva en cada cas podrà ser un valor entre zero i el valor màxim indicat en la taula, és a dir, dependrà de la càrrega. El cabal d'aire ve determinat per l'aigua que es deixa anar en l'escanyall i els paràmetres de lliscament i ràtio aire-aigua que es donin en cada cas. En aquesta figura es representen les corbes resultants, per valors diferents de la longitud de l'arbre, del lliscament i de la ràtio aire-aigua.

Respecte l'aigua consumida, un canvi en el lliscament és molt menys significatiu que un canvi en la ràtio aire-aigua. Per un arbre de 3 m de longitud, un canvi en el lliscament dóna gairebé la mateixa corba resultant. En canvi, per un arbre de 9 m, el canvi en el lliscament és suficientment visible a l'escala de la figura 2-8.

L'augment de la ràtio aire-aigua comporta una disminució de la pressió màxima assolible per un mateix cabal d'aire, i viceversa. Per arbres més llargs, davant de canvis en la ràtio aire-aigua, la corba canvia de manera més evident. Aquest fet fa que la corba d'un arbre de 9 m de llargada i una ràtio aire-aigua de 1,33 es cavalqui amb la corba d'un arbre de 6 m i una ràtio aire-aigua de 0,66, per una mateixa velocitat de lliscament de 0,25 m/s.

En la figura 2-9 es mostren les corbes de pressió màxima respecte el cabal d'aire que arriba a la caixa dels vents. La ràtio aire-aigua té molta influència en el cabal d'aire. Per les mateixes combinacions de paràmetres que en la figura 2-8, on es representen les mateixes corbes respecte l'alçada d'aigua sobre l'escanyall, les corbes resultants difereixen molt més les unes respecte les altres. En aquesta representació, les corbes per diferents longituds d'arbre no es cavalquen per cap combinació dels valors donats al lliscament o a la ràtio aire-aigua, com en la representació anterior.

En aquesta figura es fa evident el fet que una trompa amb una ràtio elevada d'aire-aigua, és a dir, amb una eficiència elevada d'arrossegament d'aire en l'escanyall, és molt més versàtil i útil que una trompa que tingui un escanyall poc eficient. Per ràtios aire-aigua elevats, el rang possible de cabals és molt més gran, mentre que el rang de pressions màximes es manté en un ordre de magnitud similar. La influència del lliscament es pot continuar qualificant-se se reduïda en aquesta representació.

El rendiment màxim de compressió de l'aire es defineix com la potència acumulada en l'aire de la caixa dels vents respecte la potència hidràulica utilitzada. La potència de l'aire es calcula com una compressió isotèrmica entre la pressió atmosfèrica i la pressió màxima assolible en la caixa dels vents.

Si no s'aprofita la potència que acumula l'aigua a l'interior de la caixa dels vents, en virtut de la seva major pressió respecte l'atmosfèrica, l'energia hidràulica implicada és la corresponent al salt existent entre la bassa i la cota de descàrrega de l'aigua, que s'ha situat a la desembocadura dels arbres.

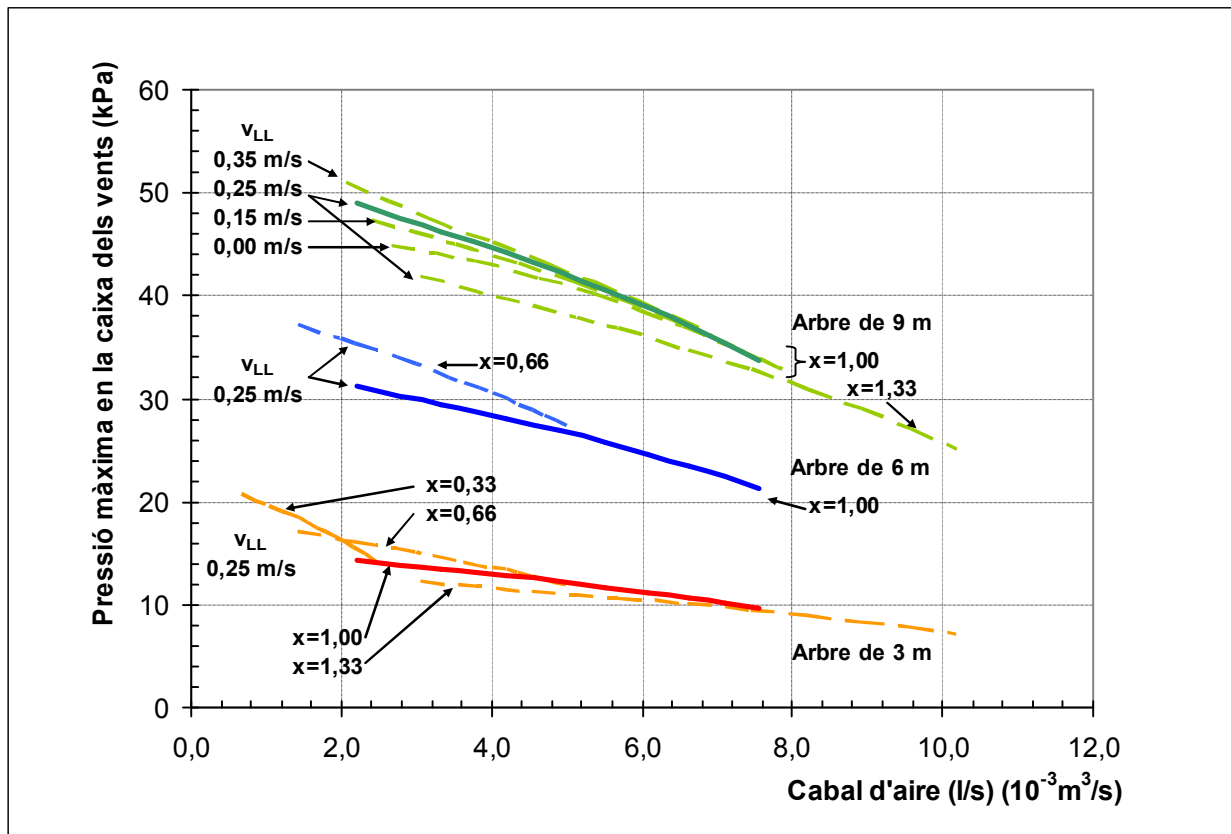


Figura 2-9. Pressió màxima que pot subministrar la trompa respecte el cabal d'aire.

Es tracta d'un màxim assolible de rendiment, atès que depèn de la pressió que es requereix en cada moment. És evident que si la pressió de la caixa dels vents és zero, la potència pneumàtica subministrada per qualsevol cabal d'aire és zero i el rendiment de la compressió és nul. Així doncs, el rendiment efectiu de compressió, en cada instant, és aproximadament proporcional a la pressió de la caixa dels vents, essent nul per una pressió nul·la, i essent el màxim si la pressió en la caixa dels vents és la màxima que pot subministrar la trompa, segons quin siguin la resta de paràmetres.

En cas que la pressió requerida no sigui la màxima, una major part de l'energia que proporciona el salt d'aigua es perd per fregament. D'una banda, l'alçada d'aire-aigua en l'arbre disminueix, de manera que el doll d'aigua que cau de l'escanyall dissipa l'energia sobrant per fregament amb l'aire i amb les parets no inundades de l'arbre. Si la totalitat d'aquestes pèrdues fos en forma de calor i fos absorbida per l'aigua, per cada metre de caiguda en buit dins l'arbre, la temperatura de l'aigua augmentaria en $2,3 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$.

En la figura 2-10 es representa el rendiment de compressió màxim respecte l'alçada de l'aigua sobre l'escanyall, la qual determina el cabal d'aigua que surt per l'escanyall, per un arbre de 3 m de longitud, i per diferents valors del lliscament i de la ràtio aire-aigua. En la figura 2-11 es representen les mateixes corbes respecte el cabal d'aire en lloc de respecte l'alçada d'aigua sobre l'escanyall.

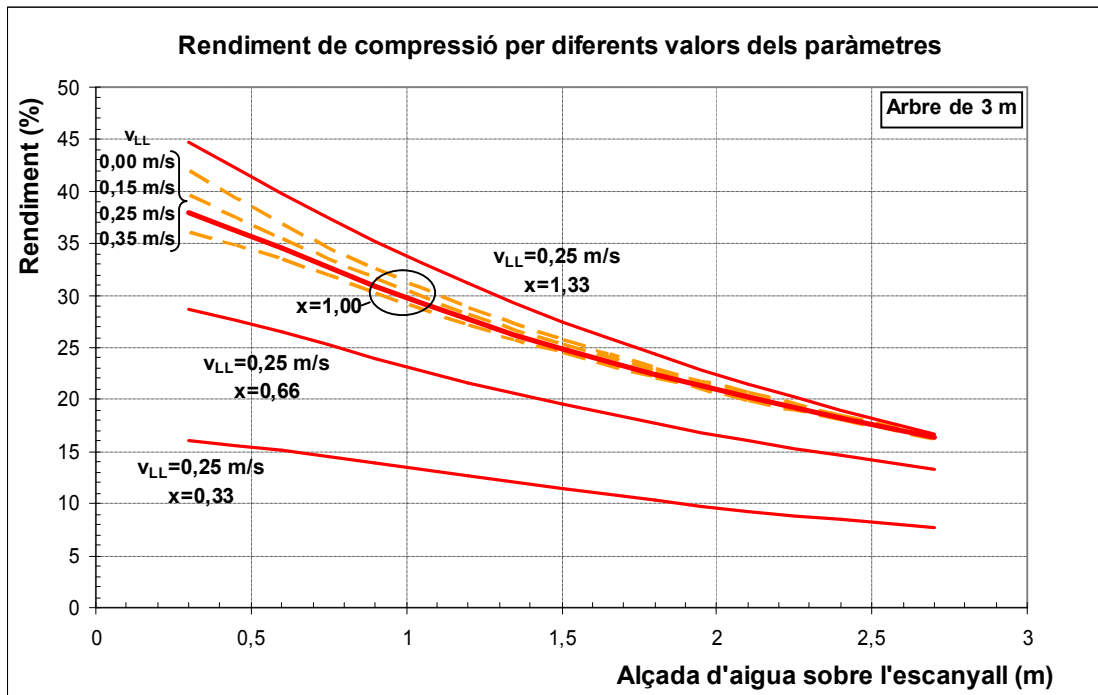


Figura 2-10. Rendiment pneumàtic màxim de la trompa de 3 m respecte l'alçada d'aigua en l'escanyall.

El rendiment màxim és més elevat per cabals d'aigua inferiors, i va disminuint a mesura que aquest cabal augmenta. El lliscament influeix poc en el rendiment; és lleugerament superior per lliscaments més baixos, i lleugerament inferior per lliscaments més alts. En canvi, la ràtio aire-aigua té molta influència en el rendiment màxim de compressió, essent molt més alt per valors de la ràtio més elevats.

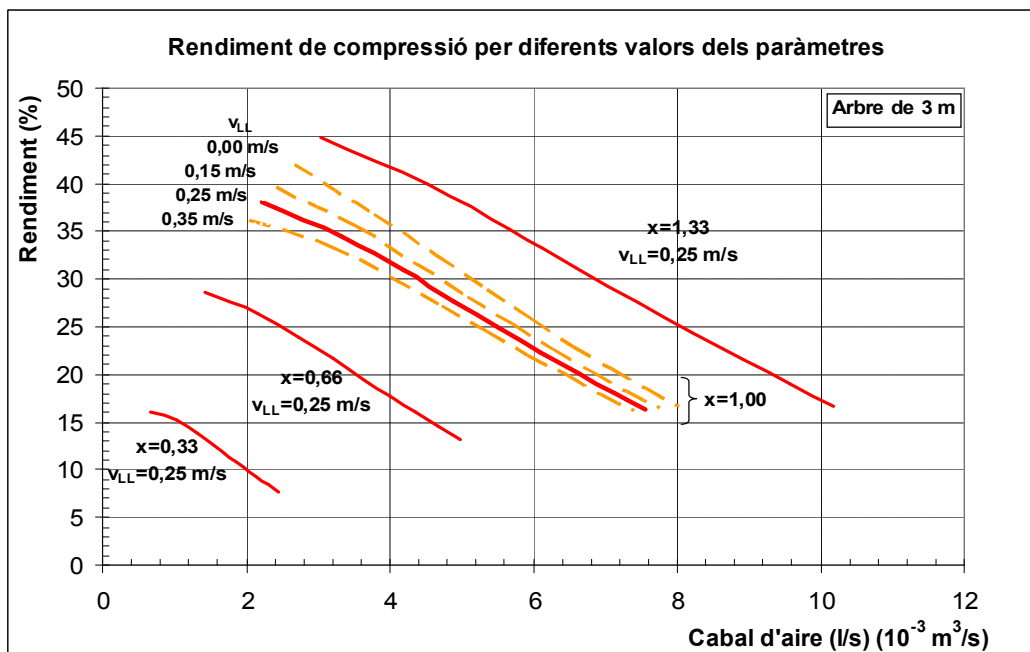


Figura 2-11. Rendiment de compressió respecte el cabal d'aire, per diferents valors dels paràmetres

En la figura 2-12 es representa el rendiment màxim de compressió per tres arbres de longitud diferent. Es representa el rendiment respecte l'alçada d'aigua sobre l'escanyall. La corba del rendiment respecte el cabal d'aire és molt similar, excepte que les corbes passen a ser convexes. Si la resta de característiques i paràmetres són iguals, les corbes de rendiment són molt similars entre elles. Per arbres més llargs, el rendiment tendeix a ser lleugerament superior per un mateix cabal d'aigua, principalment perquè les pèrdues per fregament en les singularitats, constants per un mateix cabal, es van fent relativament més petites a mesura que s'incrementa la longitud de l'arbre, atès que les pèrdues anomenades lineals són bastant menys importants que les anomenades singulars.

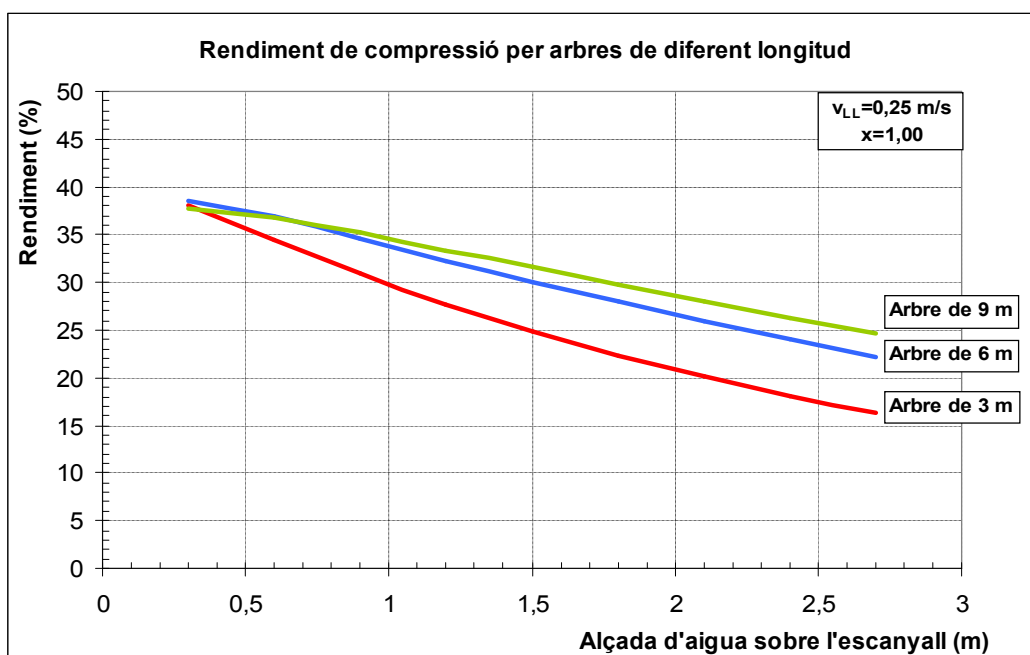


Figura 2-12. Rendiment màxim de compressió respecte la càrrega d'aigua.

El rendiment màxim de compressió de l'aire disminueix a mesura que augmenta el cabal d'aigua, o el que és el mateix, l'alçada d'aigua sobre l'escanyall. Aquest fet es deu principalment a l'augment de les pèrdues per fregament que es donen al llarg de l'arbre amb l'augment del cabal.

Aquest rendiment no supera en cap cas la quantitat del 40% perquè es deixa perdre l'energia de l'aigua continguda a la caixa dels vents, la qual està sotmesa a la mateixa pressió que l'aire. La manera més fàcil d'aprofitar aquesta energia consisteix en utilitzar-la per elevar la cota de l'aigua a la sortida, tal com es fa en les trompes de caixa inundada, o en els compressors hidràulics d'aire. Si la cota de sortida de l'aigua queda fixada en un valor constant, es perd versatilitat pel que fa a la pressió mínima subministrable. La pressió en la caixa dels vents queda determinada per aquesta cota de sortida. Si aquesta energia recuperada es descompta del balanç, les corbes de rendiment de la compressió quedarien com es representa en la figura 2-13.

El rendiment per cabals d'aigua més grans, per valors elevats de l'alçada d'aigua sobre els escanyalls, resulta ser aproximadament igual en ambdós casos, donat que amb l'augment del cabal, les pèrdues per fregament augmenten en gran mesura. Així, pel mínim cabal considerat i un arbre de 3 m de longitud, les pèrdues per fregament representen solament un 10% de l'energia hidràulica inicial, mentre que pel cabal màxim considerat en les figures, representen quasi un 50% del total.

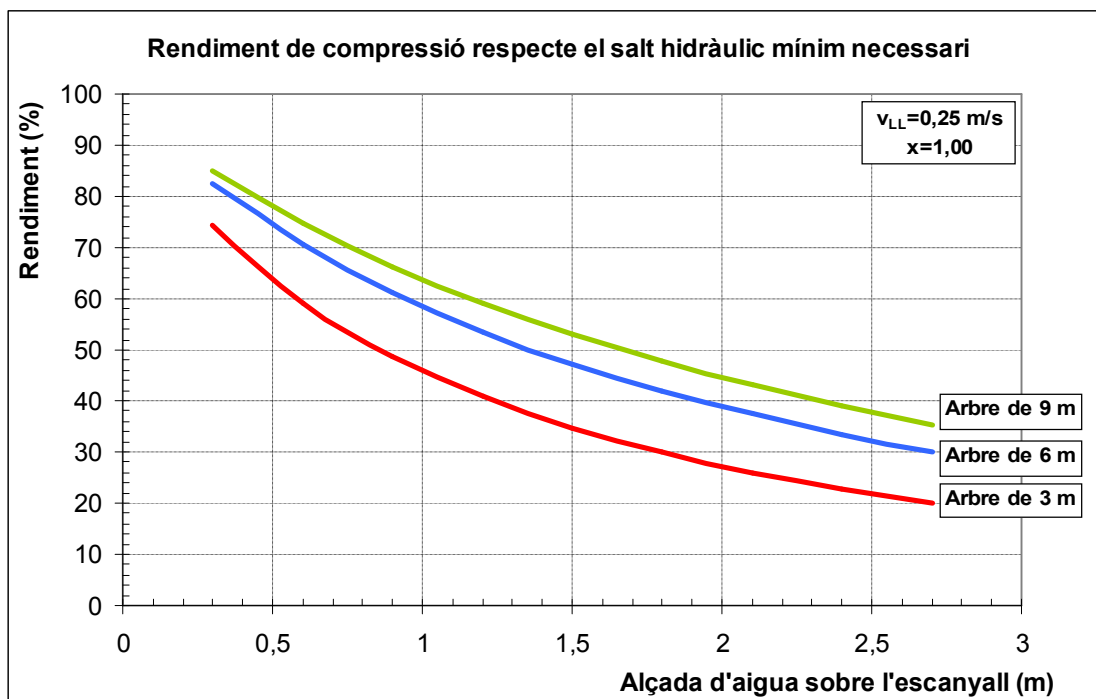


Figura 2-13. Rendiment de compressió de l'aire respecte el salt hidràulic mínim necessari.

El repartiment de l'energia hidràulica inicial en les diferents formes que adopta en passar per la trompa seria l'expressat en la figura 2-14, per un arbre 6 m de longitud, lliscament de 0,25 m/s i ràtio aire-aigua igual a la unitat.

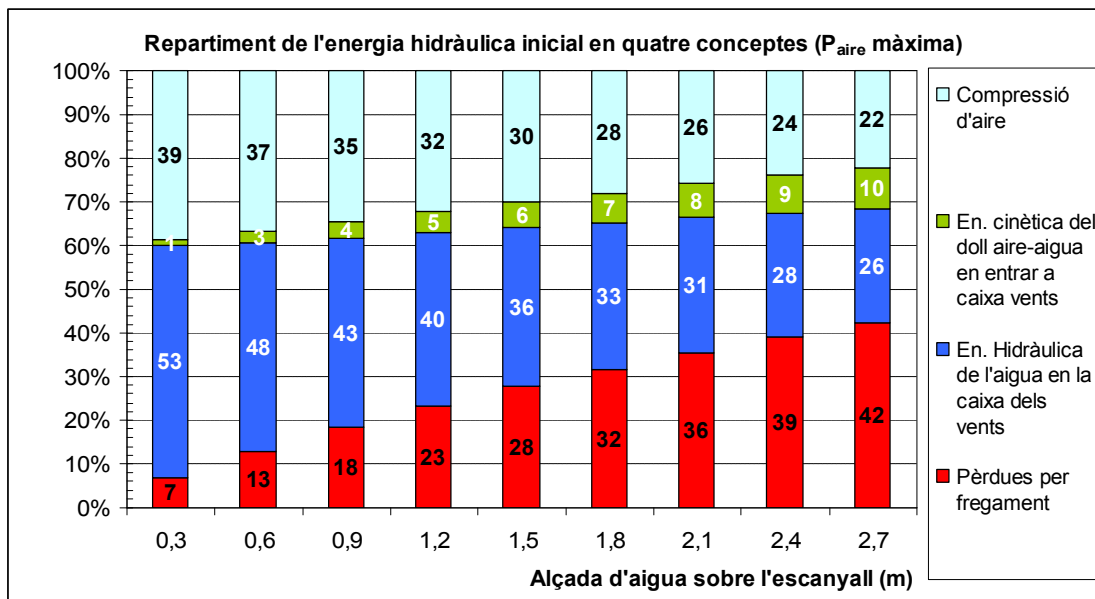


Figura 2-14. Repartiment de l'energia hidràulica inicial

Aquest repartiment es produeix quan la trompa subministra la pressió màxima de l'aire. En el cas que la pressió a la caixa dels vents sigui la meitat de la màxima, la quantitat d'energia en l'aire es reduiria aproximadament a la meitat, l'energia del doll a l'entrada de la caixa dels vents seria la mateixa, l'energia hidràulica de l'aigua continguda a la caixa dels vents es reduiria a la meitat, mentre que les pèrdues per fregament s'incrementarien fins a completar el 100% de l'energia inicial.

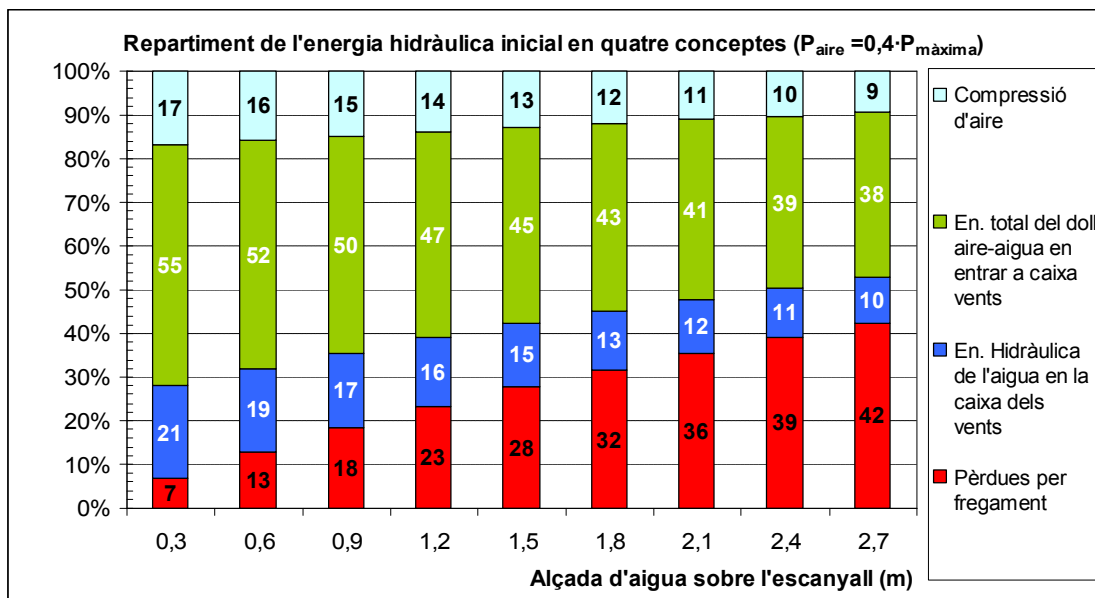


Figura 2-15. Repartiment en la trompa per una pressió en la caixa dels vents del 40% de la màxima.

Aquestes pèrdues es donen en el xoc de l'aigua amb la banqueta. Per una pressió de treball de l'ordre dels 10 kPa, la quantitat d'energia dissipada en la banqueta pot representar entre el 30% i el 60% de l'energia

total del salt, l'energia pneumàtica aprofitada, entre el 10 i el 15% i un percentatge similar s'escapava per la sortida d'aigua. La resta es perdia en forma de fregament en la resta d'elements de la trompa. El repartiment quedaria aproximadament com es mostra en la figura 2-15.

Sota el concepte "Energia total del doll aire-aigua en entrar a la caixa dels vents" s'entén l'energia cinètica del doll, i l'energia en forma de pressió excedentària que podria arribar a proporcionar, però que no proporciona per ser la pressió requerida per la càrrega inferior a la màxima.

Es poden plantejar dues estratègies d'aprofitament de l'energia de la trompa:

- a) d'una banda, es pot seguir l'estratègia dels compressors hidràulics d'aire, que consisteix en fixar la pressió de treball en la caixa dels vents igual a la màxima que pugui proporcionar l'arbre. D'aquesta manera es recupera l'energia hidràulica de la caixa dels vents per mitjà de l'augment de cota de la mateixa. El salt efectiu de l'aigua solament ha de cobrir les pèrdues per fregament que es donen al llarg dels conductes. El sistema proporciona energia en forma pneumàtica.
- b) d'altra banda, es pot optar per situar la recuperació d'energia a la sortida de l'arbre, que serà tant més efectiva com menor sigui la pressió en la caixa dels vents, a semblança del sistema de canonada forçada i turbina de les centrals hidroelèctriques, però amb un fluid bifàsic i descàrrega contra la pressió que hi hagi a la caixa dels vents, en lloc de ser contra la pressió atmosfèrica. Per pressions elevades en la caixa dels vents, la major fracció d'energia seria la continguda en l'aigua de la caixa dels vents en virtut de la seva pressió. Aquesta darrera fracció, o bé es perdria, o bé s'hauria de recuperar per mitjà d'una turbina, atès que per aquest sistema es renuncia a l'augment de cota de l'aigua que s'escull en el primer sistema.

2.2.7 Efecte de la temperatura, humitat i solubilitat de l'aire en el funcionament de la trompa

Es pot calcular la composició de l'aire sortint d'un compressor hidràulic, en el cas que existeixi equilibri termodinàmic pel que fa a la temperatura de les dues fases, a la humitat de l'aire comprimit i a la solubilitat de l'aire en l'aigua. Sota aquestes hipòtesis, es compliran les següents condicions:

- a) La temperatura de l'aire al final del compressor serà igual a la de l'aigua entrant.
- b) La pressió de vapor al final del compressor serà igual a la de saturació a la temperatura de l'aigua.
- c) Per la temperatura de l'aigua es complirà la llei d'Henry de la solubilitat dels gasos en aigua.
- d) Un cop s'ha format la mescla, la suma de la quantitat de massa present en les dues fases és constant, segons la llei de conservació de la massa.

La llei d'Henry per a la dissolució d'un gas en aigua s'expressa segons la següent equació:

$$M_{gas} = k_{gas} \cdot p_{gas} \quad \text{Equació 2-17}$$

on:

- M_{gas} és la concentració molar del gas en l'aigua, en mol/l (M)
- k_{gas} és la constant d'Henry per aquell gas, a la temperatura considerada, en M/hPa.
- p_{gas} és la pressió parcial d'aquell gas, que equival al producte de la fracció molar present en la fase gasosa per la pressió total, en hPa.

En la taula 2-5 es presenten els valors considerats per la pressió de saturació del vapor d'aigua, i per a les constants d'Henry de dissolució dels gasos oxigen i nitrogen en aigua per diferents temperatures:

Taula 2-5. Pressió de saturació del vapor d'aigua i constants d'Henry de l'oxigen i el nitrogen en aigua, per diferents temperatures¹⁰⁴.

Temperatura (°C)	P _{saturació vapor} (kPa)	k Oxigen (M/hPa)	k Nitrogen (M/hPa)
0 °C	0,61	$2,098 \cdot 10^{-3}$	$0,957 \cdot 10^{-3}$
15 °C	1,70	$1,566 \cdot 10^{-3}$	$0,747 \cdot 10^{-3}$
25 °C	3,17	$1,283 \cdot 10^{-3}$	$0,642 \cdot 10^{-3}$

Es considera una riquesa d'oxigen en l'aire de l'atmosfera del 21% en volum.

Frizell (1901, p.475) s'exposa la problemàtica que comporta l'augment de solubilitat dels gasos que componen l'aire amb l'augment de la pressió. D'una banda, el rendiment volumètric del compressor disminueix, i de l'altra, degut a les diferents solubilitats de l'oxigen i del nitrogen en l'aigua, l'aire comprimit resulta empobrit en oxigen respecte l'atmosfèric, per la qual cosa quedaria justificat el rebuig per part dels miners d'aquest sistema de compressió per les dificultats de respiració que comportava.

A més, segons COMPRESSED AIR MAGAZINE (1963), a l'hivern la instal·lació de Ragged Chutes, de 4,1 MW de potència nominal, no era capaç de cobrir la demanda total d'aire degut a les baixes temperatures ambientals, per la qual cosa s'havia d'utilitzar un compressor mecànic suplementari de 1,5 MW.

Aquest fet semblaria estar en contradicció amb el lleuger benefici que comporta l'augment de la densitat de l'aire a mesura que disminueix la temperatura. No obstant, aquest avantatge es veu totalment contrarestat i superat en escreix pel perjudici de la formació de gel en les entrades d'aire.

¹⁰⁴ Valors extrets de TCHOBANOGLIOUS (1985)

El principal efecte perjudicial de les baixes temperatures és la formació de gel en els espiralls, que queden obstruïts en major o menor grau. La quantitat d'aire arrossegada per l'aigua es veu fortament disminuïda, reduint el cabal subministrable pel compressor. A més, la major quantitat d'aigua per unitat d'aire fa augmentar les pèrdues volumètriques per dissolució. La riquesa en oxigen disminueix en major proporció.

En la taula 2-6 es mostra el rendiment i la composició de l'aire de sortida per un compressor de les característiques equivalents al de Ragged Chutes, per una pressió de l'aire de 9,31 hPa, una humitat relativa en l'aire ambient del 50% i una concentració d'oxigen en l'aigua entrant del 80% respecte el valor de saturació amb l'atmosfera i del 100% per al nitrogen.

L'efecte de la formació de gel en els espiralls fa baixar en gran mesura el rendiment volumètric del compressor i la quantitat d'oxigen present en l'aire comprimit, fins a un 15,5% en aquest cas. El canvi de la temperatura de l'aigua entre 0°C i 25°C comporta un enriquiment de la composició d'oxigen de l'aire comprimit des del 17,8 % fins al 18,9%, per disminució de la solubilitat dels gasos en aigua amb l'augment de la temperatura. Per una temperatura de l'aigua fixada, un aire més fred en l'atmosfera millora lleugerament el rendiment volumètric del compressor. La riquesa d'oxigen de l'aire comprimit també augmenta, malgrat que en una quantitat poc representativa.

Taula 2-6. Característiques teòriques de l'aire sortint del compressor de Ragged Chutes.¹⁰⁵

Temperatura	Ràtio vol. aire/aigua en l'aspiració	Ràtio vol. aire/aigua efectiu final	% volum d'aire comprimit respecte l'aspirat	% en volum d'oxigen en l'aire comprimit	% humitat rel. en l'aire comprimit a T_{aigua}
$T_{\text{aire}}=T_{\text{aigua}}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,5 (cong.)	0,287	57,5%	15,5 %	10,9 %
$T_{\text{aire}}=T_{\text{aigua}}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$	1,0 (no cong.)	0,781	78,1 %	17,8 %	10,9 %
$T_{\text{aire}}=T_{\text{aigua}}=15\text{ }^{\circ}\text{C}$	1,0	0,818	81,8 %	18,5 %	10,9 %
$T_{\text{aire}}=T_{\text{aigua}}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$	1,0	0,832	83,2 %	18,9 %	10,9 %
$T_{\text{aire}}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{aigua}}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$	1,0	0,857	85,7 %	19,0 %	10,9 %
$T_{\text{aire}}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{aigua}}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$	1,0	0,803	80,3 %	18,72 %	10,9 %

Donat que el vapor existent en l'aire comprimit quan està en la caixa dels vents està saturat a la temperatura de l'aigua, la humitat relativa d'aquest aire, un cop es descomprimeix a pressió atmosfèrica,

¹⁰⁵ CHEN i RICE (1982, 1983) elaboren un model matemàtic dels compressors hidràulics d'aire en què es té en compte la humitat i la solubilitat de l'aire. Per ràtios de compressió reduïts, s'assoliria l'equilibri entre les dues fases. En canvi, per pressions més elevades, la solubilitat efectiva de l'aire seria inferior a la d'equilibri, degut a la disminució del volum de la bombolla, i considerant que la velocitat de difusió dels gasos en l'aigua és finita. Pel compressor de Ragged Chutes presenten un resultat calculat pel percentatge d'oxigen en l'aire comprimit del 17,4% en volum. Es cita un estudi de camp realitzat l'any 1911 sobre el mateix compressor, segons el qual l'aire comprimit tindria una riquesa en oxigen del 17,7% en volum.

és sempre igual a l'invers de la relació de compressió. En aquest cas, la relació de compressió és 9,19, i la humitat relativa de l'aire un cop surti a l'atmosfera serà del 10,9 % a la temperatura de l'aigua. En cas que la temperatura ambient sigui diferent de la de l'aigua, el valor absolut de la humitat no canviarà, mentre que el valor relatiu de la humitat serà diferent.

Existeix un límit teòric de relació de compressió per aquest tipus de compressors, a partir del qual la sortida d'aire comprimit seria nul·la, per la seva total dissolució en l'aigua. Podem anomenar-la relació de compressió de col·lapse. Aquest valor límit depèn a la vegada i en gran mesura de la ràtio inicial d'aire/aigua de la mescla formada en l'embocadura de l'arbre. Així, per una ràtio igual a 1, una temperatura de l'aigua de 15°C i una relació de compressió de 25, el volum que es mantindria en condicions d'equilibri en forma gasosa a la cambra de separació seria solament del 50% de l'aspirat inicialment, amb una riquesa d'oxigen en l'aire comprimit del 15%. En canvi, per una ràtio aire/aigua igual a 0,5, per aconseguir la mateixa reducció a la meitat de la quantitat d'aire, la relació de compressió necessària seria de 13. A la pressió de col·lapse, la proporció d'oxigen dissolt coincidiria amb la seva concentració a l'atmosfera.

Durant la descompressió de l'aigua en la canonada de retorn al medi ambient, es torna a gasificar l'aire que s'ha diluït en l'aigua degut a la pressió, tot formant-se bombolles de petites dimensions en el seu interior. Aquest aire conté una major proporció d'oxigen respecte l'aire de l'atmosfera. La riquesa en oxigen d'aquest aire és de l'ordre de 32% en volum per una relació de compressió de 8, mentre que en l'atmosfera, la riquesa en oxigen es considera del 21%. Si el compressor funcionés en circuit tancat pel que fa a l'aigua, no es produiria l'empobriment en oxigen de l'aire comprimit respecte l'atmosfèric. Igualment, si l'aire dissolt en l'aigua es recuperés a la sortida del compressor i es tornés a introduir en l'aspiració, aquest empobriment seria tant menor com més aire es recuperés a la sortida.

Pel que fa a una trompa en la configuració utilitzada en la farga catalana, la composició de l'aire és gairebé idèntica a l'atmosfèrica, degut a la seva baixa relació de compressió. Sense arrossegament d'aigua en estat líquid per l'aire, la humitat relativa de l'aire hauria hagut de ser del 91 % a la temperatura de l'aigua. En cas que la temperatura i humitat ambientals fossin més elevades, la quantitat d'aigua introduïda al forn hauria estat menor que si s'hagués utilitzat una manxa, i viceversa. L'arrossegament d'aigua en forma líquida pel corrent d'aire fins al forn, feia augmentar aquesta quantitat d'aigua en una quantitat difícil de determinar.

Per altra banda, la quantitat d'oxigen present en l'aire comprimit podia disminuir lleugerament, en 0,3 o 0,4 unitats percentuals respecte l'aire ambient, és a dir, que el contingut d'oxigen de l'aire comprimit hauria estat del 20,7 % o el 20,6 % en volum.

2.2.8 Càlculs hidràulics de la recirculació d'aigua en la trompa pilot

La recirculació de l'aigua des de la caixa dels vents fins a la part superior de l'arbre es fa mitjançant dues bombes centrífugues. Cadascuna té la seva pròpia aspiració i canonada d'impulsió. Les dues canonades s'uneixen per mitjà d'una T que connecta amb la capçalera de l'arbre. En base a les característiques de les bombes proporcionades pel fabricant i expressades en la figura 2-2, i en combinació amb les característiques hidràuliques de la resta d'elements, es poden calcular els cabals i pressions assolibles en l'escanyall de la trompa.

La pressió al final de la impulsió, just en l'escanyall, es considera que és igual a l'atmosfèrica, atesa l'existència dels espiralls oberts a l'aire de l'entorn. Donat que es tracta de pressions manomètriques, la pressió en l'escanyall es considera igual a zero.

La pressió en l'aspiració de les bombes, en canvi, depèn de la pressió de l'aire que hi hagi en la caixa dels vents i de l'alçada d'aigua en la mateixa. El pitjor cas es dona quan la pressió a la caixa dels vents és igual a l'atmosfèrica, és a dir, quan no hi ha cap càrrega en la línia d'aire i aquest es deixa escapar lliurement. Per aquest motiu, s'adopta la hipòtesi de càlcul que la pressió en la caixa dels vents és zero. En cas que la pressió de l'aire fos superior, la pressió assolible per la recirculació, per un mateix cabal, augmentaria en la mateixa quantitat que el valor de la pressió en la caixa dels vents.

La corba de càrrega de la recirculació és l'expressada en la figura 2-4 i la taula 2-4. Les variables a tenir en compte són l'obertura de l'escanyall, la secció transversal de l'arbre i la seva longitud (3, 6 o 9 m).

En les figures 2-16, 2-17 i 2-18 es presenten les corbes que expressen el funcionament de la recirculació pel que fa al cabal i l'alçada de bombament, d'acord amb les premisses anteriors.

En aquestes figures es representen les corbes que resultarien d'una recirculació sense pèrdues per fregament, que coincideixen amb les prestacions de la bomba indicades pel fabricant. També es representen les corbes amb pèrdues per fregament, que estan etiquetades amb el qualificatiu de "recirculació efectiva". D'aquesta manera es posa en evidència la influència d'aquestes pèrdues en les prestacions de la recirculació.

La recirculació amb dues bombes en paral·lel permet conduir aproximadament el doble de cabal d'aigua a l'embocadura de la trompa, respecte la recirculació amb una sola bomba. La major o menor longitud de la canonada d'impulsió fa que les pèrdues lineals per fregament siguin lleugerament diferents entre la trompa de 3, 6 i 9 m de longitud. Aquesta diferència pot arribar a ser d'un m.c.a. per als cabals més elevats, però és d'uns pocs centímetres per als cabals més reduïts.

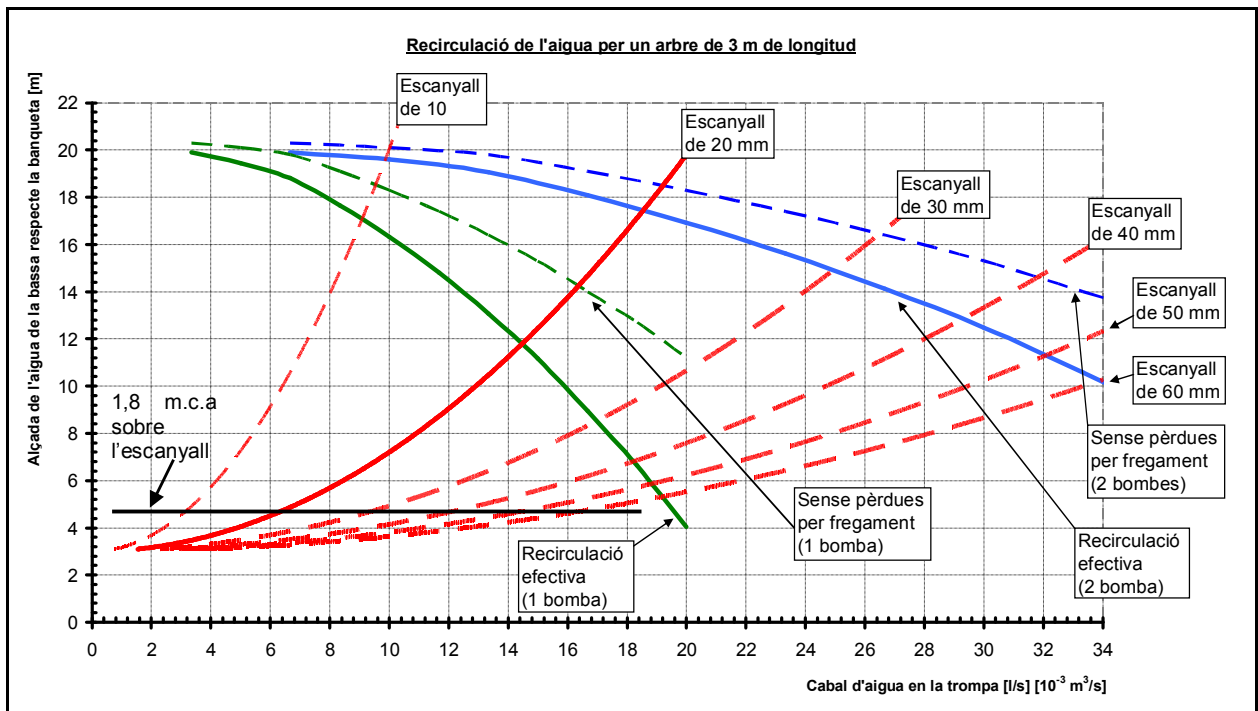


Figura 2-16. Corbes cabal/pressió de la trompa amb recirculació (arbre de 3 m de longitud)

En cada una de les figures es marca la línia horitzontal que representa una alçada d'aigua sobre l'escanyall de 1,8 m. Amb una sola bomba es pot assajar gairebé la totalitat de la casuística plantejada.

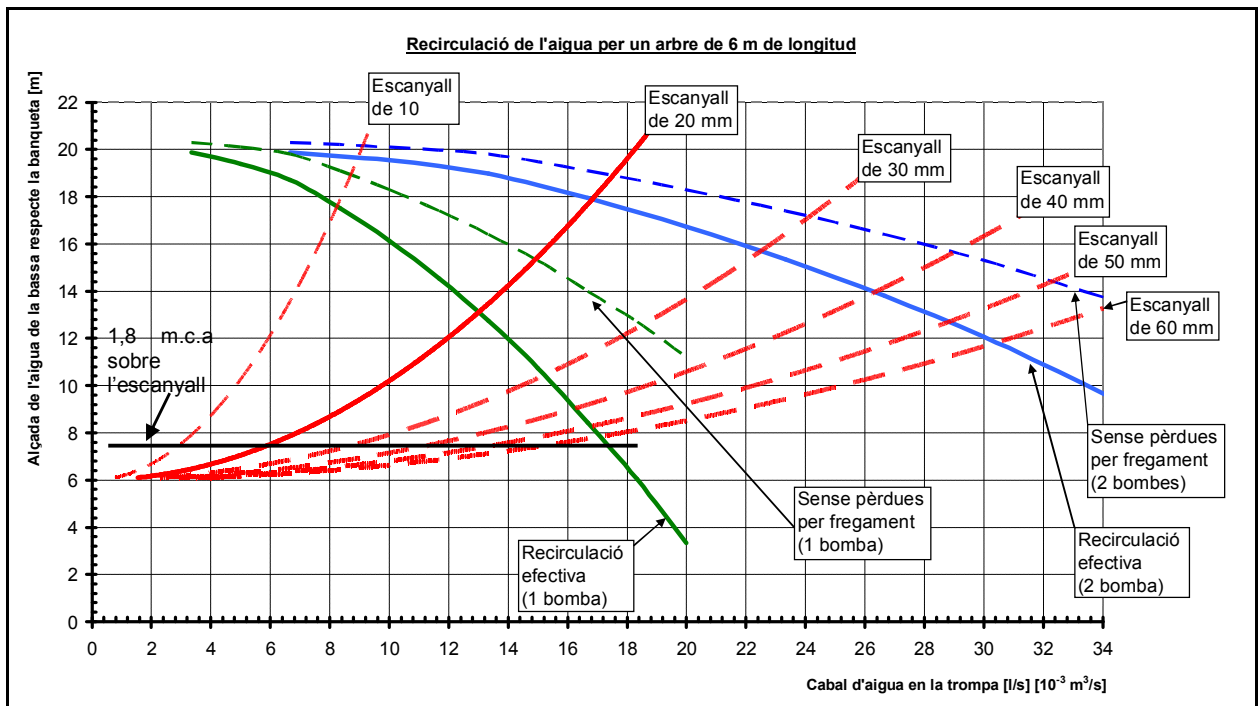


Figura 2-17. Corbes cabal/pressió de la trompa amb recirculació (arbre de 6 m de longitud).

Les bombes de recirculació poden proporcionar una alçada de bombament molt més alta que la requerida per l'assaig de la trompa. Per ajustar el cabal a un valor arbitrari, cal ajustar l'obertura de les vàlvules de la impulsió de les bombes. Per aquest mitjà, la corba efectiva de prestacions s'acosta progressivament cap a l'origen de coordenades. En la figura 2-18 es representa la corba d'una bomba per un coeficient de pèrdues (k) en la vàlvula de valor igual a 30, que equivaldria una obertura de la vàlvula del 29%, o a un angle de la maneta d'uns 45°, aproximadament.

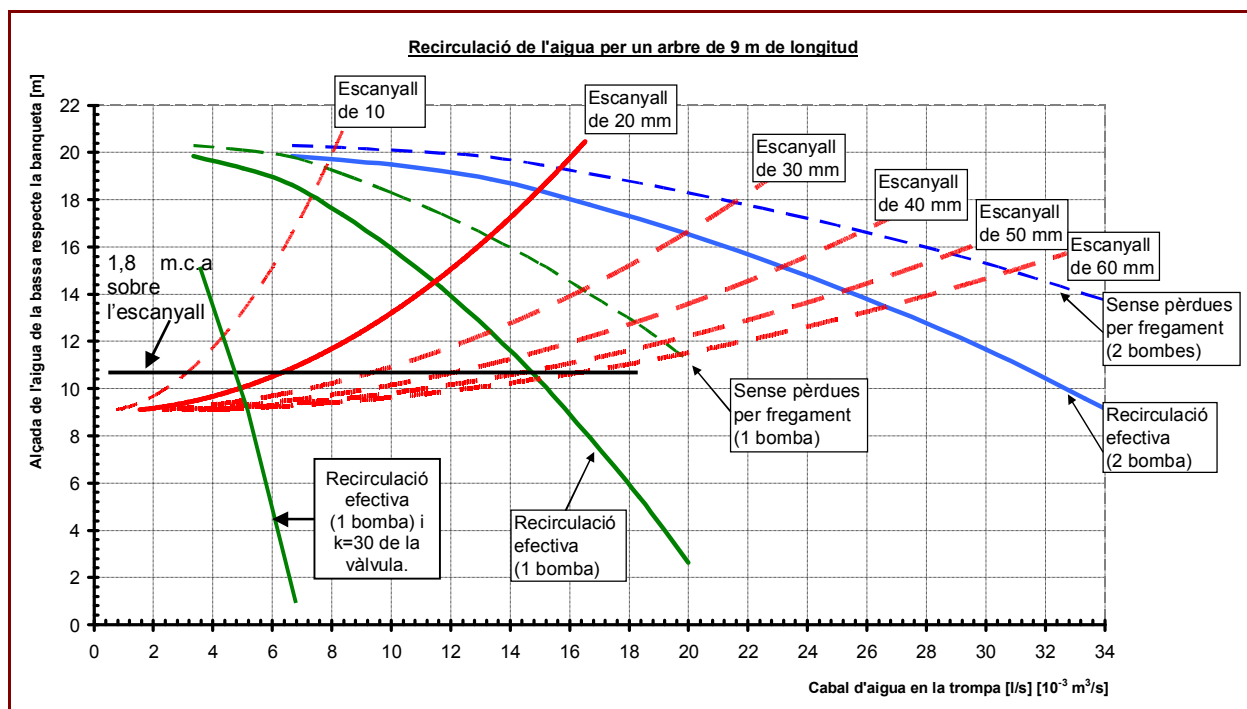


Figura 2-18. Corbes cabal/pressió de la trompa amb recirculació (arbre de 9 m de longitud).

2.3 Resultats dels assajos

2.3.1 Assaig amb tubs de pocs mil·límetres de diàmetre

Inicialment es va preparar una petita trompa d'aigua a partir d'un tub cilíndric de vidre de 4 mm de diàmetre. Per aquestes dimensions, la capil·laritat té una influència preponderant en el comportament de la trompa. L'aire i l'aigua es disposen dins el tub en capes alternades, de manera que es produeix un veritable flux pistó.

El flux pistó permet que la relació entre la quantitat de volum d'aire aspirat i d'aigua utilitzada pugui ser molt més gran que la unitat, assolint fàcilment valors 3 o de 4. A mode indicatiu, en la taula 2-7 es mostren els resultats de dos dels assajos.

Taula 2-7. Resultats dels assajos realitzats amb una trompa de 3 mm de diàmetre

	Secció de pas en l'escanyall respecte l'arbre	Cabal d'aigua	Cabal d'aire	Relació entre el cabal d'aire i el d'aigua	Rendiment energètic
Assaig 1	30 %	0,79 ml/s	2,13 ml/s	2,70	16 %
Assaig 2	80 %	2,50 ml/s	1,48 ml/s	0,59	4,2 %

2.3.2 Posada a punt de la trompa pilot

S'ha posat a punt la trompa pilot a escala 1:3. El seu comportament s'adequa al model del compressor volumètric, malgrat que es difícil definir un únic valor de la ràtio aire-aigua i del lliscament.

L'ajust del punt de funcionament es fa mitjançant l'obertura parcial de les vàlvules situades a la impulsió de les bombes. Es pot mesurar la pressió i el cabal d'aigua en l'escanyall, l'alçada de l'aigua en la caixa dels vents i el cabal i la pressió de l'aire en la caixa dels vents.

Els cabals i pressions mesurats són assimilables a les indicades per Richard (1838)

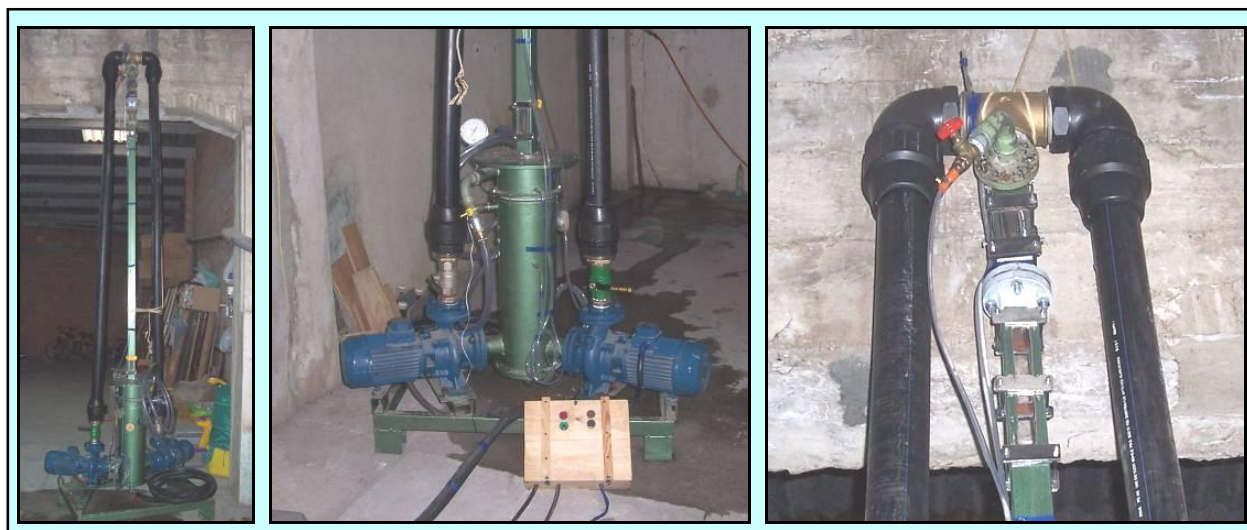


Figura 2-19. Trompa d'aigua construïda. Any 2007. Dreta: vista general de la trompa amb un arbre de 3 m de longitud. Centre: detall de la caixa de vents i les bombes de recirculació. Esquerra: detall de la part superior de la trompa, de l'escanyall i de la finestra transparent per observar el flux.

El comportament de la trompa canvia molt en funció de la banqueta que s'utilitzi, de l'eficiència de la separació de les bombolles d'aire i de la pressió i cabals d'aire en la caixa dels vents. Per aquest motiu, per cada cas concret cal fer una caracterització final per ajustar el model.

2.4 Resum de les possibles aplicacions de la trompa d'aigua

Les possibilitats d'un sistema de trompa són diverses. És un sistema sense parts mòbils, de construcció senzilla, que pot permetre aprofitar cabals sobrers d'aigua, sigui quina sigui la seva qualitat, i proporcionar una força per elevar algun altre fluid, mitjançant, per exemple, una bomba d'elevació per aire. El seu rendiment depèn molt de les condicions que es donen en cada moment, però el control que requereix és nul: funciona quan es donen les condicions adequades i deixa de funcionar en cas contrari.

Per altra banda, el contacte íntim entre l'aire i l'aigua i la virulència de la mescla el fan apte també per aplicacions d'aeració i d'intercanvi de gasos entre aire i aigua, com ara per la depuració d'aigües.

La major solubilitat de l'oxigen respecte el nitrogen, lligat a la compressió i descompressió de l'aire en la trompa, podria ser utilitzat per a obtenir tant aire enriquit com empobrit en oxigen, dins els marges definits per la llei d'Henry de solubilitat dels gasos.

El mateix fenomen de la bomba d'aire s'utilitza en alguns sistemes de refrigeració per vehicular el fluid refrigerant, gràcies a la diferència de densitats en estat líquid, o per la formació de bombolles de gas del mateix fluid en el seu interior.

Els fluids bifàsics també apareixen en els circuits de refrigeració per aigua quan es comença a formar vapor en els conductes, o de manera més evident, en els circuits de refrigeració per nitrogen líquid, en què es poden produir fenòmens expansius tipus pistó que facin avançar o retrocedir el nitrogen líquid pel circuit de refrigeració. Per aquest motiu és habitual la utilització de conductes en paral·lel que condueixen a col·lectors de major diàmetre. Allí, les bombolles de vapor que s'hagin format haurien de condensar ràpidament per l'augment de pressió.

Els fluids bifàsics també tenen una important aplicació en la reducció del fregament entre superfícies, per mitjà del que es coneix com coixins hidrodinàmics bifàsics.

En el món del mar existiria la possibilitat d'aprofitar el menor coeficient de fregament de la mescla de l'aigua amb aire o amb els gasos d'escapament del motor, per reduir el fregament del buc en el seu lliscament respecte l'aigua.

Un altre avantatge dels fluxos bifàsics és el de tenir un comportament entre el d'un fluid incompressible i el d'un fluid compressible. En el cas de l'existència de fenòmens com la cavitació i els cops d'ariet, el comportament del fluid ha de ser diferent, i pot ser avantatjós segons les circumstàncies.

Existeix també la possibilitat de substituir la banqueteta per una turbina, per tal de recuperar l'energia que s'hi dissipa. Aquesta recuperació és major com menor sigui la pressió en la caixa dels vents. La banqueteta es canviaria per un deflector que desviés l'aigua cap als àleps de la turbina. Amb un disseny adient, l'aire se separaria primerament en aquest deflector per diferència de densitats i posteriorment en els àleps de la turbina.

Bona part dels recursos hidràulics renovables no s'aprofiten en l'actualitat pel fet de tenir poca càrrega o poc desnivell. Són exemples d'això l'energia continguda en les ones del mar, en les mareas o en els cursos d'aigua de poc pendent. S'han plantejat alternatives al sistema tradicional de turbina hidràulica acoblada a un generador, en base a sistemes de conversió de l'energia hidràulica en energia pneumàtica¹⁰⁶. Les turbines d'aire tenen una densitat energètica i una velocitat més altes en comparació amb els seus equivalents hidràulics, per una mateixa diferència de pressions. A més, per desnivells petits, els costos de capital i de manteniment també són menors en el cas de l'aprofitament pneumàtic. Una primera alternativa consisteix en la utilització d'una trompa d'aigua per augmentar la pressió de l'aire entrant a la turbina. Una segona alternativa consisteix en la utilització d'un sifó amb una entrada d'aire a la part superior, a mode de trompa de buit, per generar una depressió que arrossegui l'aire sortint d'una turbina oberta a l'atmosfera. També existeix la possibilitat d'un sistema mixt.

Finalment, respecte la dessalinització d'aigua per mitjans renovables, existeixen diferents dispositius que funcionen en base a l'energia solar¹⁰⁷, en els quals la introducció d'una lleu depressió o sobrepressió podria afavorir en gran mesura el rendiment final.

¹⁰⁶ FRENCH (2001), HOWEY (2009), BELLAMY (1989)

¹⁰⁷ ZARZA (1997)

Capítol 3. La màquina elèctrica especial: el prototip VF1

En aquest capítol es descriuen els elements que han influït en l'elecció del tipus de turbina i motor a l'hora de realitzar el prototip VF1. A més de la recuperació d'energia en el xoc de l'aigua contra la banqueteta de la trompa d'aigua, també ha influït en gran mesura la tendència actual en propulsió marina de desenvolupar hèlix sense eix, arrossegades des de la perifèria, que integren l'hèlix a l'interior de rotor de la màquina elèctrica. Per aquesta configuració, hi ha indicis de millora sensible en l'eficiència propulsora.

Posteriorment es descriuen els aspectes més significatius de la construcció del prototip. Es tracta d'una màquina d'inducció amb rotor de copa, amb l'estor amb debanat de simple capa i un conductor per ranura i fase. També s'inclouen unes simulacions simples d'alguns aspectes constructius del prototip i alguns resultats significatius dels assajos.

3.1 Motivació

A continuació es presenten alguns dels aspectes que han influït en el desenvolupament del prototip VF1 i que han marcat també el rumb dels treballs.

3.1.1 La generació hidroelèctrica

El conjunt de generació hidroelèctrica més habitual és la turbina–generator, units per un eix o una transmissió.

Les realitzacions tècniques en el camp de les turbines hidràuliques són extenses i amb un alt grau de perfeccionament. La teoria proporciona eines de càlcul adients per a un bon dimensionat de cada tipus de turbina, tot indicant el rang de cabals i pressions en què donen millor rendiment.

De forma resumida i a nivell indicatiu, per a altes pressions i cabals reduïts, les més adients són les turbines Pelton; la turbina Francis s'adequa a cabals i salts mitjans; i la turbina Kaplan és adequada per a cabals més grans amb una menor diferència de pressió. Les turbines més utilitzades en hidrogenació són les Pelton i les Francis. Una bona candidata per a l'aprofitament energètic de la trompa seria la turbina Kaplan, que és la que més s'assembla a una hèlix de motonàutica.

El fet que es tracti d'un fluid bifàsic permet fer el símil amb el comportament de les hèlix de superfície utilitzades en motonàutica, en les quals una part de la rotació es dona dins de l'aigua, i l'altra a l'aire.

Per altra banda, els generadors més habituals són les màquines síncrones per a la connexió a la xarxa. Per a aplicacions de menor potència, i en el camp de les microturbines, també existeixen els generadors de contínua per a tensions de 12 i 24 V, pensades per a alimentar bateries de plom.

Les màquines d'inducció també poden utilitzar-se com a generadors si es combinen amb condensadors que aportin l'energia reactiva necessària. Malgrat que s'utilitzen poc en màquines comercials, aquesta aplicació no és despreciable. El generador del Seat 600 híbrid del laboratori del DEE de l'ETSEIB (UPC) és d'aquest tipus. Té una potència de 2,2 kVA¹⁰⁸. Amb aquest generador no és tant complicada la gestió de la tensió, la freqüència, ni la conversió a corrent continu.

¹⁰⁸ CABRERA, Rosendo.; CAPMANY, Pau. *Cap al Vehicle de Propulsió elèctrica: Avaluació i millores de la cadena energètica instal·lada en un Seat 600.*, [PFC], 2010)

El generador d'inducció permet eliminar el ferro del rotor, deixant solament els materials conductors, que solen ser inoxidable. També admet la variació del nombre de pols a la mateixa màquina, per simple commutació de bobines estatòriques. Els rotors d'inducció conductors, sense ferro ni imants permanents, malgrat el seu pitjor comportament magnètic, no estan sotmesos als esforços de reluctància, essent molt simple la seva suspensió hidrodinàmica o electromagnètica¹⁰⁹.

3.1.2 La propulsió naval i l'electricitat

Existeixen solucions per a la propulsió naval elèctrica, tant de gran potència per a la marina mercant, com de més petita per a les embarcacions esportives¹¹⁰. En la figura 3-1 es presenten alguns exemples de propulsors elèctrics concebuts en la configuració d'hèlix arrossegada des de l'eix, de la marca Fisher Panda. Aquest fabricant ofereix propulsors alimentats per corrent continu de 48 V de fins a 10 kW, i alimentats en corrent altern trifàsic de 480 V per potències entre 10 kW i 75 kW.



Figura 3-1. Propulsors navals elèctrics fabricats per Fisher-Panda.¹¹¹

Per altra banda en els darrers anys també s'han desenvolupat i comercialitzat uns propulsors navals concebuts en la configuració d'hèlix arrossegada des de la perifèria, sense eix, que integren l'hèlix en la màquina elèctrica, de manera que es suprimeix la transmissió. S'aconsegueix major compacitat, la màquina elèctrica pot tenir un nombre major de pols, una velocitat de rotació inferior i un parell més elevat.

El fet que l'hèlix no tingui eix li aporta avantatges a nivell hidràulic i impedeix que s'hi puguin enrotllar filaments o cables. A més, les hèlix en tovera tenen millors prestacions d'empenta i velocitat que les hèlix sense tovera, o convencionals¹¹². La tovera, sobretot si gira solidària amb les pales, resol els vòrtex de

¹⁰⁹ BOSCH, R. (*Desenvolupament del motor elèctric sense coixinets*, 1987)

¹¹⁰ ÀVILA, R. (*Remodelación de una embarcación de 4m. de eslora para, el diseño, instalación y estudio de un sistema de propulsión eléctrico*, [Master Thesis], 2010): es presenta el cas de construcció i assaig d'un motor d'inducció d'entreferro inundable realitzat a partir d'un motor d'inducció trifàsic comercial.

¹¹¹ <<http://www.fisherPanda.de>>. Consulta: 01/2008.

¹¹² NÚÑEZ (1975).

punta de la pala, doncs separa físicament la pressió de la cara anterior de la pala, de la succió que es genera en la cara posterior de la mateixa.

Existeixen com a mínim dues empreses que proveeixen aquest tipus d'equips:

- a) *Marine Systems Van Der Velden*: ofereix equipament propulsor elèctric per a grans vaixells, i potències a partir de 30 kW fins a 300 kW. En la figura 3-2 es presenten alguns exemples dels productes del seu catàleg. Introdueix innovacions difícils d'aconseguir per altres sistemes de propulsió com els propulsors replegables i els azimuthals.

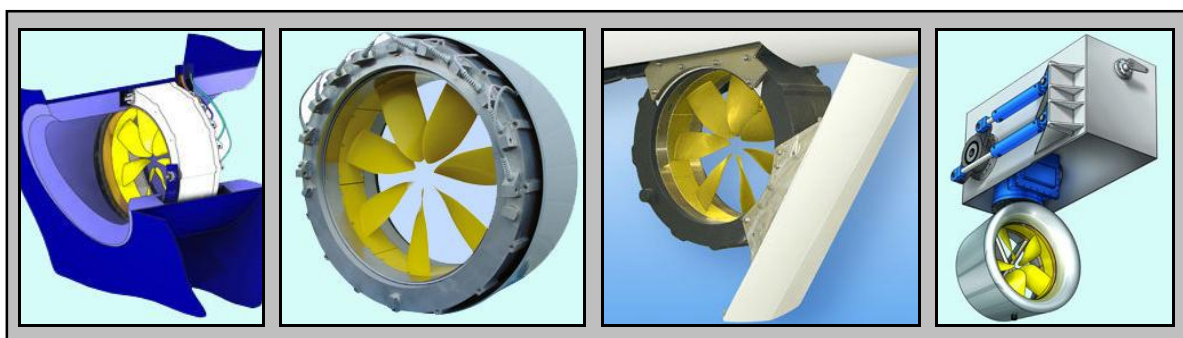


Figura 3-2. Diferents models de propulsors marins elèctrics, en tovera i arrossegats per la perifèria comercialitzats per *Marine Systems Van Der Velden*.¹¹³

- b) *L.+W. Bieschewski GmbH* el gener de 2008 va treure al mercat propulsors elèctrics del tipus “E-Jet Electric Drive”, per potències des dels 2 kW fins als 60 kW, en corrent altern (400 V) o continu (12 o 24 V). En la figura 3-4 es mostren alguns dels productes del seu catàleg.



Figura 3-3. Diferents models de propulsors elèctrics marins elèctrics, en tovera i arrossegats per la perifèria, del tipus *E-Jet Electric Drive* comercialitzats per *L.+W. Bieschewski GmbH*.¹¹⁴

En referència als motors de menor potència, l'anàlisi de les prestacions i del preu dels equips permet deduir que es tracta de motors d'imants permanents en el rotor. Això obre la possibilitat al desenvolupament d'un motor especial d'inducció, molt més econòmic, robust i resistent a la corrosió.

¹¹³ <<http://www.vdvelden.nl>>. Consulta: 01/2008

¹¹⁴ <<http://www.e-jet.org>>. Consulta: 01/2008

Es tractaria que els àleps de la turbina fossin suportats pel mateix rotor de la màquina elèctrica, de manera similar als models anteriorment mostrats.

3.1.3 Participació en el desenvolupament del bot Ras.

En el moment de plantejar el projecte de tesi, semblava que el prototip que s'hauria construït es podria arribar a provar com a generador en condicions de flux confinat a l'interior de la trompa, i també en condicions de flux obert a sobre d'una embarcació, atès que una de les possibles aplicacions d'aquest tipus de màquines és la propulsió naval.

Per aquest motiu vaig contribuir a la construcció del bot híbrid Ras, per garantir que pogués servir posteriorment com a banc de proves del prototip. La construcció es va fer en motiu de diversos projectes de fi de carrera. Degut a l'evolució que ha tingut el prototip a mesura que s'ha anat construint, fer aquest tipus de proves no és viable actualment. El bot Ras, per la seva banda, estaria a punt per a ser utilitzat.

El bot Ras s'ha fet a partir del casc de fibra de vidre d'una llanxa de competició de motonàutica de la categoria de 45 CV. És del tipus catamarà de 3,4 m d'eslora. Té un grup electrogen amb un alternador trifàsic de 8,5 kVA i 400 V de corrent altern a 50 Hz, impulsat per un motor de combustió interna de benzina d'una potència de 9 CV (6,7 kW). El buc de l'embarcació es va obtenir com a cessió temporal per a la recerca a la Facultat de Nàutica de Barcelona (FNB) i a l'ETSEIB, de part de l'Associació de Patrons de Iot (APY). L'estat actual de l'embarcació és fruit de les intervencions recollides en els Projectes de Fi de Carrera (PFC) de Vicenç Olivella, Víctor Pou, Gabriel Riera, Miquel Vidal, Albert Peregrina i Carles Bou.

La propulsió es fa per dos motors elèctrics de bomba submergible, en què s'ha substituït el rodet de la bomba per una hèlix. Estan instal·lats de manera que les hèlix queden situades a la sortida de l'estela dels dos flotadors. Els motors són de 2,2 kW de potència i 400 V de tensió nominal.

Es va col·laborar primerament en el condicionament del buc de fibra de vidre, en la caracterització del seu comportament dinàmic per mitjà de l'arrossegament des d'una altra embarcació i en les proves motrius en el canal d'ones de la UPC. La participació posterior va consistir principalment en la definició i elaboració del carenat, dels elements relacionats amb l'ergonomia, en la definició, elaboració i millora dels controls, proteccions i elements de mesura, per tal de dotar-los de modularitat i adaptabilitat. S'han assajat diferents grups generadors, càrregues i tipus de motors, amb diversos elements de suspensió dels conjunts o les seves parts. També s'ha resolt l'adaptació del la plataforma de transport per carretera.

Els controls poden ser per contactors a la tensió del generador, i per mitjà de variadors de freqüència que responen a una consigna per al sentit de gir i una altra per a la freqüència de la corrent d'alimentació dels motors.

Per a la impermeabilització i protecció del buc i carenat s'han utilitzat els següents tipus de recobriments:

1. Superfícies exterior del buc: 1,5 l. de "TITAN YATE "Esmalte uretanado 4115 Naranja" sobre dues capes de "GELCOAT".
2. Superfícies interiors: "LEPANTO, Esmalte sintético tipo industrial y lujo. Esmalte sintético uretanado 543 Azul Cobalto"
3. Superfícies exteriors del carenat de fibra de vidre: "TITANLUX Esmalte sintético 529 Amarillo Real"
4. Peces de ferro no galvanitzat: "OXIRON TITAN Martelé, Esmalte Metálico 2900 gris plata"
5. Les xapes de ferro galvanitzat de la part posterior del carenat no tenen cap protecció addicional.

El pes total del conjunt és d'uns 280 kg.

S'han realitzat proves en la configuració descrita en el canal d'ones de la UPC, en una bassa de 0,5 m de profunditat amb el permís de Parcs i Jardins de Barcelona, i en una bassa particular de més profunditat, amb resultats satisfactoris (veure figura 3-4).



Figura 3-4. Bot Ras a sobre del remolc, abans de les proves en la bassa del parc central de Nou Barris (Barcelona, 06/2009).

Les dificultats experimentals per a mantenir els propulsors en la posició adient han retallat l'abast dels assajos, mantenint velocitats moderades i no entrant en les proves d'anàlisi de fricció amb flux bifàsic per utilització dels gasos d'escapament.

3.1.4 La connexió Scott¹¹⁵

La connexió Scott permet obtenir un sistema equilibrat de tensions bifàsiques desfasades 90°, a partir d'un sistema de tensions trifàsiques desfasades 120°. Són necessaris dos transformadors monofàsics connectats segons s'indica en la figura 3-5. Cal que el bobinat primari d'un dels transformadors (*Trafo2*) tingui N_1 espires amb els dos extrems i el punt mig accessibles, mentre que el bobinat primari de l'altre transformador (*Trafo1*) ha de tenir $0,866 \cdot N_1$ espires amb els terminals en els extrems. Si el secundari de cada transformador té N_2 espires, la relació de tensions entre la tensió de línia del primari (V_L) i la del secundari (V_1 i V_2) serà igual a N_1/N_2 . Aquesta connexió té la propietat de ser equilibrada, és a dir, si les càrregues en el sistema bifàsic estan equilibrades, els corrents trifàsics estaran també equilibrats.

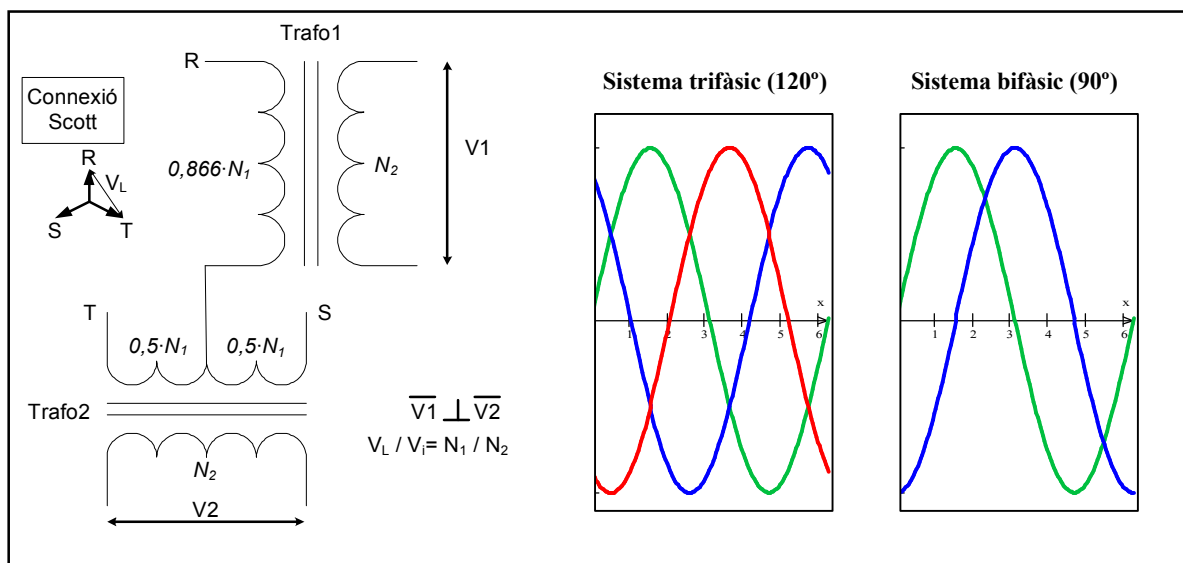


Figura 3-5. Esquema de la connexió Scott i representació d'un sistema de tensions trifàsic i bifàsic.

¹¹⁵ CORTÉS; CORRALES; ENSENYAT (*Teoría general de máquinas eléctricas*, 1991)

3.1.5 Definició dels requisits que ha de complir el prototip VF1 i metodologia emprada

De l'estudi energètic de la trompa es dedueix que una bona part de l'energia es perd en la caixa dels vents, sigui pel xoc de l'aigua en la banqueta, sigui a través de l'aigua sortint de la caixa dels vents. Pel primer cas sorgeix la possibilitat de desenvolupar una turbina per substituir la banqueta i recuperar l'energia que s'hi dissipa.

Les característiques que es desitja que compleixi són el tenir una velocitat nominal reduïda i un elevat parell, ser submergible, integrar els àleps de la turbina en l'interior del rotor, sense eix, de manera que es sostingui el rotor pel seu perímetre exterior.

Realitzar aquest desenvolupament ha estat una oportunitat per provar novetats i innovacions, que s'han anat definint a nivell teòric i pràctic per mitjà de diverses tesis doctorals i projectes realitzats en el Departament d'Enginyeria Elèctrica (DEE) de la UPC, amb anterioritat. A més, la pluridisciplinarietat ha permès una relació dinàmica entre estudiants en fase d'elaboració de projecte de fi de carrera, estudiants de doctorat i professors.

S'ha recorregut en alguns casos a la modelització per elements finits, per tal de corroborar alguns primers càlculs excessivament simplificats pel que fa a la geometria. D'aquesta manera s'han pogut comprendre millor les capacitats i limitacions del prototip construït i introduir millores a mesura que s'anava construint.

S'han anat definint assajos en paral·lel a les diferents fases de la construcció del prototip. D'aquesta manera, els resultats de les simulacions i de les mesures experimentals han permès proposar modificacions i alternatives per millorar el procés constructiu i les prestacions d'aquest primer prototip.

Molts aspectes constructius han estat objecte d'un anàlisi pluridisciplinar, intentant arribar al compromís entre els assoliments i les renúncies que caracteritza l'enginyeria, en el major nombre possible d'aspectes. En tot moment s'ha tingut present la possible futura industrialització i els aspectes de manteniment.

3.2 Definició

Adaptació d'impedàncies a partir de dos trafos toroïdals alimentats a tensions trifàsiques, que amb la connexió Scott transformen a bifàsiques. Així es garanteix l'aïllament galvànic respecte l'alimentació de la xarxa. A més, abaixen la tensió, amb el corresponent augment del corrent, en dos ordres de magnitud.

Estatore en configuració geomètrica similar a una gàbia d'esquirol, amb conductors de coure refrigerats interiorment per aigua i alimentats a molt baixa tensió i alta corrent, per part dels transformadors de corrent toroïdals situats en el mateix prototip. Debanat de simple capa i un conductor per ranura i fase, el que origina una ranura gairebé quadrada. En tractar-se d'un estatore amb tensions bifàsiques, solament hi ha un cap de bobina per banda.

Rotor en forma de got cilíndric d'alumini, sense ferro, suportat amb coixinets per un sol extrem, constituint un eix en voladís, amb fre dinamomètric de fricció.

3.3 Materials i construcció

Les màquines elèctriques estan constituïdes per un mínim de cinc circuits estretament relacionats entre ells: elèctric, dielèctric, magnètic, mecànic i tèrmic. A més, aquest darrer pot incloure un circuit hidràulic de refrigeració, per exemple, capaç de fer la funció de suport del rotor per coixí hidrodinàmic, per mitjà de la perforació dels tubs. Cal fer l'elecció de materials i configuracions per afavorir alguna d'aquestes facetes sense comprometre excessivament la resta.

3.3.1 Materials conductors: tubs i xapa de coure

Tant els tubs com la xapa utilitzats són de coure electrolític recuit, d'origen comercial, amb un contingut mínim de coure del 99,9%. Té les prestacions mecàniques adients per a poder construir el prototip amb els mitjans disponibles: una elevada resistència a la ruptura, ductilitat i mal·leabilitat suficients, etc. Les propietats del material estan expressades en la taula 3-1.

Taula 3-1. Propietats físiques del coure electrolític recuit

Densitat	$d =$	$8.89 \cdot 10^3$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Resistivitat elèctrica (20°C)	$\rho =$	$1,72 \cdot 10^{-8}$	$\Omega \cdot \text{m}$
Coefficient temperatura ¹¹⁶ (20°)	$a =$	$3,93 \cdot 10^{-3}$	K^{-1}
Punt de fusió	$T_f =$	1.083	°C
Calor específic	$c =$	393,5	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Conductivitat tèrmica	$k =$	390	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

La xapa de coure és d'un mil·límetre de gruix. El tub de coure és del tipus tou usat per refrigeració i aparells d'aire condicionat. Les característiques dels tubs utilitzats estan expressades en la taula 3-2.

Les soldadures s'han realitzat amb aportació d'estany-plom (40% - 60%), per facilitat d'execució. Aquest aliatge comença a fondre a partir dels 183°C, adquirint una consistència pastosa, i es totalment líquid a partir de 235°C. El punt eutèctic d'aquesta mescla es dona per una proporció d'estany del 62%, i la seva temperatura de fusió és 183°C. L'estany s'alia amb el coure formant bronze.

La resistivitat d'ambdós materials és molt superior a la del coure, de l'ordre de 7 cops per a l'estany i 12 cops per al plom. La seva conductivitat tèrmica és 6 cops inferior en el cas de l'estany, i 11 cops inferior

¹¹⁶ Per a petits intervals de temperatura, la resistivitat val: $\rho_t = \rho_{293K} \cdot (1 + a \cdot (t - 293K))$. Segons aquesta expressió, la resistivitat del coure a 87K valdria $0,33 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m}$, és a dir, 5,2 cops menys que a 20°C.

en el cas del plom. Aquestes pitjors propietats elèctriques i tèrmiques, justifiquen l'esforç que s'ha fet per disminuir al mínim el nombre de soldadures en el circuit elèctric, i per augmentar al màxim la superfície i qualitat del contacte entre les peces de coure a soldar. D'aquesta manera es pretén evitar el problema descrit per López (2000) de fuga selectiva d'alguns dels components de l'aliatge del material d'aportació per la soldadura, que en alguns casos s'ha demostrat que poden aparèixer per efecte dels cicles tèrmics i electrodinàmics.

Per a fer les soldadures s'ha usat un soldador de 500W de punta de coure. La potència ha resultat suficient per escalfar els punts a soldar, malgrat que el calor es dissipa ràpidament cap a la resta de coure degut a la bona conductivitat tèrmica del mateix. S'ha usat també dos petits bufadors de butà, de 200W de potència de flama cadascun (*PT-200 Pro Torch*, de dipòsit 20 ml i autonomia de 60 minuts). Aquests bufadors permeten afegir entre 50W i 200W tèrmics efectius a la zona a soldar, allí on el soldador de punta de coure no assoleix prou temperatura.

Taula 3-2. Característiques dels tubs de coure utilitzats, segons norma ASTM 280-99

Mesura estàndard	Diàmetre exterior [mm]	Gruix de les parets [mm]	Diàmetre interior [mm]
3/16	4,75	0,76	3,23
1/4	6,35	0,76	4,83
3/8	7,94	0,81	6,32
5/8	15,88	0,89	14,10

S'ha sospesat la possibilitat d'usar materials o procediments alternatius, però s'han descartat per diversos motius: l'alumini és difícil de soldar, la geometria del circuit elèctric i dels caps de bobina desaconsella l'ús de fosa d'alumini, la soldadura dura requereix temperatures i expertesa més elevades, els sinteritzats de coure no tenen la conductivitat desitjada ni la mal·leabilitat necessària per al muntatge, la soldadura làser del coure és difícil d'executar en aquestes disposicions i no garanteix una bona secció de pas del corrent entre elements, la conformació per màquina-eina amb control numèric sobre coure o alumini no és adequat per aquesta geometria i comporta el malbaratament de molt material.

Per a la producció en sèrie, la millor opció pot ser l'alumini injectat, per la seva inèrcia tèrmica, conductivitat, facilitat de mecanitzat i economia.

3.3.2 Doblat i conformat dels tubs de coure per constituir les espires

El circuit elèctric allotjat a les ranures de l'estator consisteix en la repetició tot al voltant del mateix de la unitat fonamental de circuit que es pot observar en la figura 3-6. La juxtaposició d'onze unitats iguals

permet omplir les 44 ranures de l'estator. Els requeriments geomètrics per a les espises per ajustar-se a aquesta disposició són:

- La ranura té una longitud de 85 mm, i secció quasi trapezoïdal de diàmetre equivalent 7,4 mm.
- Cal deixar una separació entre el conductor i el paquet magnètic per encabir-hi l'aïllant.
- L'espisa ha de sobresortir uns 20 o 30 mm de la ranura per solda-la a les planxes.
- El cap de bobina d'una espisa ha d'esquivar el tub sortint de l'altra espisa.

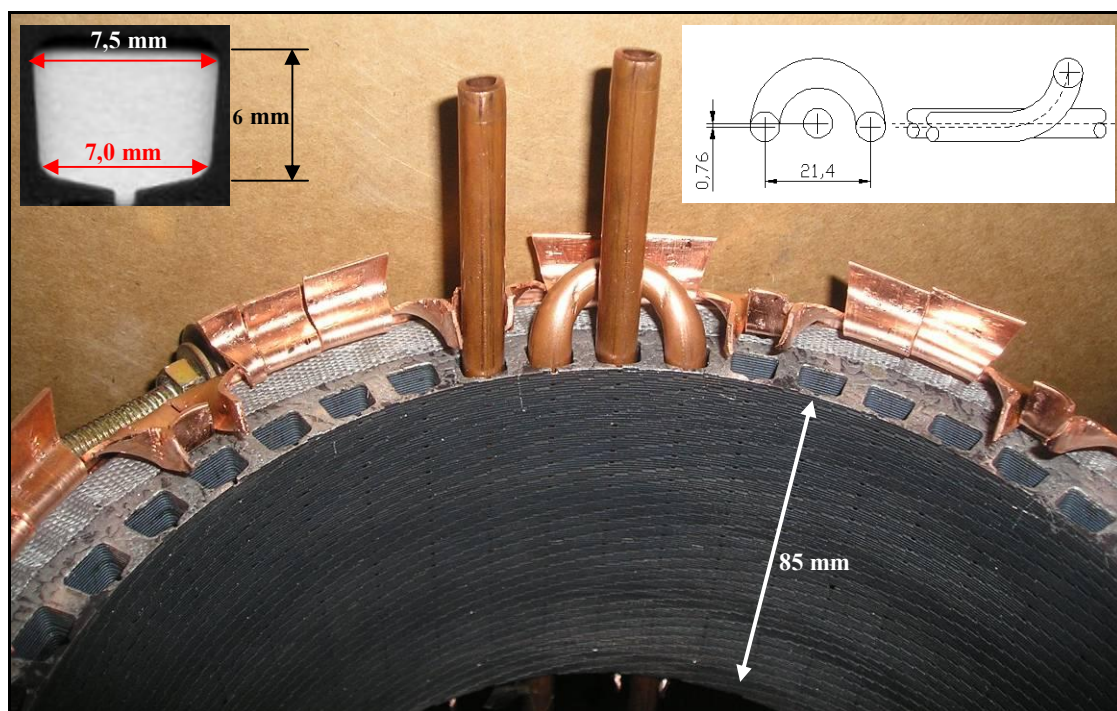


Figura 3-6. Disposició bàsica de les espises de l'estator i requeriments geomètrics.

Les espises s'han construït amb tub de coure recuit de 1/4, de diàmetre exterior (\varnothing_{ext}) 6,35mm.

El conformat de cada una de les 22 espises s'ha realitzat seguint successivament els següents passos:

- Tallat d'una longitud de 280 mm de tub recte.
- Doblat del tub pel seu punt mig un angle de 180° i sobre un radi mig de 10,7 mm, formant una U.
- Doblat de l'extrem de la U un angle de 80° sobre un radi mig d'11 mm.
- Emmotllat per donar forma trapezoïdal a tota la longitud recta del tub, per ajustar-se a la ranura.

En la figura 3-7 es mostren els utillatges usats per a realitzar les operacions anteriors de manera que totes les espirals siguin el màxim d'iguals possible i compleixin els requisits amb suficient precisió, que són:

- Tallatubs comercial per a tubs de coure, de corrons i disc tallant.
- Doblatus de palanca per tubs de 1/4", sobre cilindre de llautó amb rebaix fins a diàmetre 15 mm.
- Doblatus especial per a fer el segon doblat del cap de bobina.
- Motllo amb la forma de la ranura per a donar la forma trapezoïdal al tub.

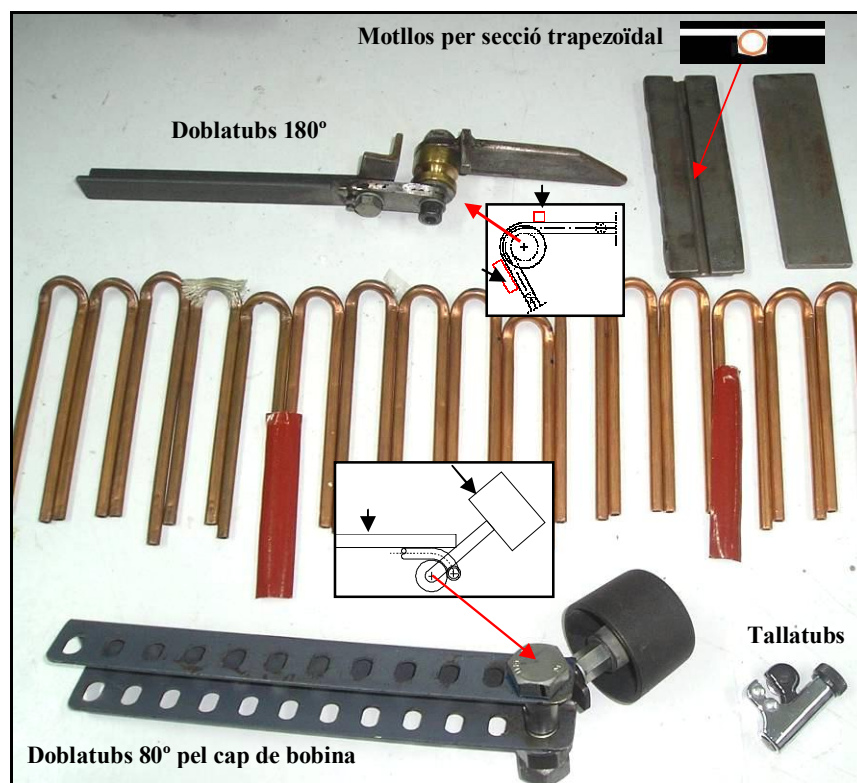


Figura 3-7. Utillatges per al conformat de les espirals, i espirals acabades.

Una tècnica alternativa per a doblar els tubs i evitar que s'aixafin les seves parets en el punt de doblat consisteix en l'emplenament del tub amb sorra compactada i el segellat posterior de les dues boques amb un element que comprimeixi la sorra, com un cargol enroscat dins el tub o una soldadura d'estany. Un cop portat el tub a la forma desitjada, s'alliberen els extrems i es buida la sorra. Aquesta tècnica s'ha usat per fer les proves de conformat de les primeres espirals.

Després de l'emmotllat i martellejat, la secció del tub canvia de forma, però la seva àrea continua essent similar, ja que no es donen circumstàncies d'allargament o escanyament de les parets. Segons les dimensions que especifica la norma de fabricació del tub, l'àrea de la seva secció transversal és de $13,35 \text{ mm}^2$. Es va dur un fragment del tub al Laboratori Comú d'Enginyeria Mecànica per a ser mesurada per amplificació òptica i escaneig per computador (veure figura 3-8). La secció calculada per aquest

mètode és de 11 mm^2 . Finalment, a partir de la massa d'un fragment de longitud coneguda i de la densitat del coure, es va calcular que la secció transversal del tub fa 12 mm^2 . S'adopta el valor de 12 mm^2 com a referència per als càlculs.

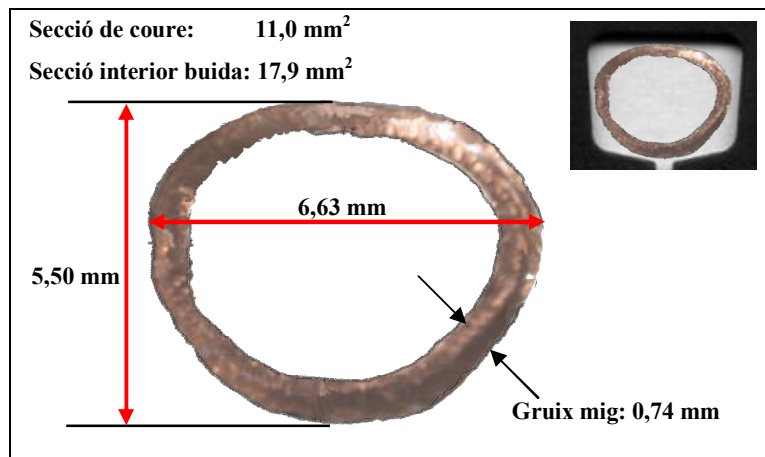


Figura 3-8. Secció transversal del tram recte del tub de coure i col·locació dins la ranura.¹¹⁷

Un cop fetes les soldadures, la longitud efectiva de l'espira és de $227 \pm 11 \text{ mm}$, segons el cas. Això representa que cada espira té una resistència de $0,325 \pm 0,016 \text{ m}\Omega$.

Quan es van tenir les espires soldades a una de les planxes, es va fer una prova de corrent continu per determinar la bondat del càlcul de resistència. Fent passar un fort corrent continu (100 A) entre la planxa i l'altre extrem de cadascuna de les espires, les caigudes de tensió oscil·len entre 35 i 45 mV, dels quals 1 mV és en la soldadura. Segons aquest càlcul, la resistència de l'espira (R_{espira}) és d'entre 0,35 i 0,45 m Ω , mentre que la soldadura representa 0,01 m Ω , és a dir, aproximadament un 2% respecte el total de l'espira.

Igualment es va procedir amb una font de corrent altern de 50 períodes. L'assaig amb 92 A dona una caiguda de tensió d'entre 64 i 70 mV segons l'espira, amb una caiguda en la soldadura propera al límit de mesura de 1 mV. Així, la impedància de cada espira (Z_{espira}) resultaria ser d'entre 0,69 i 0,77 m Ω . En combinació amb la resistència calculada anteriorment, la reactància de les espires ($X_{L \text{ espira}}$) col·locades en la ranura, i per tant, dins el circuit magnètic de l'estator, però sense rotor, tindria un valor d'entre 0,59 i 0,63 m Ω .

¹¹⁷ Imatge ampliada òpticament i escanejada en el Laboratori Comú d'Enginyeria Mecànica de la UPC (ETSEIB).

3.3.3 Adaptació del nucli magnètic de l'estator

El nucli magnètic que s'ha usat per a l'estator (veure figura 3-6) ha estat concebut comercialment per a ser injectat amb alumini i acabar constituint un rotor en gàbia d'esquirol d'una màquina d'inducció de flux radial. S'usa per a aplicacions de baixes revolucions i rotor en la perifèria de l'estator, i no en el seu interior com és habitual.

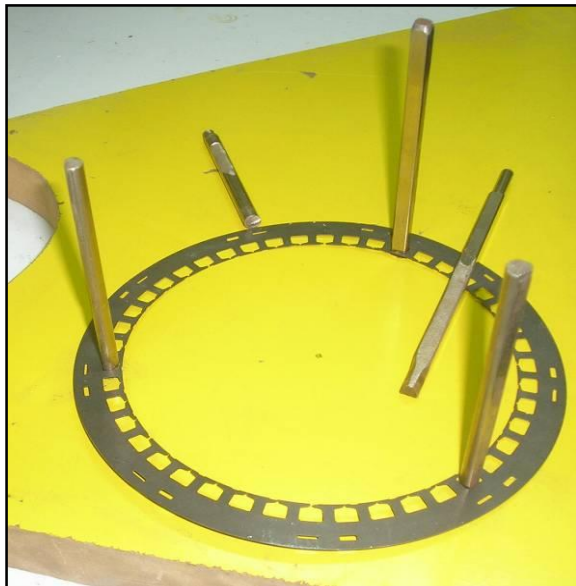


Figura 3-9. Planxa magnètica i guies d'apilament

Es tracta d'un nucli de planxes magnètiques apilades. A la sortida de fàbrica, les ranures tenen una disposició en forma de "V", configuració habitual en les gàbies d'esquirol per aconseguir un comportament més suau i uns esforços axials sobre els coixinets menors.

Ha estat necessari desfer l'apilament inicial i reapilar les planxes per tal que les ranures quedessin rectes i perpendiculars al pla de la planxa, per permetre el muntatge de les espines. A la figura 3-9 es mostra la primera planxa de l'apilament i els utilitatges usats com a elements guia i com a percutor per encaixar les osques de fixació de cada planxa.

Les magnituds característiques de les planxes i del paquet magnètic s'indiquen en la taula 3-3, segons s'indica en la figura 3-10: les dimensions de la ranura han quedat definides en la figura 3-8.

Taula 3-3 Magnituds característiques del paquet magnètic

Número total de ranures	N_{ran}	44	ranures
Altura del paquet magnètic	H_{paquet}	82	mm
Diàmetre interior	\varnothing_{int}	148	mm
Diàmetre del fons de la ranura	\varnothing_{ran}	163	mm
Diàmetre exterior	\varnothing_{ext}	184	mm
Gruix de cada planxa	h_{planxa}	0,51	mm
Número total de planxes	$N_{planxes}$	155	planxes

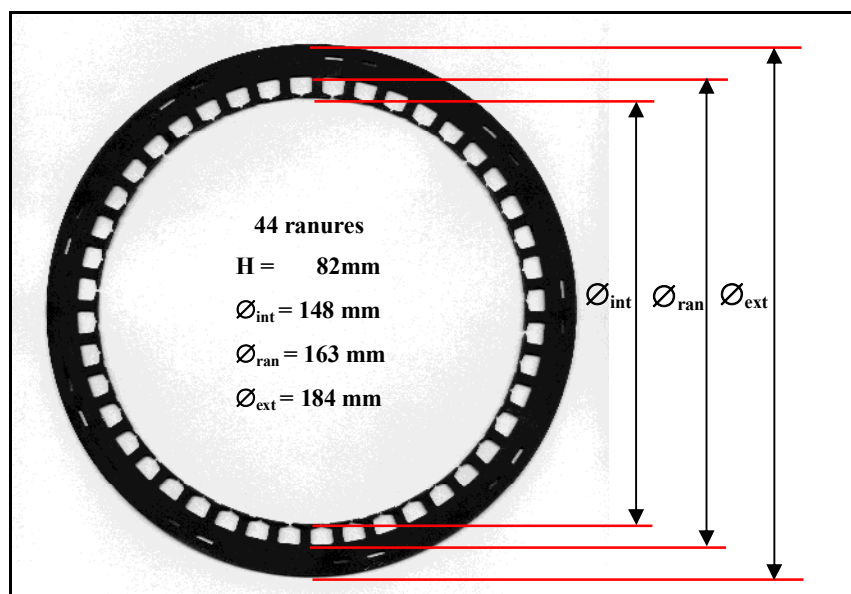


Figura 3-10. Dimensions característiques de la planxa magnètica.

3.3.4 Transformadors toroïdals d'intensitat

Per alimentar cada una de les dues fases del prototip s'han utilitzat dues de les tres bobines toroïdals d'un varivolt trifàsic. Les característiques de cada bobina estan recollides en la taula 3-4. Es tracta d'un varivolt elevador autotransformador, SALICRU ARC-13, de 6 kVA, de tensió d'entrada 220 V i sortida variable entre 0 i 250 V. El seu corrent nominal és 14 A. La seva connexió de fàbrica és en estrella, i, per tant, la tensió nominal de cada bobina és de 127 V. Degut a les espines de més que té com a autotransformador elevador, aquesta tensió es correspon a 144V d'extrem a extrem del bobinat.

Taula 3-4. Característiques de les bobines toroïdals usades com a transformador d'intensitat

Potència aparent	S	2	kVA
Intensitat nominal	I_{nom}	14	A
Tensió nominal entre extrems	V_{nom}	144	V
Nombre d'espines	$N_{espines}$	234	espines
Tensió nominal per espira	V_{espira}	0,629	V
Intensitat de buit o d'excitació	I_0	80	mA
Diàmetre del fil de coure	\varnothing_{Cu}	1,8	mm
Secció del fil de coure	S_{Cu}	2,54	mm ²
Resistència del bobinat	R_{Cu}	0,43	Ω
Diàmetre exterior	\varnothing_{ext}	188	mm
Diàmetre interior	\varnothing_{int}	70	mm
Alçada torus	H_{torus}	70	mm

Cada bobina és de 2 kVA. Per protegir l'esmalt dels conductors durant la manipulació dels torus, s'usen cintes de cotó, segons es mostra en la figura. 3-11. Els torus tenen tres terminals etiquetats amb els números 1, 4 i 5. Els terminals 1 i 5 corresponen als extrems del bobinat, mentre que el terminal 4 està soldat a l'espira número 208 respecte el terminal 1, és a dir, en el punt 0,889 del total del bobinat.



Figura. 3-11. Torus magnètic A del varivolt trifàsic utilitzat per fer el prototip.

Per a caracteritzar el comportament de les tres bobines, s'han realitzat els assajos següents:

- Mesura de la resistència del bobinat primari mitjançant òhmmetre
- Assaig de buit en corrent continu per obtenir un segon valor de la resistència del bobinat.
- Assaig de buit en corrent altern: diagrama tensió-corrent (veure figura 3-12)

Els resultats d'aquests assajos es resumeixen en la taula 3-5. El torus A té un comportament en buit pitjor que els altres dos torus, mentre que els torus B i C tenen un comportament quasi idèntic. Aquests dos torus són els que s'usen en el prototip VF1.

Per fer la connexió Scott cal que un dels torus tingui un terminal en el punt central del bobinat, i que l'altre torus tingui un terminal connectat a l'espira número 203 del bobinat. En el torus B es solda un terminal en l'espira central del bobinat, i pel torus C es fan servir els terminals existents 1 i 4. El terminal 4 està soldat a l'espira número 208, mentre que hauria d'estar soldat a la número 203. Aquest fet representa un desequilibri del 2,5% en la tensió d'aquest torus respecte l'ideal de la connexió Scott.

En el comportament del prototip s'observa un desequilibri en els corrents de les tres fases. El corrent que alimenta el torus C és lleugerament inferior al de les altres dues fases. Aquest desequilibri es justificaria totalment o parcial per aquesta discordança en el nombre d'espires usades del torus C.

Taula 3-5. Resum del comportament dels torus magnètics, segons els assajos realitzats

Nom del torus magnètic			Torus A	Torus B	Torus C
Resistència del primari - òhmmetre	[Ω]	$R_{primari}$	0,40	0,42	0,46
Resistència del primari - assaig c. continu	[Ω]	$R_{primari}$	0,42	0,45	0,43
Intensitat de buit a 144V	[mA]	I_0	354	82	77
Angle de desfasament V-I ₀	per V=50V [°]	$\varphi_{0(50V)}$	45°	29°	34°
Resist. de pèrdues en el ferro	per V=50V [Ω]	$R_{Fe(50V)}$	1.640	2.927	3.617
React. de magnetització	per V=50V [Ω]	$X_{\mu(50V)}$	1.625	5.206	5.406
Angle de desfasament V-I ₀	per V=125V [°]	$\varphi_{0(125V)}$	63°	30°	31°
Resist. de pèrdues en el ferro	per V=125V [Ω]	$R_{Fe(125V)}$	1.867	3.350	4.129
React. de magnetització	per V=125V [Ω]	$X_{\mu(125V)}$	923	5.800	6.750
Angle de desfasament V-I ₀	per V=175V [°]	$\varphi_{0(175V)}$	78°	56°	65°
Resist. de pèrdues en el ferro	per V=175V [Ω]	$R_{Fe(175V)}$	620	2.177	2.650
React. de magnetització	per V=175V [Ω]	$X_{\mu(175V)}$	135	1.800	1.200

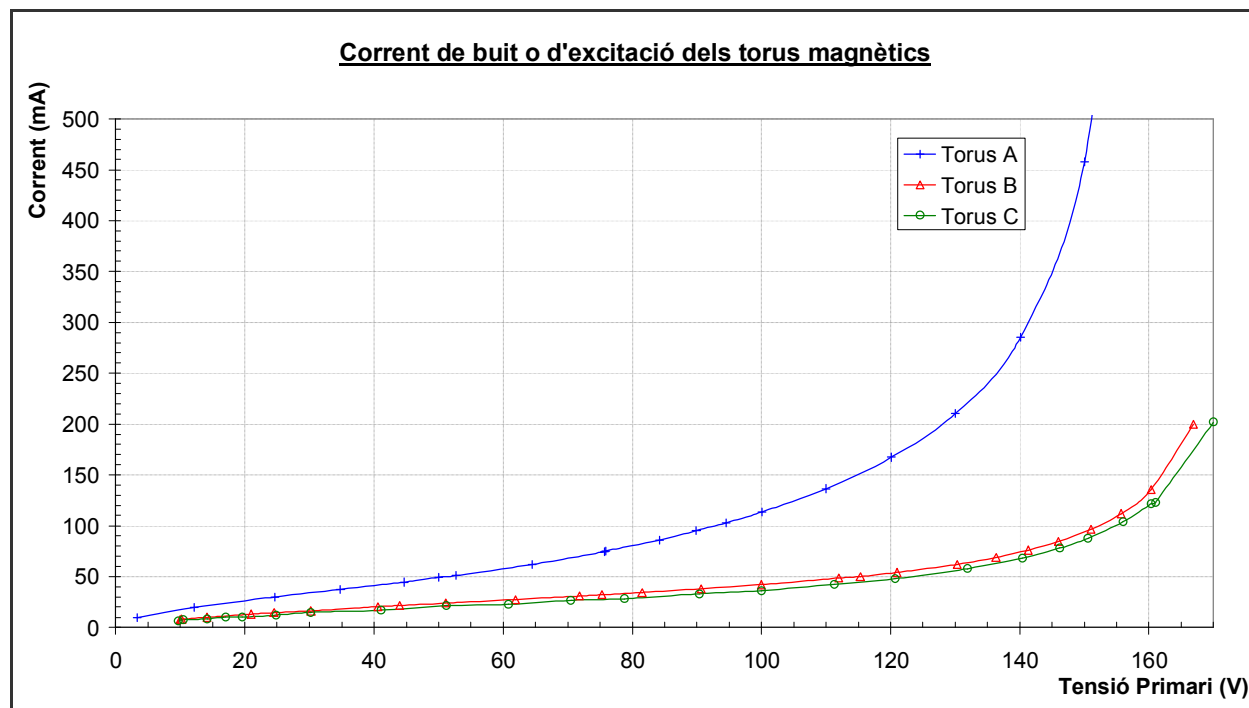


Figura 3-12. Resultats de l'assaig de buit en corrent altern dels tres torus magnètics.

3.3.5 Materials dielèctrics i mecànics

Per tal de garantir una separació física mínima (>1 mm) entre les planxes de coure del secundari i el bobinat primari, els torus magnètics s'han recobert amb unes cintes adhesives de fibra de vidre. Posteriorment s'han recobert d'esmalt per tal de fixar la fibra de vidre a la superfície. La zona sense esmaltar del bobinat, destinada inicialment al contacte lliscant del varivolt, s'ha recobert prèviament d'una capa de resina epoxi, per garantir l'aïllament.

El nucli magnètic de l'estator, de planxes magnètiques trepanades i apilades, s'ha recobert exteriorment de cintes de fibra de vidre tipus Robin (trenada perpendicularment) i s'ha pintat posteriorment amb pintura tipus *Martelé*, mantenint les planxes comprimides. La fibra de vidre garanteix l'aïllament i la separació física respecte les planxes conductores, a la vegada que manté el nucli comprimit i li dóna rigidesa. La pintura fixa la fibra al nucli, a la vegada que aïlla elèctricament.

Per garantir la separació entre les planxes de coure i el torus magnètic, i per descarregar els esforços mecànics, com el seu propi pes, sense malmetre els conductors dels bobinat, s'han usat fragments rectangulars de circuit imprès de baquelita fixats als torus amb resina epoxi, de dimensions 3cm x 1 cm x 0,2 cm.

L'aïllament entre les espirals i el paquet magnètic de l'estator s'aconsegueix mitjançant cinta de "Prepreg", de gruix 0,15 mm. Es tracta d'un producte comercial constituït per una cinta de fibra de vidre impregnada amb resina epoxi termoendurable. A més, el cap de bobina també es recobreix de fibra de vidre per evitar el contacte amb les planxes de la vora.

Per tal de mantenir l'aïllament entre les planxes de coure de diferent polaritat i mantenir una mínima distància entre elles allí on es podrien cavalcar, s'interposen uns perfils de PVC rígid de 1 mm de gruix.

Durant la construcció del prototip s'han hagut de preveure els punts de suport necessaris per a la manipulació del conjunt, des del suport inicial del paquet magnètic tot sol, fins a la disposició final recolzada per un lateral sobre una base de baquelita.

3.3.6 Col·locació de les espines

Per protegir i mantenir l'aïllament del cap de bobina, és a dir, de l'extrem de la "U" de les espines, es col·loca un petit tub de fibra de vidre trenada, del diàmetre del tub de les espines i longitud 55 mm.

En cada ranura del paquet magnètic s'introdueix una tira de "Prepreg" d'ample 20 mm, longitud 100 mm i gruix 0,15 mm, recobrint el perímetre de la ranura. Es tracta d'una cinta de fibra de vidre impregnada de fàbrica amb resina epoxi. Servirà per garantir l'aïllament entre les espines i el paquet magnètic.

Durant en procés de soldadura es va comprovar el nivell d'aïllament entre espines i paquet magnètic. Abans de començar a soldar, aquest nivell era superior a 1 M Ω . Durant el procés de soldadura es va mantenir en aquest ordre de magnitud, però en fer la darrera comprovació, va resultar ser de 10 Ω . Tenint en compte que el nivell de tensió en el coure no superarà mai 1 V, aquesta pèrdua d'aïllament no hauria de representar cap problema. A més, durant les primeres proves en tensió, l'aïllament entre espines i paquet magnètic va augmentar fins a nivells de 1 k Ω , o més. Probablement, alguna gota d'estany es va desplaçar fins un lloc de compromís, sense quedar ben soldat, de manera que el mateix corrent de fuga ha pogut fondre aquest punt de contacte, recuperant-se el grau d'aïllament.

3.3.7 Conformat i col·locació de les planxes de coure del estator

En tesis anteriors, com la de P. López (2000)¹¹⁸, la geometria de l'alimentació de les espines ha resultat tant o més important que les pròpies espines a l'hora de repartir homogèniament el corrent magnetitzant. També se sol aconseguir la mínima impedància, i per tant, el màxim corrent. S'han usat planxes planes de coure de 1 mm de gruix, que envolten generosament els torus i el paquet magnètic, soldades entre elles amb estany, amb nervadures i tubs de coure als llocs de màxima densitat de corrent.

Des de l'interior cap a l'exterior, un cilindre de coure envolta totalment el nucli magnètic de l'estator, fent de punt comú o de neutre, el qual està soldat a un dels extrems de totes i cadascuna de les 22 espines del motor, 11 a cada banda. Dues planxes planes estan soldades al cilindre, una per cada fase, per anar a buscar cada torus. Dues planxes més alimenten des de cada torus els extrems lliures de les 11 espines de cada fase. Finalment, un cilindre de coure de 55 mm de diàmetre uneix per l'interior dels torus les dues planxes de cada fase.

¹¹⁸ LÓPEZ, Josep. (*Nuevas aportaciones al motor eléctrico de flujo axial con rotor conductor sin material ferromagnético*. [Tesi Doctoral], 2000)

El cilindre que envolta el nucli està fet a partir d'un rectangle de longitud 583 mm i amplada 125 mm. Donat que el nucli de l'estator fa 83 mm d'altura, queden 21 mm per a la unió als extrems de les espires, tal com es veu a la figura 3-6.

Les dues planxes de coure que s'uneixen al cilindre central, parteixen cadascuna d'un rectangle de longitud 400 mm i amplada 320 mm. La soldadura al cilindre central es fa tot al seu voltant per cavalcament d'unes 60 llengüetes quadrades de 10 mm de costat. Les dues planxes s'han doblat adequadament i s'han soldat entre elles en la zona que envolta el nucli central, per tal d'evitar cantells vius, facilitar la manipulació del conjunt, donar-li rigidesa estructural, augmentar la secció conductora i disminuir la inductància en aquella zona.

Les altres dues planxes, una per cada polaritat, parteixen d'un rectangle de llargada 400 mm i amplada 350 mm. Van soldades als extrems lliures de les 11 espires de cada fase, amb una configuració de plec i soldadures, similar a la descrita per al cilindre central (veure figura 3-6). Un cop fetes totes les soldadures, els voladissos laterals de les planxes s'han plegat per tal d'evitar cantells vius, donar rigidesa al conjunt i disminuir la inductància al pas de corrent. Per mantenir la separació i l'aïllament entre les planxes, s'ha interposat entre elles un perfil de PVC de gruix 1 mm.

La unió entre les planxes de cada fase, per tancar el circuit elèctric, es fa per l'interior del torus mitjançant un cilindre de coure de diàmetre exterior 65 mm, altura 100 mm. El cilindre està fet per enrotllament de d'un rectangle de planxa de coure de 1 mm de gruix, 480 mm de llargada i 100 mm d'amplada. Així, en la meitat del cilindre queden sobreposades tres capes de planxa mentre que el l'altra meitat en queden solament dues. La soldadura entre la planxa i el cilindre que travessa el torus es fa amb 16 llengüetes de 13 mm d'ample retallades a cada planxa. Aquestes llengüetes es solden a la cara exterior del cilindre, per facilitar constructiva. Durant els assajos, s'ha plantejat la hipòtesi que la distribució de les llengüetes i les soldadures entre la cara interior i l'exterior del cilindre, hauria afavorit el repartiment del corrent per tota la seva secció, de manera que la caiguda de tensió en aquest element s'hagués pogut reduir entre un 30 i un 50%.

La unió entre les planxes i les espires s'ha fet per cavalcament de llengüetes retallades a les planxes, segons es mostra en la figura 3-6. Els talls i el doblat del coure permeten que la superfície de soldadura sigui molt més gran que la secció conductora de l'espira, de manera que la densitat de corrent en la soldadura serà entre 10 i 20 cops inferior a la de l'espira, compensant en part la major resistivitat de la soldadura. A més, la llengüeta central està soldada per la cara inferior de la planxa, mentre que les dues llengüetes laterals estan soldades per la cara exterior. D'aquesta manera s'homogeneïtza la distribució de corrents i tensions entre ambdues cares, malgrat que el seu gruix sigui solament d'un mil·límetre.

Les llengüetes que queden replegades sota el cap de bobina fan la funció de dissipar el calor de la planxa, i d'apantallar el fort corrent de la mitja espira del cap de bobina (veure figura 3-6).

Les soldadures de les espines s'han realitzat amb el soldador de punta calenta de 500 W. En les soldadures entre planxes ha fet falta l'aportació extra de calor per flama de butà, degut a la major secció de coure que hi conflueix respecte les unions amb les espines. La quantitat total d'estany-plom (40%-60%) que s'ha utilitzat per a la soldadura entre planxes i amb les espines és d'uns 1000 gr.

3.3.8 Circuit d'evacuació de calor i d'homogeneïtzació de corrents

En base als càlculs de dissipació de calor, es calculen les necessitats de refrigeració del conjunt. A grans trets, entre el 50 i el 60% del calor es genera en les espines. La resta es genera en les planxes de coure.

L'estratègia de refredament consisteix en fer passar el fluid refrigerant per un col·lector, el qual recorre les planxes de coure, per arribar posteriorment a distribuir el fluid a cada espira, en paral·lel. Aquest col·lector és també de coure, per la seva conductivitat elèctrica i tèrmica. El recorregut està ideat per afavorir el bon repartiment del corrent per la planxa, gràcies a l'aportació d'una secció extra de coure en aquestes zones, malgrat que la soldadura, que té major resistivitat, allunyi elèctricament els elements soldats.

El col·lector que porta el fluid a les espines és de diàmetre $5/8'$, és a dir, 14,1 mm de diàmetre interior. Està soldat sobre la planxa exterior de cada pol i alimenta a 11 espines per mitjà d'un pont fet amb tub de $1/4'$, igual que el de les espines. A la sortida de les espines, el fluid es pot deixar caure a la cubeta de retenció o bé recollir-lo amb tubs d'evacuació.

Els encaixos entre tubs es fan per esbocat, per tal de maximitzar la superfície de contacte en la soldadura. El polit de rebaves interiors dels tubs és important de cara a garantir la secció de pas en els extrems, els quals queden deformats pel procés de tall.

Els tubs usats en les planxes interiors són de diàmetre $3/8'$, és a dir, de diàmetre interior 6,32 mm. La seva funció és la d'evacuar calor i afavorir una distribució més homogènia del corrent per la planxa.

En cada un dels cilindres que travessen els torus s'han col·locat 8 tubs en paral·lel de diàmetre $3/16'$, és a dir, de diàmetre interior 3,23 mm. Així s'evacua el calor i es reforça la conductivitat d'aquest tram, afavorint el repartiment de corrent entre les capes interiors i exteriors del cilindre, i a través dels tubs de

refredament. Col·locar una espiral de tub de coure a l'interior del cilindre hauria afavorit la transferència de calor a un cabal menor de fluid, però no hauria representat una aportació significativa a la conductivitat elèctrica.

S'estima que la millora de la conductivitat deguda als col·lectors soldats és reduïda, ja que el corrent hauria de travessar dues soldadures de més per passar-hi, una per anar de la planxa als tubs i l'altra per retornar a la planxa. Mentre la longitud dels camins és similar, la secció de coure és més gran en els tubs que en la planxa, però les soldadures allunyen elèctricament aquests dos elements.

En canvi, els tubs de refredament que travessen els transformadors toroïdals haurien de representar una millora substancial en la conductivitat, donat que el corrent ha de travessar igualment dues soldadures per travessar el torus, tant si passa pel cilindre com si passa pels tubs de refredament. Els camins elèctrics a través del cilindre o a través dels tubs són de longituds similars. La secció de coure dels tubs representa un 15% de la secció del cilindre. El repartiment dels corrents entre un i altre element hauria de correspondre aproximadament al barem de seccions de pas.

Per altra banda, la temperatura de la planxa en els punts a prop del col·lector serà inferior a la dels punts més allunyats, de manera que la resistivitat del coure serà també inferior. Una diferència de 10 °C a temperatura ambient, entre 293K i 283K, es tradueix en una diferència de resistivitats del coure del 4%, amb un efecte poc significatiu en el repartiment de corrent, però a temperatura criogènica, entre 77K i 87K, aquesta diferència creix fins a un 20%, afavorint al pas de corrent pels llocs més freds de manera notable.

Les soldadures s'han fet amb estany-plom (40%-60%) mitjançant el soldador de punta calenta de 500 W i dos bufadors de butà de 200 W de potència de flama cadascun. La quantitat d'estany-plom utilitzada en les soldadures dels col·lectors és d'uns 2 kg. L'aportació d'estany-plom s'ha fet en excés per tal d'augmentar la secció efectiva de transferència de calor entre la planxa i els tubs de refredament.

S'han calculat les prestacions màximes del sistema de refrigeració descrit:

- Si el refrigerant és aire, per un increment de la temperatura de l'aire entre l'entrada i la sortida de 50°C, caldria un cabal de 190 l/min d'aire per espira, per dissipar fins a 190 W de calor per espira. Aquest cabal correspon a una pèrdua de càrrega de 1 hPa i representa una velocitat de l'aire per l'interior de les espines de 170 m/s. Per a fer les proves s'ha utilitzat la xarxa d'aire comprimit del laboratori. El cabal màxim necessari hauria de ser de 4,2 m³/min d'aire. La diferència de

temperatura mitja entre l'aire i el coure dependrà del coeficient de convecció, i per a realitzar els càlculs s'ha suposat igual a 60°C.

- Si el refrigerant és aigua, per una diferència de temperatura entre l'entrada i la sortida de 2,7 °C, caldria un cabal de 1 l/min i espira per dissipar fins a 190 W de calor per espira. Aquest cabal correspon a una pèrdua de càrrega de 0,3 m.c.a., és a dir, a una pèrdua de pressió de 3 kPa. La velocitat de pas del fluid per l'interior de l'espira seria de solament 0,9 m/s. El cabal total necessari seria de 22 l/min, que és pot subministrar mitjançant una petita bomba de poca potència, d'uns 100 W des d'un dipòsit de prou capacitat per tenir una gran inèrcia tèrmica i poder assajar el motor durant 60 minuts. Per un canvi màxim de temperatura de l'aigua de 15°C, un dipòsit de 200 l d'aigua seria suficient. La temperatura mitja entre l'aigua i el coure dependrà del coeficient de convecció, i per a realitzar els càlculs s'ha suposat igual a 10°C.
- Si el refrigerant és nitrogen líquid, el cabal necessari és molt inferior degut principalment a la disminució de resistivitat del coure amb la temperatura. La circulació del nitrogen s'aconsegueix per gravetat, situant el dipòsit lleugerament per sobre del prototip. En l'annex B es presenten els càlculs de prestacions i necessitats de nitrogen líquid per aquest cas.

La refrigeració per aire és viable solament si es disposa de circuit d'aire comprimit, atès que els cabals i pressions necessaris són força elevats respecte els assolibles per altres sistemes. Malgrat aquesta limitació, degut a l'elevada inèrcia tèrmica del conjunt del prototip, es poden fer proves sense refrigeració durant uns pocs minuts sense que la temperatura en el punt més calent arribi a valors destructius. La dissipació de calor per convecció natural és petita, així que es pot assumir que durant el temps que dura la prova, tota la calor generada es queda acumulada en el prototip, amb l'augment de temperatura associada. Així doncs, entre assaig i assaig cal deixar refredar el prototip.

3.3.9 Rotor

El rotor que s'ha usat en els assajos és del tipus més simple possible. Es tracta d'un rotor en forma de got cilíndric d'alumini, sense ferro, suportat amb coixinets per un sol extrem, constituint un eix en voladís. El seu diàmetre exterior és de 147,5 mm, i el seu gruix és de 5 mm. Atès que el diàmetre interior de l'estator és de 148 mm, l'entreferro¹¹⁹ és de 0,25 mm. Un disc cilíndric d'alumini tanca el rotor per un des seus costats. Al centre d'aquest disc s'encasta el coixinet i l'eix de sustentació del rotor.

Segons les simulacions realitzades, el gruix del rotor s'adequa a la profunditat de penetració del camp de l'estator en el rotor, pel tot el ventall d'assajos que s'han realitzat.

Gràcies a l'absència d'esforços de reluctància entre el rotor i l'estator, l'eix del rotor es pot fixar en voladís, és a dir, es pot sustentar per un sol extrem. A més, l'alumini té un comportament lleugerament diamagnètic, és a dir, té tendència a "rebutjar les línies de camp".

A més, sobre l'eix del rotor s'ha muntat un fre dinamomètric de fricció per poder aplicar al rotor diferents parells resistents. Els elements de fricció estan muntats sobre un suport basculant respecte l'eix, que a la vegada transmet el parell de fricció a un cèl·lula de càrrega o bàscula electrònica.

Queda per a treballs futurs la modificació o substitució del rotor per tal millorar les seves prestacions.

Algunes propostes són:

- Assajar rotors de copa amb altres gruixos d'alumini.
- Augmentar la precisió del mecanitzat i la millora dels suports del rotor per poder reduir l'entreferro.
- Realitzar talls longitudinals en el rotor a similitud de les gàbies d'esquirol, per evitar els vòrtex que es formen quan el medi és continu, com en el rotor de copa¹²⁰.
- Assajar altres tipus de rotors, com ara un rotor estàndard de gàbia d'esquirol, o un rotor d'imants permanents.

¹¹⁹ En aquest cas no es tracta estrictament d'un entreferro, donat que el rotor és totalment d'alumini, però mantenir aquest nom facilita el seguiment de les explicacions.

¹²⁰ FRÍAS, E. (*Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos*. [Tesi doctoral], 2004): per mitjà de la simulació presenta diferents resultats del comportament de les capes de corrent en el rotor d'una màquina d'inducció.

3.4 Simulacions

Com a assistència al procés constructiu, s'han realitzat algunes simulacions senzilles en 2 i 3 dimensions, sobretot respecte el repartiment del corrent per les planxes de coure utilitzades per connectar les espires, i poder així prendre decisions sobre el reforç o no d'algunes seccions crítiques.

Sense voler ser extens, i a nivell qualitatiu, es presenten a continuació alguns dels casos explorats:

- a) Repartiment de corrents i tensions entre un cilindre de 3 mm de gruix connectat perpendicularment a una planxa de coure de 1 mm de gruix. La solució es representa el la figura 3-13. La font del corrent és a la base del cilindre, la sortida del corrent està situada a la banda dreta de la planxa, lloc on es situarien les espires, totes en paral·lel. Malgrat que el cas està força allunyat de la realitat, es pot apreciar que el corrent es reparteix homogèniament per tota la secció disponible a una distància d'uns 5 cm de la intersecció entre planxa i cilindre. També que el en cilindre, el repartiment no és homogeni. El material no s'aprofita adequadament atès que la densitat de corrent màxima és de l'ordre de 6 cops major que la densitat promig que correspondria per un repartiment homogeni. En les zones on es concentra el corrent es donarà una major generació de calor, i per tant de pèrdues.

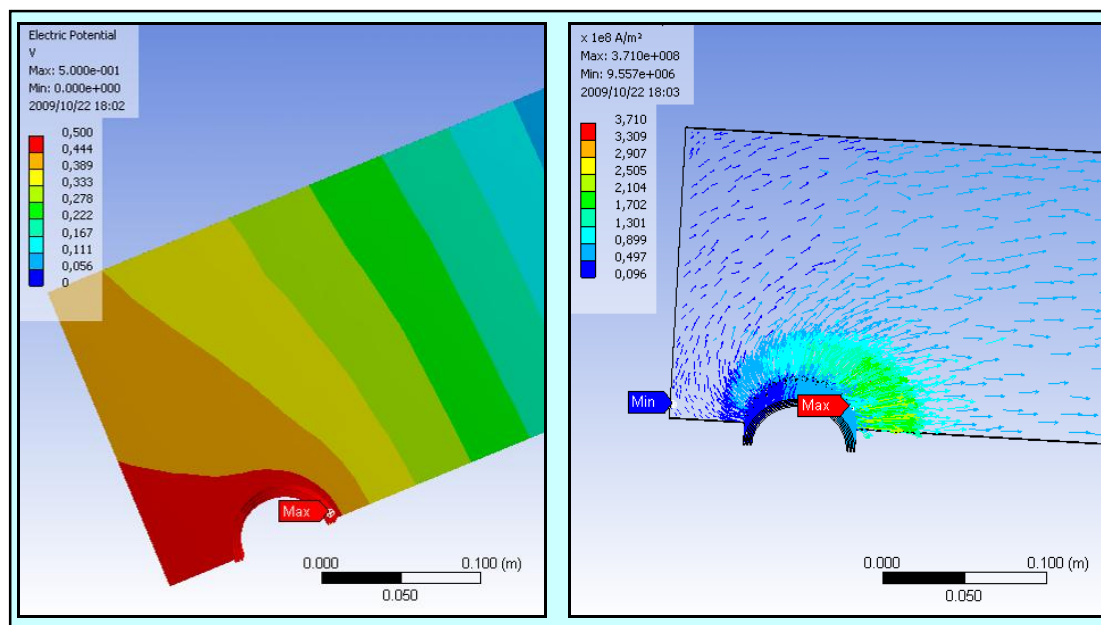


Figura 3-13. Simulació del repartiment de corrent en una planxa de coure de 1 mm de gruix, segons disposició particular del prototip VF1. Simulació realitzada en Ansys10. Imatge esquerra: distribució de tensió. Imatge dreta: repartiment de corrents.

- b) S’ha arribat a fer el model complet del prototip en 3D, però la seva complexitat condiona la capacitat de resoldre les simulacions, per més senzilles que es plantegin les condicions de contorn. Donat que la construcció del prototip es va considerar més important que la seva simulació completa, es va abandonar aquesta via. (veure figura 3-14)

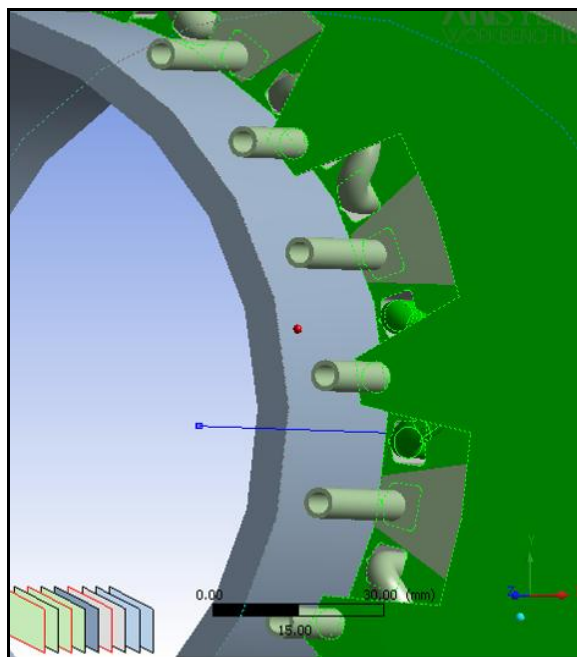


Figura 3-14. Fragment central del model geomètric en 3D del prototip VF1, realitzat en ANSYS10

- c) Repartiment de corrent en la planxa d’alimentació de les bobines, en 2D sobre el programa “femm 4.0”. Els resultats d’aquesta simulació s’adequaven aproximadament als valors mesurats sobre el prototip.
- d) Grau d’idoneïtat del cilindre que uneix els dos pols de cada fase per l’interior del torus. Es tracta d’un cilindre format per enrotllament d’una rectangle de planxa de coure de 1 mm de gruix, de manera que se sobreposen dues capes en una meitat del cilindre i tres capes en l’altra meitat. Segons la simulació en 2D, en el programa “femm 4.0”, la soldadura d’estany que uneix totes les capes en els seus extrems limita l’aprofitament del coure de les capes interiors, és a dir, la densitat de corrent en la capa més exterior és més alta que en les capes interiors, denotant un mal aprofitament del material i comportant unes majors pèrdues dissipatives en aquesta zona. A més, les llengüetes que s’han utilitzat per augmentar la superfície de soldadura entre les xapes són molt útils per evitar concentracions de corrent i la seva longitud de màxim aprofitament està al voltant del primer centímetre. Per facilitat constructiva, les llengüetes en el prototip normalment mesuren entre 2 i 3 cm de longitud.

- e) Estimació de les prestacions i del comportament magnètic del rotor i estator per modelització en 2D amb el programa “femm 4.0”. Es van fer algunes primeres simulacions per corroborar el dimensionat inicial. Un cop es va disposar dels materials constructius del prototip, es van anar fent simulacions sota diferents hipòtesis de freqüència, lliscament, gruix del rotor, etc. Els valors obtinguts per simulació coincideixen en ordre de magnitud amb els obtinguts en els assajos. Per exemple, la simulació de la figura 3-15 donava un parell d'arrencada de 0,127 Nm per un corrent per espira de 190 A, mentre que el valor mesurat en els assajos va ser de 0,290 Nm. L'assaig correspon a 50 Hz.

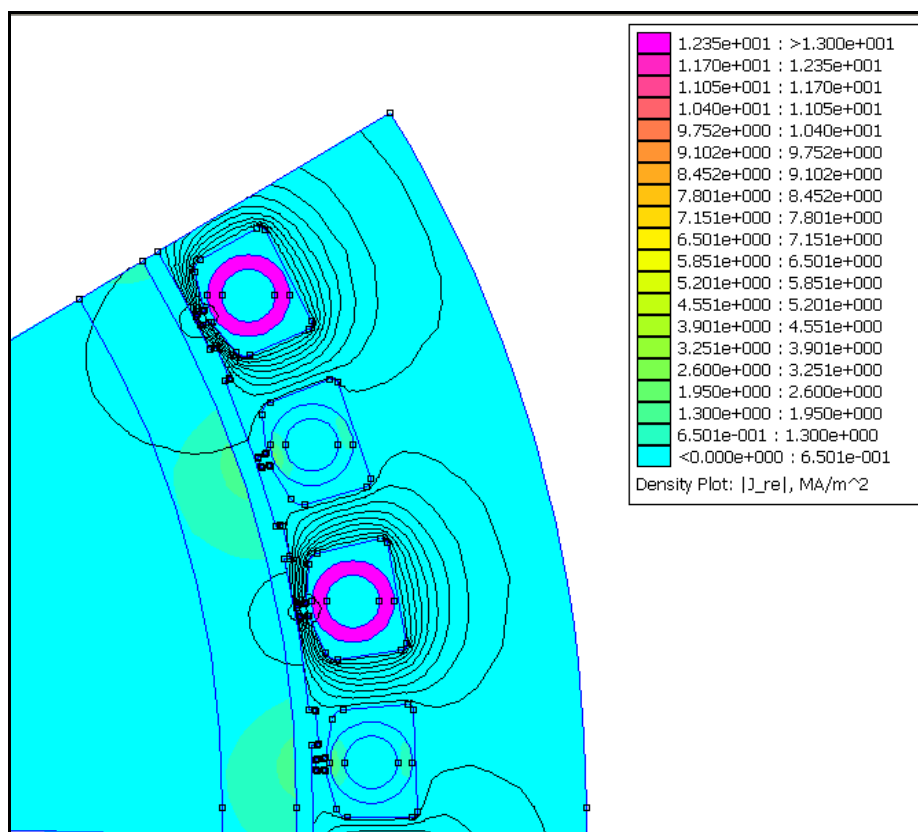


Figura 3-15. Resultat de la simulació en 2D d'un fragment del prototip. Es representen les línies d'igual potencial magnètic i la densitat de corrent en cada punt, segons el codi de colors indicat en la llegenda.

3.5 Resultat dels assajos

Es poden fer proves sobre el prototip durant alguns minuts sense haver d'utilitzar cap tipus de refrigeració, per la pròpia inèrcia tèrmica del conjunt. En les primeres proves es va veure que es podia superar el 50 % de la velocitat de sincronisme a temperatura ambient. Aquest és un èxit per si sol respecte altres prototips realitzats en tesis anteriors en el mateix departament, entre les que exploren motors d'aquest tipus, de poques espires i molta corrent.

La major part dels assajos han consistit en la mesura de corrents i tensió dels primari i del secundari, i les variables que s'hi relacionen, com la potència activa i reactiva del primari, o el desfasament tensió-corrent de primari i secundari.

Per tal de mesurar el corrent del secundari, s'han construït diverses sondes Rogowsky, segons es descriu en l'annex A. Aquestes sondes s'han fet a mida per tal de poder-les introduir pels espais que queden lliures en el prototip. D'aquesta manera s'ha pogut obtenir un senyal proporcional al corrent secundari en diferents punts del prototip.

El corrent efectiu del secundari és de l'ordre del 62% del valor ideal en cas que es complís la relació de transformació pel que fa al nombre d'espores entre primari i secundari (234 espores respecte una).

El corrent secundari es reparteix en paral·lel entre les onze espores de cada fase de manera desigual. El corrent de l'espira més allunyada del torus és un 16% inferior a que circula per l'espira més propera al torus. La impedància del camí que ha de seguir el corrent depèn de la proximitat entre espira i torus, i d'altres efectes vinculats a la inductància d'aquest camí. .

A més, el corrent de les espores cap al torus, a través de les planxes de coure centrals, pot retornar per dos camins paral·lels. Per mitjà de les sondes Rogowsky s'ha pogut estimar que malgrat tenir seccions gairebé idèntiques, un camí és utilitzat pel 62% del corrent mentre que l'altre deriva el 38% restant. Aquesta diferència s'ha atribuït a l'existència d'una soldadura de més en el segon camí, i a la menor inductància que ofereix la geometria del primer camí respecte la del segon. En aquest món d'altres corrents, els petits detalls geomètrics que serien insignificants per corrents reduïts prenen protagonisme.

En resum, pel corrent nominal del circuit primari de 14 A, el corrent en el secundari és d'uns 2000 A, que repartits entre les onze espores representa 185 A per espira, amb una variabilitat del 8,6% segons la proximitat al torus.

Amb una refrigeració adequada, es podria assajar el comportament a majors corrents, atès que queda un marge important respecte la tensió nominal dels torus magnètics.

En l'annex B es presenten els càlculs realitzats sobre les prestacions de la refrigeració per nitrogen líquid, i sobre les quantitats necessàries per a refredar el prototip fins a la temperatura d'ebullició del mateix.

El parell d'arrencada per un corrent de 14 A en el primari ha estat, a temperatura ambient, de 0,25 Nm.

La caracterització del motor ha estat difícil, degut a la variabilitat de les propietats elèctriques del coure amb l'augment de temperatura associat al transcurs de cada assaig. Es pot considerar que els assajos es donen en condicions adiabàtiques, i que tota la calor generada queda emmagatzemada en els materials del prototip. Amb l'augment de temperatura, la resistència del coure augmenta, i el corrent en el secundari disminueix per una mateixa corrent en el primari, amb la corresponent disminució de velocitat i parell. Faria falta assajar el prototip en condicions isotèrmiques, amb una evacuació adequada de la calor, per poder-ne treure les corbes de comportament, com ara les de parell-velocitat, entre d'altres.

Es planteja com a treball futur aprofundir en l'estudi de les capes de corrent i la seva distribució per superfícies conductores, en vinculació al repartiment del corrent per les planxes del prototip, a l'estudi del rotor d'inducció i de l'entreferro del prototip. Existeixen suficients antecedents per justificar aquesta via, com ara la tesi doctoral d'E. Frías (2004)¹²¹, que es fonamenta en el mètode dels elements finits, i les metodologies experimentals emprades per P. López (2000)¹²² i Q. Lloberas (2006)¹²³ en les seves tesis doctorals, en base a la utilització de sondes Hall, bobines Rogowski i sondes exploradores. Es tractaria d'identificar possibles ineficiències en el repartiment del corrent fruit de la formació de vòrtex o altres fenòmens.

En l'annex C es presenten els resultats més representatius dels assajos realitzats.

¹²¹ FRÍAS, E. (*Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos*. [Tesi doctoral], 2004)

¹²² LÓPEZ, J. (*Nuevas aportaciones al motor eléctrico de flujo axial con rotor conductor sin material ferromagnético*. [Tesi Doctoral], 2000)

¹²³ LLOBERAS, J. (*Hacia el motor superconductor: nuevas configuraciones electromagnéticas para máquinas rotativas*. [Projecte de tesi], 2006)

Capítol 4. Conclusions i futures línies d'investigació

S'han desenvolupat tres òptiques diferents i complementàries sobre el tema, avalades per la metodologia pluridisciplinària emprada:

- a) Recopilació documental i anàlisi històric i geogràfic de partida, sobre la trompa d'aigua o trompa dels Pirineus.
- b) Anàlisi fluídica experimental sobre prototipus de trompa, desenvolupament de models matemàtics i estudi dels fluxos bifàsics.
- c) Disseny, construcció i assaig d'una màquina elèctrica especial, susceptible d'actuar com a generador d'inducció de rotor tubular inundat i sense ferro. Aquest tub giratori inclouria una turbina d'hèlix suportada per la perifèria de les pales. Aquesta configuració és especialment adient per aprofitar l'energia perduda a la banqueta de la trompa, la qual es té intenció de substituir en un futur. Aquest tipus de turbina permetria el desguàs de l'aigua per la perifèria, i de l'aire per la part central, que pot inclús recular en direcció contrària.

4.1 Aportacions i conclusions

4.1.1 Anàlisi documental sobre la trompa d'aigua

Les fonts bibliogràfiques que referencien la trompa d'aigua són abundants. Majoritàriament es tracta de cites breus de la seva existència en algun punt de la geografia, amb explicacions superficials del seu funcionament o utilitat. Amb la lectura de la majoria d'elles es percep una sensació de sorpresa o novetat constant. Fins ben bé al segle XIX, dona la sensació que els autors d'aquests textos sentin la necessitat de transmetre una descoberta, com assumint que serà una novetat per al lector. Es concentren més en transmetre el concepte de la trompa que en aportar informació rellevant sobre el seu funcionament o prestacions.

Solament a partir d'unes poques fonts es podrien reconstruir de manera fidedigna les trompes d'aigua que havien existit en les fargues. Els textos més antics estan mancats de detall o precisió, mentre que els més moderns es troben ja amb els inicis de la seva desaparició.

Els artesans constructors de les trompes difícilment deixaven constància escrita dels seus coneixements. Més aviat practicaven el secretisme per protegir el seu medi de vida, prestigi i competitivitat. S'han adoptat com a referents per a la realització de les trompes d'aigua en el laboratori els textos de T. Richard i J. François, de 1838 i 1843 respectivament, els quals versen sobre les fargues de la zona de l'Arieja (França).

Durant l'elaboració del present treball he pogut col·laborar amb altres investigadors en treballs relacionats amb la història de la Farga Catalana i en l'estudi *in situ* de la fàbrica del ferro de la Sénia, (Montsià) i de la farga d'Hostalric (la Selva).

Sobre la història de la trompa d'aigua, ha calgut recórrer a una extensa bibliografia per poder donar una visió relativament completa dels tipus de trompes que han existit al llarg del temps i de la seva evolució.

El primer criteri de classificació de les trompes rau en el mecanisme que implementen per arrossegar l'aire: les trompes sense espiralls utilitzen des de la caiguda lliure de l'aigua sobre un embut, passant per la formació d'un remolí o la simple caiguda per l'interior de l'arbre; un altre tipus eren les trompes amb espiralls o amb trompilles, que eren més eficients que les anteriors.

Un segon criteri de classificació és el de les variants geogràfiques, que malgrat ser pràctic, posa en evidència les influències mútues i constants que existeixen entre totes.

Durant els s. XVIII i XIX s'introdueixen una sèrie d'innovacions en la trompa, com ara l'augment de la càrrega d'aigua sobre l'escanyall per incorporació d'una bassa superior, o la immersió de la caixa dels vents per augmentar la pressió de l'aire. És destacable que en la representació gràfica més antiga d'una trompa d'aigua aplicada a la metal·lúrgia, la de G. Branca de 1629, apareguin d'una manera més o menys ingènua, totes aquestes innovacions més tardanes.

No va ser fins a finals del s. XIX que s'aconsegueix augmentar el rendiment d'aquest tipus de màquines fins als límits que fixa la mecànica de fluids, amb el desenvolupament i construcció de compressors hidràulics d'aire de grans dimensions. Amb l'augment de la pressió de l'aire i la recuperació de l'energia de l'aigua de la caixa dels vents en forma d'energia potencial, per elevació de la cota de desguàs, s'aconsegueixen rendiments de conversió de l'energia hidràulica a pneumàtica de fins al 85%, valor molt superior al 15% que devien tenir de promig les trompes d'aigua de les fargues.

Altres aplicacions del principi funcional de la trompa són la trompa de buit, algun dels tipus de polvoritzadors, els injectors i ejectors, el transport de fluids bifàsics, desenvolupat sobretot per les mescles de vapor i aigua i pel transport d'hidrocarburs, i la bomba d'elevació d'aigua per aire comprimit.

4.1.2 Anàlisi fluidic de la trompa pilot

Segons mostra l'anàlisi teòric de la trompa, els artesans de les trompes de la farga catalana van aconseguir un aprofitament òptim d'aquest giny hidropneumàtic. Sense donar una explicació científica als fenòmens que s'hi produeixen, es va arribar a un domini suficient de les trompes per competir durant alguns segles amb les manxes i les rodes hidràuliques. Aquesta màquina té la simplicitat i versatilitat adequades per adaptar-se al procés de la farga catalana, i aconseguir a la vegada que el procés de la farga catalana s'adaptés a la trompa.

Per uns requeriments màxims de pressió de l'aire d'uns 12 kPa, no es podien introduir gaires més innovacions per augmentar el rendiment de la màquina que les que es van anar desenvolupant progressivament amb el temps. Per aquesta pressió tant reduïda, la millora havia de provenir de l'augment del cabal d'aire en relació al consum d'aigua. La ràtio entre aire i aigua en la mescla és el factor més determinant del comportament de la trompa i els seus derivats. No obstant, ja des de les primeres trompes, els resultats que obtenien en aquest sentit s'acosten força al límit natural d'aquests fenòmens d'arrossegament. La millora en el rendiment de la trompa s'aconsegueix per l'augment de la pressió de treball amb el desenvolupament dels compressors hidràulics d'aire.

S'han posat a punt interessants relacions teòriques d'utilitat per al dimensionat de trompes d'aigua, sigui en la configuració pròpia de la farga, o en la resta d'aplicacions que deriven del mateix principi funcional, com els compressors hidràulics d'aire, o les bombes d'elevació d'aigua per aire. S'han apuntat les singularitats més destacades que distingeixen cada una d'aquestes aplicacions entre si.

S'ha treballat sobre la caracterització del flux bifàsic aire-aigua, i es pot afirmar que continua sent un desconegut amb un fort potencial d'aplicació, com ara en forma de coixí hidrodinàmic, o per reduir la fricció a l'avanç dels bucs.

Pel que fa als prototipus de trompa realitzats, els més petits estarien a punt per nodrir alguns museus de la ciència, amb l'avantatge que serien operatius i reflectirien la realitat històrica no solament en la seva forma, sinó també en el seu funcionament.

S'ha caracteritzar el funcionament de la trompa pilot a escala 1:3. Els resultats obtinguts avalen els models teòrics desenvolupats. No obstant, la determinació dels paràmetres del model no deixa de tenir una forta component empírica, de manera que caldria un estudi posterior més afinat per obtenir una major abstracció.

L'anàlisi energètic de la trompa permet definir les estratègies d'aprofitament de l'energia de la fase líquida, sigui a la sortida de l'arbre quan la pressió a la caixa dels vents no és la màxima, sigui a la sortida de la caixa dels vents, i serveix de punt de partida per a la definició de la màquina elèctrica especial construïda.

L'estudi dels compressors hidràulics d'aire, com a ginyes que recullen la herència de les trompes d'aigua, posa de relleu nous fenòmens que eren de menor importància en la trompa, com la compressió isotèrmica que es produeix, la sequedat de l'aire comprimit, o la dissolució dels gasos de l'aire en l'aigua. Els dos darrers fenòmens són proporcionals a la relació de compressió de l'aire.

A més de la pèrdua de rendiment que comporta la dissolució de l'aire en l'aigua, l'aire comprimit resulta empobrit en oxigen respecte la composició habitual de l'aire atmosfèric. En contrapartida, l'aire que s'allibera durant la descompressió de l'aigua que surt del compressor resulta enriquit en oxigen.

El bombament d'aigua amb aire té aplicacions en el desenvolupament sostenible i en el respecte al medi ambient, atès que el mecanisme d'elevació és poc agressiu. Actualment s'usa en piscifactories per al tràfec de l'aigua. També s'aprofita l'elevada eficiència d'oxigenació que té associat.

4.1.3 Màquina elèctrica especial: el prototip VF1

Amb la construcció i assaig del prototip VF1 s'han aconseguit les següents fites i resultats:

- S'ha superat el lliscament del 50% per primera vegada per motors de geometria similars.
- S'ha perfeccionat el sistema d'adaptació d'impedàncies, injectant corrents de l'ordre del 62% respecte el valor ideal que correspondria per la relació d'espines com a transformador de corrent.
- La connexió Scott ha demostrat ser de molta utilitat en la geometria emprada.
- S'ha millorat el procediment de soldadura del circuit d'alta corrent, tot optimitzant la quantitat i geometria de les soldadures i determinant les seves impedàncies associades.
- S'ha aconseguit posar a punt un sistema de mesures, per a determinar amb precisió les reactàncies internes de les diferents parts, que permeten traçar el circuit equivalent de la màquina.
- S'han detectat desviaments respecte els valors esperats en el repartiment de corrents en el cilindre de coure que travessa el torus de cada fase. El corrent no es reparteix de manera equilibrada entre les tres capes de planxa de coure que formen el cilindre, sinó que la major part del corrent circularia per la capa més externa del cilindre.
- S'ha pogut assajar la màquina per diferents parells resistents en el rotor, gràcies al fre dinamomètric incorporat, per determinar les corbes parell-velocitat.
- S'ha fet el càlcul teòric de l'estimació del nitrogen líquid que faria falta per refredar el prototip fins a la temperatura de 77 K. També s'ha fet l'estimació del comportament resistiu dels materials conductors del prototip a aquesta temperatura.

4.2 Futures línies d'investigació i d'aplicació

Durant el transcurs dels treballs s'han anat identificant aspectes i àmbits que podrien resultar d'interès per futures investigacions, i que han quedat fora de l'abast d'aquesta tesi. Aquestes línies s'enumeren a continuació, separades segons l'àmbit al qual pertanyen:

4.2.1 Anàlisi documental sobre la trompa d'aigua

El treball documental realitzat es podria posar en valor per mitjà de les següents iniciatives:

- Divulgació dels treballs realitzats a la Sénia i a Hostalric en aquests municipis mitjançant demostracions, tallers o reconstruccions.
- Avaluar les possibilitats d'explotació turística d'algun giny demostratiu de la trompa.
- Realització de material divulgatiu en la línia dels plantejaments del concurs "Ciencia en Acción"¹²⁴.

4.2.2 Anàlisi fluídic de la trompa pilot

Cal distingir entre les línies de valorització del treball realitzat i les línies d'ampliació de la investigació.

Les possibles aplicacions o línies de valorització dels resultats són:

- Aplicació de la trompa d'aigua com a tecnologia per al desenvolupament pel tercer món.
- Estudi d'aplicació de les bombes d'elevació d'aigua per aire comprimit per a piscifactories, o per a l'oxigenació de masses d'aigua.
- Aprofitament de la caixa dels vents de la trompa pilot per a l'assaig d'hidrogenadors en el laboratori del DEE.
- Desenvolupar aplicacions de la trompa d'aigua i el bombament per aire en combinació amb sistemes renovables de dessalinització d'aigua.
- Estudiar l'aprofitament d'aquests mecanismes d'oxigenació de l'aigua per a combatre l'eutrofització dels pantans, per a la reducció de la seva demanda biològica/química d'oxigen (DBO, DQO), o per a la depuració d'aigües residuals.

¹²⁴ Veure <<http://www.cienciaenaccion.org>>.

Es plantegen les següent possibles línies d'ampliació de la investigació:

- Ampliar l'estudi de la trompa d'aigua per mitjà del desenvolupament d'altres prototips.
- Aprofundir en les aplicacions dels fluxos bifàsics en turbines, bucs, o en la llanxa Ras.
- Explorar el comportament dels fluxos bifàsics sota condicions de cavitació o de cop d'ariet. La concentració sobresaturada d'oxigen o nitrogen pot resultar d'interès en algun àmbit.

4.2.3 Màquina elèctrica especial: el prototip VF1

El prototip construït no s'ha assajat fins esgotar les possibilitats d'investigació. Sense haver de realitzar un altre prototip, encara es poden realitzar diferents proves útils, com ara:

- Assaig del prototip a la temperatura del nitrogen líquid, per immersió o per refredament pel sistema de conductes previst.
- Comprovar l'eficiència del sistema de refredament previst amb diferents fluids, com aire comprimit, aigua o aigua amb generació de vapor.
- Desenvolupar una suspensió fluïdodinàmica per al rotor.
- Assajar el prototip com a motor amb una hèlix en el rotor, i posteriorment com a generador, amb una turbina a l'interior del rotor.
- Assajar el comportament del prototip en combinació amb altres tipus de rotors, com ara un rotor estàndard d'inducció de gàbia d'esquirol, un rotor d'imants permanents, com a màquina síncrona, o per modificació de l'actual rotor de copa.
- Incloure les pales de la turbina a l'interior del rotor per tal d'assajar el conjunt.
- Realitzar el platejat del secundari del motor per tal de reduir la seva impedància.
- Concebre i realitzar els assajos i mesures del circuit magnètic del prototip, com ara la caracterització del camp en l'entreferro, dels corrents induïts en el rotor, o del repartiment del corrent per les planxes de coure que alimenten les espines.

Per altra banda, l'experiència acumulada permet plantejar modificacions en el disseny bàsic del prototip:

- Modificació de la geometria del cilindre central de coure per aprofitar la menor impedància dels camins perifèrics de retorn del corrent.
- Modificació de la geometria del cilindre de coure que travessa els torus, per tal reduir la seva impedància, en base als resultats obtinguts sobre el comportament del corrent en aquest tram.
- Estudi d'altres possibles geometries i posicions del toroides d'adaptació d'impedàncies.

Capítol 5. Bibliografia

5.1 La trompa d'aigua

1. AGRICOLA, Georgius. *De re metallica*. Translated from the first latin edition of 1556 by Herbert Clark Hoover and Lou Henry Hoover. Londres: The Mining Magazine, Salisbury House, 1912. Disponible a: <<http://www.archive.org>>
2. ALEMBERT, Jean Le Rond d'; DIDEROT, Denis. *Encyclopédie, ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*. [en línea]. Paris: Briasson, Tome de planches. 1751-1765. Disponible a: <http://fr.wikisource.org/wiki/Planches_de_l'Encyclopédie_-_3>. Disponible a: <<http://diderot.alembert.free.fr/PLANCHES/index.html>>. Disponible a: <<http://portail.atilf.fr/encyclopedie/> - Planches, 3r Forges ou Art du Fer – Secció II planche 3 i 4 – p. 21:11:8 i 21:11:9>
3. ARASA, J.; FUSES, V.; GARCIA, E.; SERRA, M. «*La farga i el ferro a la vall del riu Sénia: el cas de la Fàbrica del Ferro*», *Lo Senienc. Memòria, natura i llengua*. Centre d'Estudis Seniencs, 2008, Núm. 5.
4. AREU, Montserrat; COMAS, Francesc. *La forja*. Barcelona: Rafael Dalmau (ed.), Col·lecció Nissaga n°8, 1987.
5. ASME Milwaukee. *Taylor mine compressor*. [en línea] Milwaukee (EEUU): American Society of Mechanical Engineers, 2007. [Consulta el 31 de març de 2010]. Disponible a: <<http://sections.asme.org/Milwaukee/history/51-taylorcompressor.html>>
6. AUBUISSON, Jean François d'. *Traité d'hydraulique à l'usage des ingénieurs*. Paris: Chez F. G. Levrault, 1834. Disponible a: <<http://www.archive.org>>
7. AUBUISSON, Jean François d'. «*Expériences sur la résistance que l'air éprouve dans des tuyaux de conduite, faites aux mines de Bancié en 1825*», *Annales des Mines, ou Recueil de mémoires sur l'exploitation des mines et sur les sciences qui s'y rapportent*. Paris: chez Treuttel et Würtz Libraires, Deuxième Série, Tome III, 1828. p. 367-486, planche VII. Disponible a: <http://Annales.ensmp.fr/numeros/ANN_1828_S02_03/>

8. AUBUISSON, Jean François d'. «*Expériences faites sur la trompe du ventilateur des mines de Rancié, suivies de quelques observations sur les trompes en général*», *Annales des Mines, ou Recueil de mémoires sur l'exploitation des mines et sur les sciences qui s'y rapportent*. Paris: chez Treuttel et Würtz Libraires, Deuxième Série, Tome IV, 1828. p. 211-244. Disponible a: <http://Annales.ensmp.fr/numeros/ANN_1828_S02_04/>
9. BACON, J. E. *Pneumatic water elevator*. [en línea] EEUU: United States Patent Office (USPO), núm 542.620, 16 de juliol de 1895. [Consulta el 31 de març de 2010]. Disponible a: <<http://www.google.es/patents/>>
10. BARALDI, Enzo. «*Historical resources relating to the Mediterranean Metalurgy of iron*». A: VILA, Antoni; CODINA, Olivier; BOSCH, Josep Maria [Dir.]. *L'obtenció del ferro pel procediment directe entre el s. IV i XIX. Actes del 6è curs d'Arqueologia d'Andorra 2000*. Aixovall: Govern d'Andorra, Ministeri de Cultura, Àrea de Recerca Històrica, 2001. p. 79-99.
11. BARTHES. «*Mémoire sur les soufflets de certaines forges produits par la chute de l'eau*», *Mémoires de mathématique et de physique, présentés à l'Académie Royale des Sciences, par divers savans & lûs dans les Assemblées*. Paris: Imprimerie Royale, Tome III, 1760. p. 378-408. Disponible a: <<http://books.google.es>>
12. BEAUNIER; GALLOIS. «*Expériences faites sur les Trompes de la Fonderie de Poullaouen*», *Journal des mines, ou Recueil de mémoires sur l'exploitation des mines, et sur les Sciences et les Arts qui s'y rapportent*. Paris: Imprimerie de Bossange, Masson et Besson, 16è volume, 2nd semestre, an XII, núm. 91, 1803, p. 37-48, planche VII. Disponible a: <<http://www.annales.org/archives/annales/1803-1804-2>>
13. BELGHERBI, Kader. *La Route du fer*. [en línea]. 2004. Disponible a: <http://pagesperso-orange.fr/kader.belgherbi/durand/fichiers/route_du_fer_2003/index_fer.htm>
14. BELHOSTE, Jean François. «*Une machine soufflante pour les forges de montagne: la trompe à eau*». A: VILA, Antoni; CODINA, Olivier; BOSCH, Josep Maria [Dir.]. *L'obtenció del ferro pel procediment directe entre el s. IV i XIX. Actes del 6è curs d'Arqueologia d'Andorra 2000*. Aixovall: Govern d'Andorra, Ministeri de Cultura, 2001. p.100-110.
15. BÉLIDOR. *Architecture hydraulique, ou l'art de conduire, d'élever et de ménager les eaux pour les differens besoins de la vie*. Paris: quay des Augustins chez Charles-Antoine Jombert, tome 2nd, 1739, p. 192-194. Disponible a: <<http://gallica.bnf.fr>>

-
16. BELL, Louis. *Electric power transmission: a practical treatise for practical men*. New York: McGraw Publishing Co, 4a edició, 1906. p. 55-58. Disponible a: <http://www.archive.org>
 17. BELLAMY, N. W. «*Low-head hydroelectric Power using pneumatic conversion*». *Power engineering journal*. May 1989. p.109-113.
 18. BIDINI, G; GRIMALDI, C. N.; POSTRIOTI, L. «*Thermodynamic analysis of hydraulic air compressor-gas turbine power plants*». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Power & Energy*. New York: Institution of Mechanical Engineers, Vol. 211, Issue 5, 1997. p. 429-437.
 19. BIDINI, G; GRIMALDI, C. N.; POSTRIOTI, L. «*Performance analysis of a hydraulic air compressor*». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Power & Energy*. New York: Institution of Mechanical Engineers, Vol. 213, Issue 3, 1999. p.191-203.
 20. BONI, Bruno. «*Sull origine italiana delle trombe idroeoliche*». *La fonderia italiana*, AIM Riva Valentino, 1958, núm. 5, p. 161-168.
 21. BOSCH TOUS, Ricard; FUSES NAVARRA, Víctor, «*Model Pilot de trompa d'aigua o trompa dels Pirineus*», a: *El patrimoni industrial de les terres de l'Ebre. Actes de les VII Jornades d'Arqueologia Industrial de Catalunya.Tortosa 19, 20 i 21 d'octubre de 2006. A cura d'Àngels Solà i Lluís Virós*. Barcelona: Associació d'Enginyers Industrials de Catalunya i Associació del MNACTEC, Col·lecció Cultura, Tècnica i Societat, 2009. p. 277-286.
 22. CANTELAUBE, Jean. «*Evolution technique et charbonnage des forêts. L'exemples des forges à la catalane dans les Pyrénées*», a: *Protoindustries et charbonnage des forêts*, Les Cahiers de l'Izard, 1992, núm 3.
 23. CANTELAUBE, Jean. «*De la forge à bras à la forge à la catalane: évolution du bas fourneau de réduction directe du minerai de fer dans les Pyrénées ariègeoises*». A: VILA, Antoni; CODINA, Olivier; BOSCH, Josep Maria [Dir.]. *L'obtenció del ferro pel procediment directe entre el s. IV i XIX. Actes del 6è curs d'Arqueologia d'Andorra 2000*. Aixovall: Govern d'Andorra, Ministeri de Cultura, Àrea de Recerca Històrica, 2001. p. 9-34.
 24. CHEN, L. T.; RICE, W. «*Some psychrometric aspects of a hydraulic air-compressor (HAC)*». *Journal of energy resources technology-transactions of the ASME*. Volum: 104, Issue: 3, p.274-276. 1982.
 25. CHEN, L. T.; RICE, W. «*Properties of air leaving a hydraulic air compressor (HAC)*». *Journal of energy resources technology*. Volum: 105, Issue: 1, p.54-57. 1983.
-

26. COMBES. «*Mémoire sur les deux forges catalanes de Gincla et de Sahorre*». *Annales des Mines, ou Recueil de mémoires sur l'exploitation des mines et sur les sciences qui s'y rapportent*. Paris: chez Treuttel et Würtz Libraires, Série I, Volume 9, Tome 1r, 1824. p. 329-360. Disponible a: <<http://www.anales.org/archives/anales/1824/>>
27. COMPRESSED AIR MAGAZINE. «*An operating Taylor compressor*» *Compressed air magazine*. Volume 68, núm. 10, octubre de 1963, p.24-25, 1963.
28. CODINA VIALETTE, Olivier. «*Forns, rendiments i massers perduts a la farga Rossell. De la limitació tecnològica a la restricció dels costos*». A: VILA, Antoni; CODINA, Olivier; BOSCH, Josep Maria [Dir.]. *L'obtenció del ferro pel procediment directe entre el s. IV i XIX. Actes del 6è curs d'Arqueologia d'Andorra 2000*. Aixovall: Govern d'Andorra, Ministeri de Cultura, Àrea de Recerca Històrica, 2001. p. 148-160.
29. CODINA VIALETTE, Olivier. *La Farga Rossell. El zenit de l'obtenció del ferro pel sistema directe 1842/1876*, Andorra la Vella: Govern d'Andorra, Ministeri de Turisme i Cultura, 2001.
30. CODINA VIALETTE, Olivier. «*Els obrers especialitzats i el mercat laboral andorrà dels segles XVII-XIX*», a: *Andorra i els seus veïns del Nord. 18a. Diada Andorrana. XXXVII Universitat Catalana d'Estiu. 20 d'agost de 2005. Prada de Conflent*. Andorra la Vella: Societat Andorrana de Ciències, 2006.
31. DABOSI, Francis. *La forge à la catalane: Magie de l'Eau et du Feu*. [en línea] [Consulta el 10 de març de 2010]. Disponible a: <http://www.cadrecatalans.com/toulouse/article/culture/Dabosi_forge_catalane.htm>
32. DAVIS, Geo. Jacob Jr.; WEIDNER, Carl Robert. «*An investigation of the air lift pump*». *Bulletin of the University of Wisconsin*. Madison (Wisconsin): University of Wisconsin, Engineering series, volume VI, núm 7. 1909-1911, 1911, p. 405-573. Disponible a: <<http://www.archive.org>>
33. DELLA PORTA, Giovanni Batista. *Magiae Naturalis*. Frankfurt: Excudebat Samuel Hempelius, 1607, p. 641. Disponible a: <<http://www.archive.org>>
34. DIETRICH, le Baron de. *Déscription des gîtes de minéral, des forges et des salines des Pyrénées, suivies d'observations sur le fer mazé et sur les mines des sards en Poitou*. Paris: chez Didot & Cuchet, part 1a, 1786. Disponible a: <<http://books.google.es>>
35. DRALET. *Traité de l'aménagement des bois et forêts*. Toulouse: chez Veuve Douladoure, 1807. Disponible a: <<http://www.archive.org>>

-
36. DRALET. *Description des Pyrénées*. Paris: chez Arthus Bertrand, 2nd tome, 1813. Disponible a: <<http://www.archive.org>>
 37. DUMARESQ, Charles. *Power of the mines*. [en línea] Cobalt (EEUU): Cobalt Mining Legacy. 2009. [Consulta el 31 de març de 2010]. Disponible a: <<http://www.cobaltmininglegacy.ca/power.php>>
 38. FLACHAT, Eugène; BARRAULT, A.; PÉTIET, J. *Traité de la fabrication du fer et de la fonte envisagée sous les rapports chimique, mécanique et commercial*. Paris: Librairie Scientifique et Industrielle de L. Mathias, 1842. Disponible a: <<http://gallica.bnf.fr>>
 39. FRANÇOIS, Jules. *Recherches sur le gisement et le traitement direct des minerais de fer dans les Pyrénées et particulièrement dans l'Ariège*, Paris: Carilian-Goeury et Von Dalmont Éditeurs, 1843.
 40. FRENCH, M. J.; WIDDEN, Martin B. «*The exploitation of low-head hydropower by pressure interchange with air, using siphons.*» *Proceedings of the IMechE Part A: Journal of Power and Energy*, Volume: 215, núm.: 2, 2001. p. 223-230. Disponible a: <<http://eprints.lancs.ac.uk/20250/>>
 41. FRIZELL, J. P. *Method of rising water*. [en línea] EEUU: United States Patent Office (USPO), núm 233.499, 19 d'octubre de 1880. [Consulta el 31 de març de 2010]. Disponible a: <<http://www.google.es/patents/>>
 42. FRIZELL, Joseph P. *Water-power, an outline of the development and application of the energy of flowing water*, New York: John-Wiley & sons (ed.), 1901. Disponible a: <<http://openlibrary.org/b/OL6911659M/Water-power>>
 43. GALLARDÓ I GARRIGA, Antoni; RUBIÓ I TUDURÍ, Santiago. *La Farga catalana: descripció i funcionament, historia, distribució geogràfica*, Barcelona: Nagsa, 1930.
 44. GAMBOA, Francisco Xavier de. *Comentarios a las Ordenanzas de Minas, dedicados al Catholico Rey, nuestro Senyor, Don Carlos III*. Madrid: Oficina de Joaquin Ibarra, 1761. Disponible a: <<http://books.google.es>>
 45. GAVIGNAUD, Geneviève. «*Mines de fer et forges catalanes dans les pays de Conflent et de Vallespir au XIX^e siècle*», a: *Mines et Mineurs en Languedoc-Roussillon et régions voisines de l'Antiquité à nos jours. Actes du XLIXe Congrès de la Federation historique du Languedoc méditerranéen et du Roussillon, organisé à Alès les 22 et 23 de mai de 1976*. Montpellier: Fédération Historique du Languedoc Méditerranéen et du Roussillon, 1977.
-

46. GIBSON, A. H. *Hydraulics and its applications*. New York: D. Van Nostrand Company, 1908.
47. GIRARD, Robert. «*Les machines à produire le "vent"*», a: *Mines de fer et sidérurgie en Savoie (XIII-XIXe siècles), Martinets (moulins à fer), Roues hydrauliques des forges de Savoie et d'autres contrées...* [en línea]. 2010. [Consulta el 10 de març de 2010]. Disponible a:
<<http://moulinafer.free.fr/Vent.htm>>
48. GONZÁLEZ TASCÓN, Ignacio. *Fábricas hidráulicas españolas*, Madrid: CEDEX, CEHOPU, Ministerio de Obras Públicas, 1992.
49. GRAELLS, Eudald. *Els orígens industrials de Catalunya*, Ripoll: Edicions Maideu, 1990.
50. GRUNER, Louis. *Traité de Métallurgie*. París: Dunod (ed.), 1875. Disponible a:
<<http://gallica.bnf.fr>>
51. HARRIS, Elmo Golightly. *Compressed air. Theory and computations*. New York: McGraw-Hill, 1910. Disponible a: <<http://www.archive.org>>
52. HARRIS, W. B. *Air or gas lift for fluids*. [en línea] EEUU: United States Patent Office (USPO), núm 814.601, 6 de març de 1906. [Consulta el 31 de març de 2010]. Disponible a:
<<http://www.google.es/patents/>>
53. HASSENFRAZT, Jean-Henri. *La sidérotechnie, ou, l'art de traiter les minerais de fer pour en obtenir de la fonte, du fer et de l'acier*. París: chez Firmin Didot (ed.), 1812. Disponible a:
<<http://www.archive.org>>
54. HAWKING, Robert. *Charles Havelock Taylor 1859 - 1953*. [en línea] Burlington (Ontario, Canada): blogspot.com, 2009. [Consulta el 31 de març de 2010]. Disponible a:
<<http://charleshtaylor.blogspot.com/>>
55. HENRION, M. A. «*Les gîtes miniers exploités dans le département des Pyrénées-Orientales*». *Société Agricole, scientifique & littéraire des Pyrénées-Orientales*. Perpignan: Imprimerie de Charles Latrobe, vol.: 25, 1881. p.114-164.
56. HISCOX, Gardner D. *Hydraulic Engineering*. New Yoek: the Norman W. Henley Publishing Company, 1908. Disponible a:
<http://openlibrary.org/b/OL6996074M/Hydraulic_engineering>

-
57. HOWEY, D.A.; PULLEN, K.R. «*Hydraulic air pumps for low-head hydropower*». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part A: Journal of power and energy*. Vol.: 223, núm.: 2, 2009. p.115-125. Disponible a: <<http://hdl.handle.net/10044/1/4294>>
 58. IVENS, Edmund M. *Pumping by compressed air*. New York: John Wiley & Sons, 1914. Disponible a: <<http://www.archive.org>>
 59. JUFRE GARCIA, Francesc Xavier. *El artificio de Juanelo Turriano para elevar agua al Alcázar de Toledo (s.XVI). Modelo con escaleras de Valturio*, Lleida: Milenio, 2008. (<http://www.artificiodejuanelo.org>)
 60. KIRCHER, Athanasius. *Magnes sive de arte magnetica opus tripartitum*. Roma: Ectypographia Ludovici Grignani, 1641. Disponible a: <<http://books.google.es>>
 61. KIRCHER, Athanasius. *Mundus subterraneus in XII libros digestus*. Amsterdam: Janssonio Waesbergiana (ed.), tomus II, 1678. Disponible a: <<http://www.archive.org>>
 62. LAPASSAT, Robert. «*L'industrie du fer dans les Pyrénées orientales et ariégeoises au XIXe siècle*», *Conflent*. Prades: Groupe de Recherches Historiques et Archéologiques du Conflent, nº120, 1983.
 63. MADÓZ, P. *Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones de Ultramar*. Madrid: P. Mádoz y G. Sagasti (ed.), 1845.
 64. MAGNUS, G. «*On the Motion of Fluids*». *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. Londres: Richard Taylor (ed.), 4th series, volume I, núm. 1, January 1851, 1851. p.1-23. Disponible a: <<http://www.archive.org>>
 65. MANSON, Jacques Charles de. *Traité du fer et de l'acier*, París: chez Levrault, Schoell et C., 1804. Disponible a: <<http://books.google.es>>
 66. MARIOTTE. *Traité du mouvement des eaux et des autres corps fluides, divisé en V parties*, París: chez Jean Jombert (ed.), 1700. Disponible a: <<http://books.google.es>>
 67. MAS ARRONDO, Carlos. *Història de la farga catalana: el cas de la vall Ferrera, al Pallars Sobirà, 1750-1850. Pròleg de Jordi Maluquer de Motes i Bernat*, Lleida: Pagès, 2000.

68. MAS ARRONDO, Carlos. «*La energía hidráulica en su dimensión histórica: entre el molino harinero y la farga a la catalana*», a: *La Industrial agroalimentària i els usos de l'aigua. Actes de les VI Jornades d'Arqueologia Industrial de Catalunya. Lleida 3,4 i 5 d'abril de 2003*. Barcelona: Enginyers Industrials de Catalunya, col·lecció Cultura, Tècnica i Societat, núm 19. 2006. p. 98-115.
69. MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Madrid: Ediciones del Castillo, 1973.
70. MATEU I SUBIRÀ, Joaquim. *Fargues de Catalunya i Andorra*, Barcelona: Rafael Dalmau (ed.), 2004.
71. MCNIGHT, J. *Improvement in device for rising water*. [en línia] EEUU: United States Patent Office (USPO), núm 44.876, 1 de novembre de 1864. [Consulta el 31 de març de 2010]. Disponible a: <<http://www.google.es/patents/>>
72. MOLERA I SOLÀ, Pere; BARRUECO I JAOU, Consol. *Llibre de la Farga*, Barcelona: Rafael Dalmau (ed.), Col·lecció Nissaga nº1, 1983.
73. MORÍS MENÉNDEZ-VALDÉS, Gonzalo. «*Ingenios hidráulicos históricos: molinos, batanes y ferrerías*», *Ingeniería del Agua*. Vol. 2, Num. 4, diciembre de 1995. p. 25-42. Disponible a: <<http://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/3320/1/24article2.pdf>>
74. MOULAN, Ph. *Tratado de mecànica industrial*, Barcelona: Gustavo Gili (ed.), 4a edició, 1931.
75. MUTHUON, J. M. «*Rapports sur les Forges du pays conquis en Espagne*». *Journal des mines publié par l'Agence des mines de la République*. París: Imprimerie de Du Pont, 2nd volume, 3e trimestre an III, núm. 11, 1794, p. 1-18. Disponible a: <<http://www.annales.org/archives/annales/1794-1795-2/>>
76. MUTHUON, J. M. *Traité des forges dites catalanes, ou l'art d'extraire directement et par une seule opération le fer de ses mines*, Turin: Imprimerie Départementale, 1808. Disponible a: <<http://www.archives.org>>
77. NENES, A.; ASSIMACOPOULOS, D.; MARKATOS, N.; KARYDAKIS, G. «*Simulation of Airlift Pumps for Moderate-Depth Water Wells*» [en línia]. *Technika Chronika*. Atenes: Technical Chamber of Greece, núm 14, 1996, p. 1-20. [Consultat el 30 de març de 2010]. Disponible a: <http://nenes.eas.gatech.edu/Preprints/Airlift_TC.pdf>

-
78. NENES, A.; ASSIMACOPOULOS, D.; MARKATOS, N.; MITSOULIS, E. *Simulation of Airlift Pumps for Deep Water Wells*. [en línea]. Atenes: National Technical University of Athens, 1996. [Consultat el 30 de març de 2010]. Disponible a: <http://nenes.eas.gatech.edu/Preprints/Airlift_CJCE.pdf>
79. NUÑEZ BASÁÑEZ, José F. «Resultados obtenidos en arrastreros con hélices en tobera» *Ingenieria Naval*. Núm. 476, febrer de 1975. [Consulta el 20/03/2010] Disponible a: <[http://www.maquinasdebarcos.com/Arrastreros con helice en tobera.pdf](http://www.maquinasdebarcos.com/Arrastreros%20con%20helice%20en%20tobera.pdf)>
80. OERTEL, Herbert [et al.]. *Prandtl's essentials of fluid mechanics*. New York: Springer, cop, 2nd ed. 2004.
81. OLD VICTORIA. *Old Victoria*. [en línea] Rockland (Michigan, EEUU): Society for the Restoration of Old Victoria, Inc. 2009. [Consulta el 31 de març de 2010]. Disponible a: <<http://www.coppercountry.com/OldVictoria.php>>
82. PANREAC. *Precipitación de Hidróxido de Níquel. Filtración a vacío*. [en línea]. 2010. [Consulta el 31 de març de 2010]. Disponible a: <<http://www.patacake.net/panreac/spanish/practicas/practicas21.htm>>
83. PEELE, Robert. *Compressed air plant. The production transmission and use of compressed air, with special reference to mine service*. New York: John Wiley & Sons, 2a edició, 1910. Disponible a: <<http://www.archive.org>>
84. PELOUZE. *L'art du maitre des forges ou traité théorique et pratique de l'exploitation du fer et de ses applications aux différents agents de la mécanique et des arts*. París: Malher et compagnie, librairie scientifique et industrielle, 1827-1828. Disponible a: <<http://books.google.es>>
85. PENMAN, David. *Compressed air practice in mining*. Londres: Charles Griffin (ed.), 2a edició, 1922. Disponible a: <<http://www.archive.org>>
86. PERCY, John. *Metallurgy: the art of extracting metals from their ores, and adapting them to various purposes of manufacture. Iron and Steel*, London: J. Murray, Albemarle Street, 1864. Vol. 2.
87. PIASKOWSKY, Jerzy. «A metallurgical appreciation of the Catalan process of iron smelting», a: SIMPOSI INTERNACIONAL SOBRE LA FARGA CATALANA 1993 RIPOLL, *La Farga Catalana en el marc de l'arqueologia siderúrgica*. Edició a cura d'Estanislau Tomàs i Morera, Andorra la Vella: Govern d'Andorra, Ministeri d'Afers Socials, 1995.
-

88. POHLÉ, Julius G. *Process of elevating liquids*. [en línea] EEUU: United States Patent Office (USPO), núm 487.639, 6 de desembre de 1892. [Consulta el 31 de març de 2010]. Disponible a: <<http://www.google.es/patents/>>
89. PRIVAT I FONT, Lluís. «*La farga d'aram de Banyoles*», a: SIMPOSI INTERNACIONAL SOBRE LA FARGA CATALANA 1993 RIPOLL, *La Farga Catalana en el marc de l'arqueologia siderúrgica. Edició a cura d'Estanislau Tomàs i Morera*, Andorra la Vella: Govern d'Andorra, Ministeri d'Afers Socials, 1995.
90. PUJOLLE, Emile; MACHOT, Pierre. «*Asson et Nougaret: deux forges à la catalane en Béarn au XIXe siècle*». A: VILA, Antoni; CODINA, Olivier; BOSCH, Josep Maria [Dir.]. *L'obtenció del ferro pel procediment directe entre el s. IV i XIX. Actes del 6è curs d'Arqueologia d'Andorra 2000*. Aixovall: Govern d'Andorra, Ministeri de Cultura, Àrea de Recerca Històrica, 2001.
91. RICHARD, T. *Études sur l'art d'extraire immédiatement le fer de ses minerais sans convertir le métal en fonte*, Paris: Librairie Scientifique et Industrielle de L. Mathias (Augustin), 1838, p. 169-229.
92. RIERA I TUÈBOLS, Santiago [et al.]. *La Farga catalana : un procés siderúrgic autòcton*, Barcelona: Associació d'Enginyers Industrials de Catalunya, 1997
93. RODWELL, George F. «*On some effects produced by a fluid in motion*». ». *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. Londres: Taylor and Francis (ed.), 4th series, volume XXVII, núm. CLXXIX, January 1864, 1864. p.36-41. Disponible a: <<http://books.google.es>>
94. RUSSELL BOND, Alexander. *The story of mechanics: the science of captive force of development of machine power in this industrial age*. [en línea] New York: P. F. Collier & Son Corporation Publishers, 1933. p. 90-93. Consulta el 10 de març de 2010. Disponible a: <<http://nxtwave.tripod.com/gaiatech/airliftreferences/trompinfo.html>>
95. SANCHO I PLANAS, Marta. *Homes, fargues i foc: arqueologia i documentació per a l'estudi de la producció de ferro en època medieval: les fargues dels segles IX-XIII al sud del Pirineu Català*, Barcelona: Enginyers Industrials de Catalunya, Associació/Col·legi: Marcombo Boixareu, 1999.

-
96. SANCHO I PLANAS, Marta. «*El Montsec entre la serra i la vall: percepció del territori i construcció d'un paisatge a l'Edat Mitjana*» [en línia], a: *Exploitation, Gestion et Appropriation des Ressources Montagnards du Moyen Âge aux Temps Modernes. Colloque International Usages et Paysages*, Pergignan: PUP, 2005. p. 73-87. Disponible a: <<http://www.ub.edu/arqueologiamedieval/WebMar2009/bibOL.htm>>
97. SANCHO I PLANAS, Marta. «*Tierra, aire, agua y fuego: Los cuatro elementos en la evolución técnica de la siderurgia medieval / Earth, air, water and fire: four elements to technical evolution of medieval siderurgy*», [en línia], a: *Primer Congreso Internacional sobre Paleosiderurgia y Recuperación de Patrimonio Industrial*. INASMET, 2005. p. 325-334. Disponible a: <<http://www.ub.edu/arqueologiamedieval/WebMar2009/bibOL.htm>>
98. SCHOTTI, Gasparis. *Mechanica hydraulico-pneumatica. Opus bipartitum*. Frankfurt: Johann Gottfried Schonwetter, Herederos de, (ed.), 1657. Disponible a: <<http://books.google.es>>
99. SCHULZE, Leroy E. *Hydraulic Air Compressors*. [en línia].U.S.: Department of Interior. Circular 7683, May 1954. Disponible a: <<http://hdl.handle.net/2027/mdp.39015078460238>>
100. SHELTON, Sam V.; WHITE STEWART, Susan. *Bubble Pump Design for Single Pressure Absorption Refrigeration Cycles*. [en línia]. Atlanta: ASHRAE, 2002. [Consulta el 10 d'abril de 2010]. Disponible a: <www.me.gatech.edu/energy/susan/ASHRAE.pdf>
101. SIMON I ARIAS, Júlia. *La Farga catalana: estudi metal·lúrgic del procés*, Barcelona: Societat Catalana de Tecnologia, filial de l'Institut d'Estudis Catalans, 1992.
102. SIMONS, Eric N. *The Pegasus story of Metals*, London: Dennis Dobson ed., 1967.
103. STREETER, Victor L. *Mecánica de fluidos*. México: McGraw-Hill (ed.), 1977.
104. TAYLOR, Charles Havelock. *Hydraulic air compressing apparatus*. [en línia] EEUU: United States Patent Office (USPO), núm 543.411, 23 de juliol de 1895. [Consulta el 31 de març de 2010]. Disponible a: <<http://www.google.es/patents/>>
105. TAYLOR, Charles Havelock. *Hydraulic air compressing apparatus*. [en línia] EEUU: United States Patent Office (USPO), núm 543.412, 23 de juliol de 1895. [Consulta el 31 de març de 2010]. Disponible a: <<http://www.google.es/patents/>>
106. TCHOBANOGLOUS, George. *Ingeniería sanitaria: redes de alcantarillado y bombeo de aguas residuales*. Barcelona: Labor, 1985.

107. THIBAUD; TARDY. «*Expériences faites sur les trompes (machines soufflantes) des forges de Vic-dessos (Ariège)*». *Annales des Mines, ou Recueil de mémoires sur l'exploitation des mines et sur les sciences qui s'y rapportent*. París: chez Treuttel et Würtz Libraires, Série I, Volume 8, Tome 1r, 1823. p. 595-628, p 648 (planche IV). Disponible a: <<http://www.anales.org/archives/anales/1823/>>
108. TOMÀS I MORERA, Estanislau. «*The Catalan process for the direct production of malleable iron and its spread to Europe and the Americas*», a: *Contributions to Science, 1 (2) p.225-232*, Barcelona: Institut d'Estudis Catalans, 1999.
109. TYLECOTE, R. F. *The early history of metallurgy in Europe*, London: Longman, 1987.
110. TYLECOTE, R. F. *A History of metallurgy*, London: The Metals Society, 1988.
111. URKIA LUS, Iñaki; URKIA LUS, Sebastián. *Energía renovable práctica*. Pamplona: Pamiela, 2003.
112. URTEAGA, M.Mercedes. *El Tratado de Metalurgia de las Comisiones (Segundas) de la Real Sociedad Bascongada de Amigos del País, 1765-1773*, San Sebastián: Gipuzkoako Foru Aldundia. Kultura, Euskara, Gazteria eta Kirol Departamentua, 2002.
113. VALLS, Olga; VALLS, Pau; VALLS, Josep Maria. *Aire i buit. Kamil Kader. Palais de la Découverte. Paris*. [en línea], Barcelona: Escola Pia de Nostra Senyora, 2010. [Consulta el 10 de març de 2010]. Disponible a: <<http://doberjvc.eresmas.net/ca/vespres/3airei8/airei8.htm>>
114. V.V.A.A. «*Mémoire sur les Aciéries de Rives et du département de l'Isère*». *Journal des mines, ou Recueil de mémoires sur l'exploitation des mines, et sur les Sciences et les Arts qui s'y rapportent*. París: Imprimerie de Bossange et Masson, 36è volume, 2nd semestre, núm. 213, 1814, p. 161-192. Disponible a: <<http://www.anales.org/archives/anales/1814-2/>>
115. V.V.A.A. *Dictionnaire technologique ou Nouveau dictionnaire universel des arts et métiers et de l'économie industrielle et commerciale*. París: Thomine (ed.), volum 10 i 19. 1831. Disponible a: <<http://gallica.bnf.fr>>
116. V.V.A.A. *La Farga Catalana en el marc de l'arqueologia siderúrgica. Edició a cura d'Estanislau Tomàs i Morera: Simposi Internacional sobre la Farga Catalana, 1993, Ripoll*, Andorra la Vella: Govern d'Andorra, Ministeri d'Afers Socials, 1995.

-
117. V.V.A.A. *La Farga. Avaluació de l'obtenció directa del ferro a Catalunya*. [CD-ROM] [en línea]. Barcelona: DURSI (Generalitat de Catalunya), Xarxa Temàtica L'Home i el Ferro a Catalunya, II Pla de recerca de Catalunya 1997/2000, 2000. Disponible a:
<http://www10.gencat.net/agaur_web/recursos/La_Farga/Docs/idx.htm>. Disponible a:
<http://www10.gencat.net/agaur_web/AppJava/a_info.jsp?contingut=lafarga>
118. V.V.A.A. *La Farga Rossell. Un exemple de farga a la catalana*. Ordino: Farga Rossell Centre d'Interpretació, Govern d'Andorra, Col·lecció Guies del Patrimoni Cultural d'Andorra, 2004.
119. VILA, Antoni; CODINA, Olivier; BOSCH, Josep Maria [Dir.]. *L'obtenció del ferro pel procediment directe entre el s. IV i XIX. Actes del 6è curs d'Arqueologia d'Andorra 2000*. Aixovall: Govern d'Andorra, Ministeri de Cultura, Àrea de Recerca Històrica, 2001.
120. WEBBER, W. O. «*Test of an hydraulic air compressor*». *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.* Volume: XXII, 1901. p.599-611
121. WHITE, Brian. «*Science of 2 phase flow*». *Airlift and slug flow references*. [en línea], 2001. [Consulta el 31 de març de 2010]. Disponible a:
<<http://nxtwave.tripod.com/gaiatech/airliftreferences/twophaseflow.html>> i
<<http://nxtwave.tripod.com/gaiatech/airliftreferences/index.htm>>
122. WURTS, William A.; MCNEILL, Sam G.; OVERHULTS, Douglas G. «*Performance and design characteristics of airlift pumps for field applications*». [en línea] *World Aquaculture*. Princeton: University of Kentucky Research and Education Center, núm. 25, sèrie 4, desembre de 1994. . [Consultat el 30 de març de 2010]. Disponible a: <www.ca.uky.edu/wkrec/AirliftPumps.pdf>
123. ZARZA MOYA, Eduardo. «*Desalinización del agua del mar mediante energías renovables*». A: PASCUAL MOLINA, Antonio. *Actas del I y II seminario del agua*. Instituto de Estudios Almerienses: 1997. p.199-226. Disponible a:
<<http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=566687>>.

5.2 Enginyeria Elèctrica

124. ALFONSO LORENZ, Jorge. *Gestió de l'energia generada per un grup electrògen amb alternador d'inducció de 2 kW per a vehicle híbrid*. Barcelona: ETSEIB, UPC, [PFC].
125. ALMAZÁN ROZAS, Marta. *Mejoras constructivas para el ensayo y medidas en tráfico abierto de un vehículo híbrido serie, SEAT 600*. Barcelona: ETSEIB, UPC, [PFC], Director: R. Bosch, 2006.
126. ARGÜESO MONTERO, Marta. *Estudio de una bobina de Rogowski como sonda detectora de pulsos de alta frecuencia*. Madrid: Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III, [Trabajo de Investigación en Ing. Eléctrica], Directores: Javier Sanz Feito; Guillermo Robles Muñoz, febrero de 2005.
127. ÀVILA BARRIS, Rossend. *Remodelación de una embarcación de 4m. de eslora para, el diseño, instalación y estudio de un sistema de propulsión eléctrico*. Barcelona: FNB, UPC, [Master Thesis], Director: Pau Casals, 2010.
128. BOIX, O.; SAINZ, L.; CÓRCOLES, F.; SUELVES, F.J. *Tecnología Eléctrica*. Ediciones Ceysa S.L. 2002.
129. BOSCH, R. *Desenvolupament del motor elèctric sense coixinets*. Barcelona: UPC, [Tesi doctoral], Dirigida per Alfons Ensenyat Badias, 1987.
130. BOU ORENCH, Carles. *Cap al vaixell de propulsió elèctrica, avaluació experimental de la cadena energètica instal·lada a la barca Ras*. Barcelona: ETSEIB, UPC, [PFC], abril 2010.
131. CABRERA SUAREZ, Rosendo; CAPMANY, Pau. *Cap al Vehicle de Propulsió elèctrica: Avaluació i millores de la cadena energètica instal·lada en un Seat 600*. Barcelona: ETSEIB, UPC, [PFC] Pendent de defensa, maig 2010.
132. CAPELLA, Robert. *Permutación de una alimentación eléctrica, por otra procedente de un grupo electrógeno*. [inèdit] 2009.
133. CHATTOCK, A. P. «On a magnetic potentiometer». *Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 24 (5), Jul-Dec 1887. p. 94–96
134. COMAS BARÓN, Jordi. *Aportacions de la MHD a les instal·lacions de dessalinització d'aigua*. Barcelona: UPC, [Projecte de tesi], Director: Ricard Bosch, 1998.

135. CORRALES MARTÍN, Juan. *Cálculo modular de máquinas eléctricas : manual práctico*. Barcelona: Marcombo Boixareu, 1994.
136. CORTÉS CHERTA, Manuel; CORRALES MARTÍN, Juan; ENSENYAT BADÍA, Alfonso; *Teoría General de Máquinas Eléctricas*. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid 1991.
137. FRÍAS VALERO, Eduardo. *Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos*. Barcelona: UPC. [Tesi doctoral]. Director: Ricard Bosch i Tous. 2004
138. GONZÁLEZ PARADA, Adrián. *Hacia el motor superconductor. Aplicación de cintas superconductoras de alta temperatura a máquinas eléctricas rotativas de flujo axial*, Barcelona: ETSEIB, UPC, [Tesi Doctoral], Directores: Xavier Granados García i Ricard Bosch Tous, el 3/7/2006.
139. GÓMEZ ALÓS, Milagros; BACHILLER SOLER, Alfonso; ORTEGA GÓMEZ, Guillermo. *Problemas resueltos de máquinas eléctricas*, Madrid: Paraninfo, colección Paso a Paso, 2a edición, 2008.
140. GRAU MUR, Ramón. *Estudio sobre el motor de inducción magnetohidrodinámica*. Barcelona: Facultat de Nautica Barcelona, UPC, [Tesi Doctoral], Apto Cum Laude, Director: R.Bosch, 27-6-94
141. HERNÁNDEZ VALLVERDÚ, Jesús. *Vehicle elèctric híbrid. Assaig i optimització del conjunt muntat sobre un SEAT 600*. Barcelona: ETSEIB, UPC, [PFC].
142. KAMAL GOHAR, M. «New economical trends for hydroelectric power schemes». *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Power Apparatus and Systems, Part III*. New York: American Institut of Electrical Engineers, Volume 81, issue 3, 1962. p. 896-900.
143. LLOBERAS VALLS, Joaquim. *Hacia el motor superconductor: nuevas configuraciones electromagnéticas para máquinas rotativas*. Barcelona: UPC, [Projecte de tesi], Directores: Xavier Alabern Morera; Xavier Granados; R. Bosch, 2006.
144. LÓPEZ LÓPEZ, Josep. *Nuevas aportaciones al motor eléctrico de flujo axial con rotor conductor sin material ferromagnético*. Barcelona: ETSEIB, UPC, [Tesi Doctoral], Sobresaliente Cum Laude, Director: R.Bosch, 22-12-2000

145. MARMANIS, Haralabos, *Analogy between the electromagnetic and Hydrodynamic Equations. Application to Turbulence*. Providence: Thesis Submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in the Division of Applied Mathematics at Brown University, [Tesi doctoral], 2000.
146. MARTÍNEZ-VELASCO, Juan A. *Transient parameters determination*. New York: CRC Press, Taylor&Francis Group, 2010.
147. MASSAGUÉS VIDAL, Lluís. *Aportaciones al estudio de los motores de Inducción Magnetohidrodinámica*. Barcelona: ETSEIB, UPC, [Tesi doctoral], Sobresaliente Cum Laude, Director: R. Bosch, 27-7-2001.
148. OLIVELLA BLANCO, Vicenç; POU PRATDESABA, Jordi. *Sistema de propulsió elèctrica de 6,5 kVA per embarcacions*. Barcelona: ETSEIB, UPC, [PFC], Director: R. Bosch, 2006.
149. PALLARÉS VINYAS, Miguel Juan. *Hacia el motor superconductor: estudio de las interacciones entre un rotor superconductor y un estator convencional*. Barcelona: ETSEIB, UPC, [Tesi Doctoral], Directors: R. Bosch; J. Granados, Tutor: Lluís Humet, 2002.
150. PEREGRINA VELASCO, Albert. *Diseño y construcción del sistema de propulsión eléctrica de un catamarán de 3,4 metros de eslora*. Barcelona: FNB, UPC. [PFC]. Director: Manuel Rodríguez Castillo, 2007.
151. PRAT AYATS, Josep. *Noves aportacions al desenvolupament de motors elèctrics sense coixinets*. Barcelona: ETSEIB, UPC, [Tesi Doctoral], Director: R. Bosch, 1997.
152. RAS OLIVA, Enrique. *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. Barcelona: Marcombo Boixareu, 6a ed., 1985.
153. ROGOWSKI, W.; STEINHAUS, W. «Die Messung der magnetischen Spannung». *Archiv für Elektrotechnik*, Vol. 1, 1912. p.141-150.
154. POLO CANTERO, José. *Caudalímetro electromagnético a través de estimación de velocidades, aplicado a canal de laboratorio*. Barcelona: Departament d'Enginyeria electrònica, UPC. [Tesi Doctoral]. Directors: Ramon Pallàs Areny; Juan Pedro Martín Vide, 2000.
155. PONCELAS LÓPEZ, Óscar. *Diagnóstico de motores de inducción mediante la adquisición de corrientes de estator con sonda Rogowski*. Barcelona: Enginyeria Electrònica, UPC, [Master Thesis], Director: J. A. Ortega Redondo, desembre de 2008.

156. PRAT AYATS, Josep. *Noves aportacions al desenvolupament de motors elèctrics sense coixinets*. Barcelona: ETSEIB, UPC. [Tesi Doctoral]. Apto cum laude. Director: R. Bosch. 12-12-97.
157. UGALDE ROSILLO, Gaizka. *Study on concentrated windings permanent magnet machines for direct drive applications*. Mondragón: Mondragón Goi Eskola Politeknikoa, [Tesi Doctoral], Director: J. Poza Lobo, 2009.
158. VIANA, S.A.; MURGATROYD, P.N. «Voltage profiles and closures on Rogowski coils», *IEE, IEE Proceedings, Electronic Power Applications*, vol. 149, May 2002, p. 223-227.
159. VIDAL PARREU, Miquel J. *LlanxaRas: Millores i anàlisi de la propulsió*. Barcelona: FNB, UPC, Projecte fi de carrera dirigit per Ricard Bosch, 2008.
160. VIVES CASALS, Elisenda. *Disseny i assaig d'un generador prototipus per el grup de càrrega de bateries d'un vehicle híbrid*. Barcelona: ETSEIB, UPC, [PFC].
161. WARD, D. A.; EXON, J. La T. «Using rogowski coils for transient current measurements», *IEE Engineering Science and Education Journal*, vol. 2, June 1993, p. 105–113.

Annex A. Sondes Rogowski

A.1 Descripció

Una bobina Rogowski és un dispositiu elèctric utilitzat per a la mesura i detecció de corrent altern i pulsacions ràpides de corrent. Rep el nom del físic alemany Walter Rogowski, el qual, juntament amb W. Steinhaus, en van donar la descripció definitiva en un article publicat el 1912¹²⁵, malgrat que anteriorment, el 1887, el professor A.P. Chattock havia publicat un article¹²⁶ on descrivia l'ús d'una bobina flexible com a potenciòmetre magnètic per a la mesura de la reluctància en circuits fèrrics¹²⁷.

Una bobina Rogowski consisteix en un fil conductor bobinat al voltant i al llarg d'un nucli d'aire o de material no magnètic. La bobina es tanca sobre si mateixa, en disposició toroïdal, al voltant d'un conductor del què es vol conèixer el corrent. Aquest corrent genera un camp magnètic al seu voltant, que a la vegada, genera una tensió induïda en les espines de la bobina, proporcional a la derivada del corrent.

Les bobines Rogowski poden ser construïdes sobre nuclis flexibles, per tal d'adaptar-se fàcilment a diferents geometries. A més, es poden implementar obertes, de manera que poden ser instal·lades sense afectar la continuïtat del corrent a mesurar. El seu comportament és altament lineal i no presenta efectes de saturació ni histèresis, gràcies a no tenir un nucli ferromagnètic. Proporciona aïllament galvànic entre el dispositiu i la instal·lació en estudi. El seu ample de banda és molt gran, i normalment està limitat per les prestacions de l'electrònica que gestiona el senyal de la bobina. Les mesures, en teoria, solament depenen de la variació del corrent encerclat per la bobina, independentment de la posició i recorregut de la bobina, mentre que l'efecte dels corrents externs s'anul·la. Aquests avantatges les fan molt adequades per a la mesura de grans corrents (alterns) i de pulsacions ràpides.

En contrapartida, la seva precisió depèn de la constància de la densitat de les espines per unitat de longitud i de la forma i superfície de la seva secció transversal [WARD, EXON, 1993]. Per aquest motiu, les bobines flexibles poden tenir el risc de canviar de propietats per la deformació o el desplaçament d'espines. Solament reacciona davant les variacions de corrent, no sent adequada per mesurar corrent continu.

¹²⁵ ROGOWSKI, W., STEINHAUS, W. *Die Messung der magnetischen Spannung. Archiv für Elektrotechnik*, Vol. 1, pp.141-150, 1912.

¹²⁶ CHATTOCK, A.P. *On a magnetic potentiometer*. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 24 (5), pp. 94-96, Jul-Dec 1887

¹²⁷ WARD; EXON (1993)

L'explicació teòrica del seu funcionament es recolza en les lleis d'Ampère i de Faraday. Segons la llei d'Ampère, la circulació del camp magnètic sobre un camí tancat és igual al corrent total que travessa qualsevol superfície limitada per aquest camí, independentment de quin camí es tracti. En referència a la figura A-1, l'expressió queda:

$$\oint H \cos \alpha \, dl = I \quad \text{Equació A-1}$$

on H és la intensitat de camp magnètic associada al pas del corrent I , dl és un element de longitud infinitesimal que segmenta el camí tancat resseguit per la bobina, y α és l'angle que formen la direcció del camp i la direcció de l'element.

Si la bobina té una densitat de n espires per metre i una secció transversal A , la quantitat d'espores existent en l'element dl es compta com $n \cdot dl$. El flux que travessa aquest fragment de circuit és:

$$d\phi = \mu_0 H A n \, dl \cos \alpha \quad \text{Equació A-2}$$

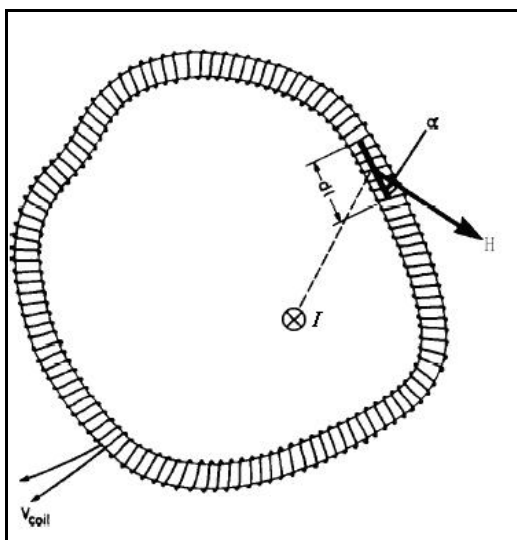


Figura A-1. Bobina Rogowski encirclant un conductor pel qual circula una intensitat I .¹²⁸

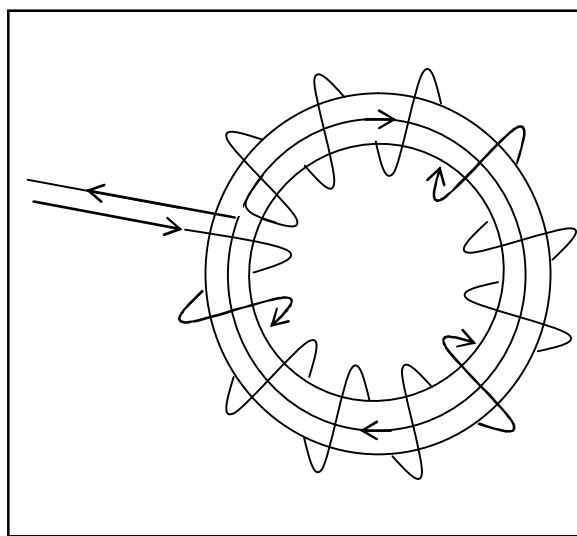


Figura A-2. Bobina Rogowski d'una sola capa amb espira de retorn.

El flux magnètic total acoblat a la bobina s'obté per integració al llarg del camí resseguit per la bobina. L'expressió anterior (Equació A.1) de la llei d'Ampère permet simplificar l'expressió del flux:

$$\phi = \int d\phi = \mu_0 n A \int H \cos \alpha \, dl = \mu_0 n A I \quad \text{Equació A-3}$$

¹²⁸ WARD; EXON (1993)

Segons la llei de Faraday, la f.e.m. induïda en un circuit estacionari tancat és igual i de signe contrari a la variació respecte del temps del flux magnètic que travessa el circuit. D'aquesta manera, la tensió induïda al llarg de la bobina valdria:

$$V_{\text{rogowski}} = -\frac{d\phi}{dt} = -\mu_0 n A \frac{dI}{dt} = -M \frac{dI}{dt} \quad \text{Equació A-4}$$

En l'equació A.4 es pot identificar el valor de la inductància mútua (M) entre conductor i bobina, que solament depèn de la geometria:

$$M = \mu_0 n A \quad \text{Equació A-5}$$

- on:
- μ_0 és la permeabilitat magnètica del buit, que val $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m.
 - n és la densitat lineal d'espores, quantitat d'espores per unitat de longitud.
 - A és la superfície de la secció transversal de la bobina, superfície de l'espira.

El conductor, en el seu recorregut helicoidal al voltant del nucli, acaba constituint una espira perpendicular a l'eix del torus. En cas d'existir un flux magnètic variable perpendicular a aquesta espira, s'induiria una tensió que se sobreposaria a la ocasionada pel corrent que es pretén mesurar. Per compensar aquest efecte es posa en sèrie una espira de retorn per l'interior del bobinat. Així, la bobina es pot obrir sense haver d'interrompre el circuit de mesura (figura A-2)

L'aïllant usat en el fil conductor ha de ser compatible amb el rang de tensions que es donaran en la bobina. La tensió induïda en les espores és generalment molt petita, i la seva suma al llarg de la bobina no sol sobrepassar 1 V, segons la seva implementació i per les aplicacions usades en aquest document.

El senyal obtingut directament de la bobina és proporcional a la derivada del corrent, en un factor M . Si l'ona de corrent és sinusoidal de freqüència f , la tensió induïda en la bobina serà també sinusoidal, amb una amplitud proporcional a l'amplitud del corrent, en un factor $M \cdot f$, retardada una fase de 90° . Per aquest motiu, els harmònics i les pertorbacions més ràpides, resulten magnificades, fet que en alguns casos pot resultar d'interès. Si es vol aconseguir un transductor de corrent a tensió, es pot aplicar un integrador a la tensió de la bobina, de manera que el senyal de sortida quedi proporcional al corrent, dins del rang de freqüències de funcionament de l'integrador.

Quan existeixen freqüències elevades en els corrents, la capacitància i inductància pròpies de la bobina poden prendre protagonisme i afectar als valors de les mesures. Per les bobines que aquí es descriuen, i per les freqüències de treball màximes de l'ordre del kHz, aquest fenomen no es produeix. En general, les bobines Rogowski tenen una freqüència pròpia de ressonància de l'ordre dels MHz.

A.2 Construcció de les bobines Rogowski utilitzades

Per mesurar els corrents en el secundari del prototip VF1 ha estat necessari recórrer a la construcció de bobines Rogowski que permetessin superar les següents dificultats:

- El corrent a mesurar pot assolir una magnitud de fins a 10 kA.
- No es pot interrompre el circuit del secundari per interposar un element resistiu calibrat a mode de “Shunt”, degut a què està construït amb planxes de coure soldades.
- Les sondes Rogowski comercials avaluades no tenen la longitud adequada ni la secció prou petita per encaixar en els espais disponibles en el prototip.

El suport que fa de nucli és de poliamida flexible d'origen industrial. La seva longitud i secció s'adequa a l'espai on s'ha d'instal·lar. El fil de bobinar que s'ha usat és de coure de 0,15 mm de diàmetre, aïllat amb esmalt de tensió de ruptura dielèctrica superior a 1000V i classe tèrmica F (155°C).

Per tal d'aconseguir un bobinat regular i homogeni, s'ha emprat un torn mecànic per fer girar el suport a una velocitat baixa i controlada, tot aprofitant l'avanç automàtic de la torreta per repartir homogèniament les espires al llarg del nucli. L'avanç que s'ha aplicat és de 0,33 mm/volta, és a dir, lleugerament superior al doble del gruix del fil de coure (0,15 mm), de manera que la segona capa de bobinat ha quedat intercalada en la primera.

Mantenir la tibantor del fil és molt important per tal d'aconseguir una distribució homogènia de les espires al llarg del suport: quan és excessiva el fil es pot trencar, i quan és insuficient, les espires queden laxes i mal distribuïdes. S'ha solucionat amb l'aplicació d'elements elàstics i de fricció sobre el fil.

El fet que el nucli no sigui cilíndric, sinó rectangular, ha dificultat el bobinat, ja que per una velocitat de gir del torn constant, la velocitat lineal del fil resulta ser polsant. Aquesta velocitat depèn de la posició angular del nucli suport. La relació entre la velocitat instantània màxima i la mínima és igual a la relació entre la diagonal més llarga i el costat més curt de la secció transversal del suport, és a dir, gairebé proporcional a l'esveltesa de la secció, que el nostre cas té un valor d'entre 5 i 6. Els elements mòbils del desbobinador tenen una resposta mecànica més lenta degut a la seva inèrcia, fet que es tradueix en tibantors excessives que porten a la ruptura del fil.

La primera BR1 va ser feta proporcionant el fil manualment per evitar la seva ruptura. Per a la resta, es van afegir successivament elements elàstics i amortidors al llarg del recorregut del fil fins absorbir

aquestes fluctuacions. D'aquesta manera, la velocitat de sortida del fil de la bobina es manté gairebé constant, evitant la ruptura del fil per aquest motiu, a la vegada que es manté una tibantor homogènia.

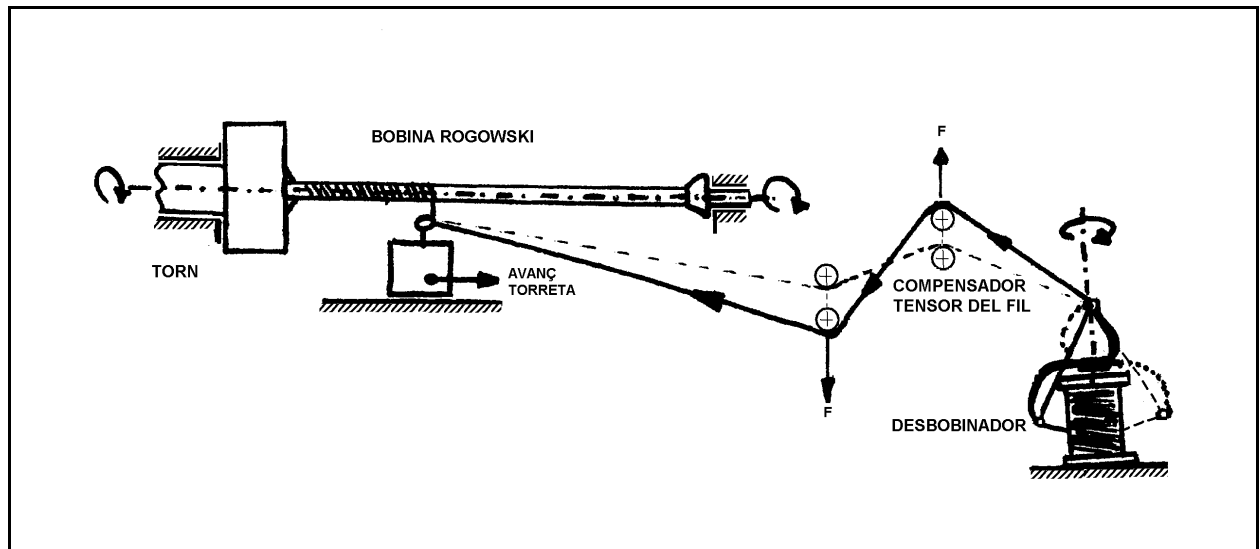


Figura A-3. Esquema del sistema de bobinat de les sondes Rogowski amb el torn

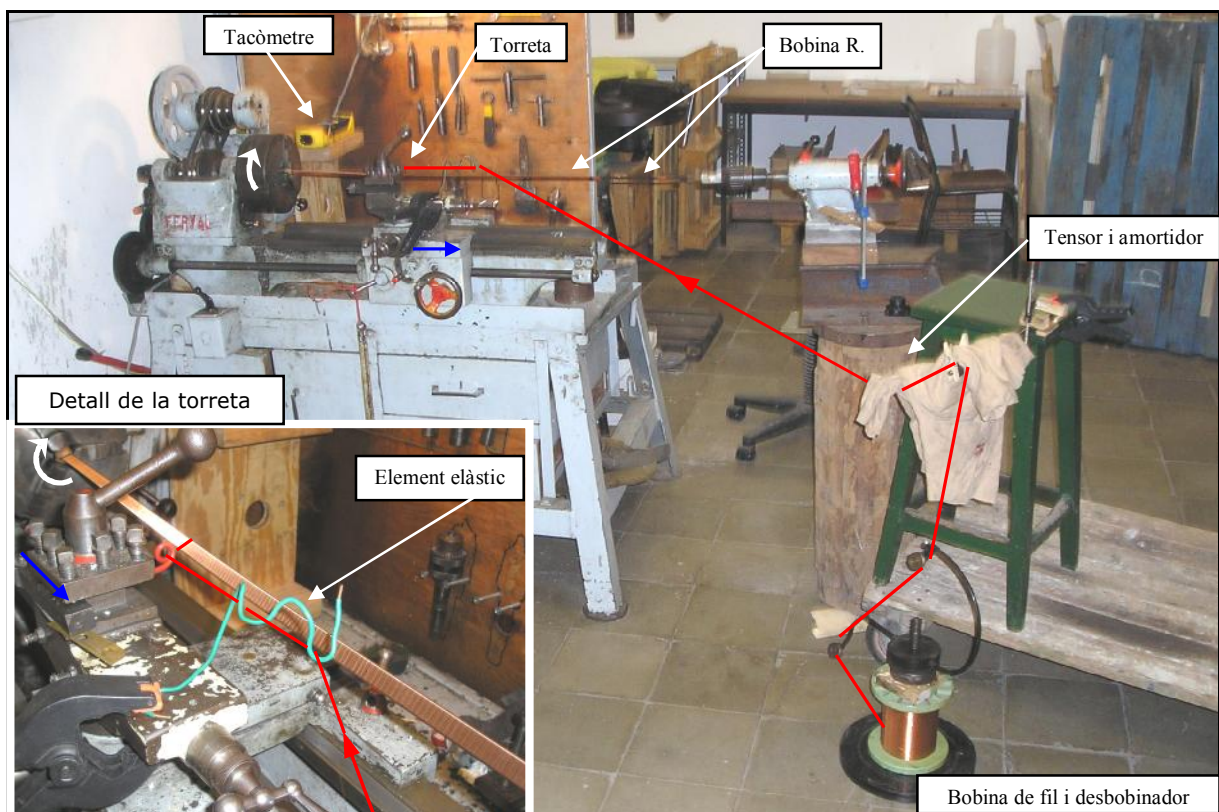


Figura A-4. Disposició dels elements per bobinar: torn i elements auxiliars.

S'han construït nou bobines Rogowski, de les quals, les dues primeres han servit per optimitzar el procés d'implementació. Per posar a punt el procediment, s'ha fet una primera bobina Rogowski (BR1) del tipus

més simple possible: una bobina d'una sola capa amb una espira de retorn, que passa per l'interior en sentit contrari. Les comprovacions han confirmat que el seu comportament s'adequava a l'esperat. La segona bobina (BR2) s'ha realitzat sobre un suport de major secció transversal i amb el doble d'espires per unitat de longitud, per tal d'augmentar la inductància mútua entre el corrent i la bobina.

L'augment de la densitat d'espires s'ha realitzat disposant en sèrie una segona capa d'espires bobinades en el mateix sentit de gir, però en direcció contrària d'avanç, per sobre de la primera capa. D'aquesta manera, l'espira de retorn resulta innecessària, i el procés se simplifica. En cas d'existir un flux variable perpendicular a la bobina, s'induirien tensions iguals però de polaritat inversa en una i altra capa, que es compensarien. Després de comprovar que el seu comportament s'adequava a l'esperat, s'ha procedit a construir la resta de bobines.



Figura A-5. Bobines en diferents moments de construcció: (a) bobina de capa simple; (b) bobina de doble capa després d'esmltar; (c) BR6, amb recobriment de cotó i vernís, text identificatiu i BNC.

Després de bobinar, es comprova la seva resistència elèctrica amb un multímetre per confirmar que no hi hagi cap espira malmesa. Posteriorment s'esmalta el conjunt per evitar el desplaçament de les espires, fixar-les sobre el suport i reforçar l'aïllament. Per protegir mecànicament el bobinat, s'hi enrotlla una tira de cotó de 1,2 cm d'amplada amb un cavalcat del 50%. Es registren les característiques tècniques sobre el cotó i es recobreix el conjunt de vernís per fixar el cotó sobre la bobina. Finalment es posa el terminal tipus BNC-F a l'extrem i s'hi solden els terminals de la bobina. Cal vigilar que els esmalts i vernissos afegits no siguin incompatibles amb l'original del fil de coure, per no malmetre'l.

Per utilitzar una bobina, s'instal·la al voltant dels conductors a estudiar, i es tanca sobre sí mateixa, fent coincidir, per superposició, l'inici de la bobina amb el seu final a l'altre extrem. El fet que inici i final no estiguin perfectament alineats, pot ser una font d'imprecisió de les lectures, però degut a les dimensions relatives de la bobina respecte la seva secció transversal, i a diferents assajos que s'han fet, s'ha

considerat com un error no significatiu. La connexió amb l'oscil·loscopi es realitza mitjançant cable coaxial apantallat de 0,75 m de longitud, amb connectors BNC-M als dos extrems.

Els paràmetres usats per descriure cada bobina són els següents (veure figura A-5 i taula A-1):

- Nombre total d'espises (N): s'han mesurat amb un tacòmetre digital en fer les bobines al torn.
- Longitud del bobinat (L): el suport mesura 1 m de llarg, mentre que les bobines són més curtes.
- Densitat d'espises (n): és la relació entre el número total d'espises i la longitud de la bobina. BR1 té la meitat de densitat d'espises perquè és una bobina de capa simple amb espira de retorn per l'interior. La resta de bobines són de capa doble, amb la segona capa per sobre la primera i bobinada en sentit d'avanç invers, però amb el mateix sentit de rotació. El valor d'aquesta densitat és força homogènia entre bobines. Per a les de doble capa, el seu valor mig és de 6.024 espises/m. La seva desviació estàndard mostral és de 44 espises/m, és a dir, del 0,7%. Aquesta variabilitat és fruit del procés constructiu, de l'augment de velocitat de bobinat en les darreres bobines, de la falta de precisió en el posicionat de la torreta i de la necessitat de tenir elements flexibles per evitar la ruptura del fil de coure.
- Secció transversal de l'espira ($a \times b$): el producte $a \times b$ correspon a l'àrea de l'espira (A en l'equació X.5). Per a la BR1 s'ha usat un suport de poliamida flexible de secció més petita que per la resta, de $11,4 \times 1,4 \text{ mm}^2$, que amb l'increment del gruix del fil de coure, dóna la secció de l'espira de $11,6 \times 1,6 \text{ mm}^2$. Per la resta de bobines s'ha usat una altra base de secció més gran, resultant una secció de $12,7 \times 2,1 \text{ mm}^2$, que amb l'increment del gruix del fil queda una espira de $12,9 \times 2,3 \text{ mm}^2$. N'hi ha dues que tenen un gruix doble perquè s'han usat dos perfils sobreposats com a base (espira de $12,9 \times 4,6 \text{ mm}^2$).
- Diàmetre del fil de coure ($\varnothing_{\text{fil coure}}$): es tracta de fil de coure esmaltat Pirelli tipus "Piresold FS (F-155C) IEC 60317 20 - 0,150 G1", de 0,15 mm de diàmetre. L'esmalt és de classe tèrmica F, que resisteix fins a 155°C. La seva tensió de ruptura dielèctrica és superior als 1.000 V. La seva resistivitat (ρ) s'ha suposat equivalent a la del coure electrolític ($1/59,6 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$).
- Longitud del fil de coure (L_{coure}): és l'estimació de la longitud de fil usada en el bobinat, calculada com el producte de la longitud d'una espira pel nombre d'espises, més la longitud dels terminals.
- Resistència teòrica de la bobina ($R_{\text{teòrica}}$): resistència òhmica calculada per al conjunt de la bobina segons l'expressió següent:

$$R_{\text{teòrica}} = \frac{\rho \cdot L_{\text{coure}}}{A_{\text{coure}}} = \frac{(59,6 \cdot 10^{-6})^{-1} \Omega \cdot \text{m}}{\pi / 4 \cdot (0,15 \cdot 10^{-3})^2 \text{ m}^2} \cdot L_{\text{coure}} = 0,9495 \frac{\Omega}{\text{m}} \cdot L_{\text{coure}} \quad \text{Equació A-6}$$

- Resistència mesurada de la bobina (R_{bobina}): resistència mesurada amb un multímetre, entre terminal i terminal després del bobinat.

- Inductància mútua (M): el valor teòric ($M_{teòric}$) és el resultat de l'aplicació de l'equació X.5. Per al valor mig de la densitat d'espises, i per la secció més usada, valdria:

$$M_{teòric} = \mu_0 n A = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} \cdot 6024 \text{ espises/m} \cdot 12,9 \cdot 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 = 225 \cdot 10^{-9} \text{ H} \quad \text{Equació A-7}$$

El valor mesurat ($M_{calibrat}$) és fruit del procés de calibrat de les bobines.

- Tensió eficaç induïda per cada kA eficaç de corrent sinusoidal de 50 Hz del primari (V_r): el valor teòric ($V_{r\text{ teòrica}}$), segons la llei de Faraday (equació X.4), correspon al producte de $M_{teòric} \cdot 2\pi \cdot f$. Pren el valor 70,7 mV/kA per al valor $M_{teòric}$ del punt anterior. El valor calibrat ($V_{r\text{ calibrat}}$) és fruit del procés de calibrat. D'aquest valor es dedueix el valor $M_{calibrat}$. La linealitat de les mesures és molt elevada. El coeficient de regressió lineal entre tensió induïda i corrent és superior a 0,999 en tots els casos.

Taula A-1. Característiques de les bobines Rogowski implementades

NOM		BR1	BR2	BR3	BR4	BR5	BR6	BR7	BR8	BR9
N	[espises]	2.142	4.260	4.950	4.500	4.310	4.500	4.300	4.305	4.455
L	[mm]	710	702	810	747	717	751	716	717	745
n	[espises/m]	3.017	6.068	6.111	6.024	6.011	5.992	6.006	6.004	5.980
$a \times b$	[mm x mm]	11,6x1,6	12,9x2,3	12,9x4,6	12,9x2,3	12,9x2,3	12,9x2,3	12,9x2,3	12,9x2,3	12,9x4,6
$\varnothing_{\text{fil coure}}$	[mm]	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
L_{coure}	[m]	58	130	174	137	132	137	131	131	157
$R_{\text{teòrica}}$	[Ω]	55	123	165	130	125	130	125	125	149
R_{mesurada}	[Ω]	58	---	165	132	127	133	127	128	150
$M_{\text{teòric}}$	[nH]	70	226	456	225	224	223	224	224	446
M_{calibrat}	[nH]	88	---	461	239	239	236	237	239	448
$V_{r\text{ teòrica}}$	[mV/kA]	22	71	143	71	70	70	70	70	140
$V_{r\text{ calibrat}}$	[mV/kA]	27,5	---	144,9	75,0	75,1	74,2	74,5	75,2	140,7

La BR2 va patir el trencament d'una de les espises durant l'extracció del torn. Tot i que es va intentar reparar per soldadura, els resultats van ser nefastos.

La inductància pròpia d'aquest tipus de bobines sol ser de l'ordre de 1mH o inferior. La seva capacítància sol ser d'entre 1 i 100 pF. En conseqüència, la seva freqüència de ressonància sol ser superior a 1 Mhz. Per aquest motiu, en el procés de calibrat no s'ha trobat cap efecte vinculat a aquest fenomen.

El calibrat d'aquestes bobines ha consistit en aplicar un corrent elevat de freqüència industrial 50 Hz a un conductor, al voltant del qual s'han col·locat les bobines Rogowski. L'equip usat per a generar el corrent és el transformador TS (veure figura A-6). Es tracta d'un banc de transformadors de corrent fort a baixa tensió TS, de 25 kA, 15V, 240 kVA.

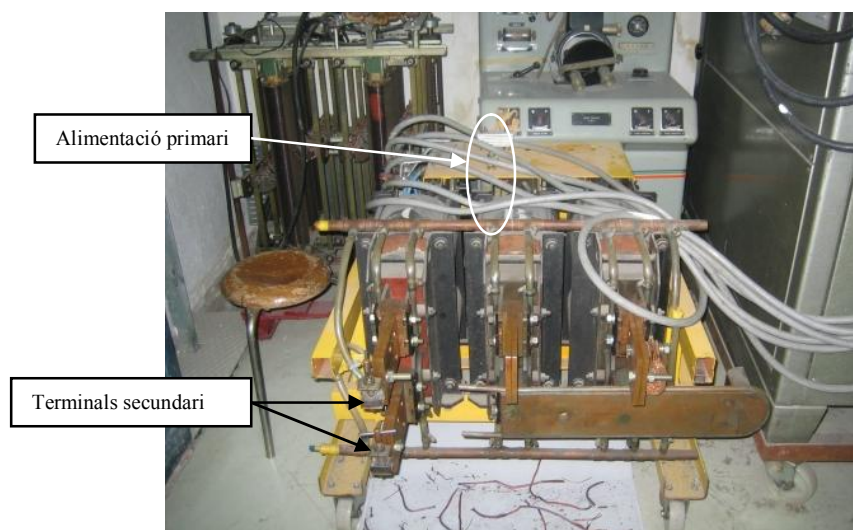


Figura A-6. Transformador TS d'altres corrents del laboratori d'Enginyeria Elèctrica de l'ETSEIB

El corrent del secundari del TS depèn de la tensió del primari, que es pot regular mitjançant un variòmetre trifàsic. Per mesurar el corrent generat s'ha utilitzat una pinça amperimètrica de corrent màxim 1kA. Per a corrents més elevats, s'ha realitzat el calibrat entre el corrent del primari i del secundari del TS fins a 1 kA i s'ha extrapolat la relació per corrents més elevats.

Mitjançant un oscil·loscopi d'impedància d'entrada de $1M\Omega$, s'han mesurat els valors "rms" de la tensió de la bobina per diferents valors de corrent. Aquests valors s'han representat en la figura A-7, en què es pot apreciar el comportament fortament lineal de totes les bobines. Mitjançant regressió lineal dels valors registrats, s'ha obtingut l'equació de la recta d'ajust per cada bobina. El valor del pendent d'aquestes rectes es recull en la darrera fila de la taula A-1.

En la figura A-8 es presenten dues captures de pantalla dels assajos de calibrat de les bobines BR1, BR2 i BR3, respecte el corrent del primari del TS. La figura de l'esquerra correspon a 30A en el primari i 1,42 kA en el secundari del TS. El senyal de la tensió de les bobines està desfasada 5 ms (90°) en retard respecte l'ona de corrent. Quan la bobina Rogowski s'instal·la en posició invertida, la seva senyal queda també invertida, com es pot veure en la primera traça, corresponent a la BR1. El senyal de BR2, de la segona traça, és molt més petit de l'esperat perquè va patir el trencament d'una espira i la soldadura no va resultar prou eficaç. La figura de la dreta correspon a 120 A en el primari i 6,11 kA en el secundari. Els desfasaments són idèntics. Malgrat que l'ona de corrent no s'observi deformada a aquesta escala, les

traces de les bobines Rogowski, degut a la seva naturalesa derivativa, posen de manifest que la ona ha deixat de ser sinusoidal.¹²⁹

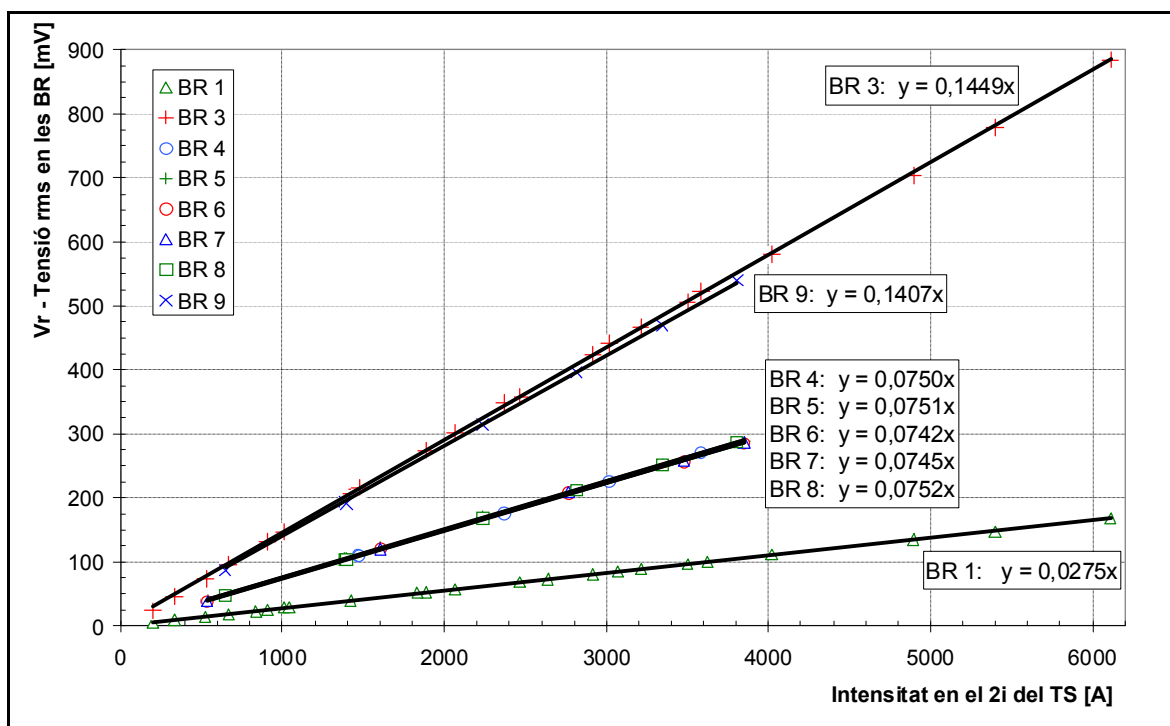


Figura A-7. Rectes de calibrat de les sondes Rogowski.

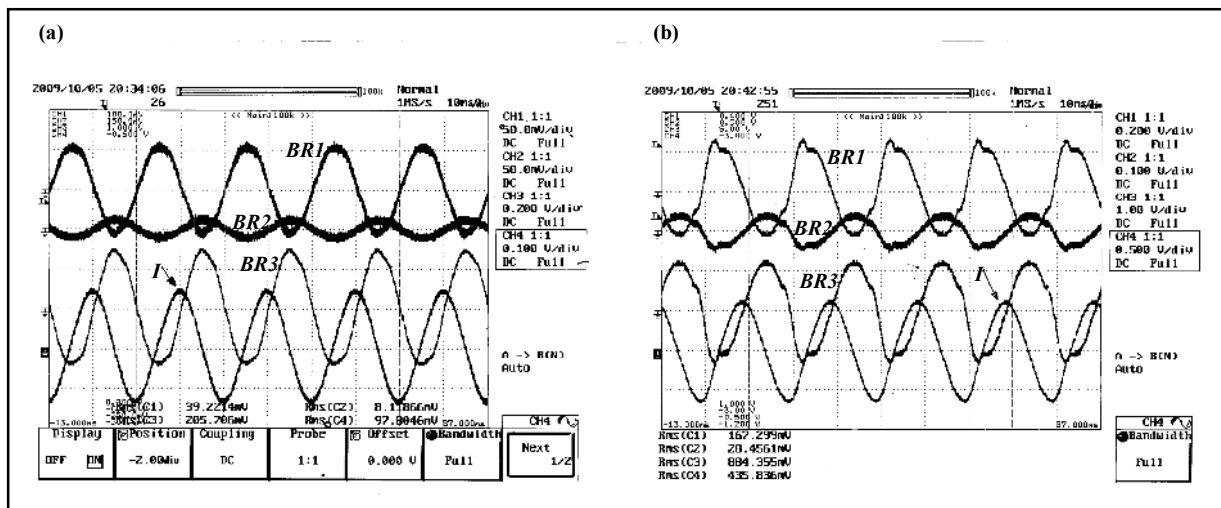


Figura A-8. Dues captures de pantalla de l'oscil·loscopi durant el calibrat de BR1, BR2 i BR3. El corrent del secundari del TS és en cada cas de: (a) 1,42 kA; (b) 6,11 kA.

¹²⁹ VIANA, S.A.; MURGATROYD, P.N. «Voltage profiles and closures on Rogowski coils», IEE, IEE Proceedings, Electronic Power Applications, vol. 149, May 2002, p. 223-227.

Annex B. Refredament del prototip amb nitrogen líquid

B.1 Càlcul de prestacions i quantitats necessàries

Les característiques del nitrogen líquid són les següents:

Taula B-1. Característiques físiques del nitrogen (N₂) líquid.

Massa molecular		28	g/mol
Densitat líquid a 1 atm i 77K	$d_l =$	808	kg·m ⁻³
Densitat vapor a 1 atm i 20°C	$d_v =$	1,2506	kg·m ⁻³
Punt de vaporització	$T_v =$	77,35	K
Entalpia de vaporització	$H_{l-v} =$	2.792,8	J/mol
Calor específica màssica	$c_m =$	1.040	J · kg ⁻¹ · K ⁻¹
Calor específica molar	$c_n =$	29,12	J · mol ⁻¹ · K ⁻¹

El prototip pesa uns 45 kg, dels quals uns 10 kg són de coure i uns 35 kg són de ferro. Donat que la calor específica del coure és de 380 J·kg⁻¹·K⁻¹ i el del ferro és de 440 J·kg⁻¹·K⁻¹, la calor específica promig del prototip (c_p) es pot considerar de 427 J·kg⁻¹·K⁻¹. La calor (Q) a extreure per refredar-lo des de 293K (20°C) fins a 77K (-196°C) és de 4.150 kJ, segons l'expressió següent:

$$Q = m \cdot c_p \cdot (\Delta T) = 45 \text{ kg} \cdot 0,427 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1} \cdot (77\text{K} - 293\text{K}) = -4.150,4 \text{ kJ} \quad \text{Equació B-1}$$

Si es considera solament la calor de canvi de fase, l'entalpia de vaporització (H_{l-v}), la quantitat de nitrogen líquid necessària per al refredament seria de 41,6 kg de N₂(l), segons l'expressió:

$$n = Q / H_{l-v} = 1.486 \text{ mol} \rightarrow 41,6 \text{ kg} \quad \text{Equació B-2}$$

Donat que el refredament no es fa per immersió, sinó fent circular nitrogen líquid per l'interior dels conductes de coure, el vapor de nitrogen que s'hi forma també contribueix en major o menor mesura al refredament del conjunt. Si es considera que en cada instant el vapor arriba a l'equilibri tèrmic amb el prototip abans de sortir a l'ambient, la quantitat de nitrogen líquid que faria falta seria de 779 mol, és a dir, d'uns 21,8 Kg de N₂(l). Aquest valor s'obté per integració de l'expressió següent:

$$dQ/dt = (H_{l-v} + c_n \cdot [T(t) - 77\text{K}]) \cdot dn/dt \rightarrow n = 779 \text{ mol} \rightarrow 21,8 \text{ kg} \quad \text{Equació B-3}$$

Malgrat que les hipòtesis anteriors s'allunyen molt de la realitat, per al refredament caldrà tenir disponible una quantitat de nitrogen líquid d'entre 22 i 42 kg, a la qual s'ha d'afegir el nitrogen necessari per mantenir la temperatura durant el temps dels assajos.

Durant els assajos, per tal d'assolir el règim tèrmic permanent, és necessari que la calor generada pel pas de corrent sigui absorbit pel fluid refrigerant. Pallarès (2002) dona el valor de 10^5 W/m^2 com a dissipació de calor màxima admissible per part d'un conductor de coure en un bany de nitrogen, per un salt tèrmic entre conductor i nitrogen de 10 K. Donat que la refrigeració del prototip VF1 es realitza per circulació forçada directament per l'interior dels conductors de coure, assumir la referència de 10^5 W/m^2 com a dissipació màxima queda del costat de la seguretat.

El tram de major densitat de corrent són les espines fetes de tub de coure de secció 12mm^2 , diàmetre interior 4,8 mm i longitud 280 mm. El corrent màxim que circularà per espira és de 400A, que correspon a $33,3 \text{ A/mm}^2$. La potència a dissipar per unitat de superfície interior per aquest tram seria de:

$$\frac{P}{S} = \frac{R \cdot I^2}{S} = \frac{\rho_{87K} \cdot l \cdot I^2 / s}{\pi \cdot \phi_{\text{int}} \cdot l} = \frac{0,33 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m} \cdot (400 \text{ A})^2 / (12 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2)}{\pi \cdot 4,8 \cdot 10^{-3}} = 2.917 \text{ W/m}^2 \ll 10^5 \text{ W/m}^2$$

Equació B-4

El corrent límit que igualaria aquest sostre de dissipació de calor seria de 2.341A, és a dir, uns 6 cops superior. Aquest ve a ser el coeficient de seguretat en la capacitat de dissipació superficial de la calor. La quantitat de calor que es produiria en cada espira seria:

$$P = \rho_{87K} \cdot l \cdot I^2 / s = 0,33 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m} \cdot 0,28 \text{ m} \cdot (400 \text{ A})^2 / (12 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2) = 12,32 \text{ W} \quad \text{Equació B-5}$$

En el conjunt del prototip es generarien 540 W de calor, que requeririen l'evaporació de 0,2 mol de N_2 líquid per segon per dissipar-se en el refrigerant, siguin 12 mol/min, siguin 0,336 kg/min, que en volum líquid són 0,42 l/min de N_2 . Per mantenir l'assaig durant 15 minuts faria falta un mínim de 5 kg $\text{N}_2(\text{l})$.

$$\text{Evaporació de } \text{N}_2(\text{l}) \text{ a potència màxima} = \mathbf{0,336 \text{ kg/min}}$$

Pel cabal anterior, la velocitat del líquid en les espines seria de 0,018 m/s, mentre que en estat vapor a 77K la seva velocitat seria de 3,3 m/s. Ambdues velocitats són assumibles a la pràctica.

Per tenir un ordre de magnitud i poder comparar, pel mateix corrent i una resistivitat del coure a temperatura ambient de $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, la calor generada en cada espira seria uns 5 cops superior, és a dir, de 64,2 W/espira, i d'uns 2.800 W en el conjunt del prototip.

Annex C. Resultats dels assajos realitzats sobre el prototip VF1

En aquest annex s'incorporen els resultats més rellevants fruit dels assajos realitzats sobre el prototip VF1.

C.1 Assaig de curtcircuit del torus A

El torus A no s'ha utilitzat per a construir el prototip. Per aquest motiu, es va poder fer aquest assaig de curtcircuit amb posterioritat a l'assemblatge del prototip VF1. En la taula 3-4 es donen les característiques del torus.

Descripció: s'alimenta el torus pel bobinat primari a 50 Hz a tensió variable a través del varivolt de la taula d'assaig, fins a un màxim de 20 A. El secundari està constituït per cable de coure trenat flexible, aïllat amb cinta de cotó, que omple totalment l'orifici central del torus.

Mesures: les mesures es fan amb l'oscil·loscopi Yokogawa DL1700. S'usa una sonda amperimètrica per al corrent primari (30,5 mV/A), una sonda de tensió diferencial per a la tensió primària, una sonda Rogowsky per al corrent total (75 mV/kA) secundari i una sonda de tensió per a la tensió d'espira del secundari.

Taula C-1. Magnituds mesurades en l'assaig de curtcircuit del torus A.

$I 1^i$ [A]	$V 1^i$ [V]	$I 2^i$ [A]	$V 2^i$ [mV] buit	$I 2^i / I 1^i$	$V 1^i / V 2^i$
5,1	18,4	359,9	72,6	70,4	252,9
10,0	36,6	670,5	145,9	67,3	251,1
10,8	42,2	758,9	168,4	70,1	250,8
13,2	51,6	922,9	203,2	70,1	253,7
15,3	60,2	1075,3	237,5	70,3	253,4
16,9	66,3	1181,1	263,7	69,9	251,4
19,0	73,9	1307,7	294,6	68,8	250,9

Es presenta també un oscil·lograma de l'assaig en la figura C-1. El canal representa el corrent primari, el canal 2 és la tensió primària, el canal 3 és representa el corrent secundari (per mitjà de sonda Rogowski), i el canal 4 és la tensió del secundari, per mitjà d'espira exploradora. És d'observar que no existeix cap deformació de les formes d'ona de cap de les quatre magnituds, apreciable a simple vista.

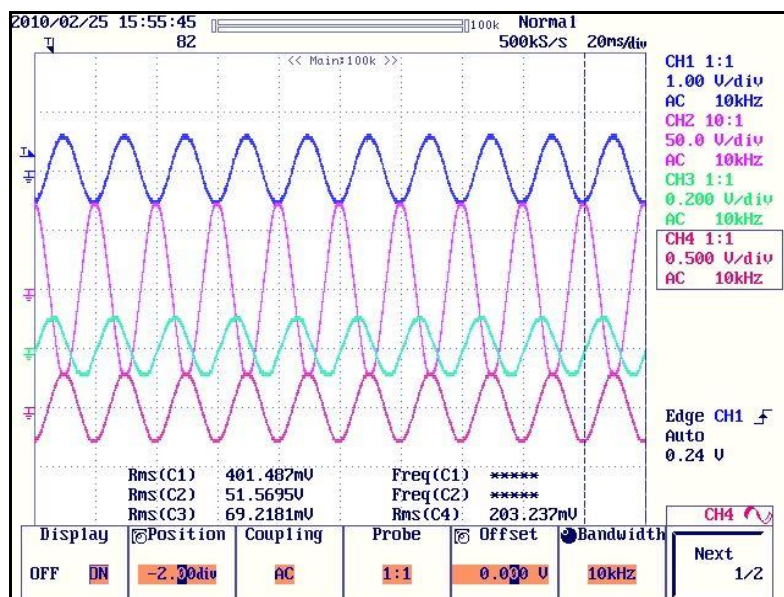


Figura C-1. Oscil·lograma de l'assaig de curtcircuit del torus A.

C.2 Estimació dels valors de resistència i potència dissipada del secundari

En funció de la geometria escollida per al circuit secundari, es va fer una primera estimació de la resistència i potència dissipada en el secundari sota les condicions ideals següents:

- Corrent primari igual al nominal dels torus: 14 A
- Relació d'espores entre primari i secundari: 234
- Corrent secundari ideal: 3.276 A, que equival a un corrent per espira de 298 A

Els resultats per una de les dues fases són (cada fase té 11 espores en paral·lel):

Taula C-2. Estimació de la resistència i potència dissipada en el secundari del prototip VF1.

Nom de l'element	Longitud [mm]	Secció promig [mm ²]	R òhmica [μΩ]	I [A]	J [A/mm ²]	ΔV òhmica [mV]	Pot. cal. [W]
Planxa coure exterior	[120, 320] promig: 200	Coll torus: 197 Planxa: 350	[8, 21] Promig: 14	3.276	Coll torus: 17 Planxa: 9,4	[28, 64]	140
Espira (x 11)	230	12 x11 = 132	350 11 en = 31	[220, 380] 298 A	[20, 33] 27	[78, 130] 104	[18, 50] 34x11=340
Planxa de interior	promig 240	[300, 583] Promig: 440	Promig: 11,5	3.276	[3, 11]	37	124
Cilindre del torus	100	480	3,5	3.276	7	12	38
Totals	Promig: 770	Promig: 233	Promig: 60	Total: 3.276	9	193	642

Per aquestes condicions de corrent secundari (300 A/espira), a la temperatura ambient del coure, la dissipació de calor per efecte joule del secundari seria de $2 \times 642 \text{ W} = 1.284 \text{ W}$

C.3 Mesura del corrent primari

Per la connexió Scott, tant les tensions com els corrents haurien de ser equilibrats. No obstant, els corrents mesurats en cada fase del primari no són iguals. En general, el corrent de la fase del torus C és menor que el corrent mesurat en les altres dues fases que alimenten els extrems del torus B, que solen ser similars entre ells. Per corrents reduïts (5A), el corrent de C pot ser un 25% menor que els altres dos. Per corrents elevats (20A), aquesta diferència es redueix fins un 10% o menys.

Segons la connexió Scott, el torus C hauria de tenir 0,866 cops el nombre d'espines del torus B. En realitat el torus C té 0,889 cops el nombre d'espines del torus B. Ambdós valors difereixen en un 2,5%. Aquesta diferència s'hauria de traduir en un desequilibri de les tensions en una proporció similar. La resta de la desviació en els corrents, fins al 10%, s'ha d'atribuir a altres factors.

C.4 Mesura del corrent secundari

Per mesurar el corrent del secundari, s'han provat diverses opcions. En un primer moment es van mesurar les caigudes de tensió, de l'ordre dels mV, entre diferents punts del secundari. Posteriorment es van construir i instal·lar sondes Rogowski en diferents punts.

C.4.1 Mesura de la caiguda de tensió en les planxes de coure

S'han mesurat les caigudes de tensió entre punts diferents del circuit secundari mitjançant un mil·livoltímetre. Malgrat que les lectures es veuen emmascarades pel flux de dispersió, tant més influent com més allunyats són els punts entre els quals es mesura la tensió, les lectures s'adeqüen als càlculs dins un marge del 20%. L'emascarament degut al flux de dispersió es valora en un 3%.

Per una tensió en el primari de 20V i un corrent primari de 2A, el repartiment de tensions en la planxa que reparteix el corrent per les espines és el que es veu en la figura C-2, pels torus B i C. La màxima caiguda de tensió entre els punts més allunyats era de 10 mV. La tercera gràfica de la figura C-2 representa la solució d'equilibri estàtic del flux de corrent entre la font i els 11 pols de l'estator, que correspon a l'anul·lació de la divergència de la tensió, per una diferència de potencial màxima de 21 mV.

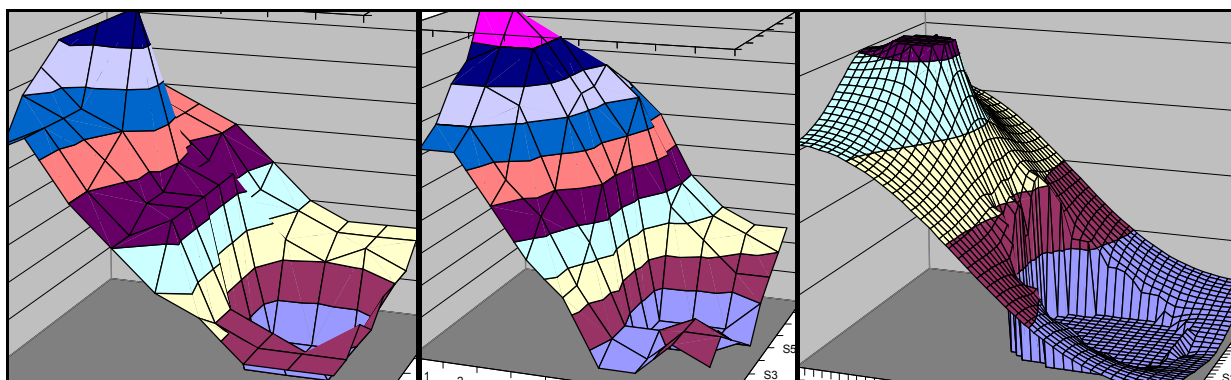


Figura C-2. Caigudes de tensió entre diferents punts de la planxa de coure de la fase del torus B, de la fase del torus C i de la solució numèrica.

C.4.2 Estimació del corrent secundari per la caiguda de tensió en un tram del circuit.

Es va mesurar la caiguda de tensió en el cilindre de coure del secundari que travessa cada torus, que és de l'ordre dels pocs mil·livolts, juntament amb el corrent del primari. La relació entre tots dos és perfectament lineal. La resistència teòrica ideal del cilindre és de $3,5 \mu\Omega$, que comporta una caiguda de tensió òhmica de 12 mV pel corrent secundari teòric de 3.276 A, que correspondria a un corrent primari de 14A. La caiguda de tensió mesurada és de 32 mV, de manera que la impedància resultant seria de gairebé tres cops la resistència òhmica. Atès que no es tenia una mesura del corrent secundari, solament es podien suposar les causes d'aquesta gran diferència. D'una banda, que la impedància del cilindre fos realment del triple que la resistència òhmica. D'altra banda, que la lectura de la caiguda de tensió es veiés emmascarada pel flux de dispersió o per la força electromotriu induïda sobre l'espira que constitueix el sistema de mesura. Un tercer factor seria el que el corrent no es distribuís homogèniament pel les tres capes de coure de 1 mm de gruix del cilindre, o que les soldadures fossin les causants de bona part d'aquesta caiguda de tensió.

En capturar amb l'oscil·loscopi el senyal de la tensió del secundari, mesurada amb una espira que encercla el camí magnètic del torus, i el senyal de la caiguda de tensió en el cilindre, s'observa que els senyals són gairebé superposables, mentre que haurien d'estar desfasats un angle apreciable a simple vista. Aquest fet porta a desestimar la utilització de la caiguda de tensió en el cilindre per estimar la magnitud de corrent del secundari.

En canvi, comparant el senyal de la caiguda de tensió en el cilindre respecte el senyal d'una sonda Rogowski, són linealment proporcionals en magnitud.

C.4.3 Repartiment del corrent entre les onze espiras en paral·lel

En un assaig previ per obtenir un valor de la impedància de les espiras, es va arribar al valor d'una resistència de $450 \mu\Omega$, per mitjà d'una prova d'injecció de corrent continu directament en el secundari, i una impedància de $880 \mu\Omega$, per mitjà d'una prova d'injecció de corrent altern directament en el secundari, mentre que la resistència teòrica és de $350 \mu\Omega$.

Si la mesura de la caiguda de tensió en una espira determinada és de 160mV , per un corrent del primari de 14A , resulta per un corrent teòric ideal en l'espira del secundari de 298A . La impedància resultant de l'espira hauria estat de $537 \mu\Omega$. Si se suposa que la impedància d'espira calculada anteriorment és correcta, el corrent secundari hauria de ser un 39% inferior a l'ideal per tal de provocar la caiguda de tensió mesurada, és a dir, el corrent secundari per espira hauria de ser de 182A , un 61% del valor teòric ideal.

A partir de la mesura de la caiguda de tensió en les espiras es conclou que el corrent del secundari es reparteix entre les onze espiras en funció de la distància a la font, és dir, en proporció inversa a la distància respecte els torus. Aquest repartiment desigual es valora en un 16% entre les espiras de major i menor caiguda de tensió, entre les més properes a la font i les que menys. Aquesta caiguda de tensió és de l'ordre dels 52mV de promig en les espiras, per un corrent el primari de $3,5\text{A}$.

C.4.4 Mesura del corrent secundari per mitjà de sondes Rogowski

Les mesures realitzades en un primer moment per mitjà de les sondes Rogowski indiquen que el corrent secundari efectiu seria del voltant del 62% del teòric ideal per la relació d'espiras entre primari i secundari (234 espiras respecte una) .

A més, el corrent de la fase del torus C seria normalment menor que el corrent de la fase del torus B en una magnitud del voltant del 10%. S'arriba al mateix valor comparant les caigudes de tensió en les espiras d'una i altra fase. Aquesta diferència es va reduint a mesura que creix el corrent.

Les sondes Rogowski es poden posar en diverses posicions. Per a mesurar el corrent de cada fase, es poden posar al voltant de cada torus, entre les dues planxes de cada pol, o bé al voltant del paquet magnètic de l'estator, també entre les dues planxes de cada pol. Malgrat que el resultat hauria de ser el mateix, la magnitud del senyal difereix en un i altre cas. Pel torus C, els senyals són iguals. En canvi, pel torus B, la lectura feta encerclant el torus és un 20% inferior a la que s'obté encerclant els caps de bobina. Aquestes diferències no s'han pogut justificar.

Cal dir, però, que el rotor no és simètric respecte les dues fases. Si s'assimila a un rotor de copa, la base de la mateixa, on es situa el coixinet de suport, està al costat dels caps de bobina de la fase alimentada pel torus B. En canvi, a l'altra banda el rotor acaba el voladís. Aquesta asimetria podria explicar part de la desigualtat en les lectures de corrent.

C.4.5 Repartiment del corrent secundari pel neutre

Existeixen tres altres posicions en què es pot col·locar una sonda Rogowski encerclant part del corrent secundari. El neutre de les dues fases té tres camins en paral·lel per repartir el corrent de retorn cap a les bobines de cada fase. Un dels camins travessa el cilindre de coure que envolta el nucli de l'estator fins a la planxa del pol de retorn, a través d'un cordó de soldadura. Els altres dos camins són iguals: part del corrent es deriva per la planxa de l'altra fase per arribar a la planxa de la fase de retorn, travessant dos soldadures. Les sondes Rogowski es poden situar encerclant el cilindre central, o bé encerclant cadascun dels dos camins alternatius per les planxes exteriors.

Les mesures realitzades denoten que el 60% del corrent retorna pel cilindre central, amb una lleugera tendència a créixer amb l'augment del corrent, mentre que pels dos plecs laterals de les planxes retornaria el 40% restant, el 20% per cada banda. Aquest repartiment queda justificat pel major nombre de soldadures a travessar en el camí pels plecs laterals de les planxes.

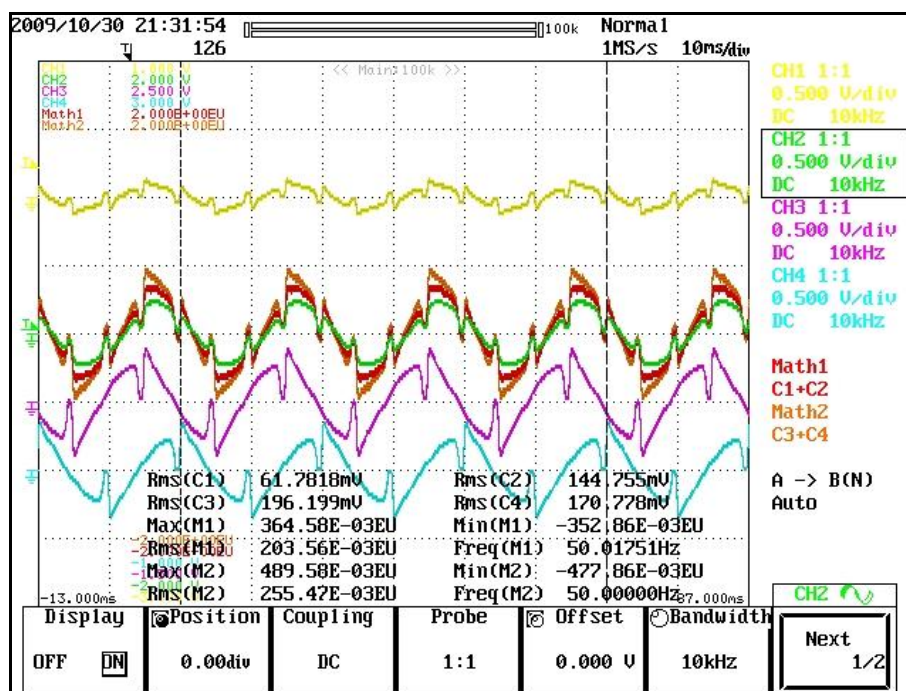


Figura C-3. Captura de pantalla de l'oscil·loscopi pel repartiment dels corrents secundaris pel neutre.

En la figura C-3 es mostra la captura de pantalla de l'oscil·loscopi de les mesures de corrent amb sondes Rogowski diferents punts del circuit secundari. El canal 1 representa el corrent de retorn per un dels camins laterals. El canal 2 representa el corrent de retorn pel cilindre central. El canal 3 és el corrent d'una de les fases. En canal 3 és el corrent de l'altra fase. Es representa també la suma dels corrents dels canal 1 i 2, i la suma dels canals 3 i 4. Es pot comprovar que la suma dels corrents del cilindre i del camí lateral seria igual a la suma dels corrents de les dues fases si s'hi sumés el corrent del segon camí lateral.

Per la forma de les ones de corrent, s'observa el fet que els harmònics circulen pels camins laterals, mentre que la ona del cilindre central és molt més "arrodonida".

En les proves a una freqüència d'alimentació més alta, s'observa el mateix fenomen. Mentre que per 50 Hz, el 60% del corrent retorna pel cilindre central, a 150 Hz, hi retorna aproximadament el 52% del corrent, retornant la resta pels camins laterals.

C.5 Influència del doblat de les planxes de coure

Vist des del primari, la influència del doblat de les planxes es indetectable. Potser té una lleugera influència en l'angle de fase de tensió i corrent, o en els corrents i tensions del secundari.

A través de la mesura de la caiguda de tensió en les espines tampoc no es detecta cap diferència entre la situació abans i després de doblar totes les planxes i soldar tots els complements.

En la figura C-4 es mostra la forma de les ones de tensió i corrent del primari, sense rotor. La ona de corrent presenta una discontinuïtat atribuïble a la histèresi dels materials magnètics.

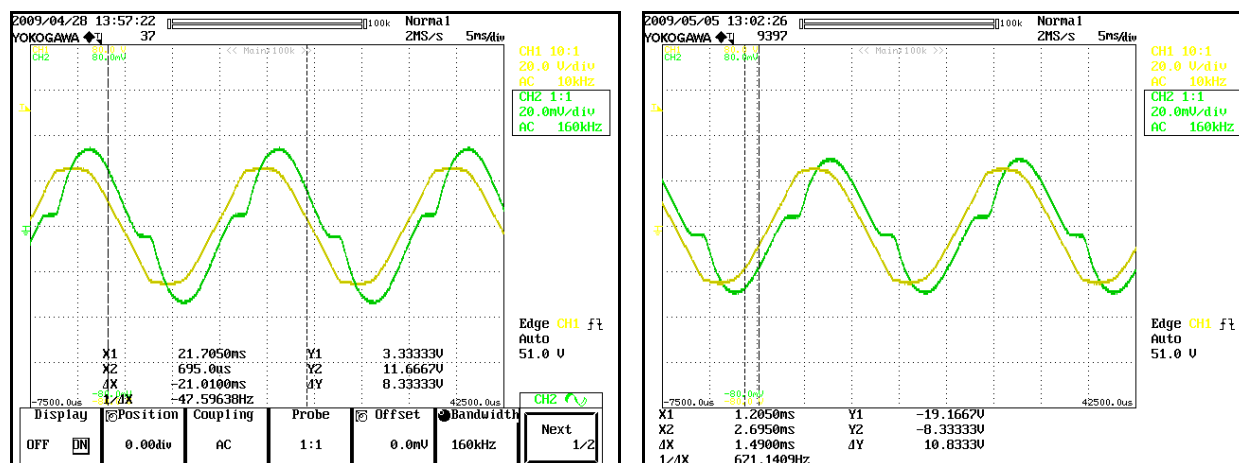


Figura C-4. Oscil·logrames de tensió i corrent del primari, abans i després de modificar el secundari.

L'angle de desfasament entre tensió i corrent es pot valorar entre els 31° i els 45° segons la instrumentació que es faci servir per mesurar les magnituds elèctriques i el punt de treball.

C.6 Primers assajos

Els primers assajos es van fer regulant la tensió d'alimentació procedent de la xarxa per mitjà d'un varivolt. Es connectaren aparells de mesura en el circuit primari. La velocitat de sincronisme a 50 Hz correspon a 273 rpm, pel fet de tenir 11 parells de pols. La velocitat de lliscament 50% correspon a 137 rpm. Així que el prototip ha superat el lliscament 50% en el darrer punt de funcionament.

Taula C-3. Magnituds mesurades en els primers assajos del prototip VF1.

Velocitat de gir rpm	Corrent de fase del primari [A]	Tensió entre fases del primari [V]	Potència activa trifàsica [W]	Potència reactiva trifàsica [VA]
comença a girar	3,2 A	33 V	170 W	110 VAr
52 rpm	8 A	42 V	350 W	300 VAr
120 rpm	16 A	79 V	2.200 W	1.040 VAr
148 rpm	24 A	127 V	5.400 W	2.100 VAr
157 rpm	30 A	180 V	11.000 W	5.000 VAr

Amb un dinamòmetre s'ha mesurat el parell resistent degut a les friccions, tant d'arrencada (fricció estàtica) com de rotació a poques revolucions per minut (fricció dinàmica). El radi al qual s'ha aplicat el dinamòmetre és el del rotor, de 73 mm. Els resultats han estat els següents:

Taula C-4. Parell d'arrencada del prototip VF1 en els primers assajos.

Cas	Força mesurada pel dinamòmetre [grams-força]	Força resistent [N]	Parell resistent [N·m]
Coixinets calents, fricció estàtica	130 gr	1,27	0,093 Nm
Coixinets calents, fricció dinàmica	50 gr	0,49	0,036 Nm
Coixinets freds, fricció estàtica	500 gr	4,90	0,360 Nm
Coixinets freds, fricció dinàmica	100 gr	0,98	0,072 Nm

També s'ha mesurat el parell d'arrencada del motor amb el mateix dinamòmetre, i amb una bàscula electrònica, amb un braç de 180 mm de longitud. Alguns valors mesurats són els següents:

Taula C-5. Resultats de la mesura del parell d'arrencada del prototip VF1 quan ja tenia la forma final.

Corrent del Primari [A]	Força mesurada [grams-força]	Força resistent [N]	Longitud braç [mm]	Parell resistent [N·m]
3,5A	11,4 g	0,11 N	180 mm	0,020 N·m
7,0 A	43 gr	0,42 N	180 mm	0,076 N·m
10 A	250 gr	2,45 N	73 mm	0,179 N·m
10,3 A	94,3 gr	0,93 N	180 mm	0,167 N·m
14 A	350 gr	3,43 N	73 mm	0,250 Nm
14,1 A	181,5 gr	1,78 N	180 mm	0,321 Nm

C.6.1 Correlació entre algunes magnituds mesurades

La relació entre la majoria de magnituds mesurades és gairebé lineal, com ara entre el corrent primari i la tensió primària, i aquestes amb la caiguda de tensió en una espira determinada, i aquestes respecte la caiguda de tensió mesurada en el cilindre que travessa els torus, i aquestes amb la tensió d'una espira oberta que envolta el paquet magnètic dels torus. En la figura C-5 es presenta la gràfica que relaciona la tensió entre dues fases del primari amb el corrent d'una de les fases del primari.

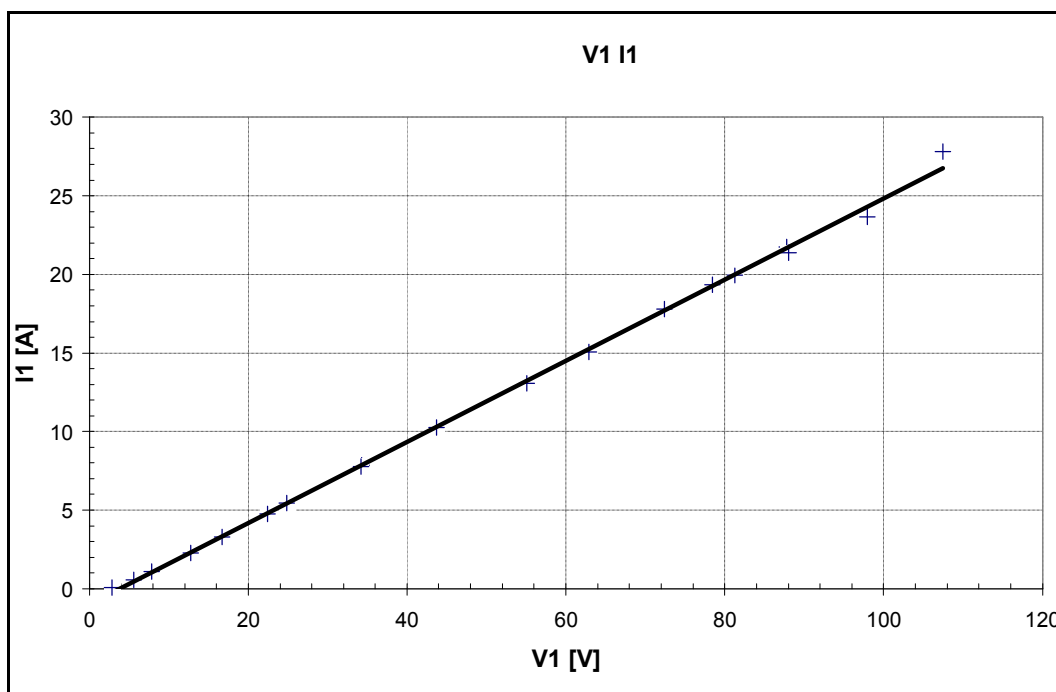


Figura C-5. Relació lineal entre el corrent i la tensió del primari.

La tensió del secundari es mesura per mitjà d'una espira exploradora que encercla cadascun dels torus, els extrems de la qual es connecten a un voltímetre. Aquesta tensió evoluciona linealment respecte el corrent

primari (veure figura C-6). S'observa la diferència del 15% entre els valors de les tensions d'una i altra fase per un mateix corrent primari.

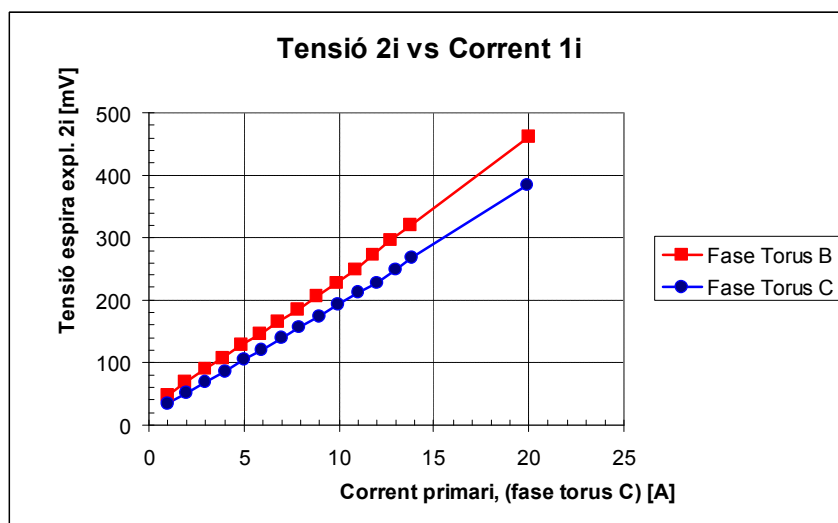


Figura C-6. Tensió del secundari respecte el corrent primari.

En comparar les caigudes de tensió mesurades en les espines de l'estator amb la tensió del secundari s'observa el fet que a mesura que creix el corrent del primari, la caiguda de tensió en les espines respecte del total es va fent menor. És a dir, la caiguda de tensió en la resta d'elements creix més que proporcionalment respecte el corrent del primari. Podria ser que el flux de dispersió de l'espira no creixi tant com el de la resta d'elements del secundari, de manera amb l'augment de corrent, la caiguda de tensió fora de l'estator creixi més de pressa que en les espines de l'estator. En la figura C-7 es mostra aquesta evolució.

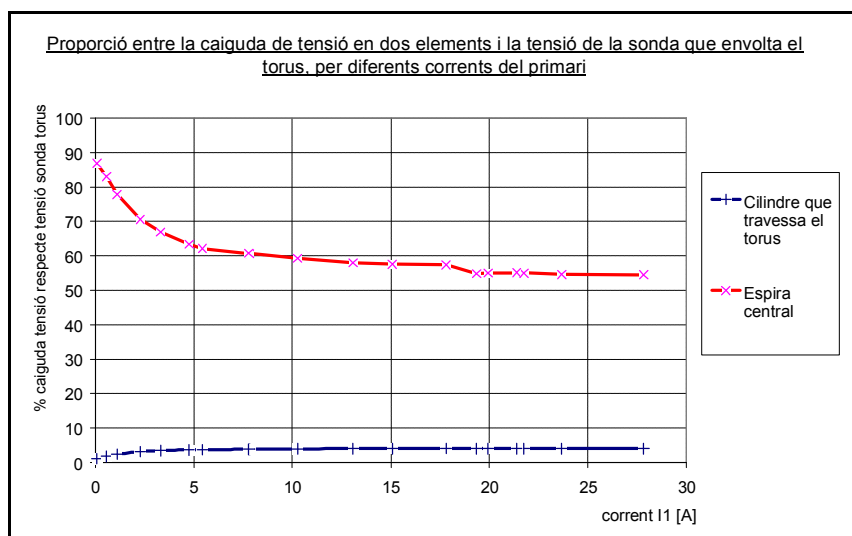


Figura C-7. Evolució de la proporció de caiguda de tensió en una espira respecte la tensió del secundari, en funció del corrent primari.

Per corrents primaris entre 1 i 5 A, la proporció de caiguda de tensió en les espires passa de ser el 88% del total al 63%. Aquesta tendència a la baixa continua d'una manera més suau, de manera que per corrents elevats, aquesta proporció es va reduint fins al 55%. En canvi, la caiguda de tensió mesurada en el cilindre que travessa el torus segueix una tendència inversa, representant una 1% del total per 1 A en el primari, fins al 4% a partir dels 5 A en el primari.

C.6.2 Corbes parell velocitat per diferents corrents del primari (50 Hz)

Mitjançant un fre basculant que actua sobre en rotor, i una bàscula electrònica es pot mesurar el parell que desenvolupa el prototip. En la figura C-8 es presenta el parell per rotor bloquejat.

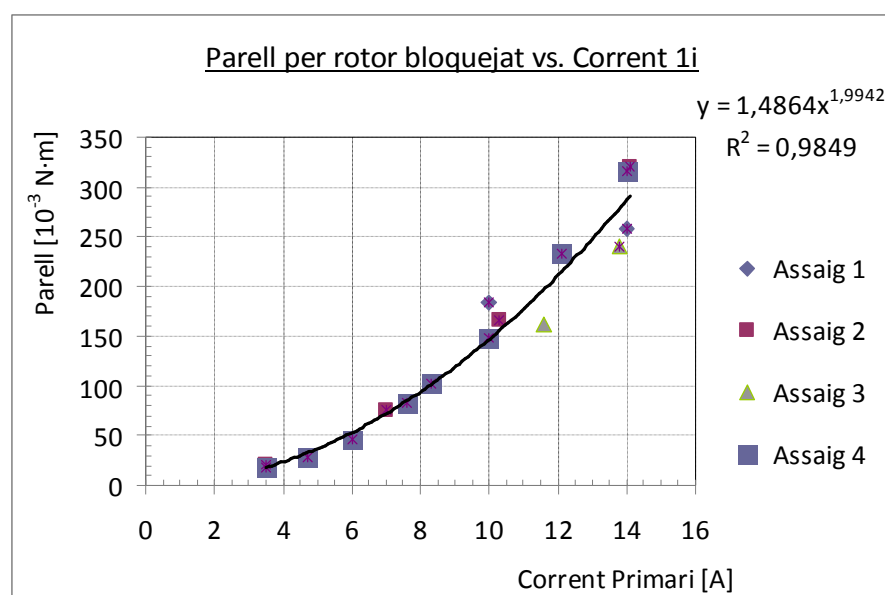


Figura C-8. Corba de parell pel rotor bloquejat en funció del corrent primari.

A mesura que s'escalfa el prototip, el parell es redueix, per causa de la reducció del corrent secundari.

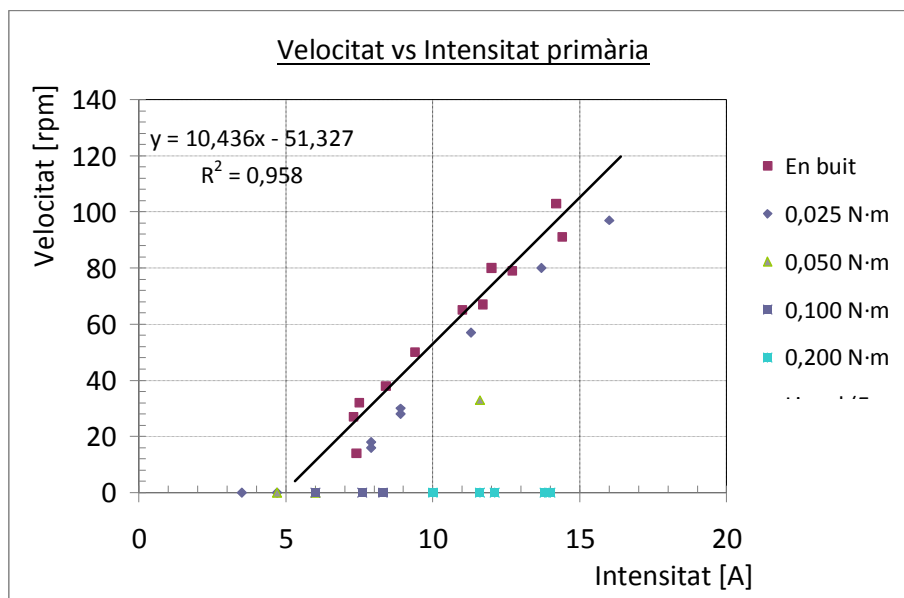


Figura C-9. Corba de velocitat en funció del corrent primari i diferents parells resistents.

En la figura C-9 es representa la velocitat de rotació del rotor en funció de la intensitat del primari, per diferents parells resistents. La relació existent entre velocitat i intensitat sembla lineal.

La velocitat que adquireix el rotor sense cap fricció afegida depèn de la temperatura del prototip. A mesura que s'escalfa, la velocitat va disminuint. En contrapartida, al cap d'un temps breu de començar a girar, el parell resistent dels coixinets del rotor disminueix. La magnitud d'aquest parell resistent és de l'ordre de la del parell motor. La combinació d'ambdós factors fa que les mesures presentin una dispersió important.

C.7 L'acumulador cinètic d'energia elèctrica (ACEE)

Per tal d'assajar el prototip VF1 a una freqüència diferent de la industrial de 50Hz, s'ha utilitzat un acumulador cinètic d'energia elèctrica (ACEE) constituït per un motor de corrent continu que arrossega el volant d'inèrcia i el rotor de l'alternador. Les seves característiques són les següents:

- Equip motor: primer es va utilitzar un motor universal de 1100 W de potència. Atès que feia falta més potència per alimentar la càrrega, aquest motor es va substituir per un altre de corrent continu i imants permanents, del tipus Mavilor MSS-35, de 3,5 kW de potència, parell màxim 67 Nm, velocitat màxima 4000 rpm, tensió màxima 250 V de c.c., corrent màxim o desmagnetitzant 113 A de c.c.

- Volant d'inèrcia constituït per un disc pla d'acer massís, de 330 mm de diàmetre i 60 mm de gruix, de 40 kg de massa, amb un moment d'inèrcia respecte el gir al voltant del seu eix de $0,5483 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. L'energia emmagatzemada quan gira a 3000 rpm és de 27 kJ.
- Equip generador: motor trifàsic d'imants permanents del tipus MA-55, de 5,5 kVA, de quatre parells de pols, de manera que es poden assolir freqüències de fins a 200 Hz per una velocitat de rotació de 3000 rpm. En la connexió dels semiestadors en triangle i entre ells en paral·lel, dóna una tensió de línia de 160 V a 100 Hz.

El pes total del conjunt del ACEE, amb els suports i bancades, és d'uns 100 kg.

Una de les proves es va fer per connexió directa a la sortida del generador, sense regulador de tensió. La tensió que proporciona el generador el funció de la freqüència. El corrent que pot proporcionar el generador al prototip, per diferents freqüències es representa en la figura C-10

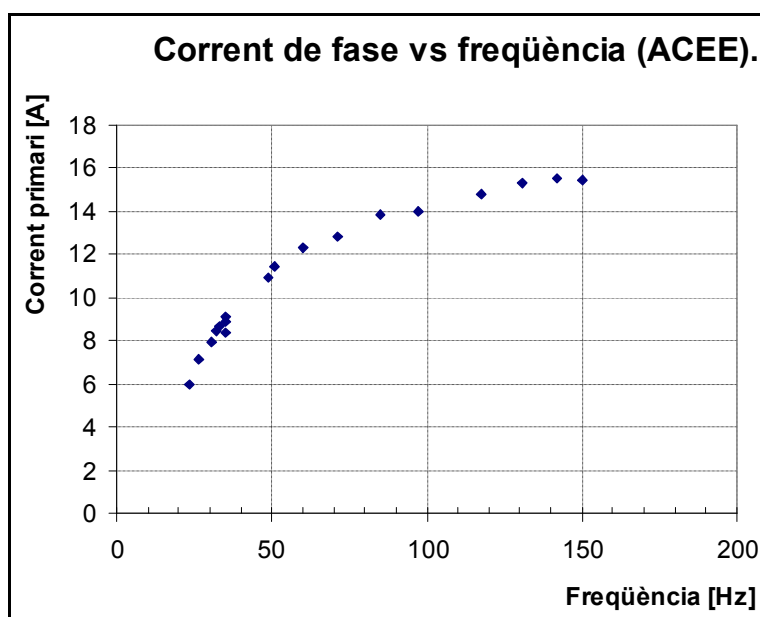


Figura C-10. Intensitat que pot proporcionar el generador del ACEE al prototip VF1 en funció de la freqüència.

A mesura que augmenta la freqüència, la tendència és que disminueixi la relació entre el corrent secundari i el corrent primari, tal com es mostra en la figura C-11

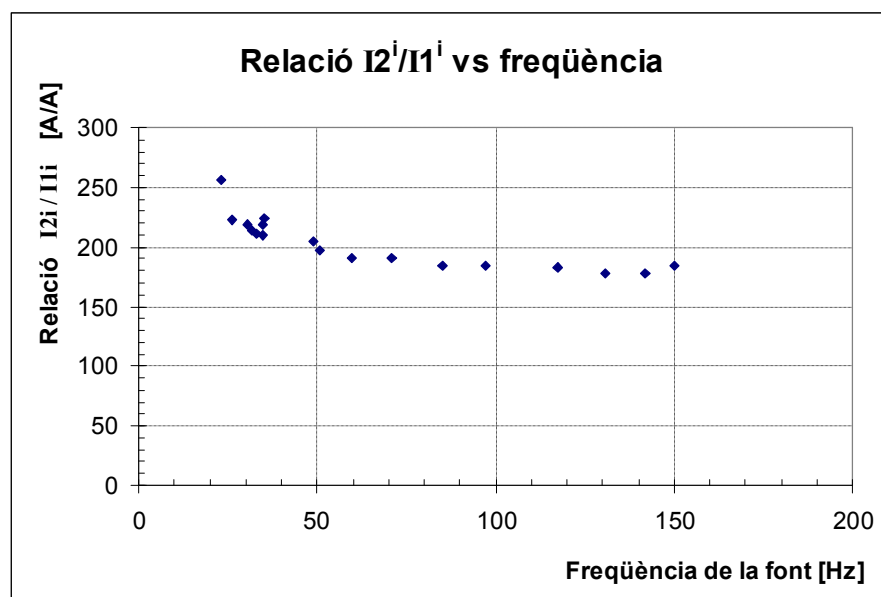


Figura C-11. Evolució de la relació entre intensitat primària i secundària, en funció de la freqüència.

En la figura C-12 es presenta un oscil·lograma de l'assaig a 135 Hz. El primer canal és la intensitat del primari. El segon canal és la tensió entre fases del primari, el tercer canal és la senyal de la bobina Rogowski d'una fase de secundari, i el quart canal és la senyal de la bobina Rogowski instal·lada al voltant del cilindre central del neutre del secundari.

En aquest cas en què la potència de curtcircuit de la font és limitada, i molt menor a la de la xarxa, l'ona de tensió del primari es deforma, mentre que l'ona de corrent és aproximadament sinusoidal. En canvi, quan s'alimenta el prototip des de la xarxa, l'ona de tensió és sinusoidal, mentre que l'ona de corrent queda deformatada. S'atribueix aquesta deformació a la histèresi dels materials magnètics del prototip.

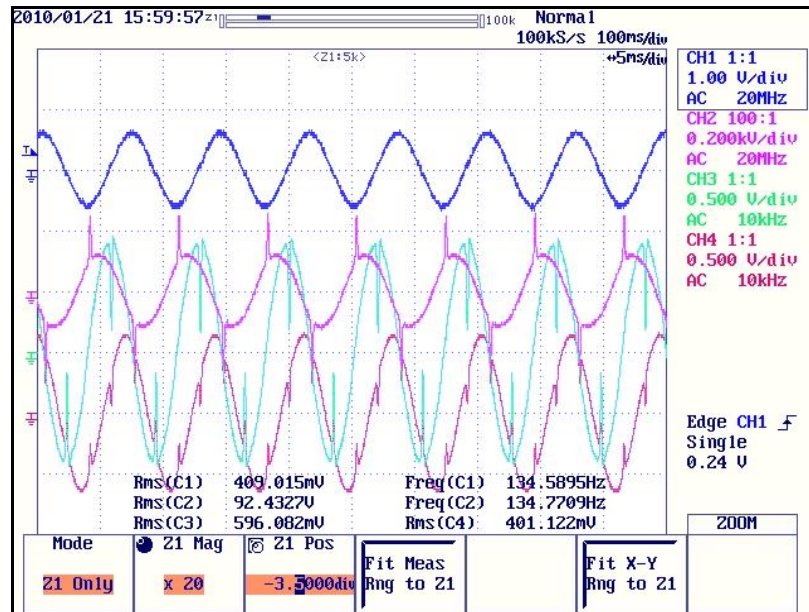


Figura C-12. Oscil·lograma de l'assaig realitzat a 135 Hz alimentant des de l'ACEE.

En l'assaig a 26 Hz, tant l'ona de tensió com la de corrent de la font queden afectades pels harmònics fruit de la histèresi.

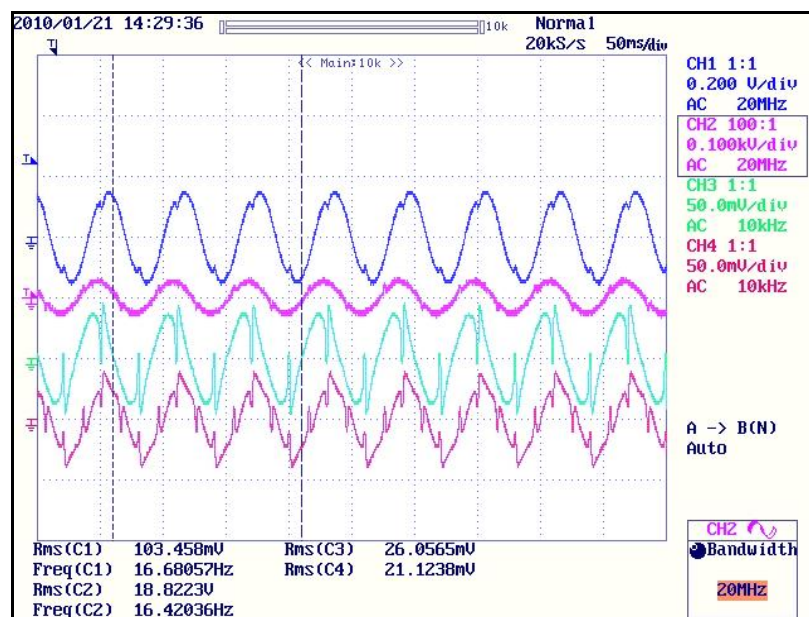


Figura C-13. Oscil·lograma de l'assaig realitzat a 26 Hz alimentant des de l'ACEE.