



Universitat de Girona

APLICACIÓ D'ALGORITMES GENÈTICS EN L'OPTIMITZACIÓ DELS PROCESSOS DE FABRICACIÓ DE PAPER

Xavier TURON CASALPRIM

ISBN: 84-689-2576-4

Dipòsit legal: GI-630-2005

TESI DOCTORAL



Universitat de Girona

Departament d'Enginyeria Química,
Agrària i Tecnologia Agroalimentària



**APLICACIÓ D'ALGORITMES GENÈTICS EN
L'OPTIMITZACIÓ DELS PROCESSOS DE
FABRICACIÓ DE PAPER**

Presentat per:

Xavier Turon i Casalprim

3 de desembre de 2004

Defensa: 11 de març de 2005 davant tribunal,

Dr. Luís Jiménez, President tribunal

Dr. Antonio L. Torres, 1^{er} Vocal

Dra. M^a Angels Pèlach, 2^a Vocal

Dr. Francisco Sobrón, 3^{er} Vocal

Dr. Jordi Bayer, Secretari

amb la qualificació d'Excel·lent *cum laude* per unanimitat

AGRAÏMENTS

Els primers agraïments són pels directors de la present Tesis Doctoral, al Dr. Jalel Labidi i al Dr. Pere Mutjé. També al Dr. Jean Paris, supervisor de la Tesi i director del treball durant tots els mesos d'estada a Montréal (Canadà). He d'agrair també el suport econòmic del grup del Dr. Paris a l'École Polytechnique de Montréal durant la meva estada.

També he d'agrair el suport econòmic de la Generalitat de Catalunya pel finançament de la recerca durant dos anys, en forma de beca TDOC per a la finalització de Tesis doctorals d'alt interès industrial o econòmic.

A l'empresa Torraspapel S.A., especialment a la planta de Sant Joan les Fonts, per facilitar el desenvolupament de la part experimental del treball. Voldria destacar la col·laboració dels dos directors de planta durant aquests anys el Sr. Joan Guinart i el Sr. Jordi Serra, així com el personal de fàbrica.

També vull recordar a tots aquells, relativament pocs, que han compartit des de l'inici a l'any 2000 el meu període predoctoral a la UdG, tant del grup LEPAMAP com d'altres grups de recerca, en especial la M^a Àngels que es va fer càrrec dels meus inicis. També a la resta de companys de LEPAMAP que s'han anat afegint a la "família", i als que ja no en formen part. A tots ells, gràcies per compartir cafès, dinars, sopars&cinemes; ordinadors, taules i trasllats de mobiliari; alegries, decepcions i algun "cabreig". Sou molts i no hi cabeu tots (Pere, Christian, Sus, Farners, Nanu Zafra, JuanCa,.....)

No puc oblidar-me de la "família" de treball de Poly a Montréal, que vàrem compartir moltes hores, especialment a la Zoé i en Xavi.

També a la resta de amics i companys fora de l'ambient universitari, que han compartit moments d'esbarjo i aguantat algun "rotllo" de tant en tant.

Finalment, als que més he d'agrair, perquè són els que més i més temps han hagut de suportar-me, sobretot els mals humors: els meus pares.

A tots els m'han fet costat,
i també un record per els que no han pogut
veure aquest treball finalitzat.

Índex

ÍNDEX

Pàgina

SECCIÓ 1. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS

CAPÍTOL I

I. INTRODUCCIÓ.....	I.1
I.A. Producció de paper	I.6
I.B. Marc general del treball	I.13
REFERÈNCIES	I.15

CAPÍTOL II

II. OBJECTIUS	II.1
---------------------	------

SECCIÓ 2. FONAMENTS TEÒRICS

CAPÍTOL III

III. TANCAMENT DE CIRCUITS	III.1
III.A. Introducció – Visió històrica	III.1
III.A.1. Els primers passos: Recirculació d'aigües blanques.....	III.2
III.A.2. Classificació segons la fase de tancament	III.3
III.A.2.1 Circuits totalment oberts	III.3
III.A.2.2. Circuits parcialment tancats.....	III.4
III.A.2.2.1 Avantatges i inconvenients experimentats amb el tancament de circuits	III.8
III.A.2.3. Circuits relativament ben tancats.....	III.10
III.A.2.4. Circuits ben tancats	III.13
REFERÈNCIES	III.17

CAPÍTOL IV

IV. INTEGRACIÓ DE PROCESSOS	IV.1
IV.A. Introducció	IV.1
IV.B. Tècniques d'integració de processos	IV.2
IV.B.1. Mètode d'anàlisi de pinçament (pinch)	IV.3
IV.B.2. Mètode d'anàlisi de pinçament hidràulic (water pinch)	IV.7
IV.B.3. Altres tècniques en la integració de processos.....	IV.10
REFERÈNCIES	IV.13

SECCIÓ 3. PART EXPERIMENTAL

CAPÍTOL V

V. METODOLOGIA	V.1
V.A. Metodologia del present treball.....	V.1
V.B. Metodologia de la simulació.....	V.5
V.B.1. Descripció.....	V.5
V.B.2. Particularitats de la simulació	V.9
V.B.3 Variació del model de retenció.....	V.10
V.B.4. Validació.....	V.11
V.C. Metodologia de l'optimització amb algoritmes genètics.....	V.12
REFERÈNCIES	V.15

CAPÍTOL VI

VI. RESULTATS D'EXEMPLE PRÀCTIC D'INTEGRACIÓ DE PROCESSOS MITJANÇANT ALGORITMES GENÈTICS.....	VI.1
VI.A. Optimització amb algoritmes genètics	VI.1
VI.A.1. Exemple	VI.1
VI.A.2. Balanç de matèria de l'exemple.....	VI.3

VI.A.3. Optimització de l'exemple	VI.5
VI.A.3.1. Restriccions aplicades	VI.5
VI.A.3.2. Ajustament de l'algoritme genètic	VI.6
VI.A.3.3. Grandària de la població d'individus.....	VI.7
VI.A.3.4. Probabilitat de creuament entre individus	VI.8
VI.A.3.5. Probabilitat de mutació	VI.8
VI.A.3.6. Nombre màxim de generacions	VI.9
VI.A.4. Resultats de l'optimització.....	VI-10
VI.A.4.1. Resultats: Cas A.....	VI-10
VI.A.4.2. Valoració de resultats: Cas A.....	VI-14
VI.A.4.3. Resultats: Cas B.....	VI-15
VI.A.4.4. Valoració de resultats: Cas B.....	VI-20
VI.B. Conclusions.....	VI-22
REFERÈNCIES	VI-24

CAPÍTOL VII

VII. DESCRIPCIÓ I APLICACIÓ A UN PROCÉS INDUSTRIAL

EXISTENT	VII.1
VII.A. Descripció del procés.....	VII.1
VII.A.1. Característiques principals	VII.3
VII.A.2. Procés de fabricació	VII.4
VII.A.3. Preparació de pastes	VII.5
VII.A.3.1. Disgregació de fibres o pulpejat.....	VII.6
VII.A.3.2. Condicionament de fibres.....	VII.8
VII.A.3.3. Mescla	VII.9
VII.A.3.3.1. Depuració de la pasta.....	VII.10
VII.A.3.3.2. Depuració pressuritzada primària	VII.11
VII.A.3.3.3. Depuració ciclònica	VII.12
VII.A.3.3.4. Depuració pressuritzada secundària	VII.13

VII.A.4. Procés de fabricació del full de paper	VII.14
VII.A.4.1. Màquina de paper.....	VII.14
VII.A.4.2. Caixa d'entrada	VII.15
VII.A.4.3. Zona humida	VII.16
VII.A.4.4. Zona seca.....	VII.18
VII.A.4.5. Circuit d'aigües	VII.18
VII.A.4.5.1. Descripció del circuit d'aigües	VII.19
VII.A.4.5.2. Recirculació de les aigües	VII.22
VII.A.4.5.3. Influència en els consums.....	VII.23
VII.B. Validació experimental de la simulació.....	VII.25
VII.B.1. Resultats de la validació	VII.27
REFERÈNCIES	VII.34

CAPÍTOL VIII

VIII. RESULTATS DE L'OPTIMITZACIÓ DEL PROCÉS INDUSTRIAL

EXISTENT	VIII.1
VIII.A. Aplicació	VIII.1
VIII.B. Cas de base	VIII.2
VIII.C. Optimització amb obertura total del sistema.....	VIII.4
VIII.C.1. Resultats	VIII.7
VIII.D. Optimització amb obertura parcial del sistema.....	VIII.8
VIII.D.1. Resultats.....	VIII.11
VIII.D.1.1. Repercussió interna de la reconfiguració	VIII.19
VIII.D.1.1.1. Cabals de fibra	VIII.23
VIII.D.1.1.2. Cabals de càrregues.....	VIII.28
VIII.D.1.1.3. Consistències	VIII.32
VIII.E. Nou plantejament en l'optimització	VIII.36
VIII.E.1. Resultats.....	VIII.42

VIII.E.2. Noves perspectives.....	VIII.45
VIII.E.2.1. Recirculació fora del llaç de depuració ciclònica	VIII.47
VIII.E.2.2. Tractament secundari	VIII.48
VIII.F. Conclusions	VIII.51
REFERÈNCIES	VIII.53

CAPÍTOL IX

IX. CONCLUSIONS.....	IX.1
----------------------	------

ANNEX A

ANNEX B

ÍNDIX DE FIGURES

Pàgina

Figura I.1: Producció de paper i cartró (tones) a Espanya	I.7
Figura I.2: Creixement del sector paper a Espanya i Europa (1996-2002).....	I.8
Figura I.3: Creixement comparatiu del sector paper a Espanya (1995-2002).....	I.9
Figura I.4: Producció de pasta i paper a Espanya (1990-2012).....	I.10
Figura I.5: Producció de paper d'impressió i escriptura a la UE.....	I.12
Figura I.6: Producció de paper d'impressió i escriptura a Espanya	I.13
Figura III.1: Màquina de paper amb el circuits totalment oberts	III.4
Figura III.2: Circuit de fabricació parcialment tancat	III.5
Figura III.3: Circuit primari d'aigües blanques	III.6
Figura III.4: Circuit secundari d'aigües blanques	III.7
Figura III.5: Circuit terciari d'aigües blanques	III.8
Figura III.6: Circuit de fabricació relativament ben tancat.....	III.11
Figura III.7: Circuit tancat d'aigua amb torre de refrigeració.....	III.12
Figura III.8: Sistema d'aigua en cascada per les bombes de buit	III.12
Figura IV.1: Corbes compostes	IV.4
Figura IV.2: Aplicació del mètode de l'anàlisi de pinçament	IV.6
Figura IV.3: Gràfica típica de l'anàlisi de pinçament amb transferència de massa	IV.8
Figura V.1: Diagrama simplificat de les tècniques emprades.....	V.2
Figura V.2: Diagrama de la metodologia aplicada.....	V.4
Figura V.3: Esquema: construcció i validació d'una simulació	V.6
Figura V.4: Esquema: Execució i ajust de la simulació	V.7
Figura V.5: Esquema de la metodologia d'optimització basada en algoritmes genètics	V.13
Figura VI.1: Cas a optimitzar. Esquema del procés	VI.2
Figura VI.2: Cas a optimitzar. Balanç global del procés.....	VI.3
Figura VI.3: Cas a optimitzar. Superestructura	VI.4

Figura VI.4: Solució d'exemple. Cas A.....	VI.11
Figura VI.5: Superestructura de la solució. Cas A.....	VI.12
Figura VI.6: Solució d'exemple. Cas B.	VI.16
Figura VI.7: Superestructura de la solució. Cas B	VI.17
Figura VII.1: Esquema simplificat del procés	VII.2
Figura VII.2: Consums d'aigua fresca en funció dels gramatges produïts	VII.4
Figura VII.3: Esquema de la secció de preparació de pastes	VII.6
Figura VII.4: Esquema de les etapes de depuració.....	VII.11
Figura VII.5: Esquema de les parts bàsiques de la màquina de paper	VII.15
Figura VII.6: Esquema de la zona humida de la màquina de paper.....	VII.17
Figura VII.7: Esquema simplificat del circuit d'aigües.....	VII.19
Figura VII.8: Esquema de configuració del circuit d'aigües	VII.21
Figura VII.9: Recull diari de consums d'aigua fresca i efluents d'aigua filtrada	VII.24
Figura VII.10: Funcionament de la simulació seqüencial.....	VII.26
Figura VII.11: Velocitat de tela vs. Gramatge	VII.27
Figura VII.12: Cabal a caixa d'entrada vs. Gramatge.....	VII.28
Figura VII.13: Consistència total a caixa d'entrada vs. Gramatge.....	VII.29
Figura VII.14: Consistència d'aigües blanques vs. Gramatge.....	VII.30
Figura VII.15: Percentatge de càrregues en aigües blanques vs.Gramatge	VII.31
Figura VIII.1: Esquema simplificat de la secció del procés inclosa a l'estudi.....	VIII.2
Figura VIII.2: Esquema del cas base abans d'optimitzar.....	VIII.3
Figura VIII.3: Esquema de l'escenari d'optimització d'obertura total.....	VIII.4
Figura VIII.4: Esquema de l'escenari d'optimització d'obertura parcial.....	VIII.9
Figura VIII.5: Estructura de la nova xarxa (Solució A).....	VIII.13
Figura VIII.6: Estructura de la nova xarxa (Solució B)	VIII.13
Figura VIII.7: Nombre de connexions de les solucions obtingudes.....	VIII.16
Figura VIII.8: Aspecte de la configuració del cas base a la simulació	VIII.17
Figura VIII.9: Aspecte d'una reconfiguració a la simulació.....	VIII.18

Figura VIII.10: Consum acumulat d'aigua per cada solució.....	VIII.23
Figura VIII.11: Cabal màssic de fibra a l'entrada de la depuració ciclònica	VIII.24
Figura VIII.12: Cabal màssic de fibra a l'entrada de la depuració pressuritzada. .	VIII.25
Figura VIII.13: Cabal màssic de fibra a la pasta enviada a màquina de paper.....	VIII.26
Figura VIII.14: Cabal màssic de fibra d'ambdós rebuigs de depuració.....	VIII.27
Figura VIII.15: Cabal màssic de càrregues a l'entrada de la depuració ciclònica ..	VIII.28
Figura VIII.16: Cabal màssic de càrregues a l'entrada de la depuració ciclònica .	VIII.29
Figura VIII.17: Cabal màssic de càrregues a la pasta enviada a màquina de paper.....	VIII.30
Figura VIII.18: Cabal màssic de càrregues d'ambdós rebuigs de depuració.....	VIII.31
Figura VIII.19: Consistència de la pasta a l'entrada de la depuració ciclònica.....	VIII.32
Figura VIII.20: Consistència de la pasta a l'entrada de la depuració pressuritzada.....	VIII.33
Figura VIII.21: Consistència de la pasta enviada a màquina	VIII.34
Figura VIII.22: Consistència d'ambdós rebuigs de depuració.....	VIII.35
Figura VIII.23: Balanç global de matèria, cas base	VIII.42
Figura VIII.24: Balanç global de matèria, optimització amb restriccions relaxades	VIII.43
Figura VIII.25: Balanç global de matèria, millor solució	VIII.44
Figura VIII.26: Esquema del plantejament de recirculació fora del llaç de depuració ciclònica.....	VIII.47

INDEX DE TAULES

Pàgina

Taula III.1: Efectes del tancament de circuits i la recirculació d'aigües sobre el sistema d'aigües blanques i el procés productiu.....	V.9
Taula VI.1: Restriccions aplicades a l'optimització.....	VI.6
Taula VI.2: Balanç de matèria. Solució del cas A.....	VI.11
Taula VI.3: Recull i comparativa d'algunes solucions (Cas A).....	VI.13
Taula VI.4: Balanç de matèria. Solució del cas B	VI.18
Taula VI.5: Recull i comparativa amb altres possibles solucions (Cas B)	VI.19
Taula VII.1: Comparativa de dades reals i dades obtingudes per simulació	VII.32
Taula VIII.1: Quadre resum dels paràmetres principals de fonts i demandes	VIII.5
Taula VIII.2: Restriccions aplicades a fonts i demandes.....	VIII.6
Taula VIII.3: Quadre resum dels paràmetres principals de fonts i demandes del plantejament d'obertura parcial	VIII.10
Taula VIII.4: Restriccions aplicades a fonts i demandes en el plantejament d'obertura parcial.....	VIII.11
Taula VIII.5: Exemple de resultats de l'optimització.....	VIII.12
Taula VIII.6: Cas base vs. Solució A i B	VIII.14
Taula VIII.7: Resum de la reconfiguració del procés després de l'optimització .	VIII.16
Taula VIII.8: Impacte del canvi de configuració en el procés	VIII.20
Taula VIII.9: Quadre resum dels paràmetres principals de fonts i demandes del nou plantejament amb cabal de fibres i de càrregues.....	VIII.37
Taula VIII.10: Restriccions aplicades a fonts i demandes del nou plantejament amb cabal de fibres i de càrregues.	VIII.38
Taula VIII.11: Restriccions més relaxades aplicades a fonts i demandes del plantejament amb cabal de fibres i de càrregues.	VIII.39

Taula VIII.12: Quadre resum dels paràmetres principals de fonts i demandes del nou plantejament amb consistències i cabal de càrregues.	VIII.40
Taula VIII.13: Restriccions aplicades a fonts i demandes del nou plantejament amb cabal de fibres i de càrregues.	VIII.41
Taula VIII.14: Resum de les diferències percentuals de les diferents reconfiguracions respecte el cas base.....	VIII.46
Taula VIII.15: Conseqüències de la reconfiguració: variacions de consum al circuit d'aigües.....	VIII.51

ABSTRACT

The growing awareness of the civil society for the environment and the resulting regulations introduced has modified chemical industry production processes. Existing process configuration should be modified to reach an integrated process design. Methodologies are required to support process reconfiguration during the integrated process design.

The development of a methodology and its related tools is the goal of the research presented here. The focus lies on the development and application of a process optimization methodology. This optimization methodology starts with an existing process configuration and looks for feasible new configurations according to objectives fixed.

The proposed methodology combines the use of process simulation tool and a process optimization technique. Methodology starts with a validated process simulation reproducing existing process, in this case a non integrated paper mill producing coated high grade printing paper. Then process optimization technique performs a search in domain of possible results, looking for best results satisfying the objectives stated. Optimization technique is based on genetic algorithms as a search tool, coupled with mathematic linear programming. A pool of retained results is introduced into process simulation as process flows redistribution. Process simulation results determine feasibility of each reconfiguration.

Objectives of process optimization are defined in an objective function in the optimization technique. Such function rules the search of results. Objective function could contain a single objective or a combination of objectives. In this case, objective function is defined to reach water consumption minimization and material loss minimization. Optimization was carried out under constraints to reach combined goals in a trade-off solution. As a result

of optimisation methodology application interesting results were obtained enhancing system closure and raw materials savings while keeping process operability and paper quality.

RESUMEN

La creciente preocupación y concienciación de la sociedad respecto el medio ambiente, y en consecuencia la legislación y regulaciones generadas inducen a la modificación de los procesos productivos existentes en la industria química. Las configuraciones iniciales deben modificarse para conseguir una mayor integración de procesos. Para este fin se han creado y desarrollado diferentes metodologías que deben facilitar la tarea a los responsables del rediseño.

El desarrollo de una metodología y herramientas complementarias es el principal objetivo de la investigación aquí presentada, especialmente centrada en el desarrollo y la aplicación de una metodología de optimización de procesos. Esta metodología de optimización se aplica sobre configuraciones de proceso existentes y pretende encontrar nuevas configuraciones viables según los objetivos de optimización fijados.

La metodología tiene dos partes diferenciadas: la primera se basa en un simulador de procesos comercial y la segunda es la técnica de optimización propiamente dicha. La metodología se inicia con la elaboración de una simulación convenientemente validada que reproduzca el proceso existente, en este caso una papelera no integrada que produce papel estucado de calidad, para impresión. A continuación la técnica de optimización realiza una búsqueda dentro del dominio de los posibles resultados, en busca de los mejores resultados que satisfazan plenamente los objetivos planteados.

Dicha técnica de optimización está basada en los algoritmos genéticos como herramienta de búsqueda, junto a un subprograma basado en técnicas de programación matemática para el cálculo de resultados. Un número reducido de resultados son finalmente escogidos y utilizados para modificar la simulación existente fijando la redistribución de los flujos del proceso. Los resultados de la simulación del proceso determinan en último caso la viabilidad técnica de cada reconfiguración planteada.

En el proceso de optimización, los objetivos están definidos en una función objetivo dentro de la técnica de optimización. Dicha función rige la búsqueda de resultados. La función objetivo puede ser individual o una combinación de objetivos. En el presente caso, la función persigue una minimización del consumo de agua y una minimización de la pérdida de materia prima. La optimización se realiza bajo restricciones para alcanzar este objetivo combinado en forma de una solución de compromiso. Producto de la aplicación de esta metodología se han obtenido resultados interesantes que significan una mejora del cierre de circuitos y un ahorro de materia prima, sin comprometer al mismo tiempo la operabilidad del proceso producto ni la calidad del papel.

CAPÍTOL I

I. INTRODUCCIÓ

Les empreses industrials a l'inici del segle XXI tenen davant seu reptes comuns. Per ser competitives, sobreviure dins un mercat cada cop més global, i continuar creixent, obliga a aquestes empreses a seguir un procés de millora continuada i a invertir per aconseguir aquesta millora.

Òbviament les empreses persegueixen un rendiment econòmic, i així en la mesura del possible, busquen un augment de la producció i al mateix temps, una reducció dels costos. Totes les millores que s'impulsen amb el desig d'acomplir aquests objectius empresarials no poden deixar de banda, en cap cas, aspectes legals, ambientals o socials. Les pressions exercides sobre la indústria en forma de legislació, respecte al medi i a la societat que envolta la indústria també esdevenen factors clau que impulsen a l'empresa a una millora continuada. Aquesta millora sorgeix amb el desig de resoldre els reptes generats per l'entorn socio-polític i econòmic.

En aquest context, el món industrial en general i més específicament el sector químic, que és sector objectiu en el present treball, es replanteja els processos existents per tal de poder satisfer les noves necessitats. Aquestes noves necessitats són de diferent naturalesa, com ara de tipus:

- Productiu: major producció, major qualitat.
- Econòmic: descens dels costos de producció.
- Ambiental: substitució de matèries tòxiques, reducció de càrrega contaminant dels efluent líquids, reducció de contaminació atmosfèrica o dels sòls, etc.
- Socials: disminució de les molèsties o impactes causats a la societat de l'entorn com ara fums, sorolls, contaminació aigües o males olors.

En funció del sector o del tipus d'indústria l'exemple és fa més o menys evident. En el cas de la indústria paperera es pot parlar d'un exemple clar. El sector paperer es troba de ple en aquest procés de millora continuada per tal de no perdre competitivitat, i alhora és un clar exemple històric d'indústria que ha estat blanc de pressions i condicionants establerts per aquest entorn socio-polític-econòmic.

Les necessitats generades han de ser assumides per les indústries amb voluntat competitiva. L'empresa trasllada les preocupacions i els plantejaments tant a enginyers com al món de la ciència aplicada en general, per tal de donar resposta als problemes plantejats. D'aquesta forma neix una necessitat de replantejar els processos productius, de reflexionar sobre la tecnologia emprada o les matèries primeres utilitzades, l'ús d'aquestes matèries i de l'energia, etc.

No és gens estrany doncs que en un terreny tan ampli com el de l'enginyeria, un dels camps emergents sigui el de la integració de processos i les seves aplicacions en el camp de l'enginyeria química, que destaca i ha destacat els darrers anys en innovació i activitat.

La integració de processos pretén, tal i com es desprèn de la definició que en fa la IEA (Agència Internacional de l'Energia), desenvolupar i aplicar diferents metodologies concebudes pel disseny de nous processos industrials o bé, pel redisseny dels ja existents. Aquestes metodologies acostumen a tenir un fonament eminentment matemàtic, basat en models o tècniques termodinàmiques i/o econòmiques. Alguns d'aquests mètodes desenvolupats basen la seva cerca en: la Intel·ligència Artificial (conegut també per l'acrònim anglosaxó A.I.), l'anàlisi de pinçament (Pinch Analysis), anàlisi jeràrquic (Hierarchical Analysis) o la programació matemàtica.

La integració de processos pretén assolir dissenys industrials òptims. L'òptim en aquest procés de disseny es busca en aspectes com la inversió de capital, l'eficiència energètica, la generació d'emissions o efluent.

La integració de processos promou el desenvolupament de nous mètodes i tècniques per resoldre els problemes plantejats en aquest àmbit. Existeixen diferents mètodes i tècniques en integració de processos, d'entre totes elles es podria destacar les d'optimització de processos.

L'optimització de processos es basa en el coneixement, el disseny i l'anàlisi dels processos industrials, amb l'objectiu de millorar-ne el funcionament d'una manera sistemàtica. Els criteris que marcaran aquesta millora poden ser econòmics o bé operacionals.

La necessitat de millorar la gestió de l'energia, evitant consums innecessaris, minimitzant consums o millorant eficiències va ser el primer objectiu que es va plantejar la seva resolució mitjançant les tècniques d'integració de processos. Actualment l'energia segueix essent un dels objectius bàsics en la millora dels dissenys de processos industrials.

La gestió de l'energia és un dels aspectes bàsics tant pels governs nacionals com pel món industrial per tal de complir els compromisos nacionals fixats en el protocol de Kyoto, sobre el canvi climàtic, signat en aquesta ciutat japonesa l'any 1997. Sense una gestió correcta de l'energia és impossible assolir els propòsits de límits d'emissions atmosfèriques pactats. Durant anys la percepció resultant del compromisos signats al conveni de Kyoto podia portar a pensar que el compromís era fruit de polítiques internacionals, amb més bones intencions que possibilitats reals, recolzat per una insuficient ratificació per part dels països més contaminants. Això sí, el protocol de Kyoto representa un clar estímul, fomentant o justificant el finançament de la recerca per tal d'avançar en aquest sentit.

Ara bé, els fets succeïts recentment amb la ratificació del protocol per part del govern espanyol i la creació de mecanismes com ara el mercat de drets sobre la contaminació, regulat per la directiva espanyola de comerç d'emissions, aclareixen una mica més la situació. El mercat sobre el comerç d'emissions es basa en la creació de quotes d'emissió atmosfèrica per a les empreses, i la possibilitat de comprar o vendre aquests drets d'emissió. Aquest mecanisme canvia la visió clàssica de l'empresa, tot estimulant la reducció de gasos emesos amb un mecanisme amb dues vessants complementàries de caràcter econòmic. Les empreses que dediquin esforços i inversions que permetin assolir una reducció de les seves emissions podran obtenir beneficis de la venda de part de la seva quota en el mercat d'emissions. Les empreses més contaminants es veuran obligades a pagar per aconseguir un increment de la seva quota, i a preus de mercat, o sigui que una major demanda (poc esforç de descontaminació) provoca una major dificultat i un increment de preus en la compra de drets.

Les empreses de sectors com ara el ciment, el paperer, la ceràmica, el vidre i els productes energètics hauran d'esforçar-se per complir els límits d'emissions.

De forma encara més recent, aquest mateix mes d'Octubre (2004) amb la ratificació del protocol per part de Rússia, s'assoleixen els mínims acordats en la redacció del protocol, que fixava la necessitat de ratificació del protocol d'un nombre mínim de 55 països, que a la vegada garantissin com a mínim el 55% de les emissions mundials [1]. Aquesta darrera embranzida pot acabar d'esvair els dubtes que han planejat contínuament sobre el futur d'aquest protocol i el compliment dels pactes establerts.

En països com el nostre, existeixen particularitats bàsicament de tipus climàtic que poden motivar una major atenció a la gestió de l'aigua. Les conques mediterrànies amb grans establiments humans i industrials són sovint deficitàries en aigua. Així l'aigua esdevé un bé escàs i preuat, objecte

de majors controls i regulacions per part de l'administració i fins i tot, en alguns casos, motiu d'alarma social. En un context com aquest els estímuls per a una empresa i per aquells que es dediquen a la recerca, a millorar la gestió de l'aigua i de les matèries primeres, relegant ocasionalment la gestió de l'energia a un segon terme en quant a prioritats. Un exemple clar és el projecte d'increment de la pressió fiscals sobre el consum i la contaminació d'aigües, que ha posat en estat d'alerta en sectors industrials com ara el tèxtil i el paperer, amb l'amenaça de provocar el tancament de les indústries menys eficients.

Tot l'entorn que envolta el món industrial, tant de tipus purament econòmic amb la competència existent i la globalització de mercats, com en augment de costos productius, i finalment amb les obligacions derivades d'un augment i enduriment de les regulacions de caràcter ambiental, provoca o ha de provocar un reflexió profunda en el món empresarial.

Les empreses majoritàriament han estat dedicades fins al moment a les petites, a vegades fins i tot importants, millores internes per tal de millorar el seu procés productiu i mantenir o millorar el seu nivell de competitivitat. Però la reflexió fruit d'aquest canvi en el context internacional ha de portar a un canvi de visió. El punt de vista local que havia dominat fins ara ha de deixar pas a un punt de vista més global. Punt de vista global tant del negoci com de a pròpia planta productiva. La visió interna més global comporta la recerca de millores pel conjunt del procés i abandonar la successió de millores puntuals. Aquesta successió de millores puntuals poden contrarestar-se o fins i tot provocar perjudicis en altres punts del procés, provocant que el conjunt del procés la millora sigui minsa o inexistent. Cal doncs plantejar-se eines i mètodes més generals que permetin millorar els processos en el seu conjunt.

I.A. PRODUCCIÓ DE PAPER

La indústria productora de pasta i paper és un sector de grans dimensions a nivell mundial. La producció mundial està xifrada en 300 milions de tones anuals de paper i derivats, repartida en les aproximadament 10.000 fàbriques existents actualment arreu del món [2, 3]

Al nostre continent, el sector paperer europeu, més concretament els països membres del CEPI (Confederació Europea d'Indústries del Paper) van produir 91 milions de tones de paper i cartró, l'any 2002, en les aproximadament 1300 fàbriques dedicades a la producció de pasta i paper [4].

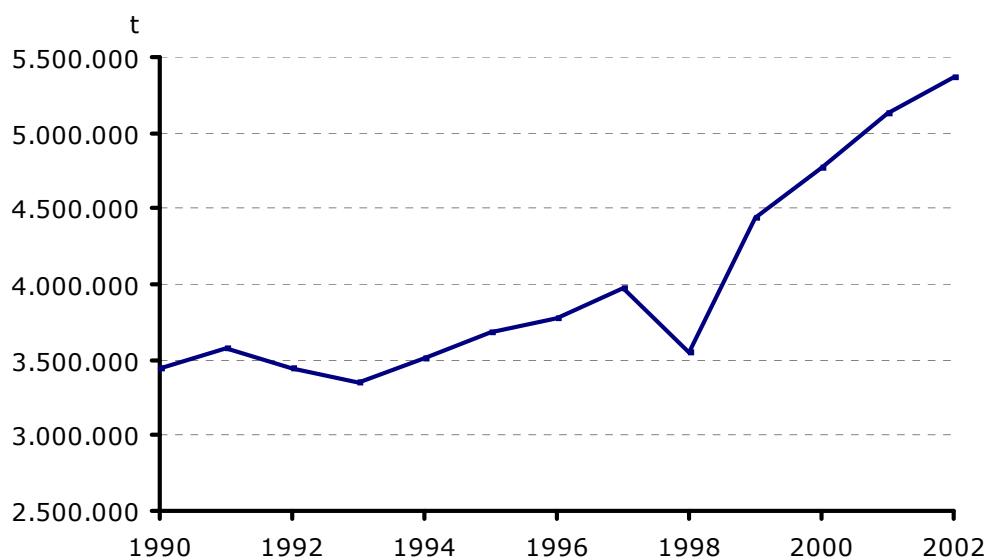
La indústria productora de pasta i paper europea és el nucli vital del gran sector econòmic forestal-paperer, que genera una facturació anual superior als 400 bilions d'euros. Aquesta indústria a Europa és responsable de 250.000 treballadors (com a empleats directes) i indirectament com a còmput general del gran sector forestal-paperer un total de 3.5 milions de treballadors [4].

La producció de paper genera un impacte substancial al medi ambient, a través de la utilització dels recursos hídrics, dels recursos utilitzats com a matèries primeres (majoritàriament fibres vegetals procedents d'arbres). Genera emissions gasoses, efluents líquids i residus sòlids. Però també cal tenir en compte la importància que té la producció de paper i cartró en el cicle del carboni. Una part del carboni que els arbres s'encarreguen d'eliminar de l'atmosfera resta fixat a la fusta i als productes paperers, al llarg de la seva vida útil. Així doncs, els productes de les indústries de la fusta i paperera formen part d'un cicle sostenible de producció i consum. S'estima que l'any 2000 i arreu del món, els productes de les indústries de la fusta i paperera contenien 290 milions de tones de carboni [5]. El carboni atmosfèric fixat és un tret característic d'aquests productes derivats forestals

que no es troba en altres materials; així, se'ls considera una contribució al balanç global en l'efecte hivernacle.

La indústria paperera europea ha augmentat significativament la seva eficiència energètica la darrera dècada. A tall d'exemple, les emissions atmosfèriques a Europa de gasos que contribueixen a l'efecte hivernacle per part de la indústria paperera van veure's reduïdes entre un 7% i un 36% per tona de produïda, entre els anys 1990 i 2000. Aquest descens ha estat motivat per la major eficiència energètica als processos productius, bàsicament per la introducció de carburants que generen menors emissions de carboni i incrementant la utilització de biomassa. Com a exemple, Japó va reduir el consum específic d'energia en un 44%, entre els anys 1970-90 [4].

A nivell de l'Estat espanyol, la producció de la indústria paperera s'ha incrementat any rere any. Durant el període que va dels anys 1990 al 2002, la producció ha augmentat aproximadament en un 60%, tal i com es reflexa en la Figura I.1.

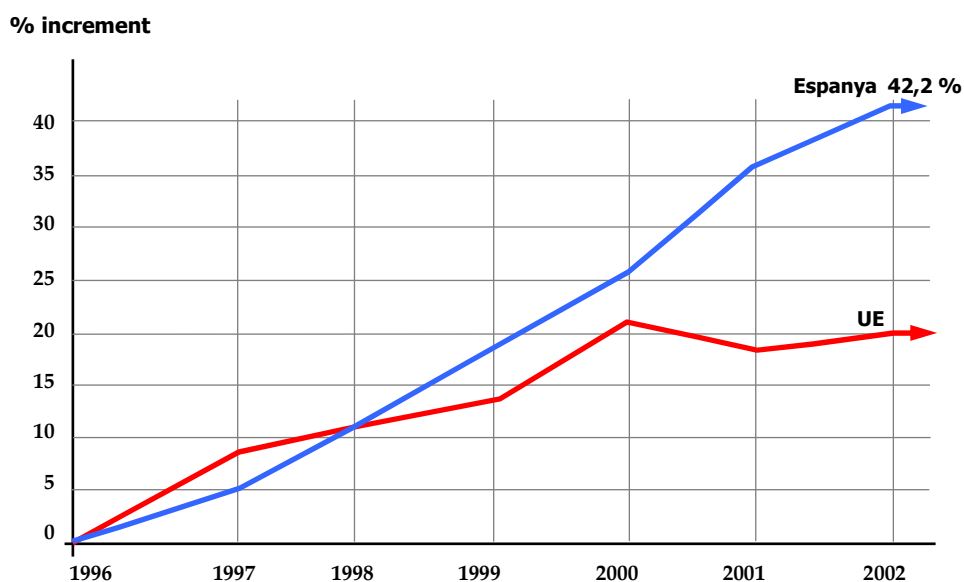


Font: Base de dades - FAO Statistics

Figura I.1: Producció de paper i cartró (tones) a Espanya

És especialment remarcable el creixement experimentat a partir de l'any 1998, tot i el temor que hi havia per la possible incidència de les noves tecnologies sobre la impressió en paper i en conseqüència sobre el consum mundial de paper.

Aquest creixement experimentat a Espanya posat en context continental és àmpliament superior a la mitjana assolida al conjunt de països de la Unió Europea, il·lustrat a la Figura I.2.

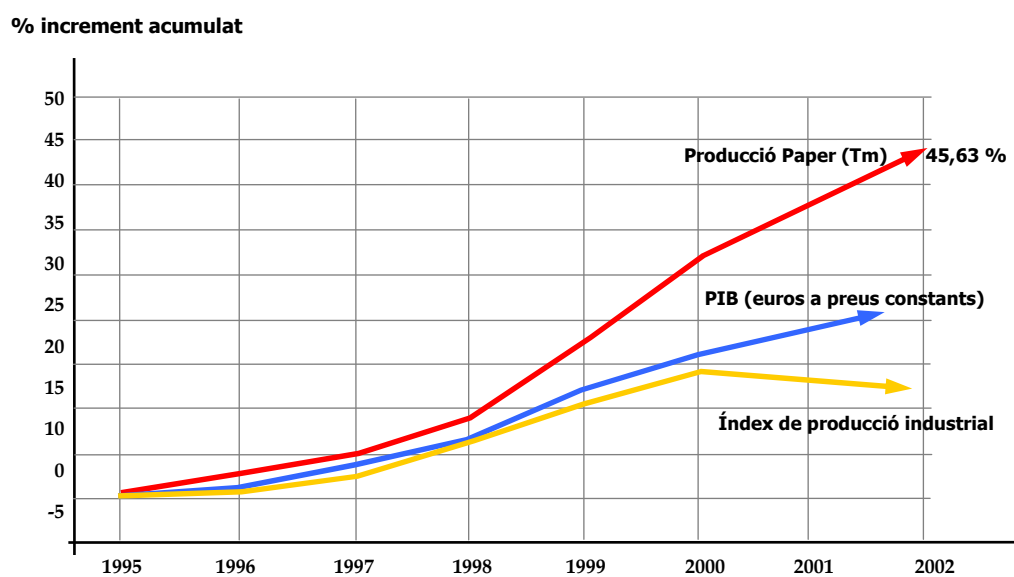


Font: ASPAPEL

Figura I.2: Creixement del sector paper a Espanya i Europa (1996-2002)

Posant en context el sector paperer en el sector industrial, observarem que la fabricació de productes paperers registrada entre els anys 1995 i 2002 a l'Estat espanyol va augmentar un 46%. Mentrestant altres indicadors econòmics o productius que serveixen de referència, com ara el Producte

Interior Brut (PIB) Espanyol va créixer un 25%, o bé l'índex de producció industrial que va créixer un 17%, tal com queda recollit a la Figura I.3.



Font: I.N.E. / ASPAPEL

Figura I.3: Creixement comparatiu del sector paper a Espanya (1995-2002)

La fabricació de paper és un sector en clar creixement. A l'Estat aquesta indústria dóna treball a uns 17.750 empleats (com a treballadors directes), i indirectament - a nivell del sector forestal/paperer - a un total de 90.000 persones. El total de fàbriques dedicades al sector paperer a l'Estat espanyol era de 147 (any 2002), 15 de cel·lulosa i 132 fàbriques de paper, concentrades bàsicament al Nord - Est de la península. Espanya és el sisè estat en producció de cel·lulosa i setè productor de paper de la UE. Alemanya, Finlàndia, Suècia i França encapçalen la llista de productors [6].

Les previsions de creixement del sector paperer són optimistes. Segons dades i estudis de l'Associació Espanyola de Fabricants de Pasta, Paper i Cartró (ASPAPPEL) el creixement de la producció de pasta i paper previst pel

període 1990-2012 és d'un 91%, on la projecció de creixement corresponent es realitza en el període comprès entre 2001 i 2012, tal i com reflexa la Figura I.4 [7].

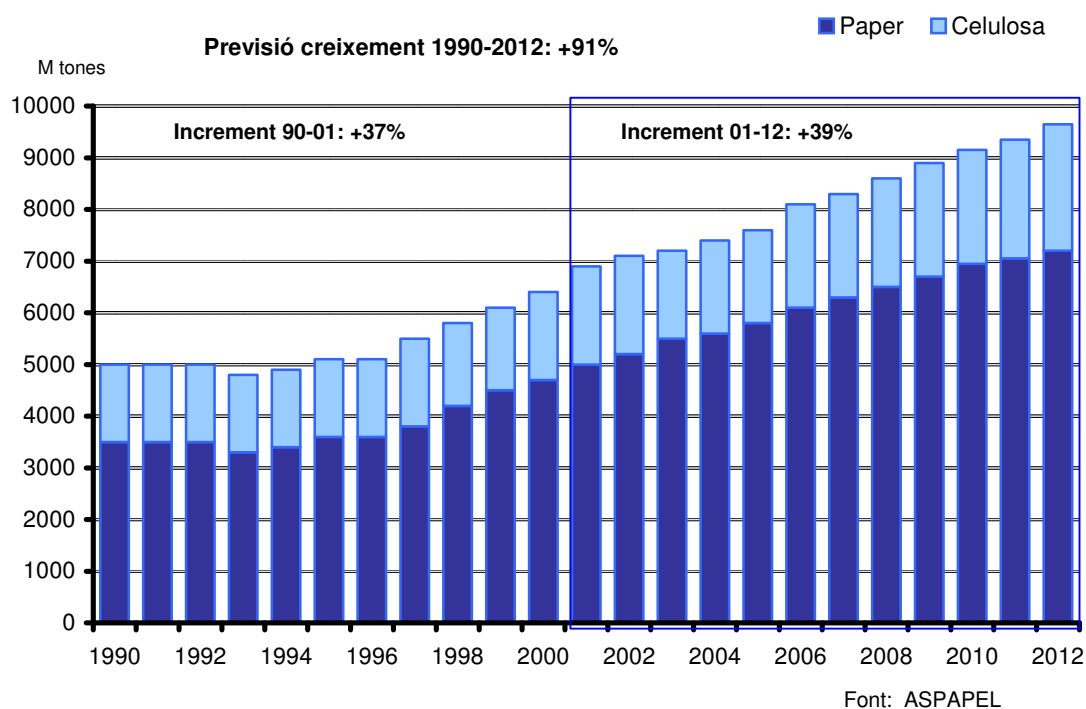


Figura I.4: Producció de pasta i paper a Espanya (1990-2012)

Respecte als aspectes ambientals, es pot parlar de la millora significativa de l'eficiència de la indústria paperera espanyola de la darrera dècada.

Com a exemple es poden destacar els descensos en emissions atmosfèriques dels centres productius localitzats a Espanya, on els darrers 4 anys el descens de les emissions de NO_x estan xifrades en un 19%, un 13% en SO₂ i un 30% en partícules sòlides. Mentrestant les emissions de CO₂ varen romandre constants.

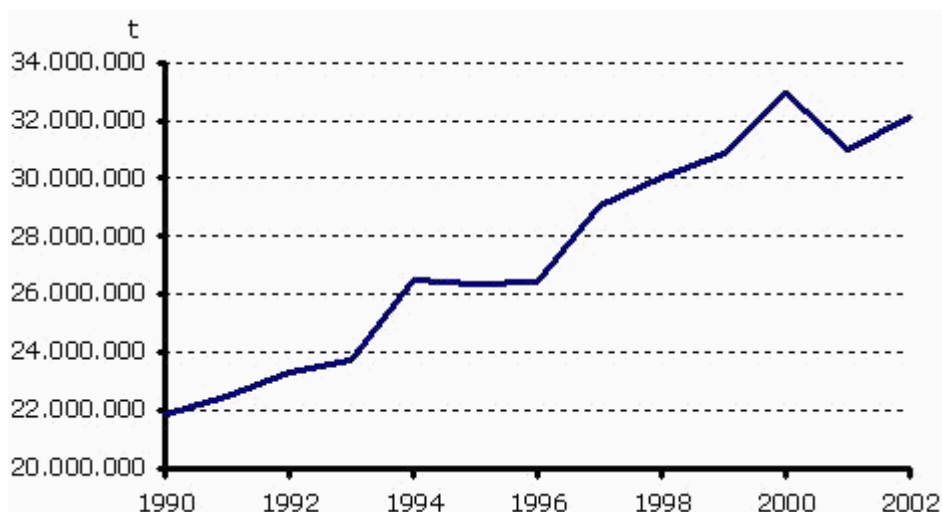
Els últims deu anys, el volum total d'aigua fresca (terme utilitzat per denominar l'aigua neta [provinent de xarxa pública, de captació superficial o subterrània], per diferenciar-la de l'aigua reutilitzada internament) utilitzada en els processos de fabricació de cel·lulosa i paper ha disminuït un 28%, tot i el creixement important que ha experimentat la producció. La reducció de consum expressada unitàriament se situaria entorn al 48% (consum d'aigua fresca per tona produïda) en la darrera dècada. En particular, el consum d'aigua fresca per tona de cel·lulosa produïda (el procés que clarament té una major demanda d'aigua) ha disminuït un 39% [6].

El desenvolupament i la implantació de tecnologies netes ha significat una reducció de la càrrega contaminant en les aigües residuals abocades d'un 29%. Aquesta millora correspon als darrers deu anys i en base als cabals totals abocats per les papereres. Durant el mateix període, però en unitats relatives (per tona de producció) la reducció experimentada arriba al 46%. Més concretament, la reducció de la DQO en termes absoluts és del 46% en la fabricació de cel·lulosa i d'un 5% aproximadament per la fabricació de paper, tot i el creixement de la producció total. En termes relatius, per tona de producte, les reduccions són del 53% en la fabricació de cel·lulosa i 30% en la fabricació de paper. La disminució dels sòlids en suspensió (SS) ha estat realment important, aconseguint un 46% de reducció en la fabricació de cel·lulosa i 52% en la de paper, en volum total; per tona les reduccions han estat del 53% i del 65% respectivament.

Paper d'impressió i escriptura d'alta qualitat

Específicament, la producció de paper de qualitat per impressió i escriptura també ha anat incrementant-se any rere any, seguint la tendència general del mercat paperer

Al paísos de la Unió Europea, el recull de dades de producció presenta una tendència de mercat amb un creixement anual bastant constant i progressiu, amb l'excepció d'una davallada l'any 2001, com reflexa la Figura I.5.

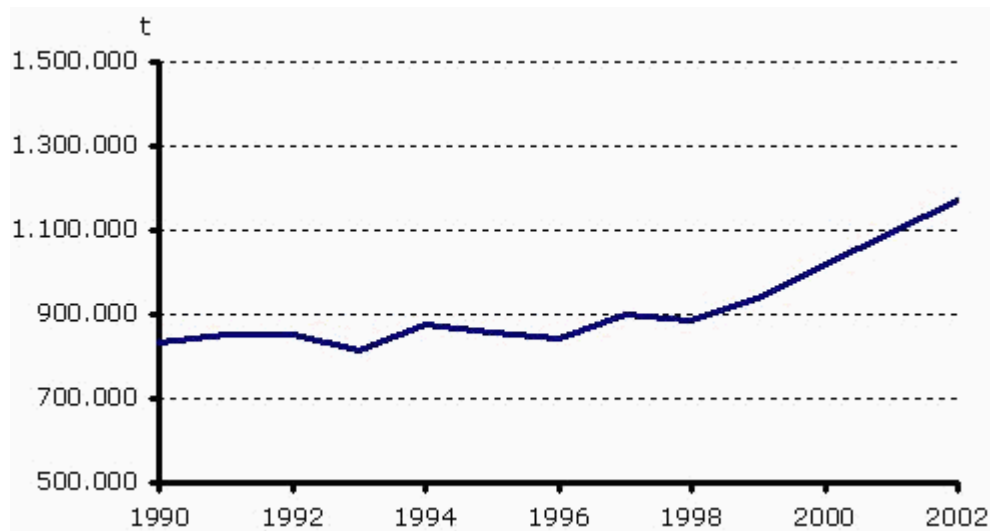


Font: FAO Statistics Database

Figura I.5: Producció de paper d'impressió i escriptura a la UE

A l'Estat espanyol el recull de dades del sector en els darrera 14 anys mostra com la producció de paper de qualitat per a la impressió i escriptura ha estat pràcticament estancada durant els anys 90, ben diferent al dinamisme que presentava el conjunt de la Unió Europea. És a partir de l'any 1998 que s'identifica un punt d'inflexió clar i aquesta especialitat papepera experimenta un creixement clar i sostingut fins a l'actualitat, com es pot comprovar a la Figura I.6.

A la llum d'aquestes dades, sembla no tenir lloc el temor que les noves tecnologies provocarien un gran impacte sobre la indústria paperera, provocant un descens en el consum de paper d'impressió i escriptura. Lluny de tot això, la incidència ha estat plenament positiva i el consum ha anat en augment any rere any eliminant les incerteses de futur.



Font: FAO Statistics Database

Figura I.6: Producció de paper d'impressió i escriptura a Espanya

I.B. MARC GENERAL DEL TREBALL

Un cop introduït de forma breu l'entorn immediat d'aquest treball: per una banda la situació general del sector industrial davant dels nous reptes, o de vegades no tant nous però encara no resolts. D'altra banda, la situació actual i del passat més recent de la indústria paperera, com a sector receptor de l'aplicació del present estudi. Per últim, la problemàtica específica que es pretén abordar en el present treball, plantejant la situació, les pressions i els reptes que ha d'afrontar la indústria, bàsicament la que centra la seva activitat amb processos químics.

El treball agafa com a referència la problemàtica, el repte que tenen aquests tipus d'empreses. El treball estarà centrat en la indústria paperera, encara

que no sigui exclusiu d'aquest sector. La metodologia aquí presentada podria adaptar-se a altres plantejaments o tipus d'indústria.

El treball no pretén abordar el conjunt de reptes plantejats, sinó que es centra en l'estalvi d'aigua i les matèries primeres a través de l'optimització del procés. Els aspectes energètics també són importants però donades les característiques climàtiques i del tipus de producció industrial, passen a tenir una consideració secundària. Així, no constitueixen el nucli de l'estudi, per bé que qualsevol resultat obtingut fruit de l'optimització aplicada ha de tenir en compte no perjudicar el balanç energètic del procés.

L'optimització de processos és un dels dominis principals en el disseny i l'anàlisi de processos industrials, caracteritzada per la seva sistemàtica destinada a millorar el disseny i el funcionament dels processos. La voluntat final és la millora de funcionament del procés, sense oblidar que també persegueix una millora des del punt de vista econòmic en l'explotació de la planta de producció. Per aconseguir aquests objectius cal satisfer unes equacions que descriuen el sistema i generalment també cal complir una sèrie de restriccions intrínseques del propi procés.

Són ja anys i dècades que el món de la ciència busca solucions amb aquest tipus de plantejaments. Habitualment les solucions trobades acaben esdevenint obsoletes o assoleixen un límit i són insuficients. El present treball pretén contribuir en l'avenç en aquest camp experimentant amb nous plantejaments que tot seguit seran desenvolupats.

REFERÈNCIES

- [1] Agència Europea del Medi Ambient. <http://www.eea.eu.int/>
- [2] Profits Leap Ahead in '99, Paper and Forest Products Industry Survey: Standard & Poor's, New York, Abril 2000.
- [3] FAO Statistics Database <http://apps.fao.org/>
- [4] CEPI (Confederation of European Paper Industries) Annual Statistics 2002 report.
- [5] IPCC Technical Paper #FCCC/TP/2003/7
- [6] ASPAPEL (Asociación Española de Fabricantes de Pasta, Papel y Cartón) Annual report 2002.
- [7] ASPAPEL “Contribución inicial del sector papelero a la reducción de las emisiones de CO₂ en España”, Febrer 2003.

CAPÍTOL II

II. OBJECTIUS

La recerca realitzada, presentada en aquest treball, s'ha centrat en el desenvolupament i l'aplicació d'una nova metodologia d'integració de processos. La metodologia està creada específicament per processos de fabricació de pasta i paper, per reduir el consum d'aigua fresca i minimitzar la pèrdua de matèria primera.

Per tal de satisfer aquest propòsit general es proposen els següents objectius particulars:

- Proposar diferents estratègies per la reducció del consum d'aigua, que al mateix temps permetin assolir una minimització de la pèrdua de matèria primera, bàsicament fibra, mitjançant l'aplicació del mètode d'optimització amb algoritmes genètics.
- Avaluar la viabilitat tècnica dels resultats obtinguts mitjançant les diferents estratègies d'optimització, a través de la simulació de procés creada.
- Demostrar la seva validesa de la metodologia proposada per optimitzar un procés existent. D'aquesta manera la metodologia proposada podrà ser utilitzada com a eina d'optimització de processos a través de la reconfiguració de circuits existents.

Per aconseguir aquests objectius el treball es divideix en diferents etapes:

- i. Definir el pla de treball, objectius i abast de l'estudi
- ii. Definir i portar a terme un pla de mostreig per tal de recollir totes les dades necessàries per tal d'establir els balanços de matèria i energia necessaris per desenvolupar la simulació informàtica. Les dades s'obtenen de la fàbrica que el grup Torraspapel té a Sant Joan les Fonts.
- iii. Dissenyar i posar en marxa la simulació informàtica amb el software de simulació Cadsim Plus, a partir de les dades obtingudes i els balanços establerts per tal de reproduir els diferents tipus de producció que realitza la fàbrica.
- iv. Validar la simulació creada. El procés de validació és crític per la utilització de la simulació en posteriors etapes, i es realitza mitjançant la comparació de les dades obtingudes per simulació amb dades reals del procés que no hagin estat utilitzades en el procés de disseny de la simulació.
- v. Realitzar l'optimització dels processos existents mitjançant mètodes informàtics i matemàtics. Adaptar la tècnica d'algoritmes genètics pel tipus de procés existents i les seves principals característiques i paràmetres.
- vi. Per últim comprovar les noves configuracions proposades fruit de l'optimització, a través de la simulació informàtica per avaluar-ne els efectes i les conseqüències.

La metodologia emprada per tal d'assolir l'optimització és la part més innovadora del present treball i constitueix la principal aportació al món de la ciència.

CAPÍTOL III

III. TANCAMENT DE CIRCUITS

III.A. INTRODUCCIÓ – VISIÓ HISTÒRICA

La fabricació de paper històricament ha estat una depredadora de recursos naturals renovables, evidentment insostenible. Els processos de fabricació a mitjans de segle eren totalment oberts, amb utilització d'aigua fresca (de pou, riu o xarxa) en tots els processos. Els consums totals podien rondar els 200 o 300 m³ d'aigua per tona de paper produïda, amb certes diferències segons l'especialitat de paper. No cal dir que els efluents eren proporcionals a aquests consums, i si es té en compte la nul·la depuració d'aigües que es practicava, tenim un clar impacte sobre el curs hídric receptor de l'abocament.

Vista la situació no és d'estranyar que apareguessin regulacions creixents en nombre i en severitat per controlar i reduir aquest mal ús de l'aigua com a recurs [1]. A aquest fet, s'hi ha d'afegir diferents aspectes econòmics, en forma de taxes per l'ús de l'aigua i per la càrrega contaminant abocada. Si bé el desenvolupament i l'aplicació de noves tecnologies per la millora del procés feia necessari una forta inversió, també s'intuïen incentius econòmics derivats de l'estalvi aconseguit amb l'aplicació de mesures i nova tecnologia.

És en aquest moment que el concepte de tancament de circuits surt a la llum i comença a tenir aplicacions al sector de la producció de pasta i paper.

III.A.1. Els primers passos: Recirculació d'aigües blanques

El primers passos cap al tancament de circuits aborden tot allò més evident dels processos existents. En primer lloc calia millorar la gestió de les aigües blanques, entenent com aigües blanques els excedents d'aigua que genera la fabricació per drenatge de l'aigua quan es forma el full de paper a partir de la suspensió fibrosa. Aquesta millora de gestió consistia en:

1. Introduir estacions de depuració d'aigua residual biològiques o fisico-químiques i biològiques, per tal de disminuir la càrrega contaminant abocada.
2. En segon lloc recircular les aigües blanques de retorn al mateix procés de fabricació.

D'aquesta manera s'aconseguia substituir un consum important d'aigua fresca, al mateix que es reduïa l'abocament i les necessitats de depuració, tant en cabal com en càrrega contaminant. La recirculació de les aigües té beneficis addicionals en forma d'estalvi de matèries primeres, permetent la recuperació fibres i additius no retinguts en la formació del full de paper.

En funció de la qualitat de les aigües disponibles, generades en diferents punts dels procés, el destí per la reutilització de l'aigua també varia [2, 3]. L'ús i consum principal és la dilució de la pasta de paper.

Com a conseqüència d'aquestes primeres mesures aplicades es pot parlar de fàbriques papereres amb un tancament parcial de circuits. L'estalvi en el consum d'aigua assolit es situava a l'entorn del 50%, on els consums es podrien situar a l'entorn dels 100 - 150 m³ per tona de paper produït.

III.A.2. Classificació segons la fase de tancament

En funció del grau i l'evolució del tancament de circuits s'estableixen diferents fases per tal de classificar els processos de fabricació. Les classificacions poden variar lleugerament segons els autors, però una de les més comunes és l'establerta l'any 1981 [4], on es defineixen 4 grans fases de tancament de circuits:

- i. Circuits totalment oberts
- ii. Circuits parcialment tancats
- iii. Circuits relativament ben tancats
- iv. Circuits ben tancats

III.A.2.1. Circuits totalment oberts

Les fàbriques amb circuits totalment oberts són típiques del procés històric de fabricació de paper. Les característiques bàsiques d'aquests circuits es recullen en la Figura III.1.

L'estructura dels circuits de procés és anterior a les recirculacions d'aigües blanques, així tots els efluent són abocats o tractats en depuradora (en el millor dels casos).

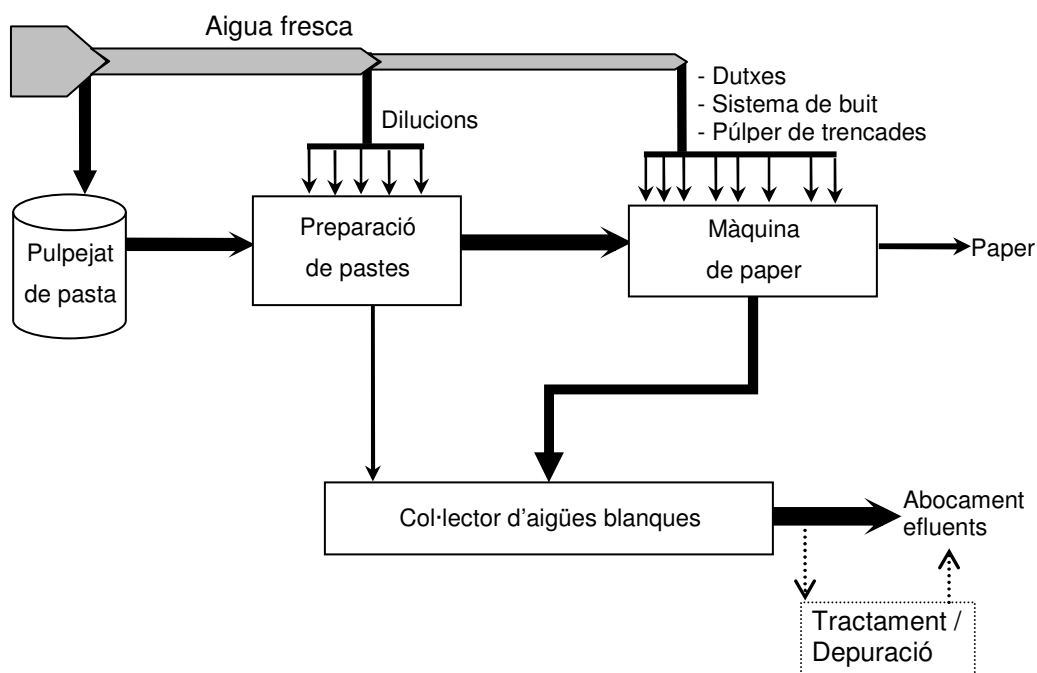


Figura III.1: Màquina de paper amb el circuits totalment oberts [4]

III.A.2.2. Circuits parcialment tancats

Amb els primers intents de reutilització de les aigües de procés, s'avançava cap a una configuració de sistemes parcialment tancats [5]. A tall d'exemple, la Figura III.2 il·lustra un sistema típic amb circuits parcialment tancats. Aquests tipus de configuracions al sud d'Europa eren típiques de mitjans de segle passat. Els consums típics ja s'havien reduït, oscil·lant entre valors de 100 a 150 m³ d'aigua per tona de paper produït. Tal i com es pot observar en la Figura III.2 la reducció de consums és deguda bàsicament a la utilització d'aigües blanques en el procés de preparació de pastes, pulpejat i dilucions de pasta. L'excés d'aigües blanques no utilitzades en la preparació de pastes, així com la resta d'aigües utilitzades són encara rebutjades i abocades (prèvia depuració en alguns casos).

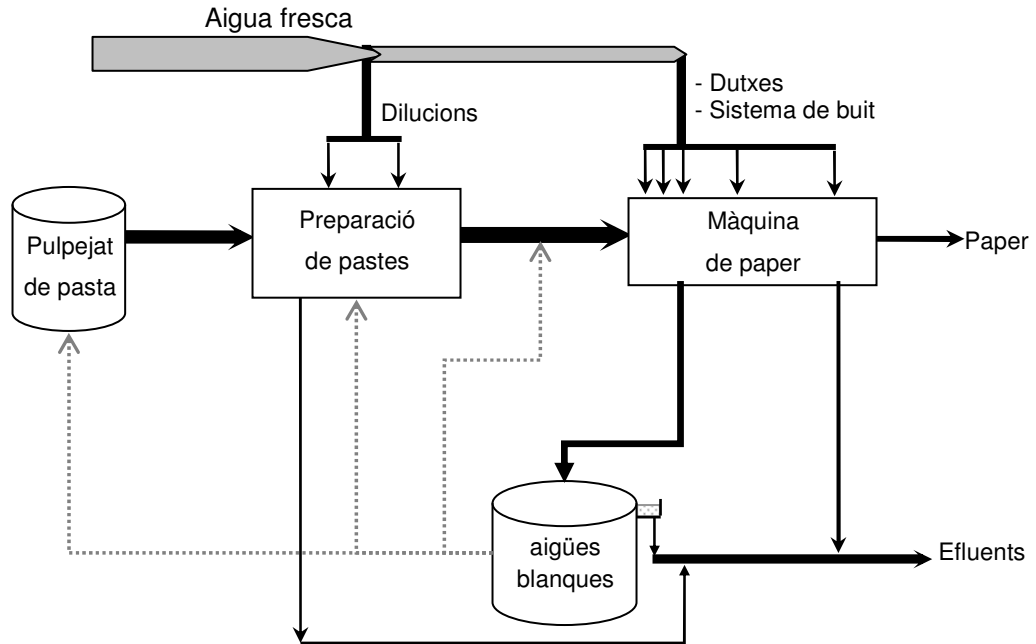


Figura III.2: Circuit de fabricació parcialment tancat

Fruit de la recirculació el sistema passa a tenir una xarxa d'aigües blanques. Aquesta xarxa està composta de tres circuits: circuit primari, secundari i terciari.

El circuit primari o cicle curt recull les aigües blanques de sota la tela de la màquina de paper i les recircula a unitats de preparació de la pasta properes a la màquina, tal com s'il·lustra esquemàticament a la Figura III.3.

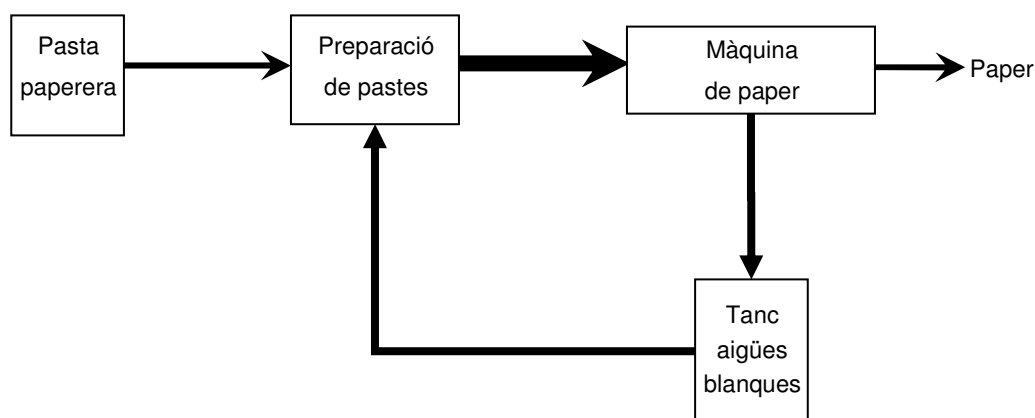


Figura III.3: Circuit primari d'aigües blanques

El circuit primari té un doble objectiu clar: Primer de tot l'estalvi d'aigua, però el més important és l'oportunitat de tornar a utilitzar la matèria primera (fibres i additius) que no ha quedat retinguda en la formació del full de paper. Al mateix temps aquesta recirculació permet mantenir millor la temperatura dels fluxos de procés, que acostuma a estar entre 40°C i 45°C, o estalviar energia en cas de necessitar escalfar l'aigua abans de ser afegida al procés.

El circuit secundari, il·lustrat a l'esquema de la Figura III.4, recull l'excés d'aigües blanques no utilitzades en el circuit primari i les retorna al procés, en aquest cas es parla de reutilització d'aigües blanques; o bé es pot sotmetre aquest excedent a un tractament per millorar-ne la qualitat abans de retornar les aigües al procés. En aquest darrer cas seria més correcte parlar de reciclatge de les aigües. El tractament a què són sotmeses les aigües blanques permet recuperar gran part de les fibres presents, per aquest motiu sovint s'anomena també recuperador de fibres a la unitat de tractament.

Les aigües que formen part del circuit secundari poden ser utilitzades posteriorment en altres parts de la fàbrica, tant dins el procés productiu com fora del procés estrictament productiu (p.e.: neteges, dilucions).

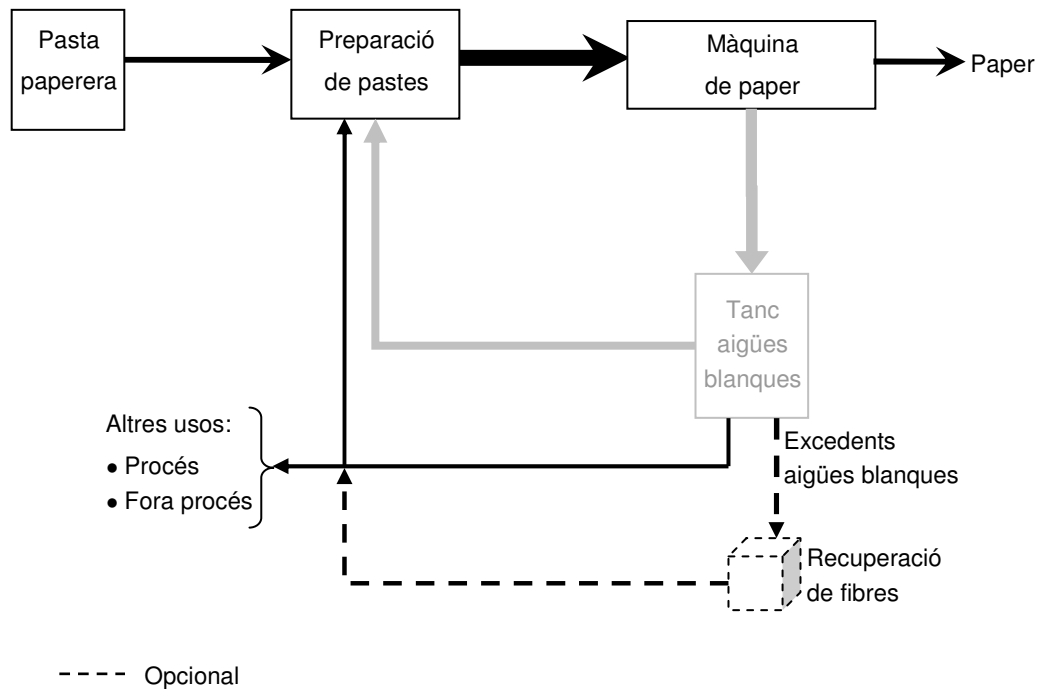


Figura III.4: Circuit secundari d'aigües blanques

Existeix encara un tercer circuit en la xarxa d'aigües blanques. El circuit terciari, il·lustrat esquemàticament a la Figura III.5, té la missió de recollir tots els excedents d'aigua, així com els rebuigs generats durant el procés productiu, i conduir-los a l'estació depuradora d'efluents.

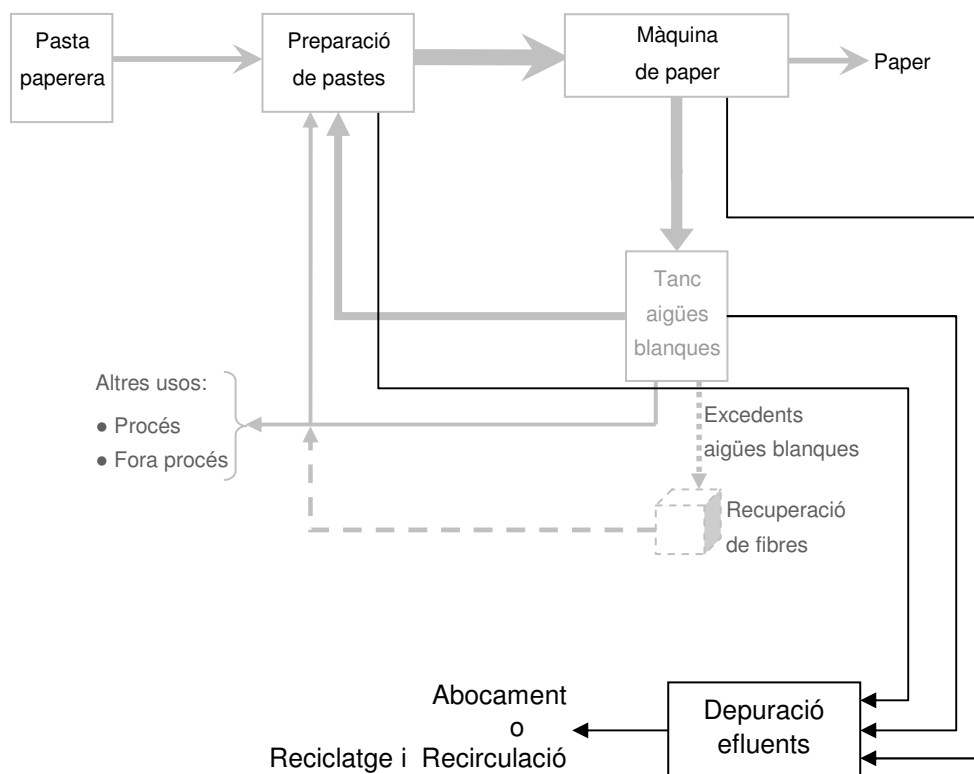


Figura III.5: Circuit terciari d'aigües blanques

III.A.2.2.1 Avantatges i inconvenients experimentats amb el tancament de circuits

Parlant d'avantatges generats és obvi que l'estalvi en matèries primeres i en consum d'aigua és primordial i evident, però el fet de recircular les aigües de procés altera tota la fabricació. Els efectes que provoca estrictament la recirculació sobre el procés tenen aspectes positius i negatius, encara que inicialment els negatius són molt superiors. La identificació d'aquests problemes derivats de tancament de circuits varen provocar una revisió dels plantejaments de tancament i l'aplicació de mesures complementàries per tal d'eliminar o minimitzar els efectes perniciosos.

La Taula III.1 resumeix els efectes positius i negatius que provoca el tancament de circuits en la xarxa d'aigües blanques i en el conjunt del procés productiu, dividida en els efectes provocats per la variació de concentració de sòlids i per la variació de temperatura [6 -14].

Taula III.1: Efectes del tancament de circuits i la recirculació d'aigües sobre el sistema d'aigües blanques i el procés productiu

Avantatges	Inconvenients
Alteració del sistema d'aigües blanques per l'augment de la concentració de sòlids	
Millora de la retenció	Reducció de la qualitat del paper
Biodegradabilitat dels efluent	Reducció de l'eficiència de la màquina de paper
	Problemes de deposicions:
	Stickies i white pitch
	Dipòsits inorgànics i orgànics
	Incrustacions i dipòsits d'alum
	Pitjor drenatge en la formació del full de paper
	Problemes de corrosió
	Problemes d'erosió/abració
	Major creixement de microorganismes
	Augment de pudors
	Augment de la coloració del paper
	Menor eficiència dels additius químics
	Augment requeriments en tractament de residus
	Major tendència a la formació d'espumes
	Problemes d'obturació
Efectes de l'augment de temperatura	
Reducció de la formació "slime" (depèn temperatura final)	Alteració i augment de la cinètica de les reaccions
Millora del drenatge	Proliferació de microorganismes
Augment de la producció	Increment de les espumes
	Alteració del pre-estucat amb midó

Per reduir les alteracions sobre el procés i sobre la dinàmica del sistema, tot utilitzant aigua de millor qualitat en punts crítics del sistema, es desenvoluparen diverses tecnologies de tractament d'efluents. Les aigües blanques un cop tractades per extreure'n gran part de les fibres i matèries en suspensió passen a formar part del circuit secundari i reciclades a unitats amb demanda d'aigua de bona qualitat [15]. Els tractaments més habituals [16 - 17] són els de filtració (p.e. filtres de disc) molt per davant d'altres tractaments com la flotació o la coagulació, actualment poc utilitzats.

Les aigües de procés passen a estar classificades en dos grans grups, les aigües blanques i les aigües filtrades o tractades, aquestes darreres amb diferents qualitats en funció del tractament rebut. També passen a diferenciar-se els tipus de recirculacions, així s'anomenen aigües reutilitzades aquells fluxos d'aigües blanques que són recirculades directament, sense tractament, a altres punts del procés i aigües reciclades aquells fluxos d'aigües blanques que són tractats per poder ser utilitzades [18].

III.A.2.3. Circuits relativament ben tancats

L'aplicació de noves tecnologies per la millora de l'eficiència interna del procés i la millora del disseny dels processos foren els plantejaments inicials en tancament de circuits. Però la millora no es podia aturar aquí, a partir de la dècada del 1970 es planteja altres reptes de millora en el tancament amb l'objectiu d'aconseguir una fàbrica amb efluent zero, sense abocaments. Una paperera amb efluent zero no implica al mateix temps una supressió del consum d'aigua, sempre existeix una entrada mínima d'aigua fresca per compensar pèrdues, evaporacions i la petita fracció d'aigua que incorpora el producte final.

El següent repte era minimitzar els consums d'aigua fora del procés principal, bàsicament aigua destinada a la refrigeració, l'aigua per segellar bombes i l'aigua dels anells líquids de les bombes de buit de la màquina de paper. Es tracta d'aigües que no entren en contacte amb les fibres i a priori, més fàcils de reutilitzar.

L'esquema tipus d'un procés en la fase de circuits relativament ben tancats seria el representat a la Figura III.6.

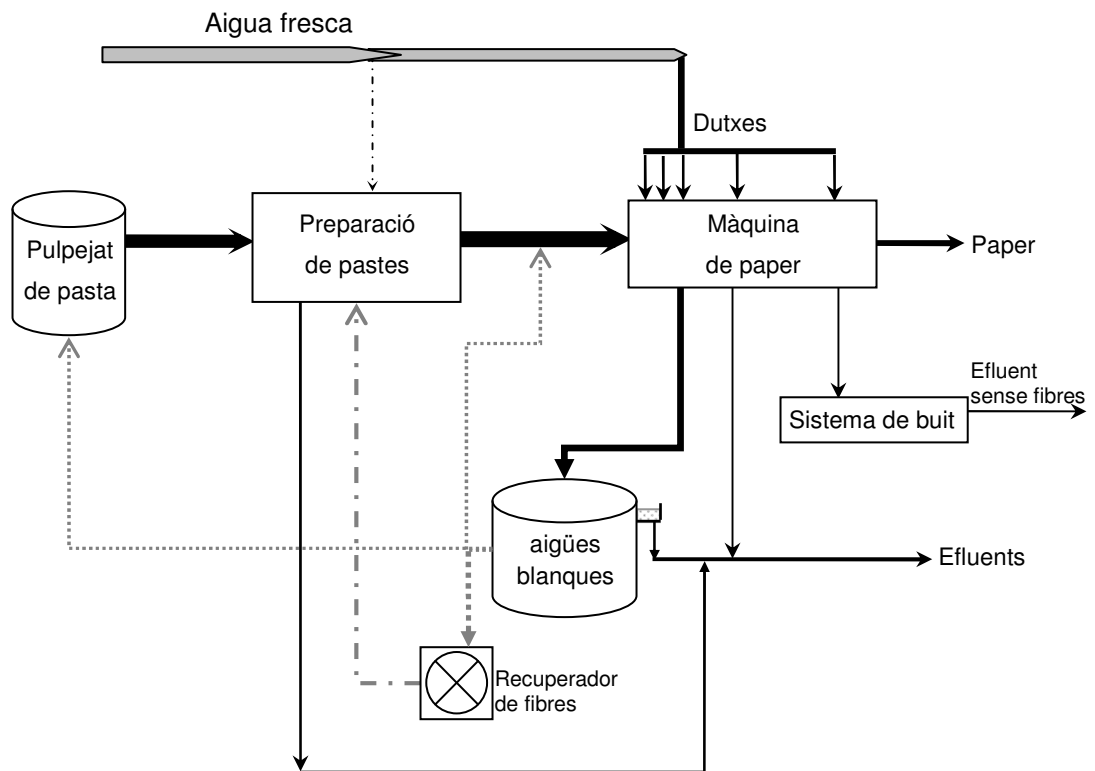


Figura III.6: Circuit de fabricació relativament ben tancat

El progressiu tancament dels circuits induí la generació d'idees per tal d'assolir sistemes tancats tant per la refrigeració com pels sistemes de bombes, basats en el principi de la substitució de l'aigua fresca per aigua de procés convenientment tractada [19-24], com el representat a la Figura III.7.

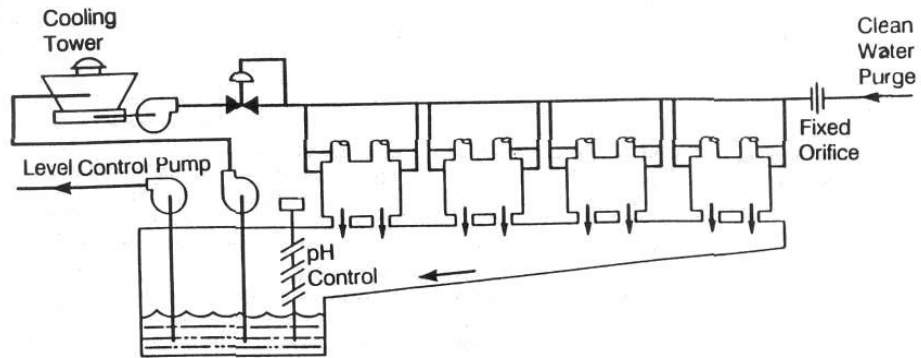


Figura III.7: Circuit tancat d'aigua amb torre de refrigeració [26]

En d'altres casos s'utilitzaven sistemes d'aigua en cascada segons els nivell d'exigència de qualitat de la demanda [19, 25, 26], com a l'exemple de la Figura III.8 d'un circuit d'aigua en cascada per les bombes de buit.

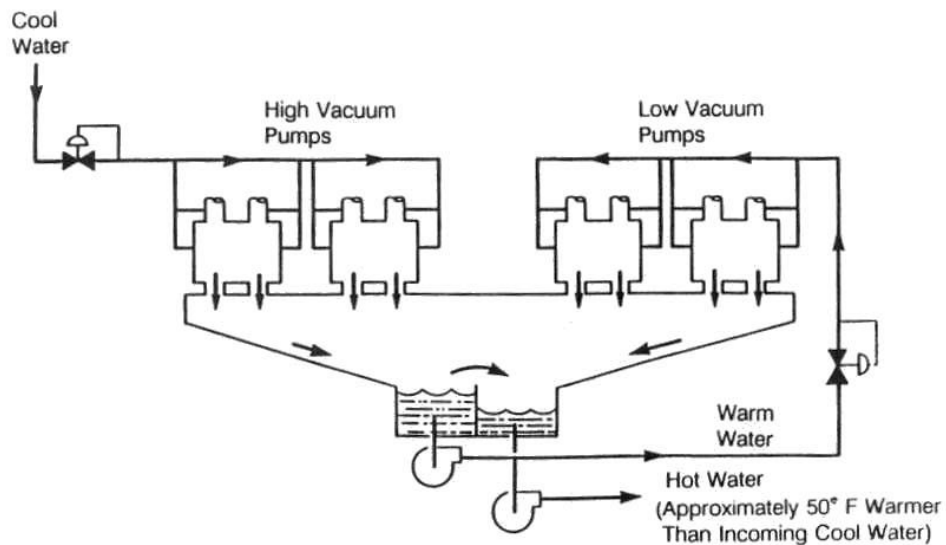


Figura III.8: Sistema d'aigua en cascada per les bombes de buit [26]

Com la gran majoria de decisions preses en enginyeria de processos l'estalvi d'aigua per tancament de circuits comporta efectes col·laterals no desitjats.

En el cas dels circuits tancats de refrigeració i circuits tancats pel segellat amb aigua de bombes, el problema és lògicament l'augment de temperatura del fluid. Aquest fet és especialment preocupant en el cas de les bombes de buit, on l'augment de temperatura causa una reducció de la capacitat de les bombes, arribant a límits d'inoperabilitat de les mateixes [19, 20].

Arribats a aquest punt les solucions més evidents en tancament de circuits ja estaven concebudes. Els avenços assolits cal qualificar-los de remarcables, aconseguint reduccions de fins el 80% dels efluents abocats, sense que la producció en surti perjudicada [25]. Calia però anar més enllà i plantejar-se alternatives que permetessin seguir millorant en l'estalvi d'aigua i a la vegada no comprometre el funcionament del procés productiu i la qualitat del producte final. Un mercat tan competitiu com la fabricació de paper, en vies de globalització en aquells moments, exigia un esforç suplementari per mantenir la competitivitat.

III.A.2.4. Circuits ben tancats

La darrera etapa del tancament de circuits pretén assolir un tancament total o gairebé total dels processos. Actualment els estudis que es porten a terme en aquest camp s'inclouen en aquesta etapa, on l'enginyeria de processos entra de ple en el redisseny dels circuits per assolir els objectius fixats. La integració de processos, protagonista del següent capítol del present treball, capitalitza els esforços en aquest terreny.

L'objectiu pretès amb l'aplicació de tècniques d'integració de processos és concebre una nova instal·lació o millorar una d'existente de manera conjunta, enlloc d'una simple agregació d'optimitzacions individuals d'unitats. Són multitud els casos i les aplicacions d'eines i tècniques d'integració de

processos per millorar l'eficiència energètica, la reducció d'efluents líquids o de residus en general.

La configuració bàsica d'un circuit ben tancat no difereix gaire de la configuració de la fase anteriorment descrita (circuit relativament ben tancat). La millora per aconseguir aquest major grau de tancament rau en la configuració interna, l'ordre i la distribució dels fluxos i les unitats de procés.

Es poden trobar referències sobre exemples d'estudis d'integració d'una fàbrica de paper amb un alt grau de tancament de circuits [27], com també estudis específics de millora d'additius utilitzats per facilitar el tancament i minimitzar els efectes perjudicials sobre la producció [28].

El fet de redissenyar els circuits no implica que es deixi de banda la recerca i la incorporació de millores en la tecnologia i eficiència dels equips de procés, es tracta de processos paral·lels i complementaris. Les millores s'han centrat en els tractaments per les aigües blanques, en unitats de procés més eficients, o bé en reptes majors com ara la utilització d'aigües filtrades per minimitzar la utilització d'aigua fresca en zones crítiques com la màquina de paper (p.e. ruixadors de màquina) [29, 30].

Una eina bàsica per aconseguir bons resultats en l'aplicació d'aquestes tècniques i metodologies és la simulació informàtica. Una simulació convenient dissenyada i validada és un fidel reflex del comportament del procés productiu. Qualsevol canvi de configuració o millora pot ser aplicat a la simulació i obtenir a priori resultats fiables sobre les conseqüències del canvi aplicat. La comoditat i l'estalvi en riscos i hores de treball per realitzar comprovacions és evident. La rapidesa que permet provar multitud de configuracions al dia, la capacitat de preveure acumulacions de contaminants o de detectar colls d'ampolla en el procés serien altres avantatges importants que aporta la simulació; amb un últim afegit de caire didàctic sobre el personal de l'empresa, tan tècnics com operaris. Existeixen

diverses referències sobre la importància de la utilització i aplicació de simuladors en l'obtenció de processos amb nivell zero d'efluents o alt grau de tancament [31-34].

A l'hora de dissenyar sistemes i processos tradicionalment s'han diferenciat dos plantejaments de base. El primer plantejament és l'anomenat conceptual basat en el coneixement dels processos. El segon es basa en la programació matemàtica, permetent un grau menor de coneixement dels processos al tractar-se de mètodes numèrics que utilitzen la capacitat de càlcul dels computadors.

El corrent conceptual en la integració de processos s'inicia amb la concepció i aplicació de mètodes de millora de l'eficiència energètica, com són el mètode d'anàlisi de pinch, a través de la tècnica de corbes compostes. Posteriorment el mètode s'amplia i es millora amb la creació del mètode de pinçament aplicat als fluxos de massa.

El segon plantejament basat en la programació matemàtica introdueix conceptes com la superestructura del procés [35], o les fonts i demandes internes [36]. La intenció és aprofitar l'experiència i el coneixement assolits en aquest camp i aplicar noves tècniques, fins al moment alienes, per tal assolir una millora.

Els conceptes citats de fonts i demandes d'aigua del procés són la base de la creació d'una superestructura d'una xarxa d'intercanvi de massa. En el cas d'estudis aplicats a la indústria poden ser útils tan per l'anàlisi de processos de fabricació, de preparació de pastes o d'aigües blanques generades. Els estudis realitzats consisteixen bàsicament en l'aplicació del concepte de fonts i demandes en una configuració bàsica existent i posteriorment resolta mitjançant la programació lineal [36].

El mètode d'algoritmes genètics, seguint la línia d'altres especialitats de la enginyeria i la indústria, distingeix el que és la configuració del procés del funcionament del mateix. Per aquest fet i per la necessitat de disposar d'un mètode robust que permeti tractar problemes de naturalesa altament combinatòria en un espai ampli de possibles solucions, la utilització d'algoritmes genètics és molt adequat.

REFERÈNCIES

- [1] Inman B. "Environmental pressure - a mill perspective" Paper Technology - Environmental pressure, pp. 10-13 (1995).
- [2] Hanna M., Reeser D.M. "Water quality impacts on manufacturing high brightness newsprint paper" TAPPI Proceedings 1989 Environmental Conference, pp. 239-241 (1989).
- [3] Korbas G., Kasper J. "Water treatment considerations for pulp & paper mill boilers" TAPPI Proceedings 1989 Environmental Conference, pp. 231-237 (1989).
- [4] Wahren D., Davis E. "Conservation of Water and energy in paper mills" 2nd World congress of chemical engineers, Canada (1981).
- [5] Panchapakesan B. "White water reuse and savealls" Pulp and Paper Manufacture, vol.6, Stock Preparation, chapter IX, Edited by TAPPI Joint Textbook Committee of the Paper Industry, TAPPI Press, Atlanta, pp. 173-186 (1992).
- [6] Heller P., Scott W.E., Springer A.M. "Potential operational problems under conditions of complete water reuse" TAPPI Journal, (1979).
- [7] Joore L., Coenen E.L.J., Verstraeten E.A.M., Homburg K.C., De Croon K.S. "Links between process qualities and product properties. an integral approach to water management. In papermaking" COST Conference 'Towards ZLE in Fibre supply for papermaking' 1999, Paper Technology (2000).
- [8] Wiseman N. "COST Action E14 - Towards Zero Liquid Effluent in papermaking" Investigación y Técnica del Papel, nº 142 (1999).
- [9] Scott W.E. "A survey of the various contaminants present in recycled wastepaper white water systems" From fiber to finished product, TAPPI Press, pp. 121-129 (1989).

- [10] Byers D. "Proper system design boosts paper machine wastewater recycling" *Pulp and Paper*, pp. 83 (1989).
- [11] Cesek B., Milichovsky M. "Dynamics of Papermaking white water recirculation" *Cellulose Chemistry and Technology* vol.33, pp. 333-347, (1999).
- [12] Curley J., Jones B., Wiseman N. "Closing the loop - Reducing the reliance on fresh water and minimising drain losses" 1999 International Environmental Conference, TAPPI Proceedings pp. 995 (1999).
- [13] Geller A., Gottsching L. "Closing water systems completely in the Federal Republic of Germany" *TAPPI Journal*, vol. 65.9, pp. 97 (1982).
- [14] Pichon M., Muratore E., Rameau J.J. "Circuits fermés et corrosion en papeterie" *ATIP*, vol. 40. 1, pp. 21-29 (1986).
- [15] Walter J. "Filtering recycled liquids in the paper mill" *Appita Journal*, vol. 45(5), pp. 296-300 (1992).
- [16] Brabyn N. et al. "Technical performance evaluation of treatment processes for the recycling of paper machine wastewater" *Paper Southern Africa*, pp. 26-35 (1985).
- [17] Walter J. "Filters aid in water use/reuse for mills 'Closing up the loop'" *Pulp and Paper*, (1990).
- [18] Wang Y.P., Smith R. "Wastewater minimization" *Chemical Engineering Science* 49, pp. 981-1006 (1994).
- [19] Cunningham, N. "Paper machine vacuum systems", The Nash Engineering Company, Norwalk (1976).
- [20] Springer AM, Ortega RG "An analysis of the potencial consequences of minimizing vacuum pump seal water discharge" *Tappi Journal* vol.64(2), pp. 67-70 (1981).

- [21] Jonsson, B.M. "Advanced water recycling system required for new South African Mill" Pulp Paper 58(12) (1984).
- [22] Schirtzinger, M.M. "A paper mill water treatment and reuse system for zero discharge" Proceedings, 1979 Industrial waste conference, Purdue University (1979).
- [23] Reeser, D.M. "A survey regarding the reuse of water or the restriction of fresh water flow for paper machine vacuum water pumps" Proceedings 1998 TAPPI environmental conference (1998).
- [24] Jonsson B.M., "Advanced Water Recycling System, Trends and Developments in Papermaking", Miller Freeman Publications, pp. 60-64 (1985).
- [25] Courtney S. "Water system closure" Tappi Journal vol.62(10), pp. 47-50 (1979).
- [26] Nelson JM "The vacuum system. Its contribution to machine efficiency" Tappi Journal vol. 66(6), pp. 63-66 (1983).
- [27] Asselman T., Paris J. "Fermeture des réseaux d'eaux de procédé dans une usine intégrée de papier journal: étude de cas" Revue ATIP, vol. 52(1), pp. 34-40 (1998).
- [28] Bourassa C, Diamond M., Sain M., Daneault C. "Mill system closure and trash catching porous fillers in papermaking" Tappi Journal Vol.2 (2), pp. 14-18 (2003).
- [29] Morley M. "Closing backwater systems through shower technology" Paper technology, pp. 41-43 (1990).
- [30] Bolton JA "System approach to reusing white water on paper machines" TAPPI Papermakers Conference, TAPPI Press, pp. 363-366 (1995).
- [31] Klinker R. "Successful implementation of a zero discharge program" Tappi Journal Vol.79 (1), pp. 97-102 (1996).

- [32] Rousseau S. "Using dynamic simulator to achieve zero effluent" PIMA's Papermaker journal, October 1997, pp. 45-49 (1997).
- [33] Melton A., Haynes A. "Process simulation as a tool for closing water loops" Towards ZLE in fiber supply for papermaking Conference (1999).
- [34] Panchapakesan B. "Introduction to process simulation in pulp & paper industry capital effectiveness and design" Proceedings of 2000 TAPPI Engineering Conference (2000).
- [35] Papalexandri, K.P., Pistikopoulos, E.N., Floudas, C. A. "Mass exchange networks for waste minimisation: a simultaneous approach" Transactions IChemE, vol. 72, pp. 279–294 (1994).
- [36] Jacob J., Kaibe H., Couderc F., Paris J. "Water network analysis in pulp and paper processes by pinch and linear programming techniques" Chemical engineering communication vol. 189, pp. 184-206 (2002).

CAPÍTOL IV

IV. INTEGRACIÓ DE PROCESSOS

IV.A. INTRODUCCIÓ

Els processos productius industrials poden arribar a ser molt complexos, amb multitud d'interconnexions entre unitats, equipaments i operacions, conformant un sistema de producció.

El terme integració de processos defineix un tipus d'anàlisi d'aquests sistemes de producció, partint d'una visió analítica per estudiar les relacions i les connexions entre les diferents operacions i sistemes que componen el procés [1]. Així considerant les diferents interaccions i interdependències entre diferents parts del procés, es poden aconseguir millores generals a través d'accions localitzades.

Més específicament el terme integració de processos respon a un conjunt de tècniques analítiques, metodologies, algorismes i tècniques de matemàtica aplicada que tenen per objectiu optimitzar un sistema de dimensions considerables. Per tal efecte s'utilitzen des de simples balanços de matèria i/o energia, a tècniques més complexes com l'anàlisi de pinch, l'anàlisi de xarxes d'aigua o el tancament de circuits; fins a l'aplicació conjunta de la matemàtica i la informàtica per dotar de major capacitat d'anàlisi i càlcul les tècniques emprades.

Un clar exemple seria la concepció d'una nova instal·lació industrial o la millora d'una existent de manera global, per oposició a l'agregació d'optimitzacions individuals d'unitats. Així la necessitat d'assolir un aprofitament òptim de recursos com l'energia, l'aigua i les matèries primeres,

amb una finalitat clara de reduir costos i els impactes sobre el medi, ha impulsat un progressiu desenvolupament destinades a fer més eficients les operacions en plantes industrials.

IV.B. TÈCNIQUES D'INTEGRACIÓ DE PROCESSOS

La recerca en integració de processos es remunta a finals de la dècada de 1970. Inicialment el principal objectiu era l'estalvi energètic en processos de producció industrials. Els primers avenços remarcables foren en el desenvolupament de mètodes sistemàtics per tal de dissenyar xarxes d'intercanviadors de calor, basats en la llei de la termodinàmica [2].

Des d'un inici la tècnica amb major acceptació i aplicació, i una de la més conegudes encara, en integració de processos és l'anàlisi de "pinch" tèrmic (*thermal pinch*) [3], que en català podríem traduir com a anàlisi de pinçament tèrmic. Aquesta eina d'anàlisi inclou una tècnica bàsica per a l'anàlisi anomenada tècnica de corbes compostes (*composite curves*) [4].

Les tecnologies d'integració de processos per millorar l'eficiència energètica han estat aplicades de manera àmplia i nombrosa arreu del món en diversos tipus d'indústria, començant per la petroliera o petroquímica, passant per la fabricació d'acer, fins a les indústries agroalimentàries o papereres. El benefici final de l'aplicació d'aquestes tecnologies fou, i continua essent, la reducció de costos derivats del consum energètic però també un aspecte menys evident com és la eliminació dels colls d'ampolla (*debottlenecking*). En processos on es succeeixen diferents operacions unitàries es formen inevitablement colls d'ampolla que limiten el ritme de producció i que esdevenen objectius essencials en la integració de processos, amb l'interès d'eliminar-los o bé minimitzar-los.

Posteriorment s'anà ampliant progressivament l'abast i la varietat de tècniques en la integració de processos, fins que avui en dia, es pot considerar com un conjunt de tècniques molt ampli dins l'enginyeria de processos i el disseny de processos. En primer lloc, la tendència fou la millora en la integració de processos a través de la fusió de les dues corrents existents: la basada en la termodinàmica i la basada en la programació matemàtica. La combinació de les filosofies ampliava el camp i els mètodes disponibles. Aquest fet va fer evolucionar la integració de processos i el seu abast, deixant l'exclusivitat d'estudis d'eficiència energètica dels inicis per passar a cobrir bàsicament quatre grans àrees [5]:

- La utilització eficient de matèries primeres
- L'eficiència energètica
- La reducció d'emissions (en sentit ampli: tant emissions atmosfèriques, efluents líquids o residus sòlids)
- La millora del procés industrial, mitjançant l'aprofitament dels recursos i les operacions internes

IV.B.1. Mètode d'anàlisi de pinçament (pinch)

L'anàlisi de pinçament és un mètode utilitzat per l'estudi de l'ús d'energia que realitza una planta de producció o una secció de la planta, i al mateix temps usat per dissenyar sistemes de producció més eficients energèticament parlant. Es tracta d'una tècnica rigorosa que avalua els efectes potencials d'un disseny alternatiu de les xarxes d'intercanviadors de calor [1]. Estudis basats en aquest mètode han estat aplicats en casos amb processos existents aconseguint millores d'entre el 30% i 50% d'estalvi d'energia [6 - 9].

La teoria del pinçament tèrmic per tal d'optimitzar xarxes d'intercanviadors de calor es basa en els principis de la termodinàmica. El pinch tèrmic fa un anàlisi sistemàtic del procés, identificant els tres tipus de fluxos bàsics existents en una planta productiva: els fluxos calents (que requereixen refrigeració), els fluxos freds (que necessiten calor) i les anomenades utilitats o serveis (vapor, refrigerant, etc.).

Cada flux del procés està definit per la seva temperatura inicial (T_i), la temperatura final desitjada (T_f), i el flux tèrmic (CP) que és el producte de la capacitat calorífica específica (C_p) i el cabal màssic (F).

Mitjançant la construcció de les corbes compostes, calenta i freda, s'arriba a deduir els requeriments mínims de refrigeració i escalfament del procés. La Figura IV.1 mostra com aquesta tècnica permet determinar i reflexar en una sola gràfica les necessitats de refrigeració i escalfament del procés.

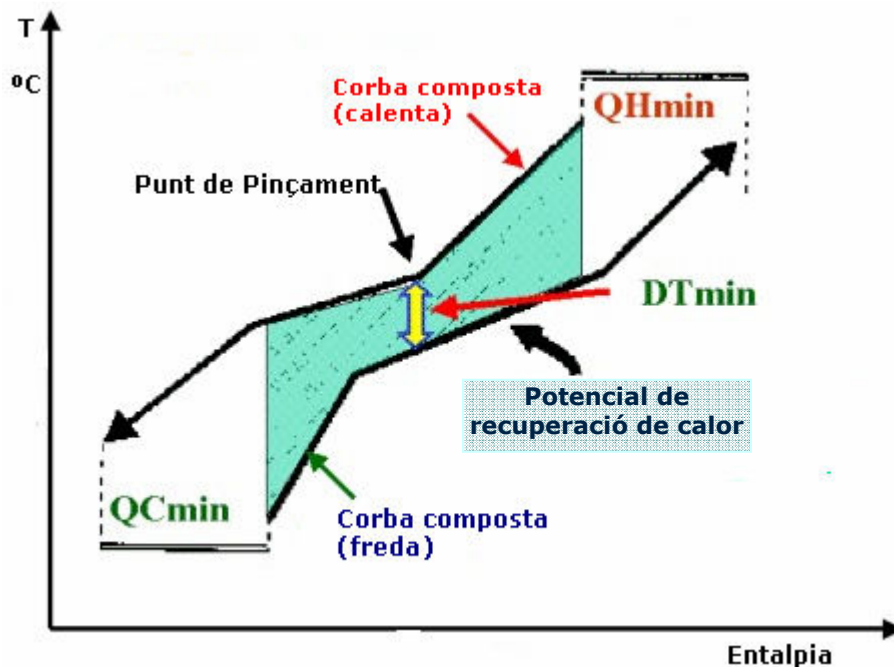


Figura IV.1: Corbes compostes

El mètode de pinçament presenta una metodologia simple per tal de realitzar anàlisis sistemàtics de processos químics, i dels serveis complementaris als processos (entenguï's necessitats de calor i/o fred). En base a la primera llei de la termodinàmica es calcula el diferencial d'entalpia (dH) dels fluxos que circulen per un intercanviador de calor. La segona llei de la termodinàmica determina la direcció del flux de calor. Així, la calor només pot anar del flux fred al més calent. D'aquesta manera s'evita el creuament de temperatura, on un flux calent no pot ser refredat més enllà de la temperatura del flux fred, ni el flux fred pot ser escalfat a temperatura superior a la del flux calent.

A la pràctica un flux calent només es pot refrigerar fins a una temperatura definida pel terme diferencial de temperatura (dT) mínim característic de l'intercanviador, tal i com apareix remarcat a la Figura IV.1.

La temperatura a la qual s'observa aquest diferencial de temperatura mínim del procés es localitza el punt de pinçament de les dues corbes compostes.

Mitjançant la determinació dels objectius a assolir en el procés, respecte a escalfament i refredament dels diferents fluxos de matèria, es pretén aconseguir una configuració òptima del sistema. Aquesta configuració implica canvis o novetats en els intercanvis de calor necessaris entre fluxos del sistema, o en la decisió sobre el millor emplaçament a l'hora de introduir tecnologies d'intercanvi de calor (per exemple intercanviadors o bombes de calor, unitats de cogeneració, etc.) que permeti assolir els objectius fixats.

Per assolir els objectius fixats s'han de complir unes regles bàsiques del mètode de l'anàlisi de pinçament. Un cop identificat el punt de pinçament la gràfica queda dividida en dues zones: la zona superior, per sobre el punt de pinçament, que és el pou d'energia pel seu dèficit de calor. La segona zona és la inferior, per sota del punt de pinçament, que és la font d'energia pel seu excés de calor. Les regles bàsiques a respectar per assolir els objectius fixats són:

- i. No hi pot haver cap transferència de calor que travessi el punt de pinçament.
- ii. No s'ha de subministrar calor procedent de l'exterior del procés per sota del punt de pinçament
- iii. No s'ha d'extreure calor o refredar cap flux per sobre el punt de pinçament

Qualsevol violació d'aquestes regles comportaria un augment del consum d'energia.

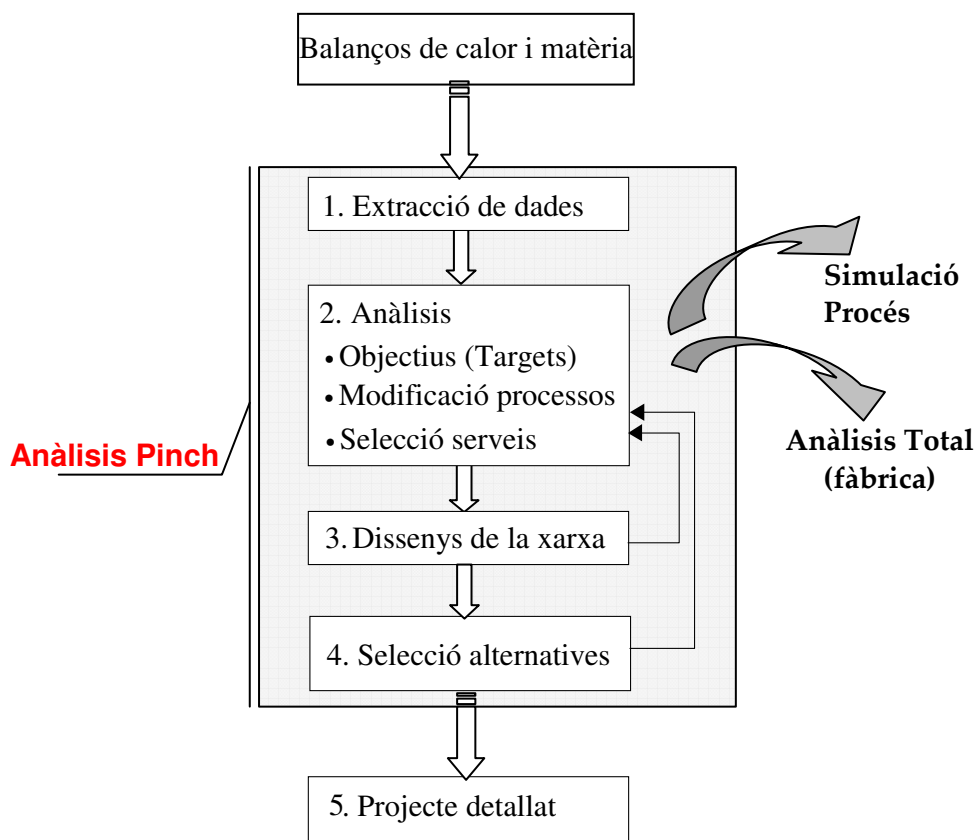


Figura IV.2: Aplicació del mètode de l'anàlisi de pinçament

Els principis bàsics del mètode, així com exemples de les aplicacions a la indústria estan recollits en diverses publicacions [7, 8] , i més específicament a la indústria paperera en d'altres cites bibliogràfiques [9 -11].

Aprofitant el gran impacte que va suposar el mètode de pinçament per l'anàlisi de l'energia, introduint una sistematització en la manera de gestionar-la, varen sorgir altres iniciatives que pretenien traslladar els principis del pinçament a altres camps.

IV.B.2. Mètode d'anàlisi de pinçament hidràulic (water pinch)

A partir de la metodologia aplicada per la integració de processos en aspectes d'energia, es deriva una variant del mètode de pinçament amb l'objectiu que la integració de processos permeti tractar els fluxos de massa. Així, mitjançant el desenvolupament de nous principis d'aquesta metodologia es planteja la resolució de problemes d'estalvi d'aigua i minimització efluents o aigües residuals. Els fonaments teòrics van ser establerts pels equips de recerca liderats Mahmoud El-Halwagi [12] i Robin Smith a l'UMIST [10].

Aquestes noves tècniques s'han anomenat de pinçament hidràulic (*water pinch* en anglès o *pincement hydraulique* en francès), i han estat aplicades amb èxit notable a una multitud d'aplicacions en processos químics industrials. L'aplicació d'aquestes tècniques suposa, en termes generals, estalvis d'aigua que varien entre el 15 i el 40% juntament amb una minimització d'efluents que oscil·la entre el 20 i el 50% [14,15].

L'adaptació de la metodologia dels sistemes tèrmics als sistemes de massa és bastant senzilla, a través de l'analogia entre el flux donant o flux ric que equival al flux calent, i entre el flux receptor o flux empobrit que equival al flux fred; sempre en aquells casos on els fluids no es barregen i únicament s'intercanvia un dels components. En aquells casos on els fluxos es barregen en cadascun dels nodes de la xarxa, perdent així la seva identitat

característica, el mètode no resulta reeixit. S'ha utilitzat aquesta tècnica especialment en sistemes de rentat, característics de la indústria petroquímica [16,17]. En el cas dels processos paperers les nombroses operacions de mescla i separació que tenen lloc impedièren l'aplicació del mètode.

Per fer front a aquest impediment en l'aplicació del mètode s'introdueixen els conceptes de demandes i fonts. Aquests termes s'utilitzen per determinar les necessitats o les cessions de massa que cal satisfer. Aquests termes són més típics de les operacions que no pas pròpiament dels fluxos [1].

De la mateixa manera que en el pinçament tèrmic, en el massic també es construeixen les corbes corresponents a les fonts i a les demandes de flux. El punt de pinçament massic serà el punt de contacte entre ambdues corbes, de manera anàloga al punt de pinçament tèrmic. Com s'observa a la Figura IV.3

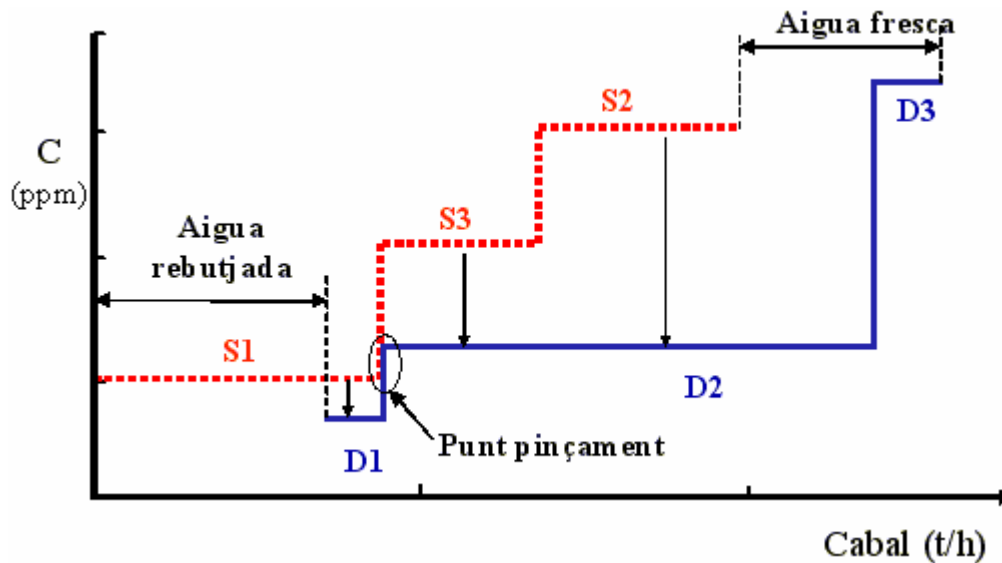


Figura IV.3: Gràfica típica de l'anàlisi de pinçament amb transferència de massa

La diferència entre la corba de fonts (línia de punts a la Figura IV.3) i la corba de demandes (línia sòlida) per sota del punt de pinçament determina l'excedent d'aigua que genera el procés. Per contra, la diferència entre corbes per sobre el punt de pinçament indica la necessitat d'aigua del procés satisfeta amb aigua fresca (aigua de pou o de xarxa). La diferència entre ambdós valors, necessitat d'aigua i excés d'aigua, determina el màxim estalvi teòric que es podrà aconseguir.

Posteriorment aquesta metodologia ha anat evolucionant i així han anat sorgint derivacions com els mètodes de pinçament de gas fluïditzat, pinçament d'hidrogen o d'oxigen [18].

El mètode de pinçament aplicat a xarxes d'aigua ha estat portat a la pràctica amb èxit en diferents tipus d'indústria com ara: la química [19 - 23], la tèxtil [24], o la indústria de la pasta y paper. En el cas que ens ocupa, les aplicacions del mètode a la indústria paperera estan descrits en un bon nombre de publicacions, on es descriu la metodologia i s'aporten casos pràctics i exemples [20, 25 - 27].

També és bastant habitual trobar publicacions on els casos presentats recullen conjuntament la metodologia i els resultats de l'aplicació d'ambdues variants del pinçament (tèrmic i hidràulic). Aquest fet es donava especialment als inicis, en les primeres aplicacions del pinçament hidràulic, com a prova de la validesa del nou mètode [28 - 30].

Amb la utilització de tècniques d'anàlisi de pinçament s'aconsegueixen avenços significatius que aporten estalvis considerables per la millora del procés. Però utilitzant únicament aquesta tècnica molts dels processos industrials ja havien assolit el seu llindar màxim en quant a estalvi. Aquest límits venen marcats tant per la pròpia metodologia com pel fet de no poder

treballar amb fluxos que continguin més d'un contaminant. Per aquest motiu s'havia de cercar i desenvolupar nous mètodes d'integració de processos que permetessin superar aquestes limitacions i obtenir millores dels processos per vies alternatives.

IV.B.3. Altres tècniques en la integració de processos

La integració de processos no es limita a les tècniques d'anàlisi de pinçament. Amb el temps s'han desenvolupat altres tècniques i mètodes en aquest camp. Paral·lelament als mètodes basats en les lleis termodinàmiques es varen desenvolupar alternatives en la integració de processos. Les limitacions observades en mètodes com l'anàlisi de pinçament van representar un estímul addicional a la recerca en aquest camp, com per exemple la limitació de treballar únicament amb un sol contaminant en els fluxos de procés [31].

El terme optimització de processos pren especial rellevància en diferents mètodes desenvolupats. Una gamma important de tècniques alternatives es basa en l'optimització de superestructures utilitzant la programació matemàtica [2, 31-33]. Les tècniques basades en la programació i els càlculs matemàtics són variades i la seva utilització, i el seu èxit, depenen en gran part del problema a tractar, del plantejament i dels objectius fixats. De forma general els problemes a resoldre acostumen a ser plantejaments d'optimització de processos. Així, les tècniques emprades amb més assiduitat acostumen a ser la programació matemàtica lineal (MILP), o la programació matemàtica no lineal (MINLP), basades en algorismes informàtics creats o modificats per tal de ser aplicats a cadascun dels problemes plantejats [34, 35]. La utilització i aplicació d'algorismes informàtics, com ara els algorismes genètics, seria un altre exemple de noves tècniques d'integració de processos en diferents camps relacionats amb la

indústria química [36 - 41], utilitzades per minimitzar consums d'aigua o energia. La seva utilització és relativament recent, amb un nombre apreciable de casos aplicats i èxits, però encara en desenvolupament i creixement. L'ús d'algoritmes genètics per a la resolució de problemes no és nou, però sí que ho és la seva aplicació en la resolució de plantejaments de minimització o optimització en processos industrials.

L'aplicació de la tècnica basada en els algoritmes genètics és la part central del present treball i com a tal, la descripció de la tècnica serà desenvolupada més extensament en el cinquè capítol i es complementarà amb un exemple pràctic d'aplicació del setè capítol.

L'ús de metodologies basades en algoritmes genètics són actualment habituals o en expansió en diferents camps de la ciència, com ara els següents [37 - 45] :

- Optimitzacions, tant en la resolució de problemes numèrics, com en problemes d'optimització combinatòria i estructural, com ara en el camp de la bioquímica i la farmàcia.
- Aprenentatge de les màquines (machine learning), per realitzar prediccions, com les meteorològiques.
- En electrònica, per la millora de la tecnologia làser.
- En la planificació exergètica residencial
- En el disseny de trajectòries de robots, xarxes de transport o xarxes de trànsit
- En economia, per a modelitzar processos econòmics innovadors o desenvolupar estratègies d'oferta en mercats econòmics.

Específicament, l'aplicació de tècniques d'integració de processos a la fabricació de pasta i paper és particularment nombrosa [15, 46 - 48]. Per les

característiques dels processos de fabricació de pasta i paper, com pels requeriments tant econòmics com ambientals, la indústria paperera és un sector clarament propici per l'aplicació de tècniques d'integració de processos.

La indústria paperera es troba, i s'ha trobat de fa anys, amb una pressió considerable per reduir tant els consums d'aigua com per minimitzar els efluents generats. Aquesta situació desemboca en una necessitat tant d'estalvi d'aigua com de millora de la gestió interna de l'aigua. D'aquí sorgeix el terme tancament de circuits que engloba aquests conceptes d'estalvi d'aigua i reducció d'efluents, mitjançant uns canvis interns en el procés que permetin aprofitar l'aigua un cop utilitzada.

Des dels seus inicis la indústria paperera arrossega la fama de gran consumidora i malbaratadora d'aigua, en un inici certament merescuda. En un principi el consum d'aigua no representava un problema, però la identificació de problemes associats a les explotacions papereres va fer sorgir una sensibilitat envers el problema. La creixent sensibilització social del segle XX ha fet que el problema persisteixi i augmenti, tot i els esforços dedicats. D'aquesta manera el cartell d'indústria amb un ús intensiu d'aigua continua vigent i en boca tant de sectors industrials com político-administratius. Així doncs és un camp idoni pel desenvolupament de la integració de processos.

En un inici la resolució dels problemes de minimització plantejats es realitzaven en base al coneixement del procés i a l'experiència del professionals que s'hi dedicaven. Però la introducció de software especialitzat per realitzar simulacions ha suposat una gran ajuda per comprendre el procés i buscar solucions. A través de la integració de processos s'ha d'aconseguir unir el coneixement i l'experiència en el procés amb la capacitat i facilitats que ofereixen les aplicacions informàtiques.

REFERÈNCIES

- [1] Labidi J., Noël G, Perrier M., Paris J. “Process analysis and energy optimization” Energy Cost Reduction in the Pulp and Paper Industry, Paprican Monograph (1999).
- [2] Smith R. “State of art in process integration” Applied thermal engineering vol. 20, pp. 1337-1345 (2000).
- [3] Linnhoff B., Hindmarsh E. “The pinch design method of heat exchanger networks” Chemical Engineering Science vol. 38, pp. 745 (1983).
- [4] Linnhoff B., Mason D.R., Wardle I. “Understanding heat exchanger networks” Computers & Chemical Engineering vol. 3, pp. 295 (1979).
- [5] Hallale N. “Trends in process integration” Chemical Engineering Progress, pp. 30-41 (2001).
- [6] Linnhoff B., Flower J. “Synthesis of heat exchanger networks: Systematic generation of Energy Optimal Networks” AIChE vol. 24, nº 4, pp. 633-642 (1978).
- [7] Savulescu L.E., Sorin M., Smith R. “Direct and indirect heat transfer in water network systems” Applied Thermal Engineering vol. 22, pp. 981-988 (2002).
- [8] Linnhoff B., et al. “Users guide on process integration for the efficient use of energy” IChemicalEngineering (1994).
- [9] Ashton, G.J., Cripps, H.R., Spriggs, D. “Application of Pinch technology to the pulp and paper industry”, Tappi Journal, August 1987, pp. 81-85 (1987).
- [10] Calloway J., Cripps H.R., Retsina T. “Pinch technology in practical kraft mill optimization” Tappi Engineering Conference (1990).

- [11] Cripps H.R., Retsina T., Reynders M.A. "The energy concept of a closed mill" AIChE Annual meeting (1993).
- [12] El-Halwagi MM., Manousiouthakis V. "Synthesis of mass-exchange networks" AIChE Journal, vol. 35(8), pp. 1233-1244 (1989).
- [13] Wang Y.P., Smith R. "Wastewater minimization" Chemical Engineering Science 49, 981-1006 (1994).
- [14] Dole V., Petela E. "Freshwater and wastewater minimization: from concepts to results" 9th International symposium on large chemical plants, Antwerp (1995).
- [15] Bédard S., Sorin M., Leroy C., "Application of process integration in water reuse projects" Pulp and Paper Canada 102(3), pp. 78-81 (2001).
- [16] Dole V., Ramchandani N., R. Tainsh Wasilewski "Make your process water pay for itself" Chemical Engineering vol. 103 (1), pp. 100 - 103 (1996).
- [17] Kumana, D. "Water conservation and waste water minimization through process integration" Procedures 5th World Congress of Chemical Engineering (1996).
- [18] Zhelev T.K., Semkov K.A. "Cleaner flue gas and energy recovery through pinch analysis" Journal of Cleaner Production vol. 2, pp. 165–170 (2004).
- [19] Hallale N., Fraser D. "Optimum design of mass exchange networks using pinch technology" Computers and Chemical Engineering, pp. 165-168 (1999).
- [20] Tan Y.L., Zainuddin A.M., Foo C.Y. "Water minimisation by pinch technology – Water cascade table minimum water and wastewater" APCCChE Proceedings (2002).

- [21] Hallale N., Fraser D. "Capital and total cost targets for mass exchange networks. Part 1: Simple capital cost models" *Computers and Chemical Engineering* vol. 23, pp. 1661-1679 (2000).
- [22] Foo C.Y. , Manan Z.A., Yunus R.M., Aziz R.A. "Synthesis of mass exchange network for batch processes - Part I: Utility targeting" *Chemical Engineering Science* 59, pp. 1009 –1026 (2004).
- [23] Zhelev T.K. "On the integrated management of industrial resources incorporating finances" *Journal of Cleaner Production*, pp. 1-6, (2004).
- [24] Ujang Z., Wong C.L, Manan Z.A. "Industrial wastewater minimization using water pinch analysis: a case study on an old textile plant" *Water Science & Technology* vol. 46 n^o 11-12, pp. 77–84 (2002).
- [25] Peng, S., Farid M., Wilks T. "Application of water pinch analysis to a dairy plant" *Model – IT II*, Eds. M.Hertog & BR MacKay, pp. 199-203 (2001).
- [26] Koufos D., Retsina T. "Water pinch application for a deink mill case study" *1999 Tappi Pulping Conference Proceedings* (1999).
- [27] Dunn R.F., Bush G.E. "Using process integration technology for CLEANER production" *Journal of Cleaner Production* vol. 9, pp. 1–23 (2001).
- [28] Cripps H. "Pinch technology for waste minimisation" *Paper technology*, pp. 33-38 (2000).
- [29] Schaareman M, Verstraeten E., Blaak R., Hooimeijer A., Chester I. "Energy and water pinch study at Parenco paper mill" *Paper technology*, pp. 47-52 (2000).
- [30] Koufos D., Retsina T. "Practical energy and water management through pinch analysis for the pulp and paper industry" *Water Science and Technology* vol. 43(2), pp. 327-332 (2001).

- [31] Doyle S. J., Smith R. "Targeting water reuse with multiple contaminants" *Trans IChemE*, Vol. 75, Part B, pp. 181-189 (1997).
- [32] Grossmann I.E. "Mixed-integer Programming Approach for the Synthesis of Integrated Process Flowsheets," *Computers and Chemical Engineering* vol. 9, pp. 463 (1985).
- [33] Marechal F., Kalitventzeff B. "Targeting the integration of multi-period utility systems for site scale process integration" *Applied thermal engineering* vol. 23, pp. 1763-1784 (2003).
- [34] Papalexandri K. P., Pistikopoulos E. N., Floudas C. A. "Mass exchange networks for waste minimisation: a simultaneous approach" *Transactions IChemE*, 72, pp. 279–294 (1994).
- [35] Linke P., Kokossis A. "Advanced process systems design technology for pollution prevention and waste treatment" *Advances in Environmental Research* 8, pp. 229-245 (2003).
- [36] Alva-Argáez A., Kokossis A. "Wastewater minimisation of industrial systems using an integrated approach" *Computers and Chemical Engineering* vol. 22, pp. S741-S744 (1998).
- [37] Holland J. "Adaptation in natural and artificial systems", MIT Press, Cambridge, Massachusetts (1975).
- [38] Goldberg D.E. "Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning" Ed. Addison Wesley Longman (1989).
- [39] Garrard A., Fraga E.S. "Mass exchange network synthesis using genetic algorithms" *Computers and Chemical Engineering* vol. 22, nº 12, pp. 1837-1850 (1998).
- [40] Yu H., Fang H., Yao P., Yuan Y. "A combined genetic algorithm/simulated annealing algorithm for large scale energy integration" *Computers and Chemical Engineering* vol. 24, pp. 2023-2035 (2000).

- [41] Prakotpol D. Srinophakun T. “GAPinch: genetic algorithm toolbox for water pinch technology” *Chemical Engineering and Processing*, vol. 43, pp. 203-217 (2004).
- [42] Goldberg D.E. “Les algorithmes génétiques” Ed. Addison Wesley Longman (1994). *
- [43] Fiszlelew A., García-Martínez R. “Generación automática de redes neuronales con ajuste de parámetros basado en algoritmos genéticos” *Revista del Instituto Tecnológico de Buenos Aires*, vol. 26, pp. 76-101 (2002).
- [44] Morimoto T., Purwanto W., Suzuki J., Hashimoto Y. “Optimization of heat treatment for fruit during storage using neural networks and genetic algorithms” *Computers and Electronics in Agriculture* 19, pp. 87–101, (1997).
- [45] Cook D.F., Ragsdale C.T., Major R.L. “Combining a neural network with a genetic algorithm for process parameter optimization” *Engineering Applications of Artificial Intelligence* vol. 13, pp. 391-396 (2000).
- [46] Charles A., Floquet P., Pibouleau L., Domenech S. “Genetic algorithms for optimal control of batch reactors” *CHISA 98*, Praga (1998).
- [47] Santos A., Dourado A. “Constrained GA applied to production and energy management of a pulp and paper mill” *Proceedings of the 1999 ACM Symposium on Applied Computing* (1999).
- [48] Hallale N. “New graphical targeting method for water minimisation” *Adv. Env. Res.* (2001).
- [49] Shafiei S., Domenech S., Koteles R., Paris J. “System closure in pulp and paper mills: network analysis by genetic algorithm” *Journal of Cleaner Production* vol.12, pp.. 131-135 (2004).

CAPÍTOL V

V. METODOLOGIA

V.A. METODOLOGIA DEL PRESENT TREBALL

La voluntat del present treball és desenvolupar una nova metodologia que sigui útil per generar de manera eficient noves configuracions de processos industrials. La generació d'una nova configuració ha de permetre millorar el procés industrial segons els objectius plantejats. En aquest cas es parteix d'un procés industrial existent i la intenció és millorar la configuració d'aquest procés per avançar en el tancament de circuits de la fàbrica, minimitzant el consum d'aigua fresca i secundàriament minimitzant el consum de matèries primeres utilitzades.

Aquesta millora s'ha de portar a terme sense comprometre altres aspectes de la fabricació, que tot i no formar part de la metodologia d'optimització s'han de tenir presents i controlats. En serien un exemple: el consum d'energia, que no s'hauria d'incrementar a l'augmentar el tancament de circuits; la qualitat del producte final, el tancament de circuits no pot comportar una reducció de la qualitat del producte final; o bé el correcte funcionament del procés, seria il·lògic i contraproductiu que fruit de l'optimització es creessin seriosos problemes afegits de fabricació, creació de colls d'ampolla, etc.

Per tal de portar a terme l'optimització s'ha utilitzat una metodologia que combina la simulació de processos amb la tècnica d'optimització pròpiament dita, com queda il·lustrat en la simplificació de la Figura V.1

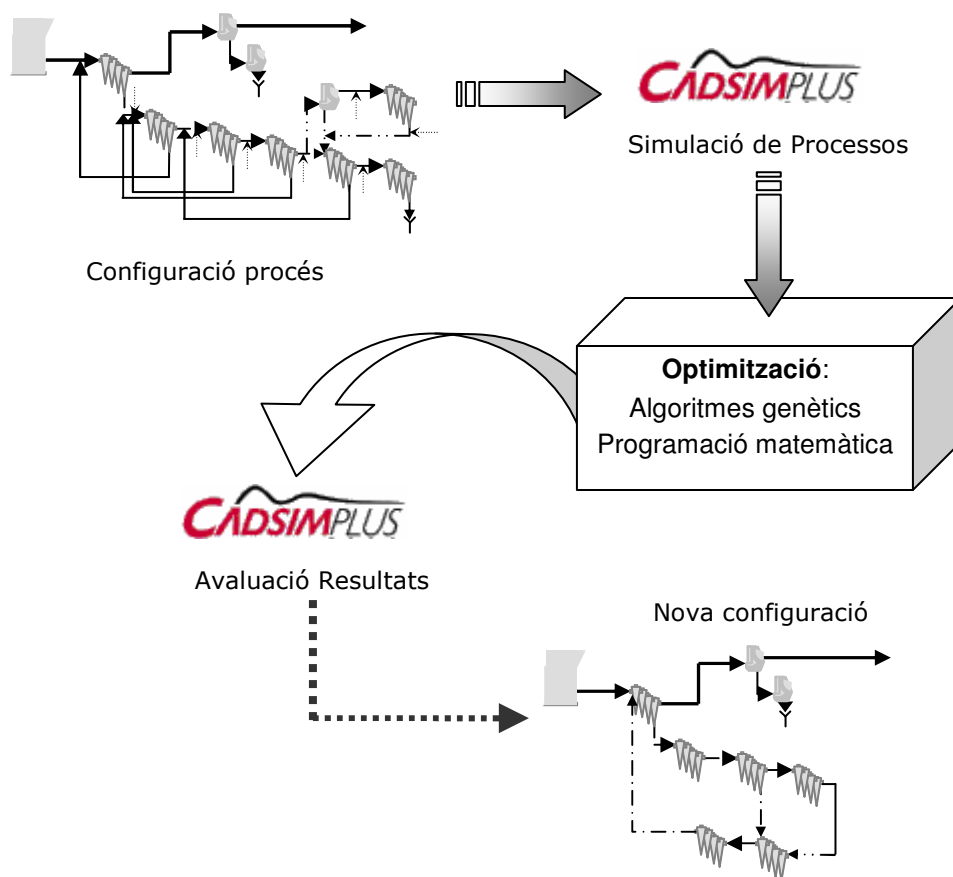


Figura V.1: Diagrama simplificat de les tècniques emprades

La primera etapa de la metodologia proposada és la construcció d'una simulació del procés, que haurà de ser convenientment validada posteriorment. Aquesta simulació ha de permetre reproduir el funcionament normal de fabricació en cadascun dels diferents tipus de paper produïts.

El nucli de la metodologia d'optimització és la tècnica iterativa d'optimització utilitzant algoritmes genètics (AG). Els resultats obtinguts mitjançant aquesta tècnica es traslladen de nou al simulador, en forma d'una nova configuració

del procés. La simulació de la nova configuració ha de permetre certificar la validesa dels resultats de l'optimització, així com avaluar conseqüències i/o possibles efectes col·laterals que puguin sorgir al alterar el procés.

Més detalladament, l'aplicació d'aquesta metodologia d'optimització suposa l'execució dels cinc passos definits a continuació, que queden sintetitzats gràficament a la Figura V.2.

Les etapes bàsiques de la metodologia aplicada són:

1. Definició, abast, plantejament i objectius del problema.
2. Definició del pla de mostreig i recollida de mostres, necessari per disposar de dades suficients per determinar els balanços de matèria i energia, i per construir i validar la simulació informàtica.
3. Construcció de la simulació de processos i posterior validació. La simulació es dissenya en funció dels objectius fixats, definits en el punt 1.
4. Optimització de processos mitjançant mètodes matemàtics.
5. Avaluació dels resultats. Resultats obtinguts i efectes derivats de la nova configuració sobre el procés existent mitjançant un redisseny de la simulació

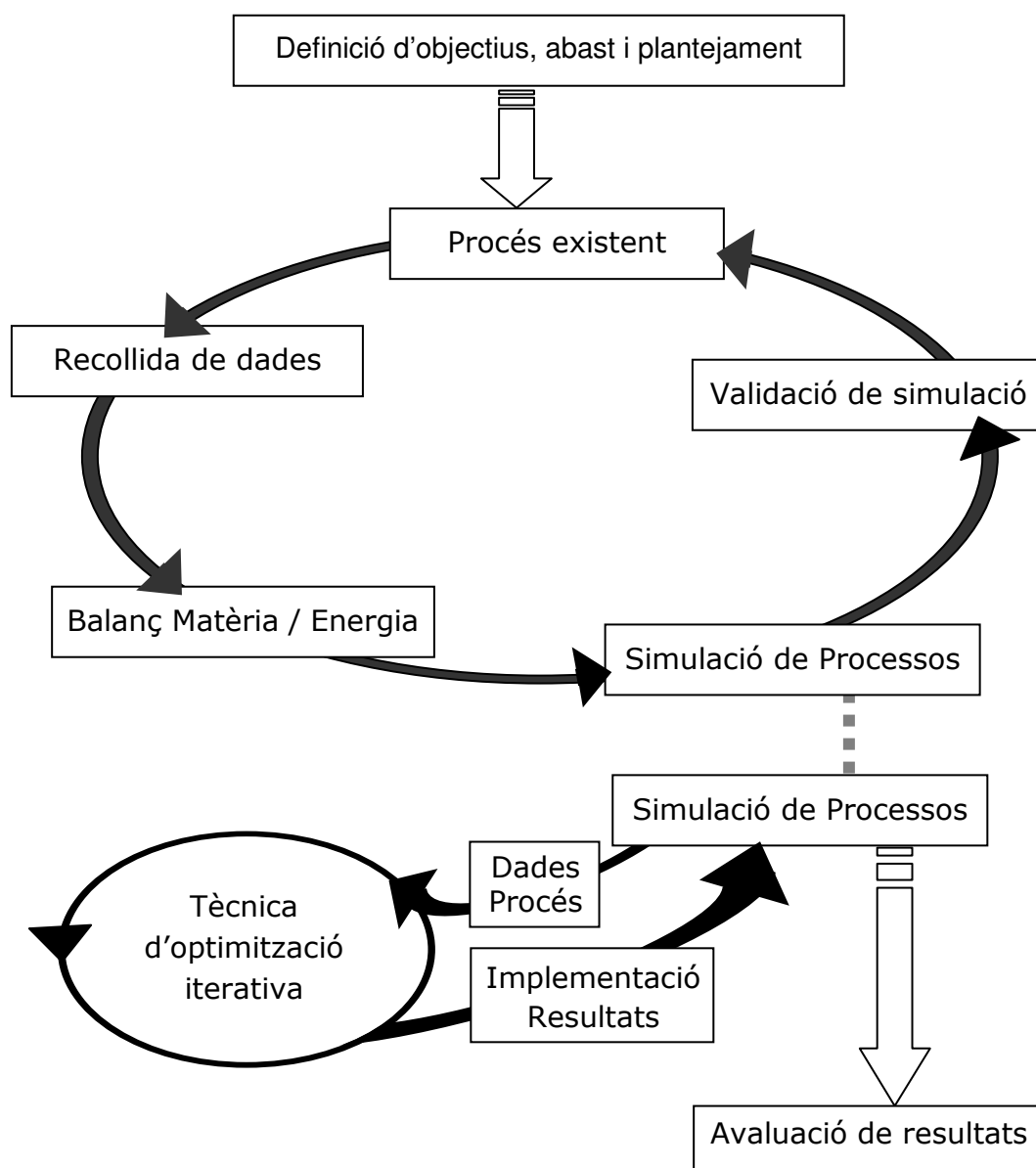


Figura V.2: Diagrama de la metodologia aplicada

L'aplicació d'aquesta metodologia en el present treball no ha estat realitzada al conjunt del procés productiu, sinó que s'ha aplicat al nucli del procés, que comprèn des de la secció de preparació de pastes fins a la part humida de la màquina de paper.

Per descriure amb més profunditat la metodologia aplicada s'ha dividit en dues parts: la simulació, que comprèn tots els passos necessaris per portar a terme la simulació prèvia a l'optimització. La segona seria d'optimització pròpiament dita, centrada lògicament en la tècnica escollida, els algoritmes genètics. El funcionament bàsic i genèric d'un algoritme genètic està descrit als annexos, (annex A), la descripció en aquest apartat de metodologia es centrarà només en l'aplicació d'aquesta tècnica a estudis de minimització de consums d'aigua o matèries primeres. La descripció estarà basada en un exemple per fer més entenedora l'aplicació

V.B. METODOLOGIA DE LA SIMULACIÓ

V.B.1. Descripció

El procés de concepció, disseny i validació és clau per garantir bons resultats a l'aplicar la simulació de processos. A la Figura VI.3 apareix representada de manera esquemàtica el procediment a seguir per tal de construir i validar una simulació informàtica.

El procés comença avaluant el procés a simular. Per norma general aquesta operació es realitza amb l'ajuda del diagrama de flux del procés. La primera tasca a realitzar és la simplificació d'aquest diagrama de flux, tot pensant en la posterior simulació. Es tracta de reproduir el procés que es duu a terme mitjançant les unitats bàsiques, eliminant elements no essencials que augmentin la complexitat del disseny.

En paral·lel cal determinar quins seran els paràmetres que regiran la simulació: cabals, concentracions, temperatures, etc. Quan es disposa d'una idea bastant aproximada del disseny de la simulació convé recollir totes les

dades disponibles sobre el procés i sobre les unitats bàsiques reproduïdes en la simulació [1].

De forma addicional, convé recollir mostres dels principals punts del procés per realitzar balanços de matèria i energia, i analitzar-les convenientment al laboratori segons la determinació de paràmetres a simular realitzada prèviament.

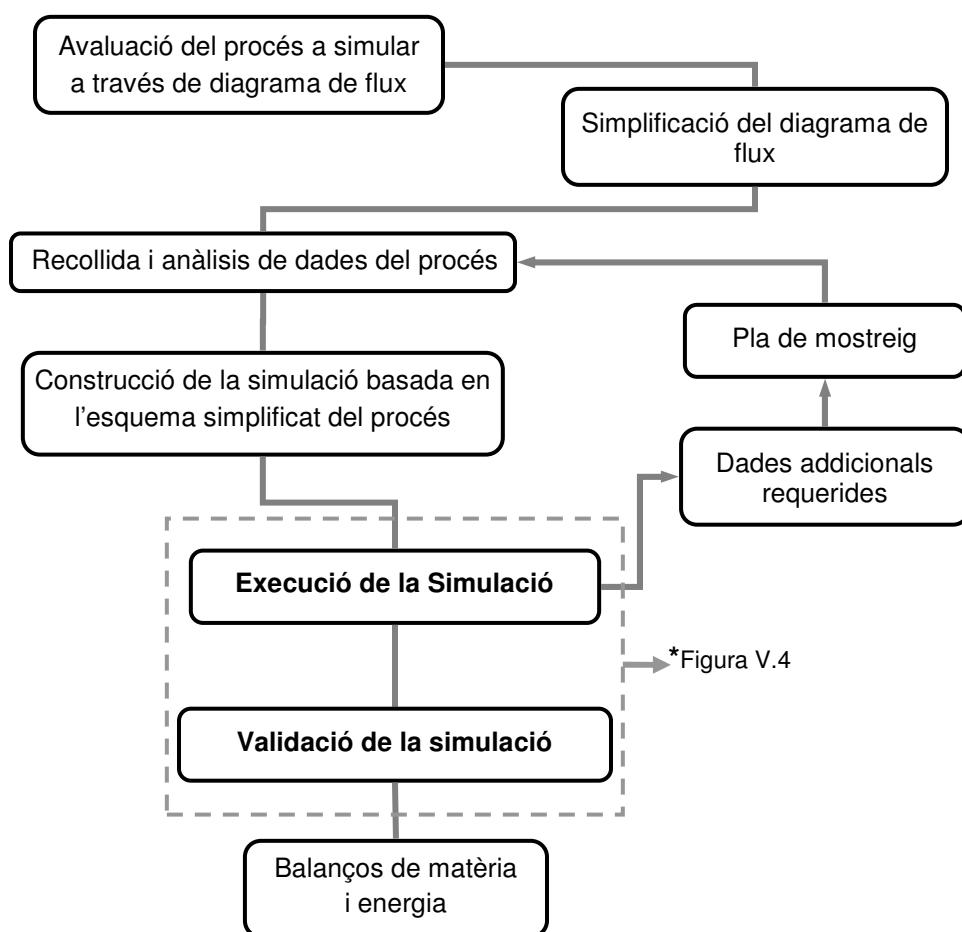


Figura V.3: Esquema: construcció i validació d'una simulació

Una vegada realitzats els passos previs es pot començar a desenvolupar la simulació i a introduir totes les dades disponibles. El procés de disseny de la

simulació acaba amb l'execució inicial de la simulació. La Figura V.4 permet identificar esquemàticament els processos d'execució i ajust de la simulació.

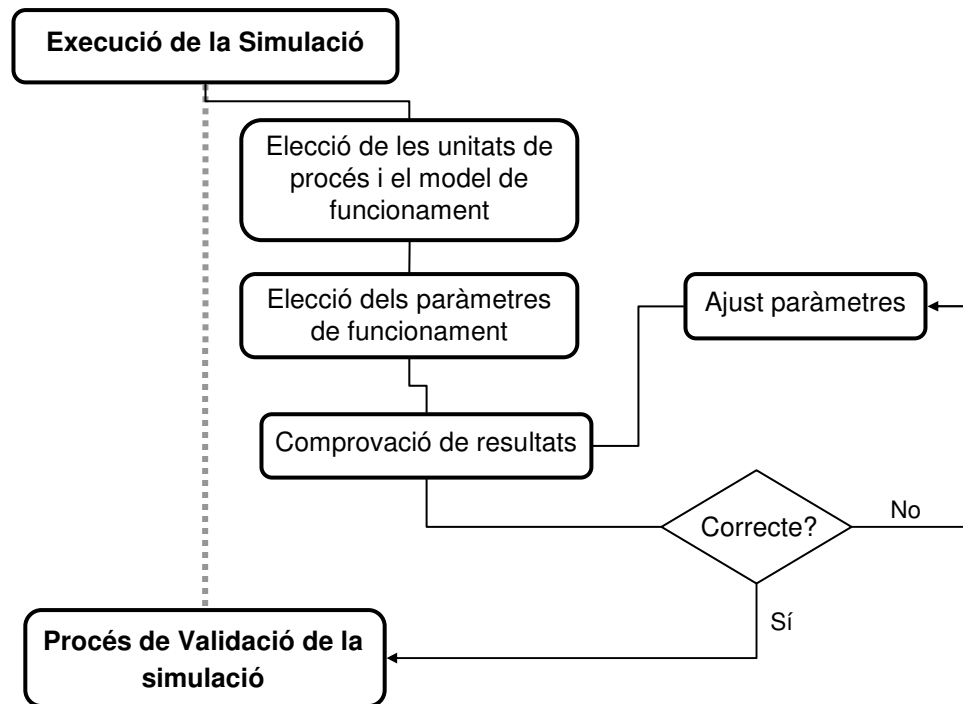


Figura V.4: Esquema: Execució i ajust de la simulació

Per executar la simulació cal escollir el tipus d'unitats de procés reproduïdes i el model que les regeix. Per exemple, al reproduir un bateria d'hidrociclons responsables d'una de les etapes de la depuració ciclònica es pot escollir entre diferents opcions. Una primera seria crear una caixa negra, amb paràmetres d'entrada i sortida de la unitat segons les dades de procés disponibles. A l'altre extrem, tindríem la determinació del nombre de ciclons que formen la bateria, la pèrdua de càrrega experimentada, els percentatges de rebuig i acceptació per cadascun dels paràmetres estudiats, etc. Òbviament existeix una sèrie d'opcions intermèdies. La determinació del tipus d'unitat i el model de reproducció es realitza en funció del objectius i el

nivell de detall que es vulgui atorgar a la simulació, i també de les dades disponibles.

A continuació cal escollir els paràmetres de funcionament que millor s'ajusten a la idea de simulació concebuda. Es tracta de determinar quins paràmetres del procés i quines unitats són les claus de reproducció de procés, i desenvolupar un sistema de determinació del funcionament de la simulació. Un exemple simple seria determinar quin paràmetre (cabal, concentració, etc.) determina les característiques d'un flux determinat. I un exemple més complex seria l'elecció entre controlar l'entrada de matèria primera i deixar un grau de llibertat a la producció final en funció del procés; o bé escollir just l'oposat, fixar la producció assolida i que sigui el procés el que determini la demanda de matèria primera.

Durant l'execució és habitual detectar punts febles a la simulació o manca de dades suficients per tal de garantir una simulació plenament representativa. Aquest fet motiva l'establiment d'un pla de mostreig complet per tal de disposar de totes les dades necessàries per realitzar la simulació i la validació de la simulació amb èxit. Podria semblar que el pla de mostreig arriba de forma tardana dins la cronologia del desenvolupament de la simulació, però és en aquest punt quan la simulació ha estat creada i provada, quant s'han detectat errors i s'ha realitzat la determinació i ajust dels paràmetres de funcionament, que es disposa d'una idea completa definitiva i definitiva de les mancances de dades del procés.

Amb la introducció de les dades addicionals i els ajustos necessaris fins a assolir el resultat desitjats, el procés de creació de la simulació s'ha completat. Per tal de garantir la fiabilitat de la simulació, de totes les dades a extreure i dels estudis a realitzar, cal realitzant la corresponent validació de la simulació.

V.B.2. Particularitats de la simulació

La simulació creada i utilitzada per realitzar aquest estudi presenta una sèrie de particularitats. Gran part d'aquestes particularitats estan motivades pel procés productiu que es pretén simular. A grans trets, les característiques diferencials d'aquesta simulació són, en primer lloc la possibilitat de realitzar canvis de qualitat del producte durant l'execució de la simulació. L'etapa de disseny de la simulació va contemplar l'ajust de funcionament del procés simulat per cinc gramatges diferents, representatius de la varietat de producte fabricat a planta estudiada. Les característiques bàsiques de cada tipus de producció, amb les corresponents dades obtingudes in-situ, estan emmagatzemades en un full de càlcul. Existeix una comunicació entre el simulador i el full de càlcul per tal d'extreure les dades emmagatzemades. Quan s'activa un canvi de gramatge del paper el simulador extreu i utilitza les dades recollides al full. La utilització pot ser directa, com a paràmetres de treball al executar la simulació, o bé com a dades de referència perquè el simulador estimi paràmetres no coneguts per mitjà de la recollida de dades in-situ.

La segona particularitat seria l'ordre d'execució i d'ajust de la simulació. En lloc de seguir un ordre natural d'inici a final de procés, on s'introdueixen les matèries primeres i fruit del procés s'obté una quantitat de paper produït, la simulació s'ajusta de forma inversa. El motiu és la voluntat de voler reproduir la forma de treballar a l'empresa, cercant una producció final de paper d'un cert gramatge per servir les ordres de fabricació. D'aquesta manera l'entrada de matèries primeres es realitza segons les necessitats del procés. Aquesta particularitat crea una sèrie de llaços de control que compliquen la simulació. Si hi afegim el canvi de gramatge descrit anteriorment les dificultats creaven tot un repte a l'hora de crear i ajustar aquesta simulació, recollit en un article bibliogràfic [2].

V.B.3. Variació del model de retenció

La simulació fins aquest punt incorporava el model de retenció estàndard que presenta el simulador Cadsim Plus. Aquest model simplificat tracta el flux de pasta com en dues fraccions: la fracció líquida i la fracció de sòlids. L'efecte de la tela de la màquina produeix una divisió del flux, definida per una fracció d'aigua drenada i una fracció de sòlids arrossegats amb l'aigua drenada. Amb aquest model útil però simplificat, tots els sòlids presents a la pasta són retinguts de la mateixa manera. Aquest és un model aproximat però poc realista.

Es crea un nou model de retenció que ha de tractar la retenció de sòlids de manera més propera a la realitat. S'aprofita al mateix temps aquesta circumstància per introduir un nou paràmetre a la simulació els fins de fibres. Els fins de fibres són fragments de fibra generats durant la fabricació de la pasta i durant els tractaments de preparació de la pròpia pasta abans de la fabricació de paper. Els fins de fibres són importants per certes propietats i qualitat del paper fabricat, però al mateix temps la seva presència pot provocar efectes no desitjats sobretot en cas d'acumulació en certes unitats del procés [3, 4].

El nou model tracta la retenció dels sòlids en tres mòduls enllaçats en la simulació seqüencial [2]. Per incorporar aquest nou model es necessiten més dades sobre el procés.

- El primer dels tres mòduls s'encarrega de la retenció de fibres. S'assumeix que la retenció de fibres al matalàs fibrós és del 100%.
- El segon mòdul determina la retenció de càrregues. El valor de retenció de càrregues ve determinat per les mesures fetes al laboratori de fàbrica sobre retenció i contingut de càrregues a les aigües blanques.

- El tercer mòdul tracta la retenció de fins de fibres. La seva determinació es realitza per balanç de matèria [5, 6].

V.B.4. Validació

La validació és el procés de comprovació de la fiabilitat de les dades obtingudes amb el simulador. La validació sempre es duu a terme amb dades reals del procés estudiat i és vàlida només pel procés estudiat (qualsevol variació important fa necessària una nova validació).

Una vegada finalitzada la construcció i ajust de la simulació es pot iniciar el procés de validació, perquè per realitzar la validació es necessiten les dades estimades mitjançant simulació. Essencialment la validació consisteix en comparar les dades obtingudes mitjançant la simulació amb dades obtingudes directament del procés en el mostreig in-situ. Les dades del procés existent preses com a referència per aquesta comparació no poden ser dades utilitzades durant la construcció i ajust de la simulació.

Finalment, si les dades obtingudes per simulació són iguals que les dades observades al procés productiu, concedint un petit marge d'error o variació, es pot considerar que la simulació està convenientment validada.

V.C. METODOLOGIA DE L'OPTIMITZACIÓ AMB ALGORITMES GENÈTICS

La part final de la metodologia correspon a l'optimització de processos utilitzant algoritmes genètics. Les característiques i el funcionament dels algoritmes genètics són complexes. Per aquest motiu la descripció completa de les característiques generals i el funcionament de l'algoritme es recull en el primer capítol dels annexos del present treball. A continuació es presenta de forma resumida la metodologia d'optimització utilitzada, basada en els algoritmes genètics.

Els algoritmes genètics són algoritmes informàtics basats en les lleis de la genètica i l'evolució natural sorgeixen com una conjunció d'aportacions procedents de la matemàtica aplicada, la informàtica i la biologia. Les metodologies basades en algoritmes genètics són un exemple de la utilització de la informàtica i matemàtica aplicada per la resolució de problemes, en la disciplina de integració de processos. Aquestes noves tècniques han de permetre superar les limitacions observades en els mètodes clàssics de integració de processos. Així, la metodologia basada en algoritmes genètics permet afrontar optimitzacions amb més d'un contaminant present en el fluxos del procés; permet explorar un ampli espai de possibles solucions i constitueix un mètode robust de cerca de solucions, especialment indicat en casos d'escàs coneixement a priori del procés. Al mateix temps, la metodologia permet aconseguir diferents solucions en la zona propera a l'òptim. Aquesta característica ofereix la possibilitat de provar diferents solucions al problema plantejat i avaluar quina és millor opció globalment, considerant altres aspectes secundaris relatius al procés no inclosos com a paràmetres d'optimització.

L'estructura bàsica de la metodologia d'optimització queda reflectida a la Figura V.5.

La metodologia parteix de la definició d'una superestructura a partir del procés existent a optimitzar. Amb aquesta superestructura i amb les dades disponibles del procés existent, procedents de la simulació validada construïda, s'inicia el procés d'optimització pròpiament dit mitjançant algoritmes genètics [7].

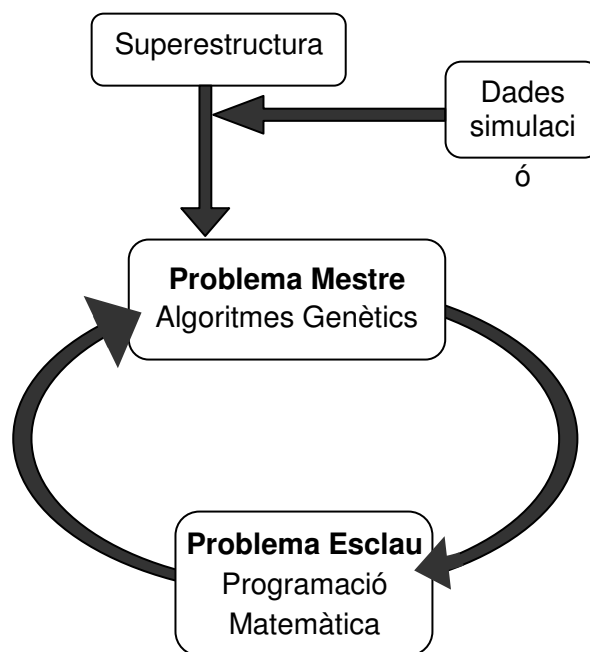


Figura V.5: Esquema de la metodologia d'optimització basada en algoritmes genètics

L'estructura del funcionament està dividida en dues parts. La primera o problema mestre, basada en algoritmes genètics, controla el procés d'optimització i determina la nova configuració del procés existent. El problema esclau conté la funció objectiu que quantifica la qualitat de les configuracions proposades, a través de la programació matemàtica.

De manera genèrica, la present aplicació utilitzant algoritmes genètics té com a missió generar solucions que satisfacin una funció objectiu definida. La informació inicial a disposició de l'algoritme és la configuració del procés, les dades que caracteritzen el procés (p.e. cabal, consistència...), les fonts i demandes definides i les restriccions que s'apliquen al tractar-se d'una aplicació amb restriccions.

L'algoritme s'encarrega de generar una població inicial, formada per un nombre limitat d'individus. Cada individu d'aquesta població conté informació codificada per una possible solució al problema plantejat. Els individus de la població inicial són descodificats i sotmesos al problema esclau, mitjançant la programació matemàtica amb la funció objectiu definida. Cada individu sotmès a la funció objectiu obté un valor quantitatiu que indica el grau d'adaptació de l'individu a la funció objectiu, o força de l'individu (*fitness* en termes anglosaxons).

A continuació es generen un nombre fixat de generacions descendents d'aquesta població inicial. Els descendents es generen amb els anomenats operadors genètics, com ara el creuament de cromosomes i la mutació (informació ampliada a l'annex). Cada individu de cada generació és sotmès a la funció objectiu per quantificar el seu grau d'adaptació. Un cop quantificat el grau d'adaptació els individus retornen al problema mestre on es torna a redissenyar el procés. En funció del seu grau d'adaptació un individu té major o menor probabilitat de sobreviure i no patir les modificacions per part dels operadors genètics.

La metodologia finalitza després d'un nombre fixat d'iteracions d'aquest procés descrit, presentant com a resultat la millor configuració retinguda. La millor solució s'expressa com sèrie de valors que indiquen si hi ha connexió o no entre font i demanda, i el valor del cabal que la font cedeix a cada demanda.

REFERÈNCIES

- [1] Jacob J., Paris J. "Data sampling and reconciliation – application to pulp and paper mills. Part I: methodology and implementation" *Appita Journal* vol. 56(1), pp. 25-29 (2003).
- [2] Turon X., Labidi J., Paris J. "Simulation and optimization of a high grade coated paper mill", *Journal of Cleaner Production* (acceptat).
- [3] Seth R.S. "The measurement and significance of fines" *Pulp and Paper Canada* vol. 104:2, pp. 41-50 (2003).
- [4] Cho B., Garnier G., Paradis J., Perrier M. "The process dynamics of filler retention in paper using a CPAM/Bentonite retention aid system" *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 79:6, (2001).
- [5] Orcotoma, J.A., Paris J., Perrier M. "Dynamic analysis o fibrous material and dissolved solids distribution in the wet-end of a newsprint mill" *Appita Journal* vol. 52(2), pp. 105-112 (1999).
- [6] Orcotoma, J.A., Paris J., Perrier M. "Paper Machine Controllability: Effects of Disturbances on Basis Weight and First Pass Retention" *Journal of Process Control*, vol.11, pp. 401-408 (2001).
- [7] Goldberg D.E. "Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning" Ed. Addison Wesley Longman (1989).

CAPÍTOL VI

VI. RESULTATS D'EXEMPLE PRÀCTIC D'INTEGRACIÓ DE PROCESSOS MITJANÇANT ALGORITMES GENÈTICS

VI.A. OPTIMITZACIÓ AMB ALGORITMES GENÈTICS

Per tal de facilitar la comprensió i familiaritzar-se amb el mètode d'optimització basat en algoritmes genètics, s'ha realitzat un exemple d'una aplicació senzilla i pràctica per il·lustrar aquesta metodologia.

VI.A.1. Exemple

Per posar a prova la nova metodologia d'optimització desenvolupada s'analitza un exemple tipus, característic d'un procés productiu paperer. Amb aquests exemple es pretén provar la idoneïtat del resultat del mètode aplicat; també es pretén comprovar les dificultats que poden sorgir a l'hora de posar en marxa els algoritmes genètics, i a l'hora d'ajustar els diferents paràmetres de funcionament de l'algoritme per al cas d'exemple.

L'exemple en sí consisteix en una secció d'un procés industrial. La configuració inicial, representada esquemàticament a la Figura VI.1, exemplifica un cas de circuits totalment oberts on totes les demandes internes d'aigua són satisfetes amb aigua fresca, i on al mateix temps tots els rebuigs esdevenen efluents enviats a tractaments de depuració d'aigües.

En aquest cas, el flux d'entrada té un cabal de 500 t/d i concentració de sòlids del 0,2%. El flux és sotmès a 6 operacions unitàries. El procés té 4 entrades d'aigua fresca com a dilució i cada unitat té els seus corresponents rebuigs.

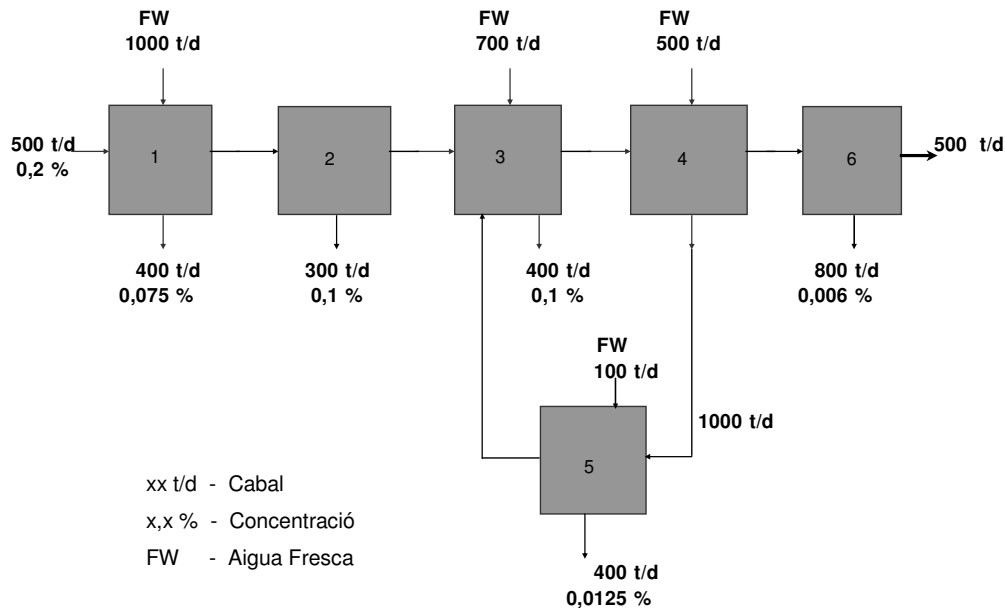


Figura VI.1: Cas a optimitzar. Esquema del procés

A la unitat n^o1 el flux rep una dilució de 1000 t/d d'aigua fresca i es genera un rebuig amb un 0,075 de consistència, amb un cabal 400 t/d.

La unitat n^o2 genera un rebuig de 0,1% de concentració i 300 t/d.

La unitat n^o3 té una dilució de 700 t/d d'aigua fresca i genera un rebuig de 0,06% de consistència, amb un cabal de 400 t/d.

La unitat n^o4 rep una dilució de 500 t/d d'aigua fresca i genera un rebuig de 1000 t/d. Aquest rebuig és recirculat, previ tractament a la unitat n^o5 on es dilueix amb 100 t/d d'aigua fresca, generant un rebuig de 0,0125% de consistència i 400 t/d de cabal.

La última unitat de tractament, la n^o6, rep el flux de la unitat 4, genera 800 t/d de rebuig al 0,006% de consistència. Al final del procés el cabal del flux és igual al de l'entrada 500 t/d.

VI.A.2. Balanç de matèria de l'exemple

Realitzant el balanç de matèria del cas proposat, obtenim un esquema de procés com de la Figura VI.2.

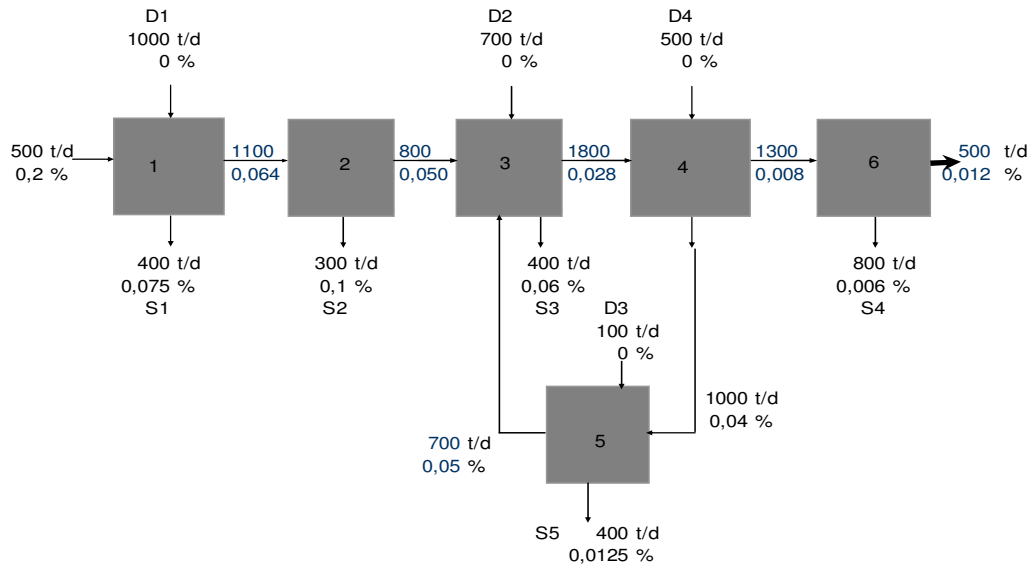
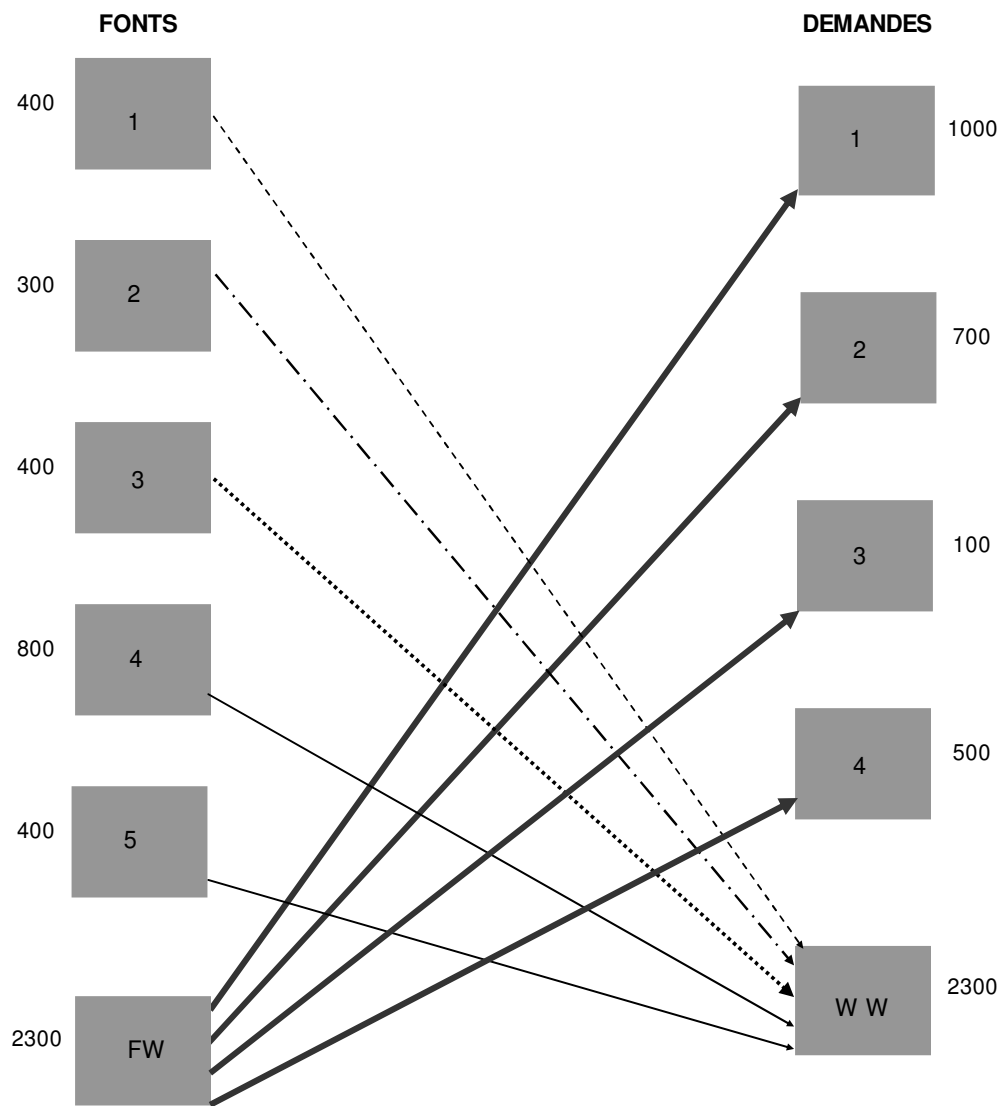


Figura VI.2: Cas a optimitzar. Balanç global del procés

Prenent com a referència la notació per a l'optimització, les quatre entrades d'aigua fresca han estat identificades com a demandes del procés (D1 – D4) i els cinc rebuigs que passen a ser efluents del procés constitueixen les fonts (S1 – S5).

El cas base presenta un consum total d'aigua fresca de 2300 t/dia, que compensen les 2300 t/dia d'efluents generats. El balanç de matèria seca és de 100 t/d a l'entrada i a la sortida.

La superestructura resultant, corresponent al procés a optimitzar, està representada a la Figura VI.3.



FW - Aigua fresca

W W – Efluent/rebuig

Figura VI.3: Cas a optimitzar. Superestructura

VI.A.3. Optimització de l'exemple

Un cop reproduït el cas d'exemple al simulador, s'inicia el procediment d'optimització mitjançant algoritmes genètics. Es defineix una funció objectiu particular per cadascun dels dos casos a desenvolupar, mantenint les dades i els paràmetres de funcionament constants:

Cas A: minimització del consum d'aigua fresca

Cas B: minimització simultània del consum d'aigua fresca i de la pèrdua de sòlids als efluents

La voluntat és substituir les demandes inicialment satisfetes amb aigua fresca per recirculacions dels efluents. Cal eliminar el màxim de connexions possibles entre aigua fresca i les demandes, i les connexions entre fonts i efluents.

Un cop es disposa de totes les dades inicials necessàries cal fixar les restriccions del procés d'optimització. En aquest cas les restriccions són en forma de concentració màxima que poden admetre cadascuna de les demandes.

VI.A.3.1. Restriccions aplicades

Les restriccions s'apliquen per tal de fixar un límit acceptable de qualitat per sobre del qual no convé realitzar la recirculació.

Les restriccions aplicades en aquest cas per les característiques intrínseques del procés són les expressades a la Taula VI.1.

S'assumeix que la distribució de fibres en els fluxos es manté constant en cadascuna de les operacions.

Taula VI.1: Restriccions aplicades a l'optimització

<u>Demanda</u>	<u>Concentració (%)</u>
D1	0,055
D2	0,09
D3	0,2
D4	0,07

La concentració final del flux de pasta paperera podria estar restringit també, marcat per un paràmetre d'acceptabilitat del procés. S'ha optat però per deixar-lo com un grau de llibertat i observar el resultat obtingut posteriorment mitjançant la simulació, fruit de l'optimització. En cas de que aquesta concentració no fos dins dels paràmetres acceptables es rebutjaria la solució obtinguda.

VI.A.3.2. Ajustament de l'algoritme genètic

El tipus d'algoritme genètic aplicat en aquest cas és el descrit en l'annex A del present treball, basat en l'estructura iterativa clàssica introduïda per Goldberg [1] i adaptada convenientment al tipus d'optimització i al procés a optimitzar.

Un cop adaptat l'algoritme genètic al problema plantejat cal executar diverses vegades el procediment per trobar un ajustament adequat. L'ajustament consisteix en modificar diferents paràmetres típics dels algoritmes genètics que en regeixen el seu comportament, com ara les probabilitats de creuament entre individus o de mutació de la informació d'un individu, la grandària de la població d'individus o el nombre màxim de generacions obtingudes. El fet de jugar i experimentar amb els ajustaments d'aquests paràmetres permet adquirir major domini i coneixements sobre el mecanisme d'optimització i de l'algoritme, afegits als paràmetres de treball

recomanats bibliogràficament. Al mateix temps constitueix una base per tal d'abordar amb més fiabilitat estudis de problemes més complexos, on l'ajustament pot resultar més complex.

A continuació és citen els efectes dels paràmetres més importants sobre l'evolució dels algoritmes genètics.

VI.A.3.3. Grandària de la població d'individus

La grandària de la població o sigui el nombre d'individus establert que formarà part de cadascuna de les generacions afecta bàsicament a dos aspectes del desenvolupament de l'algoritme genètic: la diversitat i el temps de càlcul.

Quan més gran és el nombre inicial d'individus major és la quantitat i diversitat d'informació disponible. Òbviament, la quantitat i diversitat d'informació milloren la capacitat de cerca de solucions que provoca una disminució del temps necessari per trobar les solucions, una reducció del nombre de generacions necessàries i portant-ho al límit una gran manca de varietat d'informació podria fer fracassar el mecanisme d'optimització.

D'altre banda, un nombre elevat d'individus en la població provoca un augment exponencial de les necessitats de càlcul de l'algoritme, i un perjudici manifest sobre el temps de càlcul necessari. En petits problemes d'optimització la penalització en temps de càlcul pot resultar lleugera o gairebé insignificant. A mesura que augmenta la complexitat del problema i de l'algoritme aquest increment de temps pot arribar a ser molt important i es pot convertir en un problema en cas de voler una eina àgil de presa de decisions.

En aquest cas d'exemple senzill, una dimensió de població que oscil·la entre els 15 i 30 individus és suficient, aconseguint un temps de càlcul bo (de l'ordre de 10-15 segons). Poblacions més grans de 50 individus penalitzen de manera important i innecessàriament el temps de càlcul.

VI.A.3.4. Probabilitat de creuament entre individus

La probabilitat de creuament entre els individus de la població és un dels aspectes bàsics dels algorismes genètics. Aquesta probabilitat determina el nombre d'individus que entre al procés de creuament, dividint el gen en dues parts (creuament en un sol punt) i intercanviant la informació que té codificada amb un altre individu a l'atzar. Aquest intercanvi d'informació juntament amb la posterior selecció dels individus que satisfan en major grau la funció objectiu establerta, provoquen que la recerca en l'espai de possibles solucions es vagi acotant a l'entorn de l'òptim.

Les probabilitats de creuament utilitzades es situen al voltant del 60-70%. Un nombre molt gran provocaria una destrucció de certa informació vàlida alentint el procés. Una probabilitat molt baixa desvirtuaria el mètode i també alentiria la recerca.

La probabilitat de creuament no afecta de manera sensible al temps de càlcul de l'algoritme.

VI.A.3.5. Probabilitat de mutació

La probabilitat de mutació de la informació codificada en cada individu és clau per garantir l'èxit de l'optimització. La mutació té per missió augmentar la diversitat de la població, corregint la uniformització provocada per la

selecció, introduir cadenes d'informació noves que han de permetre superar òptims locals i garantir assolir l'òptim absolut.

És aconsellable treballar amb probabilitats de mutació entre l'1% i el 5%, encara que és recomanable assajar amb probabilitats més altes per veure els efectes provocats al procés d'optimització. En aquest cas la probabilitat de mutació utilitzada finalment fou la del 5%. A tall d'exemple, proves realitzades augmentant bastant la grandària de població, fins a 50 individus, i utilitzant una probabilitat de mutació d'un 10% no s'aconseguia arribar a un òptim tot i utilitzar un nombre de generacions (iteracions) elevat.

VI.A.3.6. Nombre màxim de generacions

El nombre màxim de generacions obtingues és el mecanisme seleccionat d'aturada de l'algoritme, de les iteracions. Els seus efectes incideixen en el desenvolupament de l'optimització i en el temps de càlcul. Òbviament, cal treballar amb un nombre mínim de generacions que garanteixi assolir l'òptim, procurant al mateix temps no excedir-se tot penalitzant en excés el temps de càlcul.

Una nombre excessivament petit de generacions sovint provoca una interrupció prematura del mecanisme de selecció, obtenint resultats que no compleixen alguna de les restriccions o com simplement resultats òptims locals. Un excés important de generacions causa un augment innecessari del temps utilitzat en l'optimització. El nombre d'individus i el nombre de generacions determinen bàsicament el temps de càlcul total.

En aquest cas d'exemple, es podia treballar per sota les 100 generacions al tractar-se d'un cas senzill.

VI.A.4. Resultats de l'optimització

Com a resultat de l'aplicació de la metodologia d'optimització s'obtenen diferents resultats que compleixen plenament amb els objectius fixats i amb les restriccions aplicades. Aquesta és una de les virtuts de la metodologia, poder avaluar les diferents opcions obtingudes i comparar els resultats de les noves configuracions (en termes de costos, concentracions de contaminants, etc.). En alguns casos, una solució amb un consum sensiblement superior pot resultar més adient, per comportar menys redisseny de procés, costos més baixos o concentracions de contaminants inferiors en punts crítics.

VI.A.4.1. Resultats: Cas A

El cas A, on la funció objectiu minimitzava el consum d'aigua fresca, s'assoliren diferents configuracions possibles, totes elles assolint la fita marcada: el mínim consum d'aigua fresca. En aquest cas el mínim consum és claríssim, aconseguint un consum zero d'aigua fresca, i un excés d'aigües de procés que són eliminats com a efluents.

Una d'aquestes configuracions està representada a la Figura VI.4 i il·lustra el resultat del procés d'optimització aplicat. En aquest exemple s'elimina completament l'entrada d'aigua fresca al sistema, satisfent les demandes internes amb recirculacions.

S'apliquen un total de nou recirculacions, mentre que l'excedent de dues fonts és rebutjat com a efluent del procés. A la figura VI.4 es pot observar com cadascuna de les fonts presenta la distribució de cabals i les demandes de destí corresponents a satisfer (sobre fons ombrejat).

Exemple pràctic d'IP mitjançant algoritmes genètics

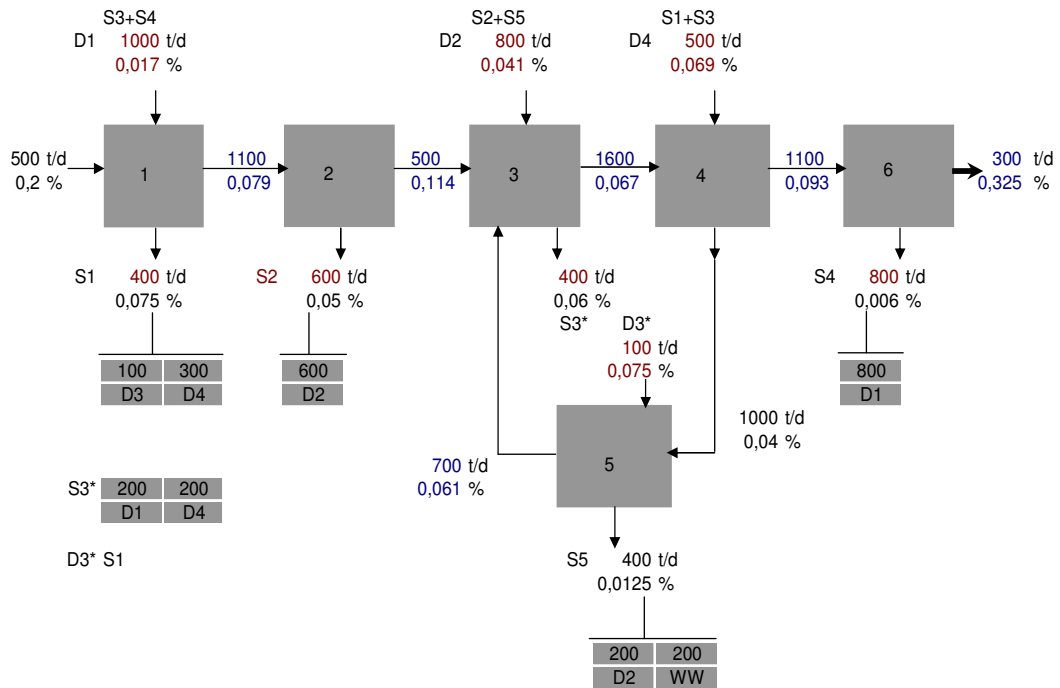


Figura VI.4: Solució d'exemple. Cas A.

El balanç total de la nova configuració queda sintetitzat en la Taula VI.2.

Taula VI.2: Balanç de matèria. Solució del cas A

	<u>Cabal (t/d)</u>	<u>Concentració (%)</u>
Entrada	500	0,20
Sortida	300	0,325
Efluent	200	0,0125
Aigua Fresca	0	0

Per visualitzar de manera més gràfica i entenedora la configuració de les noves connexions entre fonts i demandes s'ha construït la superestructura resultant, il·lustrada a la Figura VI.5.

En aquest cas presentat on exclusivament es persegueix una minimització del consum d'aigua les possibles configuracions per assolir l'objectiu són múltiples, encara que fruit de la configuració escollida varia l'impacte resultant sobre el procés.

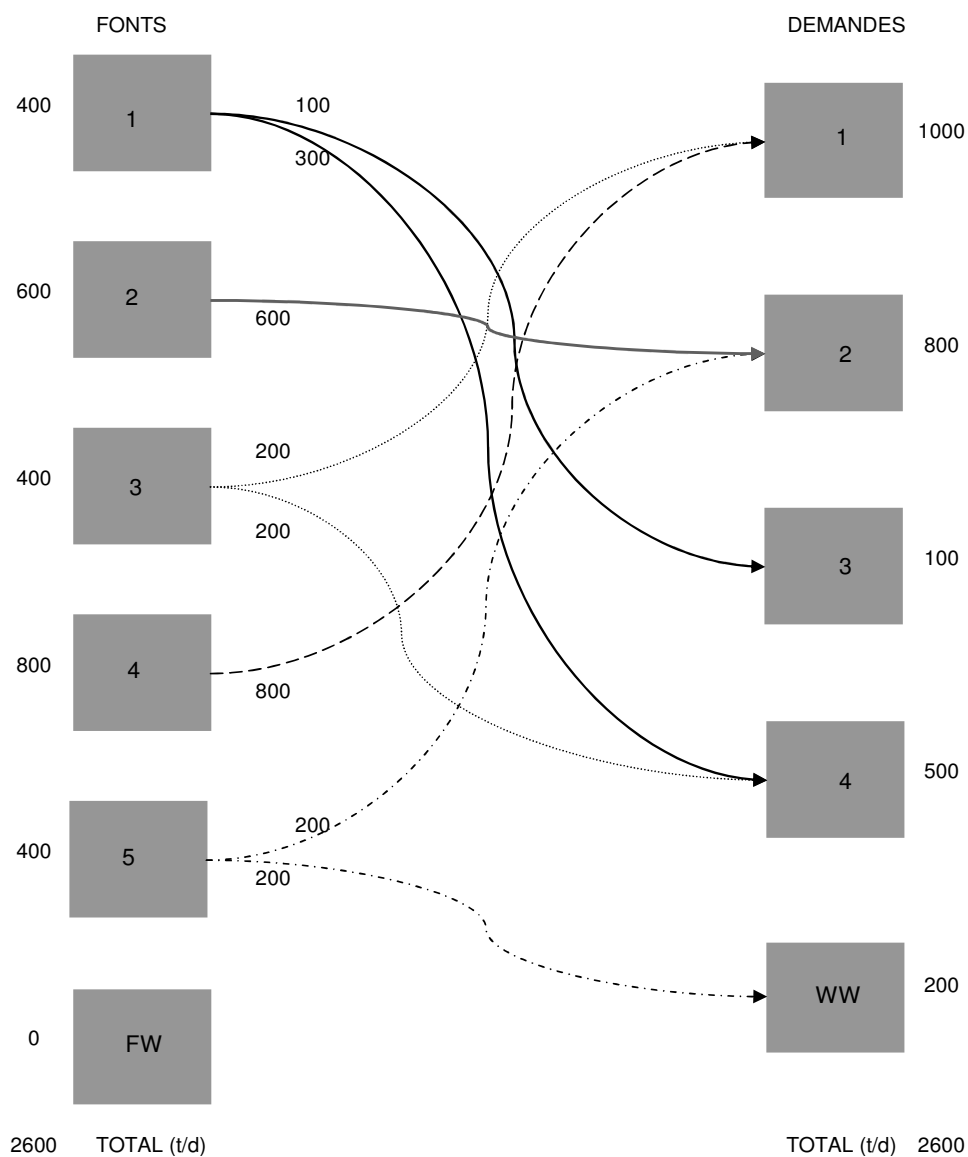


Figura VI.5: Superestructura de la solució. Cas A

Les múltiples configuracions possibles que assoleixen l'objectiu queden reflectides en la Taula VI.3, que recull diverses possibles configuracions que satisfan plenament la funció objectiu i les restriccions. Es pot observar la incidència que tenen les diferents recirculacions en la distribució de les concentracions al llarg del procés.

Taula VI.3: Recull i comparativa d'algunes solucions (Cas A)

Solució	Cabal (t/d)	Concentració (%)
Entrada	500	0,20
Sortida	300	0,325
Efluent	200	0,0125
Aigua Fresca	0	0
Demanda 1	1000	0,017
Demanda 2	800	0,041
Demanda 3	100	0,075
Demanda 4	500	0,069

Alternativa 1

Entrada	500	0,20
Sortida	300	0,30
Efluent	200	0,05
Aigua Fresca	0	0
Demanda 1	1000	0,024
Demanda 2	800	0,039
Demanda 3	100	0,055
Demanda 4	500	0,046

Alternativa 2

Entrada	500	0,20
Sortida	300	0,30
Efluent	200	0,05
Aigua Fresca	0	0
Demanda 1	1000	0,017
Demanda 2	800	0,063
Demanda 3	100	0,013
Demanda 4	500	0,032

Alternativa 3

Entrada	500	0,20
Sortida	300	0,329
Efluent	200	0,006
Aigua Fresca	0	0
Demanda 1	1000	0,031
Demanda 2	800	0,056
Demanda 3	100	0,013
Demanda 4	500	0,032

VI.A.4.2. Valoració de resultats: Cas A

Es pot observar com respectant sempre l'objectiu i les restriccions fixades les opcions són variades, amb efectes diferents a les concentracions a cada unitat.

La solució presentada en aquest exemple elimina el consum d'aigua amb una configuració final que fa necessària la construcció de 9 recirculacions, cosa que suposarà un cost associat a tenir present al realitzar un projecte. L'efluent en aquest cas té una concentració del 0,0125%.

L'alternativa 1 aconsegueix eliminar el consum d'aigua mitjançant 11 recirculacions (presumiblement major cost que la solució). El flux de sortida presenta una concentració inferior (8%), en aquest cas s'havia deixat com un grau de llibertat la concentració de sortida de l'acceptat; en funció del procés específic caldria valorar la conveniència d'un augment o un descens en la concentració, al mateix temps que es valora si és positiu o negatiu obtenir un descens o un augment de concentració. Les demandes internes es mantenen òbviament dins els paràmetres admissibles fixats per les restriccions de l'optimització; caldrà valorar també en cada cas l'efecte d'augment o descensos de la concentració en la qualitat del producte final o

els efectes sobre el procés productiu. En aquest cas, les concentracions dels fluxos de demandes disminueixen excepte en la demanda 1. En darrer lloc, l'efluent generat té un cabal de 200 t/d com en tots els casos, però presenta una concentració 4 vegades superior a la solució de referència.

L'alternativa 2 assoleix erradicar el consum d'aigua mitjançant únicament 7 recirculacions, amb la qual cosa el cost semblaria inferior. El flux de sortida presenta a l'igual que l'anterior alternativa una concentració inferior (8%). Respecte les demandes internes, la concentració en les demandes 3 i 4 es redueix de forma clara, mentre es manté la concentració en la demanda 1 i augmenta en la 2. En el cas de l'efluent generat, la seva concentració es multiplica per quatre, igualant l'anterior alternativa.

Per últim, l'alternativa 3 suposaria la construcció de 8 recirculacions per eliminar el consum d'aigua. Aquesta configuració provocaria un lleuger augment, poc més d'un 1%, de la concentració del flux de sortida. Pel que fa les demandes internes, la concentració en les demandes 3 i 4 es redueix de forma clara, mentre es manté la concentració en la demanda 1 i augmenta en la 2. En el cas de l'efluent generat, la seva concentració es multiplica per quatre, igualant l'anterior alternativa. Aquesta alternativa és la que aconsegueix una concentració inferior en l'efluent generat, reduint-la a la meitat respecte la solució presentada.

VI.A.4.3. Resultats: Cas B

El cas B, planteja una optimització on la funció objectiu pretén minimitzar el consum d'aigua fresca i la pèrdua de matèria al mateix temps. De manera semblant al cas A s'assoliren diferents configuracions possibles, totes elles assolint el consum zero d'aigua fresca. Cal valorar posteriorment la quantitat de matèria perduda a través de l'excés d'aigües de procés que són eliminats com a efluentes. En un anàlisi més profund es poden valorar les diferències

que presenten les diferents solucions obtingudes en nombre de recirculacions o en concentracions assolides, tan les internes com la del flux de sortida.

De les solucions obtingudes s'ha escollit la que complia millor la doble vessant plantejada en l'optimització. La configuració resultant d'aquesta solució està representada a la Figura VI.6 i il·lustra el resultat del procés d'optimització aplicat.

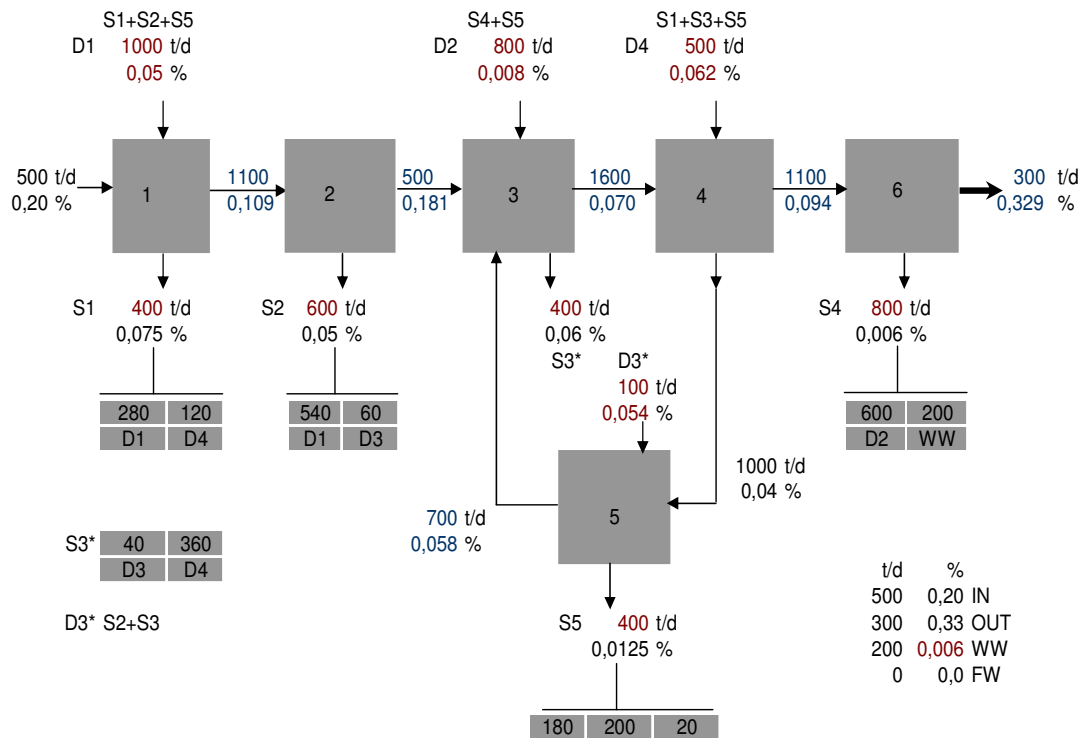


Figura VI.6: Solució d'exemple. Cas B.

En aquest exemple també s'aconsegueix eliminar completament l'entrada d'aigua fresca al sistema, satisfent les demandes internes amb recirculacions, i al mateix temps eliminar el mínim nombre de sòlids, o el que és el mateix reduir al màxim la concentració dels efluents.

Es realitzen un total de deu recirculacions, a més d'una única connexió per eliminar l'excedent d'aigua.

La superestructura resultant permet visualitzar de manera més gràfica i entenedora la configuració de les noves connexions entre fonts i demandes, tal com es reflexa a la Figura VI.7.

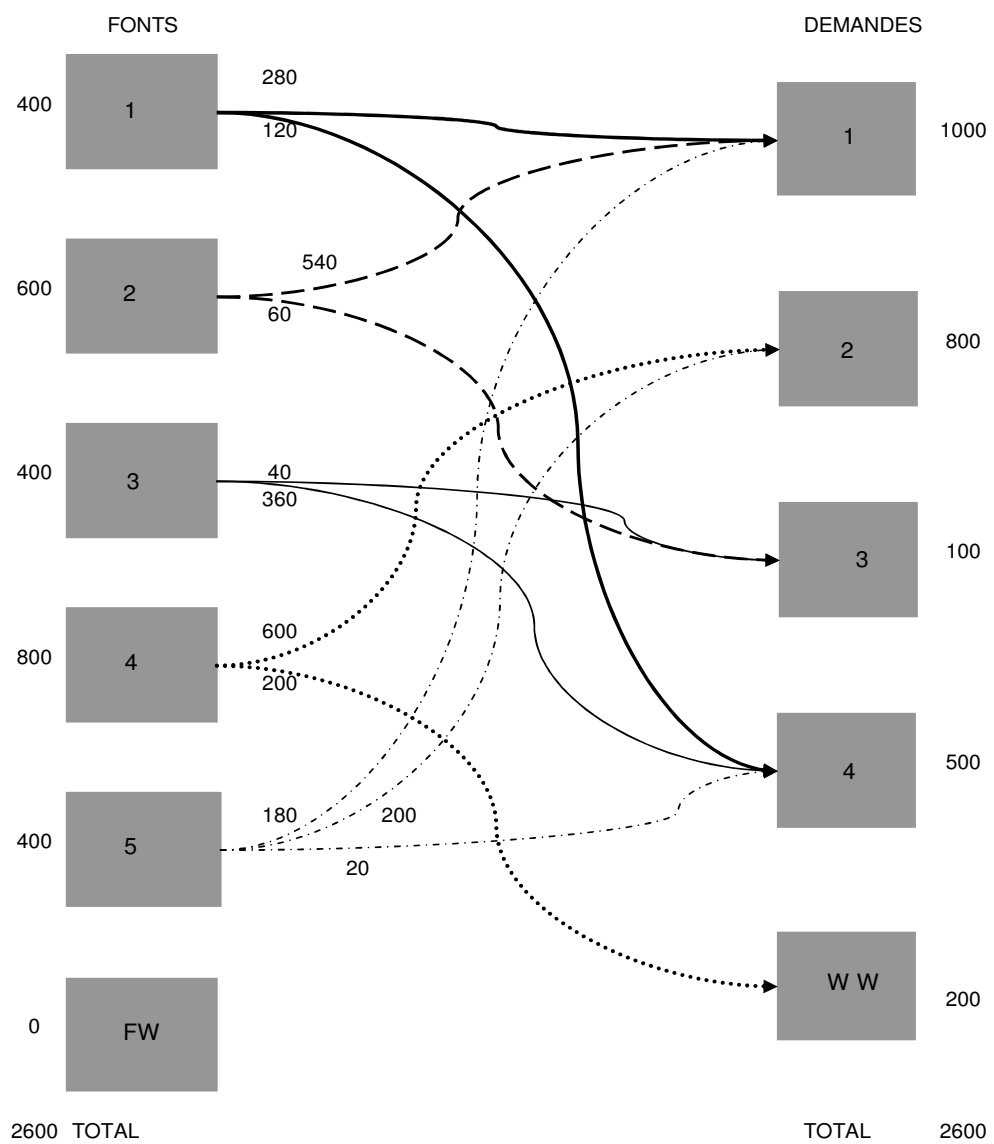


Figura VI.7: Superestructura de la solució. Cas B

De la mateixa manera que en el cas A, es sintetitza a Taula VI.4 el balanç total resultant de la nova configuració.

Taula VI.4: Balanç de matèria. Solució del cas B

	<u>Cabal (t/d)</u>	<u>Concentració (%)</u>
Entrada	500	0,20
Sortida	300	0,329
Efluent	200	0,006
Aigua Fresca	0	0

Gràcies a la metodologia d'optimització utilitzada es poden obtenir altres configuracions possibles, sempre seguint la definició d'objectius fixada a la funció objectiu, i complint també amb les restriccions aplicades. D'aquesta manera s'aconsegueixen un ventall de solucions que optimitzen el problema o bé que es troben en zones properes a l'òptim, i així comparar els diferents resultats i escollir la millor opció. Fruit de la comparativa de solucions possibles es poden extreure conclusions positives, en termes de comparació globals com ara els costos econòmics, o bé en termes més específics de producció com les concentracions assolides en certes unitats o fluxos del procés.

A la següent taula, Taula VI.5, es recullen algunes de les solucions descartades i es comparen amb els valors de referència, els valors de la solució seleccionada.

**Taula VI.5: Recull i comparativa amb altres possibles solucions
(Cas B)**

Solució	Cabal (t/d)	Concentració (%)
Entrada	500	0,20
Sortida	300	0,329
Efluent	200	0,006
Aigua Fresca	0	0
Demanda 1	1000	0,05
Demanda 2	800	0,008
Demanda 3	100	0,054
Demanda 4	500	0,062

Alternativa 1

Entrada	500	0,20
Sortida	300	0,329
Efluent	200	0,006
Aigua Fresca	0	0
Demanda 1	1000	0,043
Demanda 2	800	0,022
Demanda 3	100	0,06
Demanda 4	500	0,052

Alternativa 2

Entrada	500	0,20
Sortida	300	0,312
Efluent	200	0,05
Aigua Fresca	0	0
Demanda 1	1000	0,043
Demanda 2	800	0,006
Demanda 3	100	0,075
Demanda 4	500	0,065

Alternativa 3	Cabal (t/d)	Concentració (%)
Entrada	500	0,20
Sortida	300	0,309
Efluent	200	0,024
Aigua Fresca	0	0
Demanda 1	1000	0,039
Demanda 2	800	0,032
Demanda 3	100	0,036
Demanda 4	500	0,036

VI.A.4.4. Valoració de resultats: Cas B

De manera semblant com ja s'ha realitzat en el cas A, es pot observar les variacions obtingudes amb configuracions del procés alternatives. En aquest cas però, només la solució presentada i la primera alternativa compleixen al cent per cent els objectius fixats. Les altres dues alternatives són configuracions possibles però només properes a l'òptim respecte l'objectiu de minimitzar la pèrdua de sòlids als efluent.

La solució presentada en aquest exemple aconsegueix eliminar el consum d'aigua mitjançant una nova configuració amb 10 recirculacions d'aigua. Aquesta configuració genera un excedent d'aigües de 200 t/d amb una concentració de 0,006%, en ambdós casos es tracta dels mínims assolibles en aquest procés i sota les condicions fixades.

L'alternativa 1 aconsegueix assolir els mateixos objectius fixats en l'optimització, no consumeix aigua fresca i l'efluent rebutjat té una concentració de 0,006%. En aquest cas però, la nova configuració fa necessària crear 11 recirculacions. La concentració final a la sortida és

pràcticament idèntica a la solució de referència, situant-se 1,5% per sota. Pel que fa a les demandes internes, segueixen dins els paràmetres admissibles fixats per les restriccions de l'optimització; la distribució de les concentracions dels fluxos de demandes és diferent en les dues primeres demandes, 5 vegades superior per la demanda 1 i per contra gairebé 3 vegades inferior a la 2. Les demandes 3 i 4 són semblants al cas de la solució de referència.

L'alternativa 2 no representa un òptim absolut, però és una solució propera a l'òptim i pot resultar interessant analitzar el resultat obtingut. Aquesta alternativa també talla el consum d'aigua, utilitzant únicament 8 recirculacions, però amb una concentració de l'efluent de 0,054%, 9 vegades superior a les dues solucions anteriors. Cal citar que en aquest cas l'efluent és una barreja de l'excedent d'aigües de 3 unitats del procés, cosa que situa en 11 el nombre de connexions entre fonts i demandes. La concentració del flux a la sortida del procés presenta un valor inferior a les solucions anteriors (4-5%). Mentrestant, la distribució de concentracions a les demandes internes és semblant a la solució de referència, excepte la major concentració de la demanda 3.

Per últim, la darrera alternativa mitjançant 9 recirculacions elimina el consum d'aigua i situa la concentració final de l'efluent generat en 0,024%, 4 vegades superior als mínims assolits. L'efluent és una barreja d'excedents de dues unitats de procés, situant el nombre total de connexions en 11 també. Aquesta configuració provocaria un lleuger augment, poc més d'un 1%, de la concentració del flux de sortida. Pel que fa les demandes internes, la concentració en les demandes 3 i 4 es redueix de forma clara, mentre es manté la concentració en la demanda 1 i augmenta en la 2.

VI.B. CONCLUSIONS

L'exemple presentat permet fer-se una idea bastant aproximada de la metodologia d'optimització que s'aplica en el present estudi:

- Permet veure l'objectiu final de l'optimització: la reconfiguració d'un procés existent.
- Permet observar la naturalesa del treball amb algoritmes genètics: la generació de possibles solucions que satisfacin la funció objectiu. Els algoritmes genètics no generen una solució única, sinó que s'obtenen resultats diferents en cada execució, degut a les probabilitats que intervenen en l'algoritme. El ventall de solucions obtingudes s'han d'avaluar posteriorment per veure el beneficis aportats i els perjudicis causats, sempre comparant amb la configuració inicial.
- Permet veure l'efecte del canvi de funció objectiu, passant d'una que persegueix únicament la minimització del consum d'aigua a una segona on es combinen minimitzacions en el consum d'aigua i en la pèrdua de matèria.

En tots els casos presentats s'elimina el consum d'aigua fresca. Per tant l'elecció dels millors resultats es fa en funció dels efectes en els fluxos de sortida, en aquest cas en les consistències del flux de sortida del procés i de l'efluent rebutjat.

A l'hora de fer valoracions més profundes sobre les conseqüències d'aquestes variacions provocades en el si del procés, efectes sobre la qualitat del producte o el funcionament i la controlabilitat del procés, caldria conèixer en profunditat el procés.

Al tractar-se d'un cas d'exemple, bàsicament didàctic i de demostració de la validesa del mètode no correspon valorar més enllà del efectes numèrics sobre els paràmetres del procés. El fet realment important en l'exemple és assolir els objectius fixats tot complint les restriccions aplicades, que tenien la missió d'acotar el marge de maniobra del procés d'optimització per posar límits semblants als que s'experimenten en enginyeria de processos a l'hora de redissenyar els circuits.

REFERÈNCIES

- [1] Goldberg D.E. "Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning" Ed. Addison Wesley Longman (1989).

CAPÍTOL VII

VII. DESCRIPCIÓ I APLICACIÓ A UN PROCÉS INDUSTRIAL EXISTENT

Una vegada mostrat el funcionament de la metodologia emprada, i la seva validesa en la resolució de casos teòrics, es pretén traslladar aquesta metodologia a casos pràctics. En el present treball l'aplicació experimental de la metodologia es realitza en un procés industrial existent, amb voluntat de redissenyar el procés mitjançant l'optimització. El procés escollit en aquest cas forma part d'una centre productiu dedicat a la fabricació de paper, encara que l'aplicació podria realitzar-se a altres tipus d'indústria. En primer lloc, abans d'entrar en l'aplicació pròpiament dita es descriu en detall el procés escollit.

VII.A. DESCRIPCIÓ DEL PROCÉS

El procés productiu a estudi està dedicat a la producció de paper. Un paper de d'alta qualitat dedicat a la impressió (p.e. cartells, murals, etc....) La qualitat i el tipus de paper produït en una planta en condiona òbviament el procés. En els dos casos més habituals de tipologies de papereres, com són unes instal·lacions on es produeixi pasta paperera i paper al mateix (papereres integrades), o bé on només es fabriqui paper a partir de matèria primera ja processada (papereres no integrades), les dimensions i els processos de la fàbrica són bastant diferents.

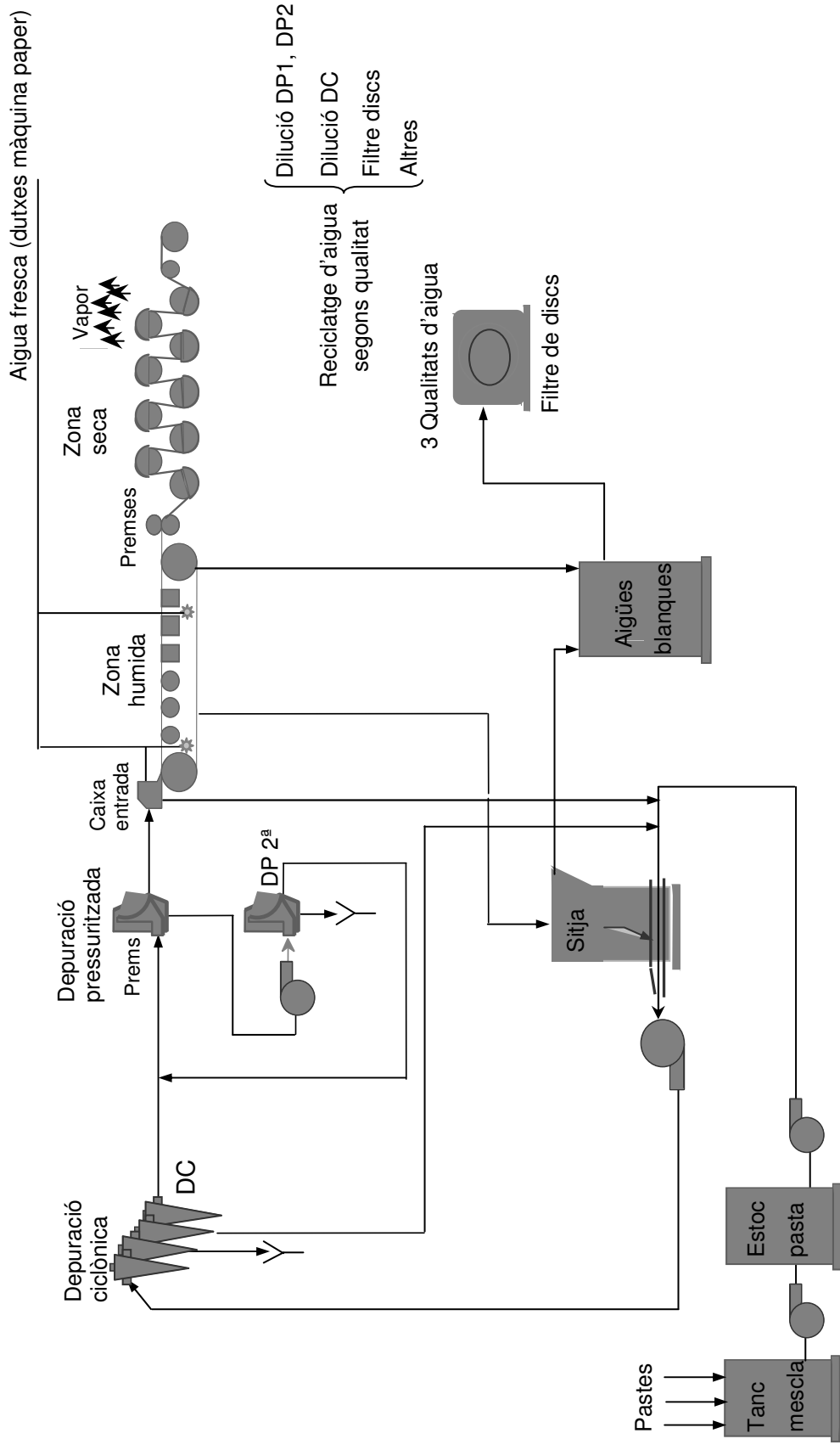


Figura VII.1: Esquema simplificat del procés

VII.A.1. Característiques principals

En aquest cas es tracta d'una fàbrica de paper no integrada, o sigui dedicada exclusivament a la producció de paper. La fàbrica adquireix la matèria primera bàsica, la pasta paperera, ja tractada i s'encarrega de processar-la i transformar-la en paper.

Per fer-se una idea del procés de fabricació, la Figura VII.1 il·lustra un esquema simplificat de la configuració del procés productiu bàsic.

En termes de producció la planta es situa entre les 300 t/d i les 350 t/d, en una sola línia de producció i una única màquina de paper. La gamma de productes fabricats correspon a paper destinat a la impressió de qualitat, estucat, amb un rang de gramatges comprès entre els 90 g/m² i els 300 g/m².

Els consums diaris d'aigua fresca a la planta tenen oscil·lacions considerables. En termes generals la mitjana de consums d'aigua pels diferents gramatges produïts està a l'entorn dels 2000-2200 m³/dia, com s'observa a la Figura VII.2.

En casos puntuals els consums són més elevats, i els dies on es duu a terme la neteja periòdica programada els consums poden ser entre un 50% i un 80% superiors. Com a mitjana absoluta de consums d'aigua fresca es pot assumir un valor l'entorn dels 2500 m³/dia.

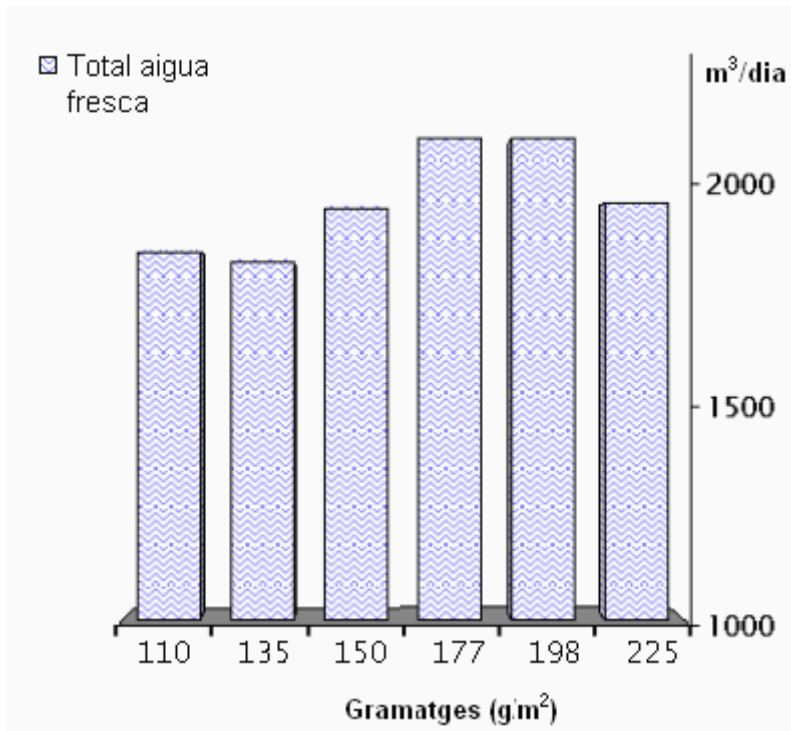


Figura VII.2: Consums d'aigua fresca en funció dels gramatges produïts

VII.A.2. Procés de fabricació

El procés de fabricació pròpiament dit s'inicia amb la recepció de les fibres en forma de fulls de pasta amb un contingut en fibra del 50% aproximadament (50% consistència, 50% d'humitat). Es tracta de pasta química, fibres obtingudes després d'un tractament químic de la fusta, en aquest cas obtingudes mitjançant el procés Kraft.

La fàbrica rep el subministrament de dues varietats d'aquesta pasta química, diferenciada segons la procedència de la fibra, és a dir del tipus d'arbre d'on s'ha obtingut. La fibra majoritària és l'anomenada fibra curta, per comparació amb la longitud de fibra de l'altre varietat. La fibra curta és l'encarregada

principalment de donar bones propietats òptiques i un aspecte homogeni al paper.

El segon tipus de fibra és la fibra llarga, molt menys utilitzada, bàsicament en la fabricació dels gramatges més baixos per tal d'augmentar-ne la resistència, evitar problemes i contratemps en el procés productiu i donar qualitat al producte acabat. Entenent per gramatge el pes en grams d'un paper homogeni d'un metre quadrat de superfície.

Aquestes fibres es reben empaquetades, en forma de fulls de pasta. El primer pas a realitzar serà la disgregació i l'acondicionament de les fibres per tal de poder fabricar el paper. Aquest procés es realitza en l'etapa anomenada preparació de pastes.

VII.A.3. Preparació de pastes

La secció de preparació de pastes és l'etapa inicial del procés productiu on es transformen les matèries primeres que formen part del procés productiu (fibres, carregues, additius, etc....) en una suspensió fibrosa que és la base de la fabricació del full de paper.

Aquesta secció, representada esquemàticament a la Figura VII.3, comprèn la preparació de les matèries primeres, la mescla dels diferents components i l'acondicionament de la pasta.

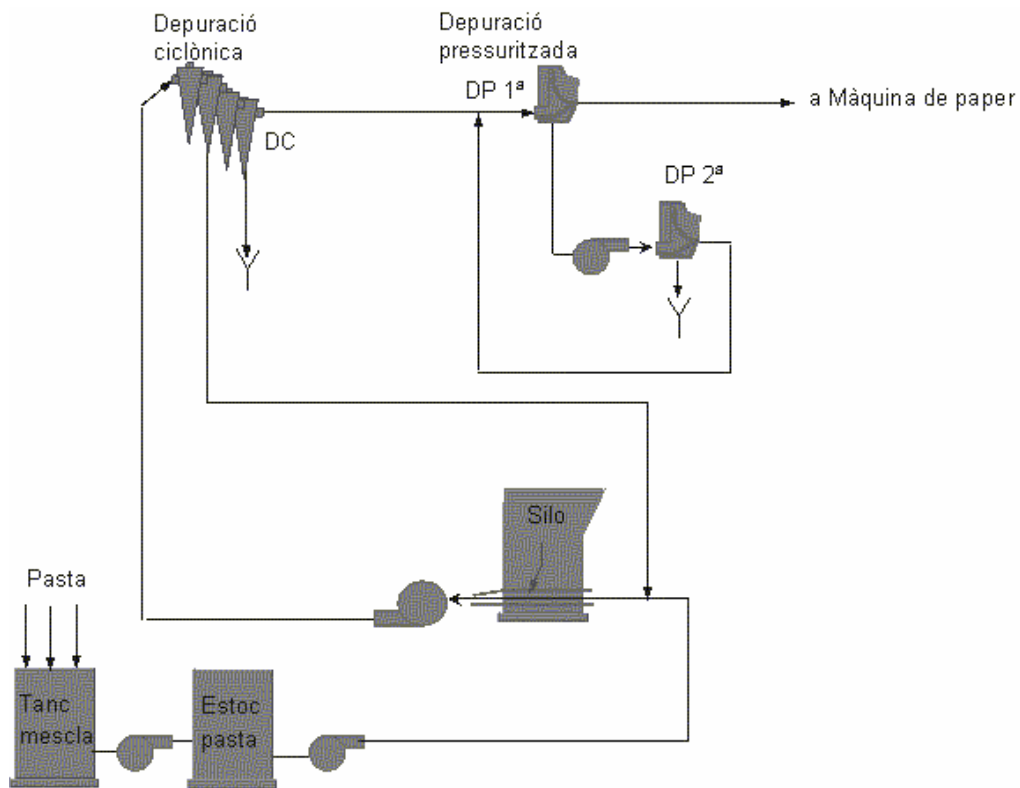


Figura VII.3: Esquema de la secció de preparació de pastes

VII.A.3.1. Disgregació de fibres o pulpejat

Per tal de disgregar els paquets de fibres, els fulls de pasta s'introdueixen als pùlpers o disgregadors de fibra, uns grans tancs agitats mecànicament, equipats d'un rotor per tal de dispersar les fibres i obtenir una pasta diluïda i homogènia. El procés es realitza a concentracions relativament baixes, per tant és necessària l'addició d'aigua fins a assolir la consistència desitjada, que en aquest cas se situa al voltant del 5%. Per completar el procés es sotmet la mescla a una agitació constant durant 9 minuts.

Descripció i aplicació a un procés industrial existent

Cal esmentar que aquest procés ja compta amb un aprofitament dels excedents d'aigua generats en tot el procés. Aquests excedents d'aigua s'anomenen aigües blanques. L'aigua de dilució emprada als púlpers prové exclusivament del circuit d'aigües blanques reduint així dràsticament el consum d'aigua fresca.

Al mateix temps, en un tercer púlper es recupera el paper fabricat que per diferents motius no és apte per la comercialització. Es tracta d'aprofitar i recuperar el paper sobrant, retalls, fora d'especificació, retornat o descartat per qüestions de qualitat. El procediment és bàsicament el mateix, però cal tenir en compte que la base no són només fibres, sinó que es tracta de paper amb una sèrie d'additius que conté. Aquest fet, juntament amb l'òbvia variació de la consistència dels fulls, a l'entorn del 90% en aquest cas, provoca un augment de la quantitat d'aigua i del temps de pulpejat necessari per tal de disgregar les fibres. Els paràmetres de pulpejat en aquest cas són de 35 minuts d'agitació constant a una consistència total del 4%.

El procés de pulpejat, per les seves característiques, és una operació en discontinu per tandes. Per tal d'assegurar el subministrament al procés productiu, la pasta pulpejada és emmagatzemada en tines de grans dimensions.

Un cop superat el procés de disgregació de les fibres i aquestes han estat emmagatzemades, ja es disposa de la matèria primera bàsica per fabricar el paper, una suspensió de fibres individualitzades. Els dos tipus de fibres, verges i recuperades, ja estan llestes per ser enviades als processos de condicionament de fibres

VII.A.3.2. Condicionament de fibres

La suspensió de fibres emmagatzemada a les tines entra a l'etapa de condicionament de fibres a mesura que el procés de fabricació ho requereix, de forma contínua però amb variació de cabal. Totes les fibres són sotmeses a un procés de refinament, excepte una part de la fibra verge curta.

El procés de refinament consisteix bàsicament en fer passar una suspensió molt diluïda de fibres entre dos discs giratoris a gran velocitat (existeixen diferents configuracions: disc fix-disc rotatori, doble disc rotatori-fix-rotatori, etc.) per tal de desempaquetar i desfibrillar cadascuna de les fibres. Així s'aconsegueix augmentar les capacitats d'hidratació, de reacció i d'interacció d'aquestes fibres, que facilitarà la fabricació i augmentarà la qualitat del producte final (per exemple la resistència del paper).

La fracció de fibra curta que no es enviada al procés de refinament es sotmet a un tractament lleugerament diferent de condicionament. Es tracta del despastillat. Aquest tractament persegueix el mateix objectiu que el refinat, adequar la fibra i augmentar-ne la capacitat d'interacció. Sense entrar en molt detall es podria dir que és un procés més ràpid i menys agressiu per les fibres en comparació amb el refinament, que no augmenta tant les capacitats de la fibra (hidratació, interacció). Els avantatges del despastillat són l'estalvi de temps i energia del procés, i la conservació de les fibres (es genera menor quantitat de fins de fibres).

Un cop tractades les fibres són emmagatzemades en les seves respectives tines de pasta. En aquest punt el procés ja disposa de les quatre varietats de fibra per entrar al procés de fabricació. Aquestes són: fibra curta refinada (FCR), fibra curta despastillada (FCD), fibra llarga refinada (FLL) i fibra recuperada.

La següent etapa en ordre cronològic seria la mescla d'aquestes pastes, entre elles i amb els additius.

VII.A.3.3. Mescla

L'etapa de mescla consisteix simplement en un tanc específic de mescla, conegut també com tanc de *blending*, amb forma característica d'embut. En aquest tanc és on es realitza la mescla homogènia de matèria primera i additius segons els patrons de fabricació marcats, que varien en funció del tipus de paper a fabricar. Les variacions són fonamentalment modificacions en les proporcions de cadascun dels fluxos de matèria. Els canvis de composició són bàsicament quantitius i no qualitius o de matèries presents a la mescla.

Les diferents matèries primeres són:

- Fibra. Cadascuna de les quatre varietats de fibra en diferents proporcions
- Càrregues minerals, en forma de cristalls de carbonat de calci (la forma més habitual) encara que fins fa poc temps s'utilitzava el sulfat de calci simplement per l'abundància natural en l'entorn immediat de la fàbrica.
- Cola, per donar propietats físiques al paper
- Midó, per donar propietats físiques al paper.
- Opcionalment s'afegeixen petites dosis de colorants: blanquejants, color blau i/o color vermell.

La fibra és la base evident del paper i el que li dona la majoria de propietats i característiques. Les càrregues minerals s'introdueixen per tal d'abaratir el cost del paper, el cost d'obtenció del carbonat de calci és òbviament inferior al cost de tala d'arbres, obtenció i tractament de fibres. Les càrregues també donen propietats òptiques al paper. En certs casos s'introdueixen altres

càrregues minerals en petites quantitats per obtenir majors o diferents propietats físiques, bàsicament òptiques, al producte.

L'addició de cola i midó proporciona al paper una millora de les propietats físiques en quant a cohesió.

Per últim, es realitza un ajust de consistència de la mescla per tal d'aconseguir la concentració desitjada per iniciar el següent procés. L'aigua de dilució utilitzada és altre cop aigua recirculada, o sigui aigües blanques.

VII.A.3.3.1. Depuració de la pasta

La pasta paperera una vegada conté els elements bàsics per la fabricació es sotmet al procés de depuració, per tal d'eliminar tot allò que pugui perjudicar el procés productiu o la qualitat del paper fabricat. En aquest cas el procés de depuració està format per dos tipus de tractament, i està dividit en tres gran etapes. A la Figura VII.4 es pot apreciar esquemàticament la configuració de les diferents etapes del procés de depuració de pasta.

Aquestes tres etapes mencionades serien:

1. En primer lloc una etapa de depuració pressuritzada o depuració per filtratge (conegut també per terme anglès de *screening*), i identificada a la figura com DP 1^a.
2. La segona és una etapa múltiple de depuració ciclònica (o *cleaning*), subdividida en 7 bateries de ciclons.
3. I la darrera, una altre etapa de depuració pressuritzada identificada a la figura com a DP 2^a.

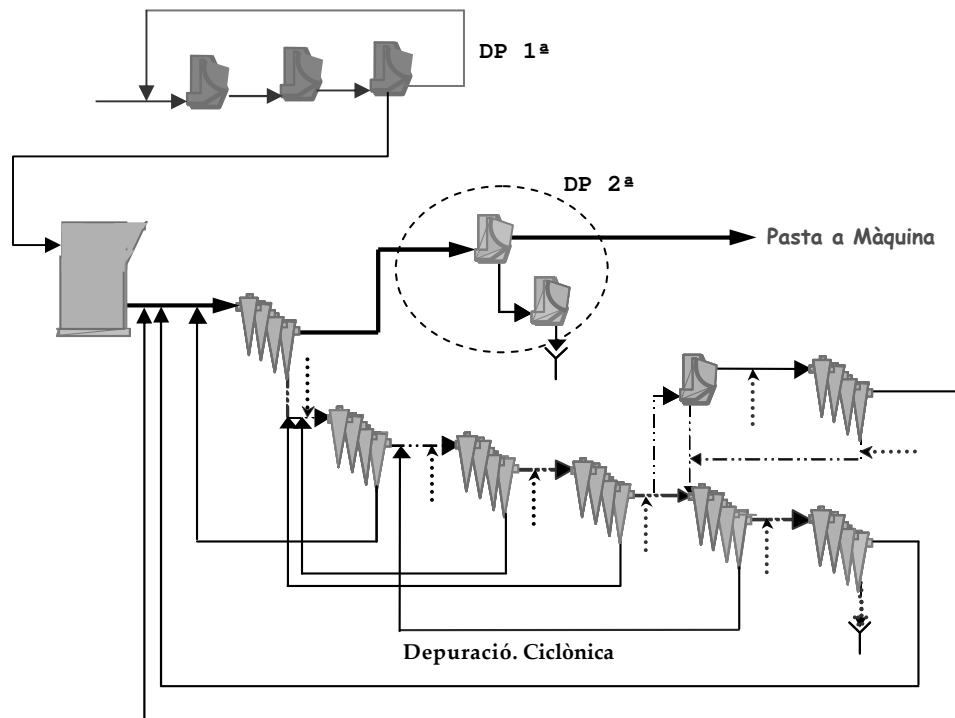


Figura VII.4: Esquema de les etapes de depuració

VII.A.3.3.2. Depuració pressuritzada primària

En el procés de depuració pressuritzada bàsicament es sotmet el flux de pasta de paper diluïda a un procés físic de depuració, consistent en fer passar la pasta a alta velocitat per una filtre o malla. En conseqüència aquesta depuració es duu a terme a pressió, d'aquí el terme de depuració pressuritzada.

L'efecte és de tamisat, aconseguint separar un flux de pasta que no aconsegueix passar per la malla en forma de rebuigs, i un flux principal de pasta depurada o acceptat.

La primera etapa del procés de depuració consisteix en tres filtres grollers per tal d'eliminar partícules grans presents a la pasta. Els rebuigs més habituals d'aquesta etapa contenen petits fragments metàl·lics procedents de filferros, clips, trossos de llauna de refresc, o altres restes procedents de la manipulació i preparació de la pasta. Aquests fragments serien enormement perjudicials tant pels equips de fabricació com pel procés si arribessin a superar aquesta etapa. En menor mesura, també es poden trobar grans flocs de fibres que no s'ha aconseguit individualitzar o grans cristalls de càrregues minerals.

La pasta té un ajust de consistència per treballar sempre amb els paràmetres de concentració idonis.

VII.A.3.3.3. Depuració ciclònica

La base tècnica d'aquest procés és sotmetre el flux de pasta diluïda a un procés físic de depuració, consistent en fer passar la pasta per una sèrie de bateries de hidrociclons. L'efecte desitjat és la separació d'impureses de la pasta per la seva relació pes-volum. S'obté un flux de pasta depurada o acceptats i un flux de pasta rebutjada.

El procés està format per set bateries de ciclons independents, cadascuna amb l'ajust de consistència corresponent entre fase i fase. L'aigua utilitzada per la dilució també és recirculada, encara que es busca aigua de més puresa i per tant acostuma a ser aigua filtrada.

La primera bateria de ciclons és l'única que genera dos fluxos de rebuig, un d'alta densitat o rebuigs pesats i una de lleugers. En els rebuigs lleugers s'acumulen aquelles partícules que estan per sota de la relació pes-volum típica de la pasta. Els rebuigs pesats estan òbviament per sobre en aquesta relació, i acostumen a ser petits grumolls, fibres empaquetades o cristalls massa grans de càrregues.

La fracció de pasta acceptada en aquesta primera fase de depuració ciclònica segueix el seu curs i és enviada a la darrera etapa del procés de depuració (filtrat secundari). Mentrestant la fracció rebutjada entra en el cercle de depuració ciclònica pròpiament dit (veure Figura VII.4).

La resta d'etapes del sistema de depuració ciclònica pretenen recuperar la matèria primera apte per la fabricació de paper que no ha superat la primera selecció. Tal com es pot observar en l'esquema de procés, el flux acceptat en una bateria de ciclons és recirculat al procés de preparació de pastes, just abans de la primera fase de depuració ciclònica, donant així una altra oportunitat de superar-la. En d'altres casos aquests acceptats són enviats a l'entrada de l'anterior bateria de ciclons. Així es permet remuntar etapes a la fracció aprofitable del flux fins a ser recirculada i tenir una altra opció de superar el procés de depuració ciclònica.

La fracció de la pasta definitivament no apta és rebutjada successivament en les diferents etapes i finalment eliminada del sistema a la sortida de la sisena fase de depuració ciclònica, amb destí a planta depuradora d'efluents. Aquests rebuigs són majoritàriament càrregues, fracció mineral, tal i com es desprèn del control i anàlisi al laboratori.

Per millorar el procés i disminuir la pèrdua de matèria es va afegir un recuperador de càrregues al procés de depuració. El recuperador s'encarrega de fragmentar els cristalls o aglomerats de cristalls minerals. Per completar aquesta recuperació s'instal·là una setena etapa de depuració ciclònica que separa d'una banda la matèria aprofitable, que és recirculada just abans de l'inici del procés de depuració ciclònica; i d'altra banda els rebuigs que seran finalment eliminats i enviats a la planta de depuració d'efluents.

VII.A.3.3.4. Depuració pressuritzada secundària

La base d'aquesta depuració pressuritzada secundària és la mateixa que la primària, la filtració a pressió de la pasta. Però a diferència de la primària que era una filtració grollera, la secundària és molt refinada. L'objectiu és eliminar petites aglomeracions de matèria primera que haguessin aconseguit superar la depuració ciclònica.

La depuració pressuritzada secundària consta de dos filtres en sèrie. El primer i principal tracta la pasta que prové de les anteriors depuracions, i representa el darrer pas que ha de superar la pasta paperera abans d'iniciar la producció pròpiament dita. El segon filtre tracta els rebuigs de la primera filtració, per tal d'aprofitar aquells rebuigs encara útils i descartar definitivament els rebuigs, enviant-los a planta depuradora d'efluents.

VII.A.4. Procés de fabricació del full de paper

La pasta de paper un cop superats els diferents processos de depuració ja es troba en condicions d'entrar al procés de fabricació del paper pròpiament dit. El procés s'inicia amb l'arribada de la pasta a la màquina de paper.

VII.A.4.1. Màquina de paper

La màquina de paper és el punt clau de la fabricació de paper. En funció de la configuració de la màquina rep un nom característic. En aquest cas, es tracta d'una màquina de taula plana o Fourdrinier.

La Figura VII.5 il·lustra la configuració típica d'aquest tipus de màquines, que coincideix amb la màquina del present estudi.

La màquina de paper es pot subdividir en 3 parts bàsiques:

- Caixa d'entrada
- Zona humida
- Zona seca o sequeries

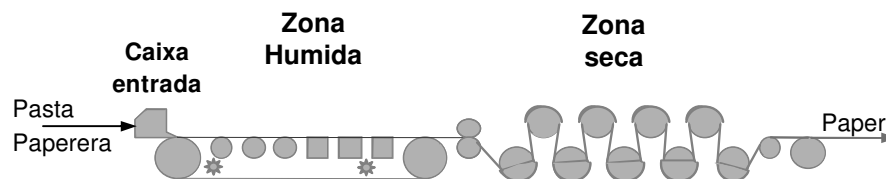


Figura VII.5: Esquema de les parts bàsiques de la màquina de paper

VII.A.4.2. Caixa d'entrada

El procés de fabricació de paper comença amb la recepció de la pasta a la caixa d'entrada de la màquina de paper. La caixa d'entrada té una importància clau en el procés de fabricació. Les velocitats de funcionament de les màquines actuals fan que el paper de la caixa d'entrada sigui molt important, regulant el cabal i la distribució de la pasta a la zona de formació del full de paper. Qualsevol petit problema a la caixa pot provocar descensos en la qualitat de paper, o trencar el full de paper i paralitzar la producció.

A aquestes alçades del procés la pasta no deixa de ser una solució homogènia molt diluïda, al voltant d'un 1% en sòlids o consistència.

La recepció de la pasta té lloc per la part posterior de la caixa, on el conducte que transporta la pasta és subdivideix per tal de garantir una distribució

correcta en l'entrada de pasta. El cabal d'entrada és superior al de sortida, generant un excedent que és retornat al procés de preparació de pastes. D'aquesta manera es garanteix un flux continuat, que impedeix distribucions i concentracions diferencials de la pasta al formar el full de paper. L'objectiu fonamental és assegurar un producte constant i homogeni.

El temps de residència de la pasta a la caixa és molt reduït, tot i així la pasta està en agitació per mantenir homogènia la pasta. Aquesta és distribuïda uniformement sobre la tela de la màquina de paper a través del llavi de la caixa.

VII.A.4.3. Zona humida

La pasta distribuïda sobre la tela a través del llavi de la caixa d'entrada, entra a la zona humida de la màquina de paper. Aquesta zona té un doble objectiu: la formació del full de paper i l'eliminació de gran part de l'aigua.

La tela de la màquina de paper és la base per la formació del full de paper. Es tracta d'un suport sintètic porós continu, que gira a gran velocitat, de 300-400 m/min fins a velocitats superiors als 1000 m/min en funció del tipus i model de la màquina. A la vegada la tela serveix per extreure bona part de l'aigua de la pasta paperera, per així formar el full de paper d'aspecte ara ja sòlid.

En aquest cas, es tracta d'una tela de 3 metres i 10 centímetres d'amplada que acostuma a girar a velocitats compreses entre els 340 m/min i els 425 m/min, en funció bàsicament del gramatge produït.

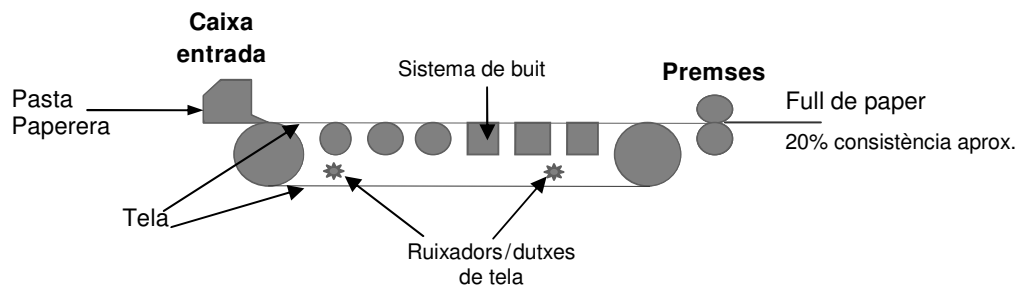


Figura VII.6: Esquema de la zona humida de la màquina de paper

L'extracció d'aigua a la tela és selectiva, en diferents zones a mesura que avança el full de paper. Té lloc per gravetat, amb l'ajuda de diferents aparells o tècniques dissenyades a tal efecte. La primera secció de la tela té lloc una extracció d'aigua per gravetat, al drenar l'aigua de la suspensió fibrosa a través dels porus de la tela. En la següent secció l'extracció per gravetat es veu ajudada per diferents mecanismes que afavoreixen l'evacuació de les aigües blanques. Es poden diferenciar dos tipus d'ajudes: de tipus mecànic i mitjançant el sistema de buit. Del primer tipus es podria destacar els "foils". De mecanismes d'extracció d'aigua amb l'ajuda de buit es podria destacar les caixes aspirants, o el cilindre aspirant (que combina l'acció del buit i la força centrífuga per expulsar l'aigua).

Al final d'aquesta etapa de formació del full de paper, la suspensió fibrosa al 1% s'ha convertit en un full d'aparença sòlida, molt delicat però, que volta el 20% de consistència o el que és el mateix 80% d'humitat.

El full de paper ja està format, només resta extreure aigua per acabar de donar les propietats finals. L'aigua cada cop és més difícil d'extreure, ja s'ha eliminat l'aigua gravitacional. Per eliminar l'aigua de contacte es fa necessària l'aplicació d'energia. Així, la següent etapa en el procés

d'extracció d'aigua es realitza amb mitjans mecànics, a través de pressió. Les premses són l'etapa intermèdia de la fabricació de paper i tenen per missió eliminar una gran part de l'aigua que encara acumula el full de paper un cop format. Després del procés de premsat el grau de sequedat mig que ha assolit el full de paper és aproximadament del 45%.

VII.A.4.4. Zona seca

L'última etapa d'extracció d'aigua són les sequeries. A les sequeries el full de paper ha d'assolir un grau de sequedat del 95% aproximadament. Aquest fet provoca que sigui un procés amb una demanda important d'energia. L'extracció d'aquesta aigua retinguda en el paper s'ha de realitzar mitjançant evaporació. Els mitjans utilitzats varien, en aquest cas és un dels més habituals el sistema de corròns escalfats mitjançant vapor.

Un cop assolit el grau de sequedat desitjat el paper és bobinat. Aquí finalitza el procés de fabricació a la màquina. Posteriorment es donen altres tractaments al paper per tal d'augmentar-ne propietats físiques, òptiques, i la qualitat del producte final. Aquests tractaments són el calandrat, l'estucat, el gofrat. Són processos off-line, separats del procés principal, en aquest cas de la màquina de paper.

Un cop el paper ja està acabat només queda el rebobinat i l'acondicionament desitjat pel client tallat, empaquetat, etc.

VII.A.4.5. Circuit d'aigües

La fabricació de paper implica la utilització de grans quantitats d'aigua. Tal com s'acaba d'explicar es forma el full de paper a partir d'una suspensió

fibrosa on el 99% és aigua, i al final del procés el producte acabat només té un 5% d'aigua. Antigament aquesta aigua sobrant era abocada directament, a la llera del riu o a depuradora, una pràctica impensable ara mateix tan pels impactes ambientals que provoca com pels costos associats (malgastar aigua, matèries primeres i energia).

Per tal d'aprofitar aquest excedent d'aigua i altres matèries dissoltes on en suspensió que no han quedat retingudes en la formació del full de paper, es va crear un circuit paral·lel al de fabricació anomenat circuit d'aigües.

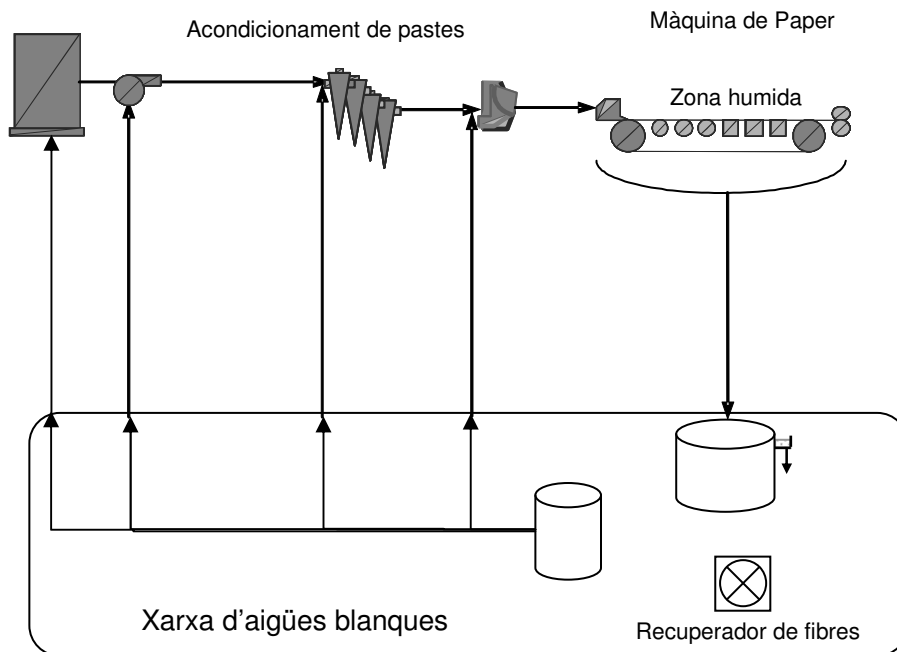


Figura VII.7: Esquema simplificat del circuit d'aigües

VII.A.4.5.1. Descripció del circuit d'aigües

El circuit d'aigües comença amb la recollida de les anomenades aigües blanques, anomenades així pel seu aspecte blanquinós degut a les matèries

dissoltes i en suspensió que no han estat retingudes al full de paper. Les aigües blanques es recullen bàsicament sota la tela formadora de la màquina de paper i es recullen en diferents dipòsits segons la seva procedència. La Figura VII.8 permet diferenciar amb més detall la configuració del circuit d'aigües a través d'un esquema basat en la simulació elaborada per el present estudi.

Les aigües drenades de la pasta per la tela, amb un contingut superior en fibres i additius, són recollides immediatament i enviades a un tanc conegut com a sitja (o "silo" col·loquialment). Aquestes aigües blanques riques en matèria primera serviran per dilucions de la pasta paperera en el circuit curt o primari d'aigües.

La resta d'aigua recollida a la primera secció de la màquina, on la major part del cabal prové de les dutxes i ruixadors encarregats de la neteja de la tela, es recull en un dipòsit subterrani just sota la màquina. Aquest dipòsit alimenta el tanc general d'emmagatzematge d'aigües blanques, juntament amb altres tancs. El destí de les aigües allí recollides serà en primer lloc dilucions i ajustos de consistència en les unitats inicials de l'acondicionament de la pasta. En segon lloc, l'excedent es converteix en la font d'alimentació del recuperador de fibres o filtre d'aigües blanques, en aquest cas el filtre de discs. Tots aquests usos posteriors de les aigües blanques formen part de l'anomenat circuit secundari de la xarxa d'aigües blanques, terme introduït al capítol II del present treball.

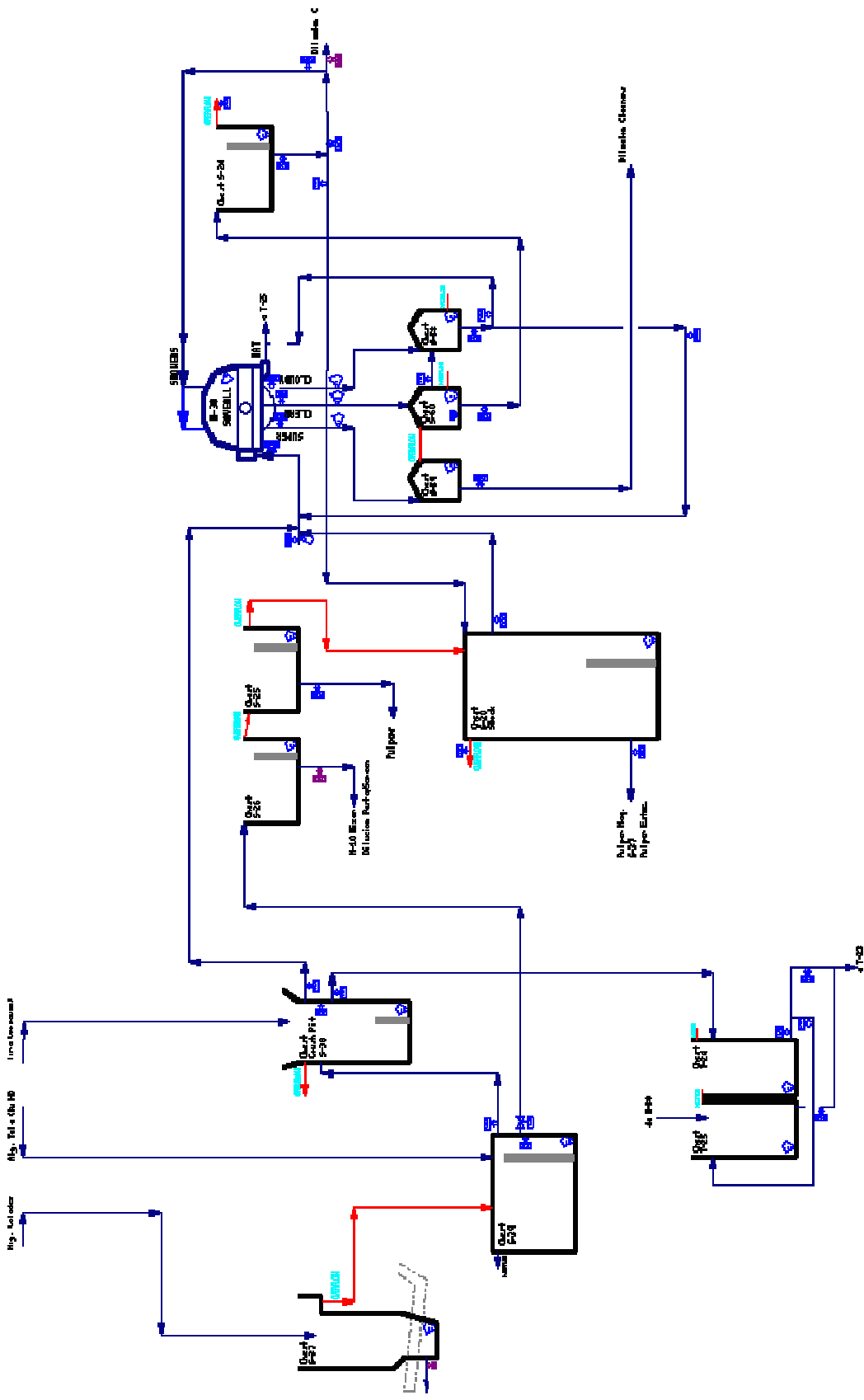


Figura VII.8: Esquema de configuració del circuit d'aigües

L'aigua extreta mitjançant l'ajuda d'aparells de buit és recollida en un altre reservori d'aigua i enviat al dipòsit general d'aigües blanques. De la mateixa manera, l'aigua extreta a les premses és recollida i té per destí final el dipòsit general d'aigües blanques.

L'aigua retinguda a les baietes, una superfície sintètica absorbent situada entre les etapes de premsat i les sequeries, es recull a part i no entra a la xarxa d'aigües blanques. El possible contingut en microfibrilles sintètiques desaconsella totalment la reutilització d'aquests cabals, normalment minsos en comparació amb el volum total d'aigua.

VII.A.4.5.2. Recirculació de les aigües

Un cop les aigües blanques han estat recollides i separades segons la seva qualitat i l'ús que se'n pretén fer, es descriurà el seu destí. Existeix una diferenciació en la terminologia, utilitzada sovint en referències bibliogràfiques especialitzades [2], per diferenciar les aigües blanques segons l'ús i el tractament que rep l'aigua. D'aquesta manera es parla de reutilització d'aigües a l'acció de recircular aigües blanques en altres unitats del procés, sense cap tractament per extreure'n sòlids. Per contra, el reciclatge d'aigües va associat a la utilització d'aigües blanques després de ser tractades per eliminar-ne bona part dels sòlids. En aquest cas concret, després de ser filtrades al filtre de discs.

Les aigües recollides de la sitja són l'exemple més clar de reutilització, però també altres com les procedents dels dos petits dipòsits (senyalats a la Figura VII.8) que alimenten els púlpers per dispersar les fibres.

Les aigües tractades al filtre de discs es recullen en tres dipòsits d'acord amb les tres qualitats d'aigua que genera aquesta unitat. Aquestes tres qualitats

d'aigua s'acostumen a definir amb els noms d'aigua superclara, clara i tèrbola; amb ordre creixent en quant a concentració de sòlids en suspensió presents. La destinació final d'aquestes aigües dependrà d'aquesta qualitat. L'aigua superclara es recicla a les unitats amb una demanda de superior qualitat, com ara ruixadors que no toleren la presència de fibres o altres sòlids que podrien arribar a obturar-ne la sortida. La qualitat intermitja, aigua clara, es recicla majoritàriament per realitzar ajustos de consistència en zones sensibles respecte l'aigua de dilució, com ara algunes bateries de depuració ciclònica. L'aigua tèrbola s'utilitza per les demandes menys exigents, bàsicament al propi filtre de discs o en neteges de la pròpia planta. L'excedent d'aigües clares, i superclares si es dóna el cas, es recull en un gran dipòsit d'emmagatzematge d'aigües filtrades. Aquest dipòsit fa el paper de pulmó per alimentar el procés quan la demanda és superior a la generació per part del filtre de discs, en cas d'aturades imprevistes de la producció o bé per realitzar neteges durant les parades programades.

VII.A.4.5.3. Influència en els consums

Quan es va iniciar el present estudi, aquest dipòsit pulmó d'aigües filtrades era de dimensions bastant reduïdes. Com a conclusió de l'estudi inicial centrat en el circuit d'aigües de la planta es creia necessari augmentar-ne considerablement el volum i evitar la pèrdua d'aigua, que en aquell moment representava la principal via d'eliminació d'aigua. Era una pèrdua totalment innecessària i a més costosa, ja que es tracta d'aigües tractades.

A la Figura VII.9 es pot observar l'ordre de magnitud de les pèrdues d'aigua en aquest punt.

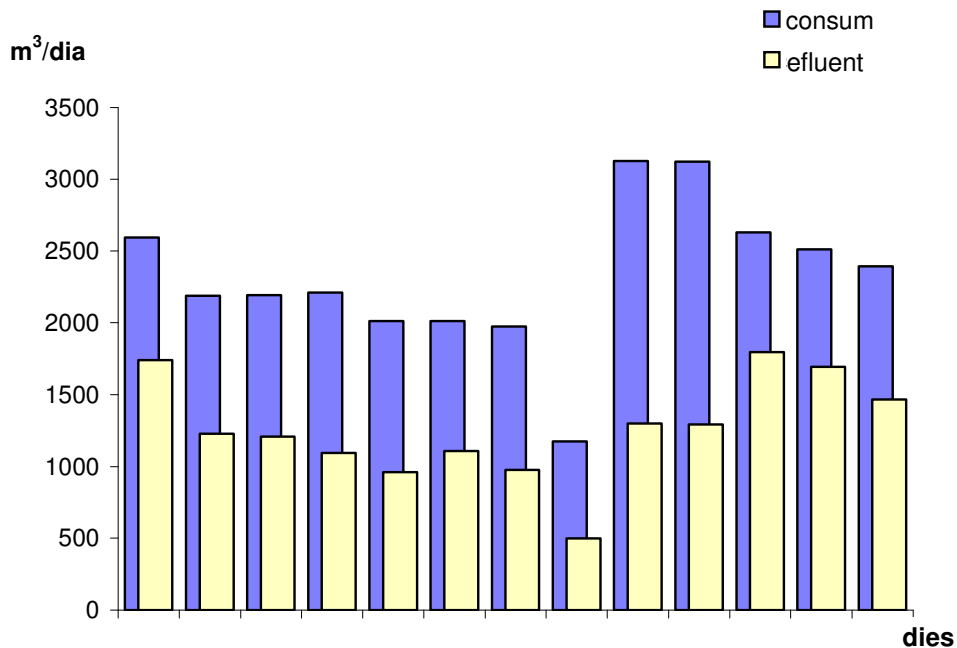


Figura VII.9: Recull diari de consums d'aigua fresca i efluent d'aigua filtrada

En terme mig, aquest efluent es situava en dies de règim de producció normal entre els 500 m³ i els 800 m³, i arribava a valors superiors de 1500 m³ en dies de parada general per neteja i manteniment preventiu.

Aquestes quantitats diàries d'aigua desaprovechada són realment considerables i presenten oscil·lacions anuals. En períodes més calorosos representa entre un 25% i un 35% de l'aigua consumida. Mentre que durant l'hivern s'assoleixen valors entre el 40% i el 68% del consum total d'aigua.

Un cop millorat i augmentat la capacitat del tanc, aquest efluent s'ha eliminat de la planta, avançant encara més en el procés de tancament de circuits.

VII.B. VALIDACIÓ EXPERIMENTAL DE LA SIMULACIÓ

El disseny, la construcció, l'ajust i la validació d'aquesta simulació ha estat descrit a l'apartat de metodologia utilitzada, capítol V. A continuació es presentaran les dades corresponents al procés de validació de la simulació. La validació consisteix en comparar dades reals del procés estudiat, no utilitzades durant la construcció de la simulació, amb dades calculades pel propi simulador [3]. D'aquesta manera es contrasta si els resultats obtinguts amb la simulació es corresponen amb els valors observats a la realitat.

Per tal de realitzar la validació de la simulació utilitzada en el present estudi s'utilitzen tres tipus de dades bàsiques:

- i. Paràmetres fixats
- ii. Paràmetres variables
- iii. Paràmetres estimats

Els paràmetres fixats corresponen a dades clau del procés invariables respecte els canvis de gramatge realitzats en el procés productiu. Són dades experimentals obtingudes directament de fàbrica.

Els paràmetres variables corresponen a dades experimentals obtingudes a fàbrica corresponents a punts o unitats del procés que són dependents del gramatge de paper produït.

Per últim, els paràmetres estimats són dades obtingudes mitjançant càlculs matemàtics a través de balanços de matèria i/o energia, generalment calculats amb l'ajuda del simulador. Aquest tipus de dades seran útils a l'hora de realitzar la validació.

El funcionament de la simulació per tal d'obtenir aquestes dades és el següent (complementat amb la il·lustració de la Figura VII.10):

- i. La simulació conté els paràmetres fixes corresponents als equips de funcionament independent del gramatge del paper produït.
- ii. En funció del gramatge seleccionat, les dades corresponents al paràmetres variables s'actualitzen a la simulació. Corresponen a dades obtingudes directament del procés que varien en funció del tipus de producció
- iii. A través del càlcul matemàtic mitjançant blocs seqüencials, el simulador calcula les dades restants (paràmetres estimats).

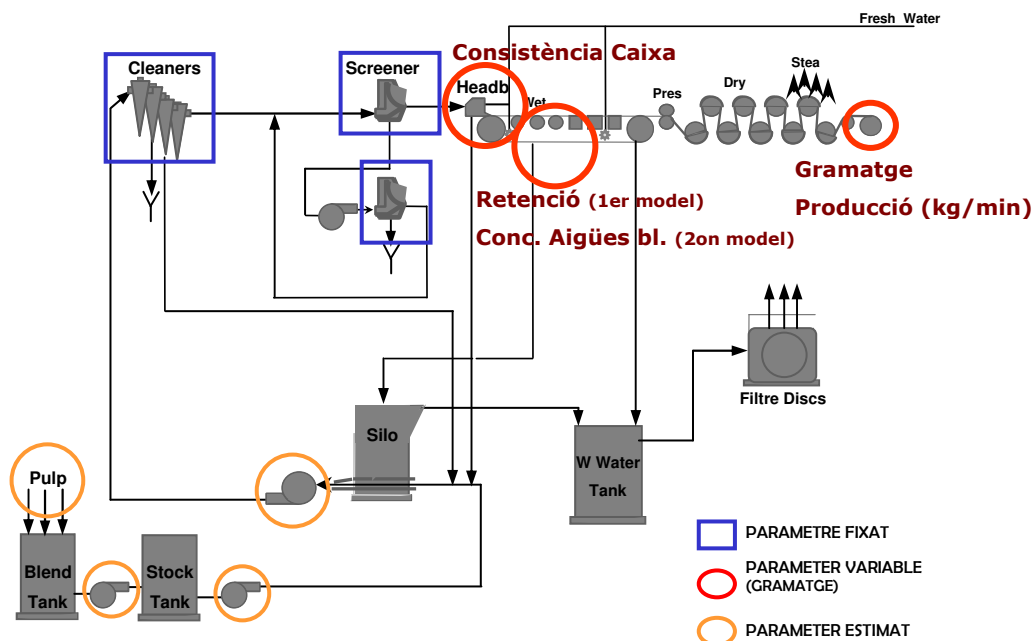


Figura VII.10: Funcionament de la simulació seqüencial

En la present simulació l'ordre de càlcul dels paràmetres és particular. L'ajust es realitza de forma inversa, començant pel final del procés amb el gramatge produït i el tonatge total de la producció. A partir d'aquest punt els càlculs remunten el procés fins arribar a l'inici. El simulador torna a calcular de nou els paràmetres a cada unitat de forma iterativa fins a convergir.

VII.B.1. Resultats de la validació

Els resultats de la validació es presenten en forma de gràfiques comparatives de resultats de simulació i dades experimentals.

La primera gràfica, Figura VII.11, mostra l'ajust de les dades de velocitat de tela de la màquina de paper del procés respecte els valors obtinguts per simulació.

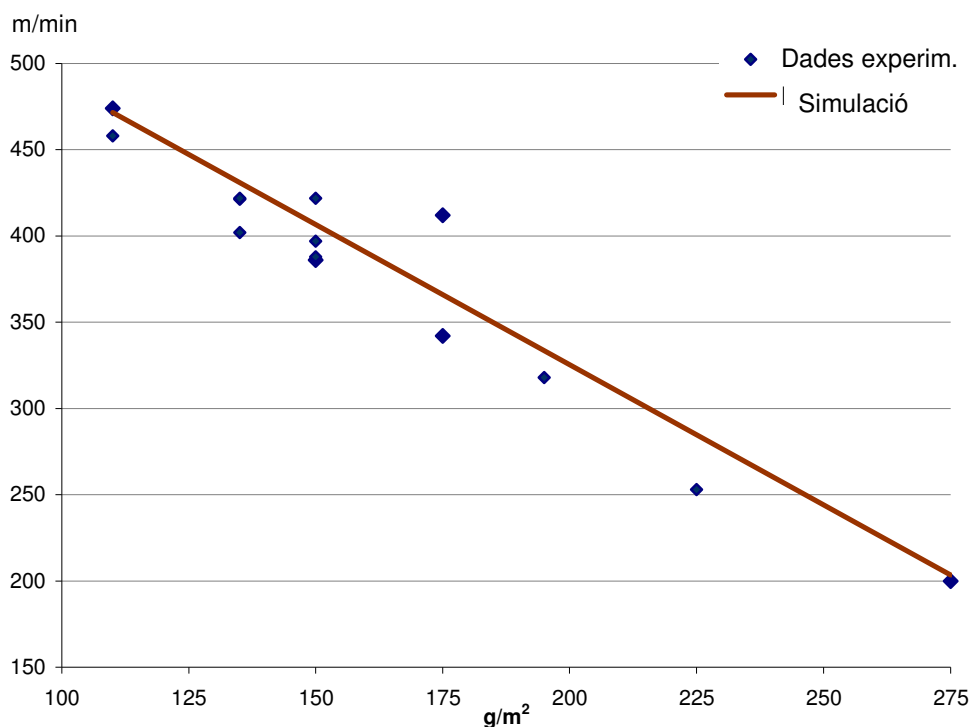


Figura VII.11: Velocitat de tela vs. Gramatge

Els valors de simulats s'ajusten a la tendència observada experimentalment, la velocitat de la tela decreix de forma gairebé lineal a mesura que es s'augmenta el gramatge produït. La velocitat de tela és un paràmetre clau per determinar el gramatge del paper i presenten una relació inversament proporcional.

A la zona intermèdia, gramatges al voltant de 175 g/m^2 , es poden observar desajustos corresponents a la realització de proves d'augment de velocitat de tela per incrementar la producció. Generalment s'acostumen a fer aquest tipus de proves en els gramatges més freqüents i menys problemàtics, o sigui amb menys problemes de trencament de full de paper.

La Figura VII.12 mostra l'ajust de les dades de cabal a la caixa d'entrada de la màquina de paper respecte els valors obtinguts per simulació.

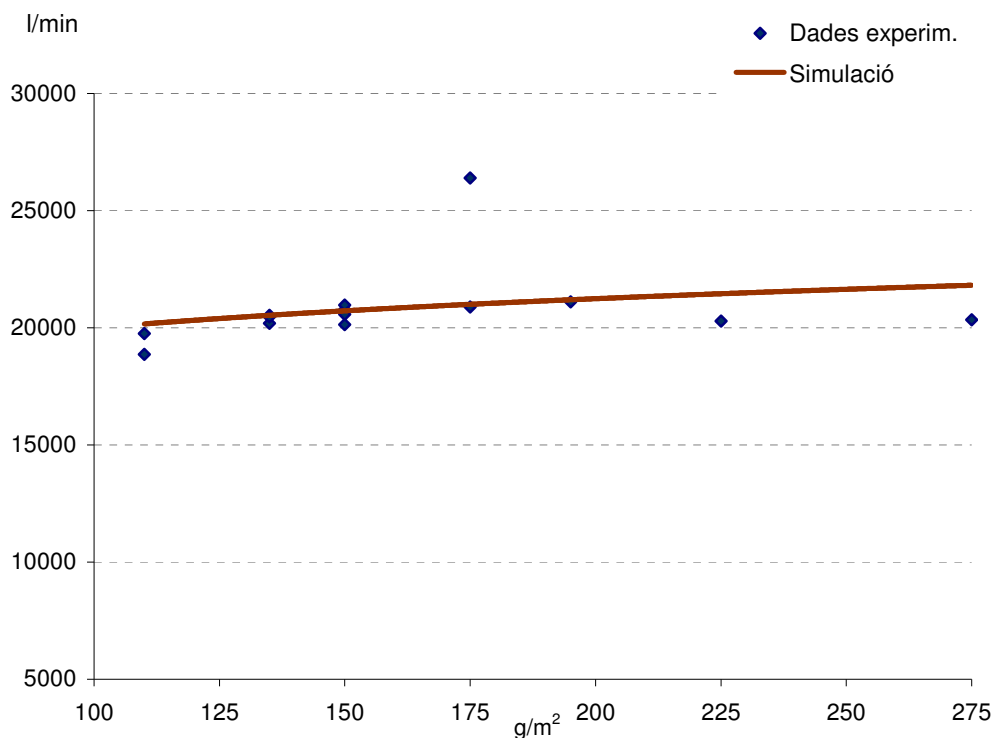


Figura VII.12: Cabal a caixa d'entrada vs. Gramatge

Altres cops l'ajust de dades simulades i experimentals és bo, excepte un punt discordant fàcilment atribuïble de nou a proves de tipus tècnic. Aquest és l'únic punt que s'escapa de la tendència general d'augment molt minso del cabal de pasta a la caixa d'entrada a mesura que s'augmenta el gramatge. Com és lògic el cabal augmenta a mesura que es produeix paper més gruixut,

però la relació és feble, s'observa una major importància de la velocitat de tela en la determinació del gramatge final del paper.

La variació de gramatge també es pot ajustar a través de canvis en la consistència de la pasta a nivell de la caixa d'entrada a la màquina de paper.

La Figura VII.13 mostra la relació entre consistència total a caixa d'entrada respecte el gramatge produït en aquest estudi.

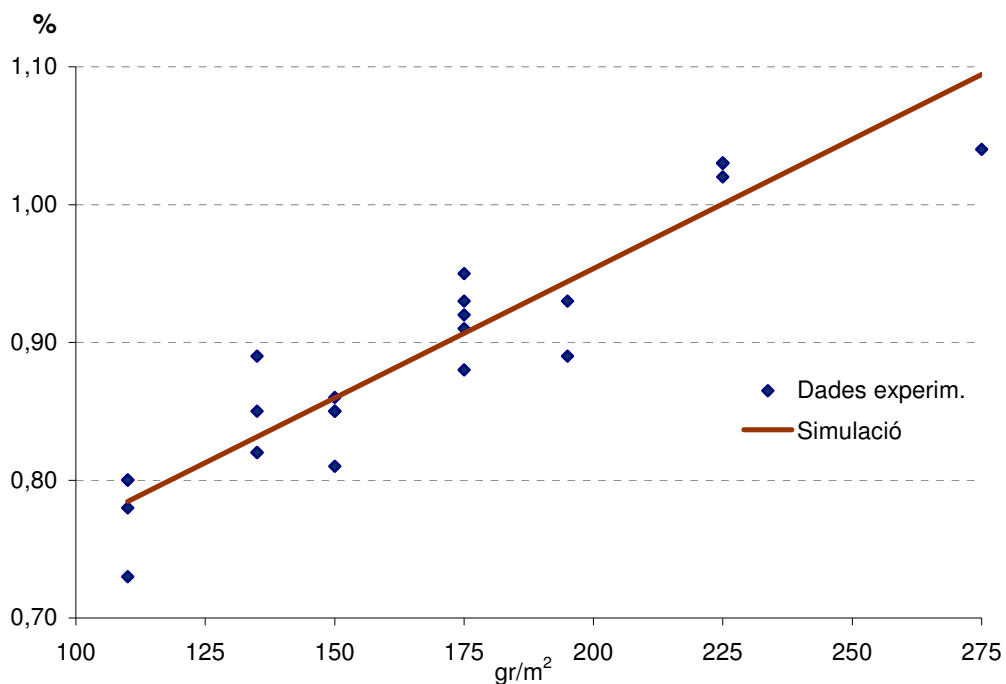


Figura VII.13: Consistència total a caixa d'entrada vs. Gramatge

De tota manera la consistència de la pasta acostuma a mantenir-se molt constant, però es cert que es poden observar petites variacions intrínseques quan es realitzen canvis freqüents de gramatge. En aquests casos s'observa una major variació de la consistència a caixa d'entrada perquè el seu paper en la determinació final de la consistència adquireix major importància. La velocitat de tela i el cabal a la caixa d'entrada són els paràmetres principals a l'hora de determinar el gramatge final del paper produït, però la consistència a

la caixa d'entrada també pot resultar important especialment en els gramatges intermedis.

S'observa com els valors de la simulació segueixen la mateixa tendència que els valors observats, encara que s'observa una variació apreciable dels valors experimentals en un mateix gramatge. Aquestes lleugeres variacions en les consistències són habituals, degut a fluctuacions del procés. Les variacions més importants que s'observen són motivades per variacions del punt de consigna de la consistència, realitzada pels tècnics de màquina. Habitualment aquestes variacions del punt de consigna van relacionades amb ajustos de producció que també inclouen variacions de cabal de pasta i de velocitat de tela.

D'altra banda, a la Figura VII.14 es pot observar la relació entre la consistència de les aigües blanques de la màquina de paper i el gramatge.

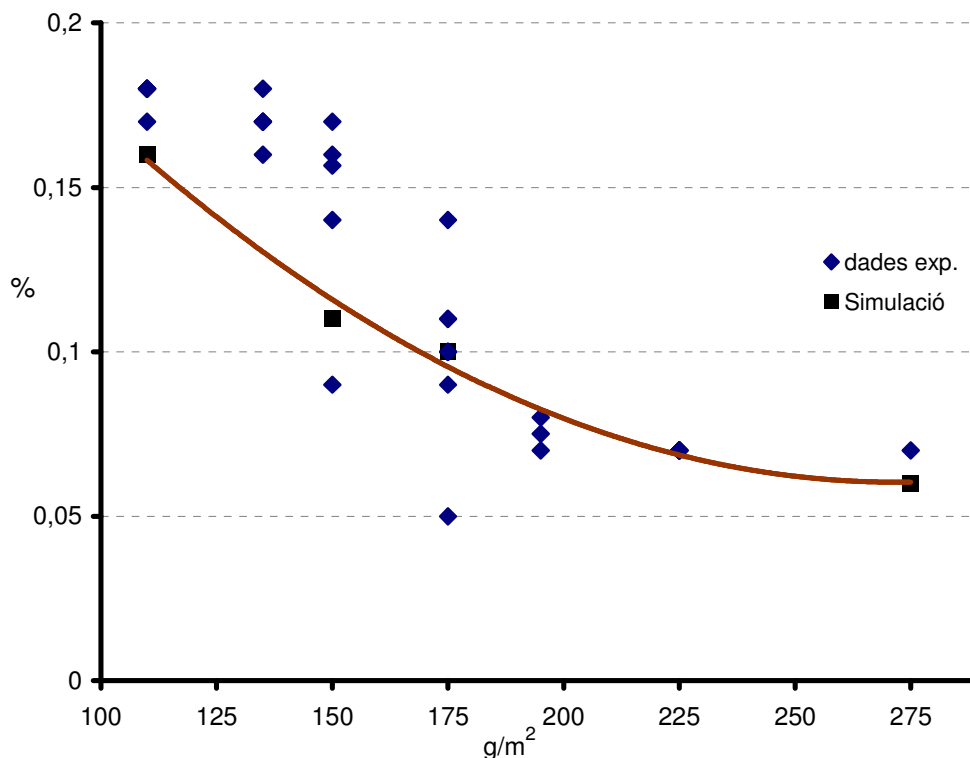


Figura VII.14: Consistència d'aigües blanques vs. Gramatge

Degut a la retenció de sòlids durant la formació del full de paper, la concentració de les aigües blanques varia significativament de manera que es converteix en un bon indicador de l'índex de retenció total.

Per últim, un paràmetre molt relacionat amb la consistència de les aigües blanques, com és la fracció de càrregues en aquestes aigües blanques. La Figura VII.15 mostra la relació entre la fracció de càrregues en les aigües blanques i el gramatge. La relació entre ambdós paràmetres segueix les mateixes pautes que el cas anterior, i pels mateixos motius, relacionats sempre amb la retenció durant la formació del full de paper.

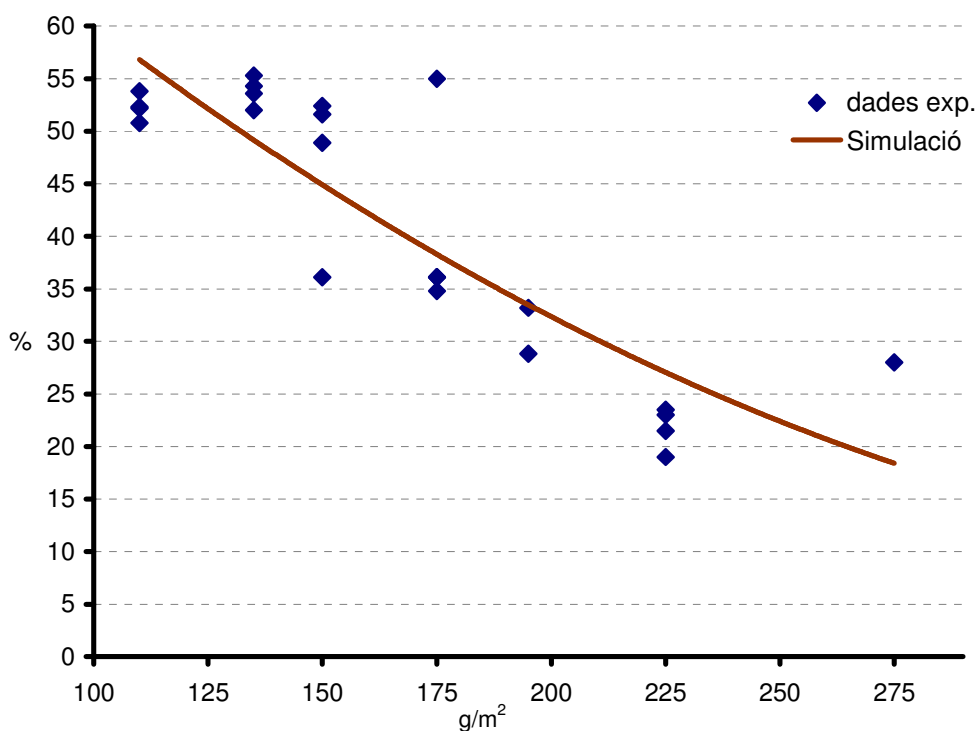


Figura VII.15: Percentatge de càrregues en aigües blanques vs. Gramatge

En aquest cas, també s'observa una variació important en valors del mateix gramatge, degut a variacions de la retenció. S'observa però un punt bastant allunyat de la resta, corresponent als 175 g/m^2 de gramatge, que seria un valor anòmal en les analítiques realitzades.

La resta de valors presenten un ajust acceptable entre dades experimentals i valors simulats.

La Taula VII.1 recull la comparativa de dades reals i dades obtingudes mitjançant la simulació que constitueixen la base de la validació. Les dades que figuren com a mitjanes, són la mitjana aritmètica dels valors observats a fàbrica per cadascun dels paràmetres escollits. S'ha inclòs el valor mínim i màxim per donar una idea de la variabilitat intrínseca del paràmetre.

Finalment s'inclou el valor obtingut mitjançant la simulació. Cadascuna de les cel·les amb els valors màxim, mínim i de simulació porta associada el valor de desviació respecte la mitjana de valors de fàbrica.

Taula VII.1: Comparativa de dades reals i dades obtingudes per simulació

	Mitjana	Mínim	Màxim	Simulació
Caixa entrada (C%)	0.95	0.88	1.05	0.95
Desv. mitjana (%)		-7	10	0.5
Aig. Blanques (C%)	0.10	0.05	0.14	0.10
Desv. mitjana (%)		-49	42	0.5
Retenció Total (%)	89.3	90.1	86.6	90.0
Desv. mitjana (%)		1	-3	0.8
Retenció càrreg. (%)	78.6	65.9	84.0	92.1
Desv. mitjana (%)		-16	7	17
Càrr. a Aig.Blanq (%)	39.0	34.8	55.0	17.2
Desv. mitjana (%)		-11	41	-55

Els resultats obtinguts mitjançant la simulació difereixen poc de la mitjana de valors reals observats. En els valors de referència corresponents a la consistència a la caixa d'entrada de la màquina de paper, a la consistència de

Descripció i aplicació a un procés industrial existent

les aigües blanques i a la retenció total, la diferència entre el valor de simulació i la mitjana de valors reals és inferior al 1%.

En l'annex s'han inclòs sèries de dades més completes utilitzades per la validació de la simulació.

En els casos específics referents a les càrregues a la màquina de paper les diferències són superiors. Degut al model de retenció que incorpora el simulador, on tots els sòlids són tractats globalment en el càlcul de la retenció, el valor de simulació de la retenció de càrregues difereix del valor mitjà real. Tot i això la desviació respecte la mitjana no és superior a la variabilitat intrínseca observada en els valors reals. Degut a aquesta desviació en la retenció, la proporció de càrregues no retingudes és menor i en conseqüència el percentatge de càrregues a les aigües blanques a la simulació és inferior als valors reals.

A la vista dels resultats obtinguts aquí presentats es considera que la simulació és representativa per reproduir el procés estudiat, i que l'etapa de validació és satisfactòria.

REFERÈNCIES

- [1] Goldberg D.E. "Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning" Ed. Addison Wesley Longman (1989).
- [2] Wang Y.P., Smith R. "Wastewater minimization" Chemical Engineering Science 49, pp. 981-1006 (1994).
- [3] Energy Cost Reduction in the Pulp and Paper Industry, Monograph, PAPRICAN ed., Pointe-Claire, Qc (1999).

CAPÍTOL VIII

VIII. RESULTATS DE L'OPTIMITZACIÓ DEL PROCÉS INDUSTRIAL EXISTENT

VIII.A. APLICACIÓ

L'aplicació de la metodologia d'optimització presentada es realitza al procés descrit al capítol anterior, amb l'objectiu de minimitzar el consum d'aigua fresca i, a la vegada, minimitzar la pèrdua de sòlids del procés a través de les purgues realitzades en el processos de depuració.

L'aplicació no es realitza al conjunt de processos de fàbrica descrits, sinó que està centrada en el nucli del procés, en la part on més incidència té sobre el consum d'aigua i de matèries primeres. L'acotació de l'abast de l'estudi ha de permetre centrar els esforços a realitzar per assolir els objectius fixats i eliminar possibles fonts d'incertesa o de pèrdua d'efectivitat de la metodologia.

Així doncs, l'estudi queda centrat en el procés comprés entre la zona de preparació de pastes i la zona humida de la màquina de paper. La Figura VIII.1 permet visualitzar els límits de la zona d'estudi.

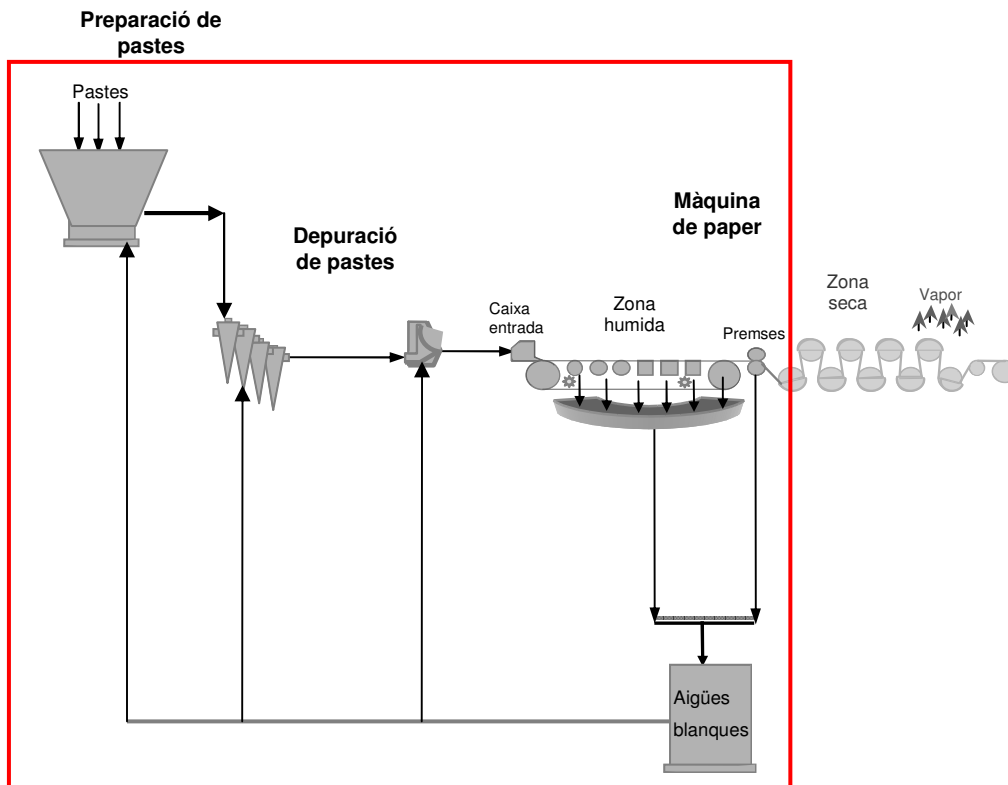


Figura VIII.1: Esquema simplificat de la secció del procés inclosa a l'estudi

VIII.B. CAS DE BASE

El procés d'optimització està concebut com un plantejament de reconfiguració de l'àrea de preparació de pastes. El punt de partida és la configuració de treball actual, il·lustrada de forma esquemàtica a la Figura VIII.2. La pasta paperera un cop mesclada i amb la composició final escollida entra al procés d'acondicionament, format per la secció de depuració ciclònica i la secció de depuració pressuritzada amb filtres, prèviament descrites amb més detall al capítol anterior.

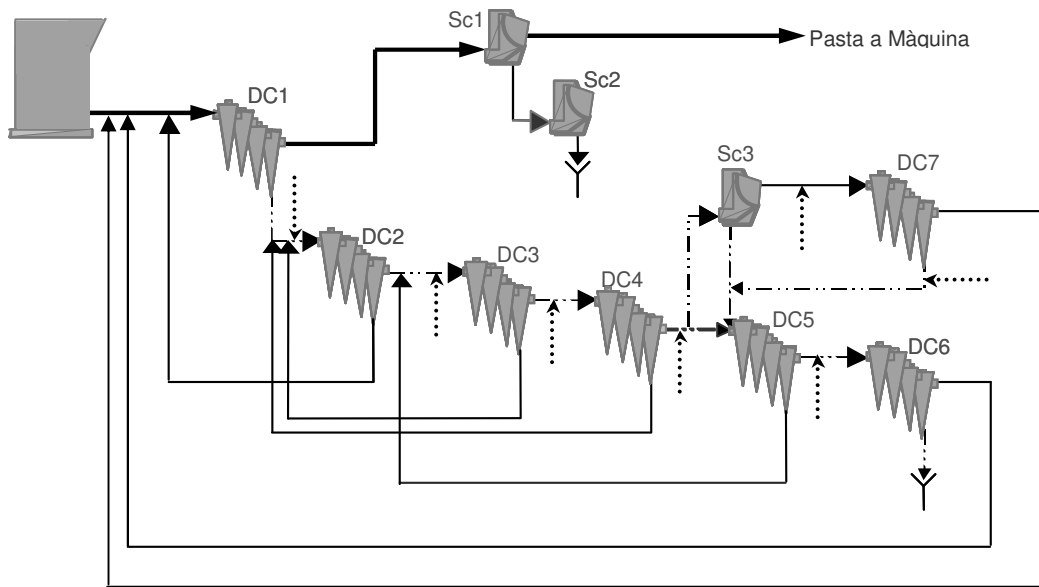


Figura VIII.2: Esquema del cas base abans d'optimitzar

Notació:

DC: depuració ciclònica

Sc: depuració pressuritzada (filtres)

.....> Entrada d'aigua externa (dilucions)

Tal i com es pot observar a la Figura VIII.2, la secció de depuració ciclònica forma un llaç semitancat per tal de depurar la pasta i al mateix temps perdre la mínima quantitat de massa. En aquesta secció es pot observar que entre etapa i etapa de depuració es fa necessària una dilució dels rebuigs per tornar a ser tractats a la següent bateria d'hidrociclons.

VIII.C. OPTIMITZACIÓ AMB OBERTURA TOTAL DEL SISTEMA

Partint de l'estructura del cas base, es realitza un plantejament d'optimització basat en la definició d'una superestructura, que és la concepció bàsica per realitzar l'optimització, on el sistema està totalment obert per identificar les fonts i les demandes de flux [1].

Aquest plantejament de base consistent en una obertura total del sistema queda reflexat a la Figura VIII.3.

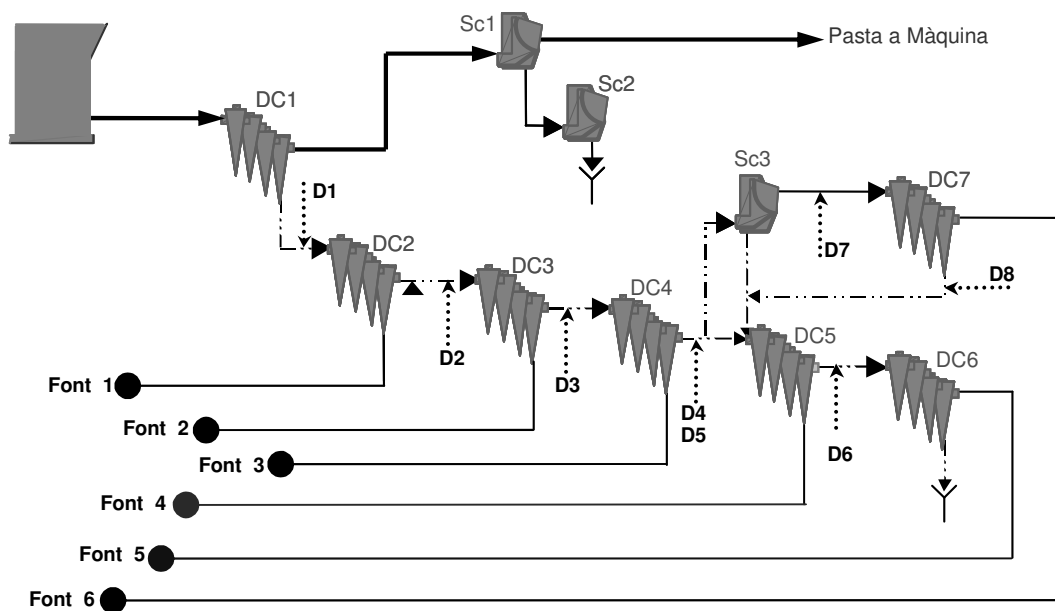


Figura VIII.3: Esquema de l'escenari d'optimització d'obertura total

L'obertura del sistema consisteix en eliminar totes les recirculacions del llac de depuració ciclònica, convertint-les en les denominades fonts (F) de flux. Aquest mecanisme dóna un grau de llibertat bastant gran al plantejament d'optimització. En total el sistema disposa de 6 fonts de flux a redistribuir.

Al mateix temps totes les dilucions presents, fins al moment satisfetes amb aigua externa al sistema, passen a ser demandes (D) de flux. D'aquesta manera el sistema de fonts i demandes, bàsic per un procés d'optimització, ja està definit.

La Taula VIII.1 recull els paràmetres principals de les fonts i les demandes en el plantejament d'optimització.

Taula VIII.1: Quadre resum dels paràmetres principals de fonts i demandes

Flux	Cabal (l/min)	C (%)	Fins (kg/min)
Font 1	1061,8	1,72	0,01
Font 2	263,6	1,98	0,01
Font 3	111,1	1,51	0,01
Font 4	1131,3	0,38	0,04
Font 5	265,0	0,32	0,02
Font 6	2898,0	0,28	0,03
Demanda 1	1788,0	-	-
Demanda 2	2331,9	-	-
Demanda 3	1719,0	-	-
Demanda 4	1814,0	-	-
Demanda 5	762,8	-	-
Demanda 6	245,0	-	-
Demanda 7	1456,6	-	-
Demanda 8	30,0	-	-

Capítol VIII

Els paràmetres de cabal, fibra i fins que determinen les característiques de les fonts provenen de la simulació informàtica, i es corresponen a les característiques dels fluxos existents a fàbrica que es decideixen interrompre i oferir-los com a grau de llibertat pel sistema d'optimització.

En el cas de les demandes, únicament existeix un paràmetre determinat que és el que determina la definició de demanda pròpiament, com a cabal a satisfer en un cert punt o unitat del procés. La resta de paràmetres es correspondrà a les restriccions imposades en la optimització.

Les restriccions fixades venen determinades per les característiques físiques o límits nominals de les unitats de treball, o bé per limitacions observades fruit de l'experiència dels responsables de fàbrica o bé per limitacions subjectives establertes a l'hora de redefinir el sistema.

La Taula VIII.2 recull les restriccions aplicades als fluxos definits com a fonts i com a demandes, en el plantejament d'optimització.

Taula VIII.2: Restriccions aplicades a fonts i demandes

Flux	Cabal (l/min)	C (%)	Fins (kg/min)
Font 1	—	-	-
Font 2	—	-	-
Font 3	—	-	-
Font 4	—	-	-
Font 5	—	-	-
Font 6	—	-	-

Flux	Cabal (l/min)	C (%)	Fins (kg/min)
Demanda 1	*	1,0	1,0
Demanda 2	*	1,0	1,0
Demanda 3	*	0,6	1,0
Demanda 4	*	2,0	1,0
Demanda 5	*	1,0	1,0
Demanda 6	*	1,0	1,0
Demanda 7	*	1,0	1,0
Demanda 8	*	0,5	1,0

* Restricció cenyida al cabal existent en el cas base, per respectar el funcionament de cada equip

VIII.C.1. Resultats

Com a resultat del plantejament d'optimització aquí presentat, les restriccions aplicades als fluxos i a les característiques intrínseques del procés, l'optimització realitzada en aquest escenari anomenat d'obertura total de sistema no arriba a resultats satisfactoris. Tot i que els resultats fruit de l'aplicació de la metodologia basada en els algorismes genètics presenten una distribució de fluxos que satisfà les demandes i les restriccions plantejades, es comprova mitjançant el redisseny del procés amb el simulador que el consum final d'aigua és superior al cas base. Al mateix temps que el procés genera uns excedents d'aigües blanques.

És evident que alguna cosa ha fallat. Si s'observa amb deteniment la simulació es poden observar certs problemes en alguns punts del sistema. Fruit de la nova distribució de fluxos s'ha provocat que algun dels tancs que acumulen l'aigua de dilució tinguessin un excés de cabal i sobreixissin. D'aquesta manera el que havia de ser una reconfiguració global òptima no

ha estat reeixida per culpa d'un seguit d'efectes col·laterals interns del procés. L'increment de concentració en certs punts provoca un consum excessiu d'aigua de dilució, cosa que eleva el consum total i provoca fins i tot aquest excedent d'aigües dels tancs.

En conclusió, els fets observats porten a pensar que el motiu principal del problema sorgit és el grau de llibertat que es dóna al sistema per a l'optimització. Amb aquest grau de llibertat gran, tot i complir amb tots els requisits, paràmetres i restriccions fixades, els resultats aconseguits no són bons.

Després d'assajar amb 30 noves configuracions assolides amb resultats no satisfactoris es decideix replantejar el procés.

VIII.D. OPTIMITZACIÓ AMB OBERTURA PARCIAL DEL SISTEMA

Un cop comprovat que la opció inicial de donar el màxim grau de llibertat al sistema amb l'obertura total de circuits no és reeixida, cal aprofundir més en l'estudi del procés per trobar un plantejament millor. El nou plantejament redueix el nombre total de demandes, de manera que es mantenen les recirculacions originals en les quatre primeres etapes de depuració ciclònica. Mentrestant es pretén reconfigurar la part final de la secció, inclòs el llaç de recuperació de càrregues format per un filtre i l'etapa número 7 de depuració ciclònica.

El segon plantejament d'optimització que s'anomena d'obertura parcial, queda recollit en la Figura VIII.4.

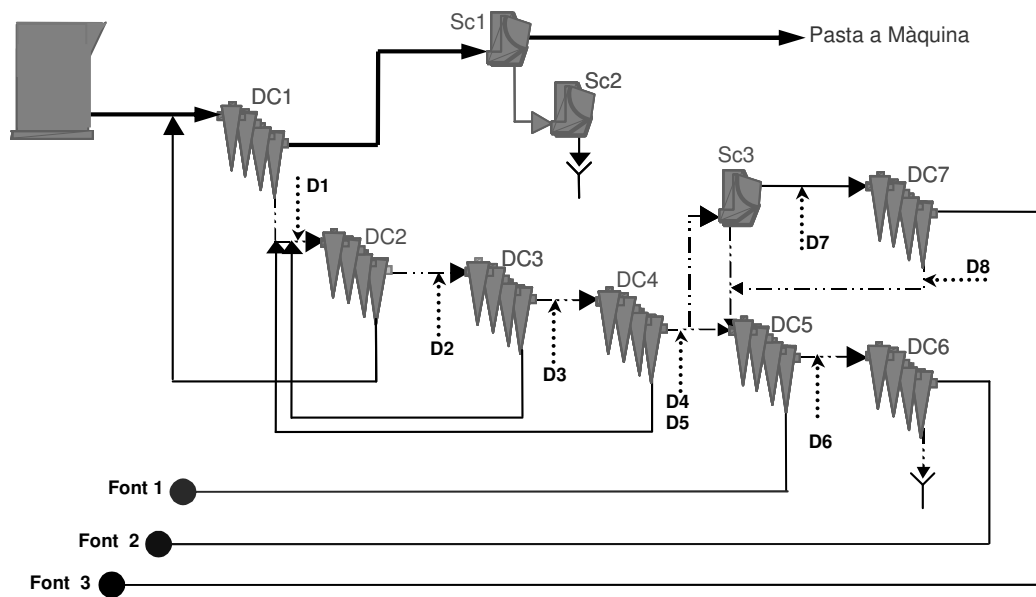


Figura VIII.4: Esquema de l'escenari d'optimització d'obertura parcial

El nou plantejament pretén mantenir la configuració original en la part més delicada de la secció, bàsica per garantir la qualitat del producte final, on els rebuigs contenen encara una quantitat apreciable de fibra aprofitable i on s'observaven la majoria de problemes en el plantejament inicial.

El nou plantejament també fa variar alguns paràmetres de fonts i demandes. Així la Taula VIII.3 recull els paràmetres principals de les fonts i les demandes en el plantejament d'optimització.

Taula VIII.3: Quadre resum dels paràmetres principals de fonts i demandes del plantejament d'obertura parcial

Flux	Cabal (l/min)	C (%)	Fins (kg/min)
Font 1	1184,1	0,33	0,01
Font 2	279,0	0,625	0,01
Font 3	2940,3	0,274	0,01
Demanda 1	1788,0	-	-
Demanda 2	2331,9	-	-
Demanda 3	1719,0	-	-
Demanda 4	1814,0	-	-
Demanda 5	762,8	-	-
Demanda 6	245,0	-	-
Demanda 7	1456,6	-	-
Demanda 8	30,0	-	-

Com en el plantejament anterior els paràmetres de cabal, fibra i fins de fibra procedeixen de la simulació informàtica, i corresponen a les característiques del fluxos existents a fàbrica.

En el cas de les demandes, únicament es defineix el paràmetre cabal a satisfer i en aquest cas els valors són els mateixos que en el plantejament d'obertura total.

En el cas de les restriccions, els valors queden recollits a la Taula VIII.4. Com que el nou plantejament només ha alterat les fonts dels sistema les restriccions no varien, degut a que les fonts no es veuen limitades per les restriccions

Taula VIII.4: Restriccions aplicades a fonts i demandes en el plantejament d'obertura parcial

Flux	Cabal (l/min)	C (%)	Fins (kg/min)
Font 1	–	-	-
Font 2	–	-	-
Font 3	–	-	-
Demanda 1	*	1,0	1,0
Demanda 2	*	1,0	1,0
Demanda 3	*	0,6	1,0
Demanda 4	*	2,0	1,0
Demanda 5	*	1,0	1,0
Demanda 6	*	1,0	1,0
Demanda 7	*	1,0	1,0
Demanda 8	*	0,5	1,0

* Restricció cenyida al cabal existent en el cas base, per respectar el funcionament de cada equip

VIII.D.1. Resultats

Els resultats fruit d'aquest nou escenari d'optimització obren la possibilitat a diferents variants de configuració del sistema. La metodologia aplicada genera diferents solucions que compleixen els objectius, condicions, i restriccions fixades que corresponen a la zona propera a l'òptim absolut. Aquest fet permet avaluar diferents solucions tot construint les noves configuracions al simulador. Per les característiques del procés, no es coneix la idoneïtat de la solució fins que no s'ha avaluat al simulador. És per aquest motiu que la utilització d'una tècnica que permeti trobar diferents solucions al voltant de l'òptim absolut resulta avantatjós.

L'aspecte dels resultats generats, fitxer generat pels algorismes genètics, seria la recollida a la Taula VIII.5.

Taula VIII.5: Exemple de resultats de l'optimització

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	WW	
S1	337	0	0	110,8	337	0	399,3	0	0	1184,1
S2	124,5	0	0	0	124,5	0	0	30	0	279,0
S3	0	904	915,5	875,8	0	245	0	0	0	2940,3
FW	1326,5	1427,9	803,5	827,4	301,3	0	1057,3	0	0	5743,9
										10147
	1788	2331,9	1719	1814	762,8	245	1456,6	30	0	10147

Aquest resultat obtingut determina una nova configuració del procés, on els zeros indiquen no connexió i els nombres enters indiquen el cabal a recircular entre font (S) i demanda (D), considerant l'aigua fresca (FW) una font més i els rebuigs (WW) com una demanda addicional.

A continuació es presenten dues de les solucions assolides. Aquestes solucions representaven una millora de consums d'aigua i matèria primera, i requerien la creació d'un nombre reduït de connexions noves. El mínim nombre de noves connexions és un objectiu secundari de l'optimització i respon bàsicament a criteris econòmics per les inversions a fer front fruit de l'optimització i de l'impacte mínim sobre l'espai existent a fàbrica (tractant-se d'una paperera els circuits són sovint complicats).

Les noves connexions entre les 3 fonts i les 8 demandes queden recollides gràficament a la Figura VIII.5 i a la Figura VIII.6.

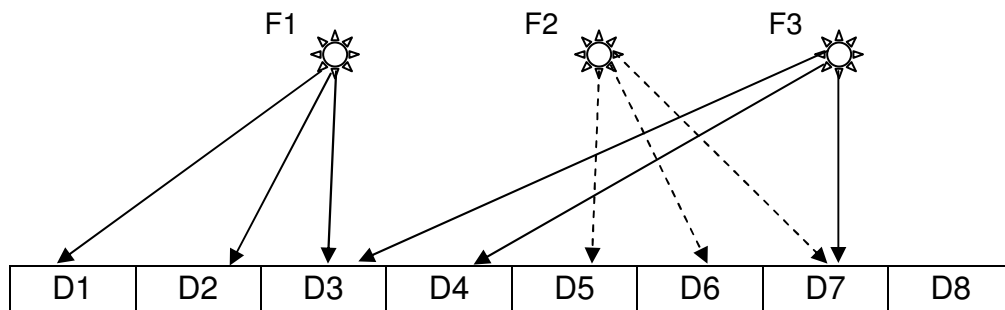


Figura VIII.5: Estructura de la nova xarxa (Solució A)

La demanda número 8, la més exigent en termes de qualitat, no és satisfeta amb aigua de les fonts sinó amb aigua fresca.

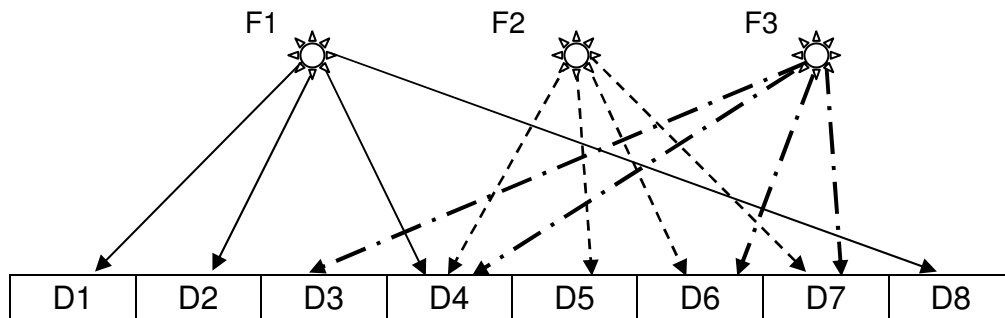


Figura VIII.6: Estructura de la nova xarxa (Solució B)

Com a resultat final del procés d'optimització, la nova configuració proposada en la solució A fa necessària la creació de 9 noves connexions, mentre que la solució B requereix 10 noves connexions, sense tenir en compte les connexions necessàries per l'aigua fresca.

Aquestes noves configuracions són introduïdes a la simulació, creant un nou procés que serà avaluat per tal de quantificar les millores plantejades. El fruit del procés d'optimització mitjançant algorismes genètics és una distribució

dels fluxos existents (oferta) per satisfer les vuit demandes. Existeix una quarta oferta, l'aigua fresca, que si el procés de minimització és reeixit hauria de ser mínim. També existeix una novena demanda, que seria enviar part del flux a l'estació depuració d'aigües residuals fruit d'un excés de cabal o d'una concentració massa elevada que impedeixi la reutilització del flux. Aquest rebuig hauria de ser proper a zero si el procés de minimització és reeixit.

La Taula VIII.6 recull les dades corresponents als paràmetres bàsics, cabal màssic, consistència i sòlids dissolts, tant del cas base (configuració original) com d'ambdues solucions presentades. La taula també inclou una comparativa dels respectius resultats de la reconfiguració respecte els valors del cas base.

Taula VIII.6: Cas base vs. Solució A i B

Cas Base		Aigua (kg/min)	Consistèn. (%)	TDS (kg/min)	Sòlids Tot. (kg/min)
175 g/m²	Entrada	12734	2,1	40	267,4
	Dilució	13215	varies	4	-
	Sortida	25924	1,06	43,4	274,8
	Rebuigs	25	6,4	0,6	1,6

Solució A 175 g/m ²		Aigua (kg/min)	Consistèn. (%)	TDS (kg/min)	Sòlids Tot. (kg/min)
	Entrada	12695	2,1	39,9	266,6
	Variació	-0,3%	0%	-0,3%	-0,3%
	Dilució	13154	varies	4	-
	Variació	-0,5%	-	0 %	-
	Sortida	25808	1,06	43,3	273,6
	Variació	-0,5%	0%	-0,3%	-0,5%
	Rebuigs	25	6,5	0,61	1,6
	Variació	0,0 %	1,5 %	1,6 %	1,5 %

Resultats de l'optimització del procés industrial existent

Solució B 175 g/m²	Aigua (kg/min)	Consistèn. (%)	TDS (kg/min)	Sòlids Tot. (kg/min)
Entrada	12700	2,1	40	266,7
Variació	-0,3%	0 %	-0,1%	-0,3%
Dilució	13105	varies	4,1	-
Variació	-0,8%	-	1,9 %	-
Sortida	25780	1,06	43,3	273,3
Variació	-0,6%	0,00 %	-0,2%	-0,6%
Rebuigs	25,3	7,2	0,7	1,8
Variació	1,2 %	10,1 %	12,8 %	12,2 %

Com s'observa a la taula ambdues solucions redueixen el consum d'aigua i també de matèria primera. Ara bé, el descens de consums és molt reduït.

Els objectius fixats en l'estudi, la reducció dels consums d'aigua i matèria primera, s'han assolit. No obstant els resultats obtinguts en l'aplicació de la metodologia en aquest procés no són espectaculars ni molt menys. Ambdós casos, presenten un consum d'aigua (aigua a l'entrada) inferior al cas base, de la mateixa que succeeix amb les matèries primeres. Per contra, la quantitat total de sòlids rebutjats, tant en concentració total com també en quantitat de càrregues, és superior en totes dues solucions; encara que el cabal de rebuig de la solució A roman constant respecte el cas base i lleugerament superior en la solució B.

Les solucions que comporten menor nombre de connexions no són necessàriament les que portaran les millores més significatives al procés. Si s'analitzen aspectes del procés amb més profunditat, com ara l'evolució de l'acumulació de contaminants en certs punts o unitats, revela la necessitat de buscar solucions més complexes per avaluar-ne les millores que aporten.

En conjunt, les solucions analitzades fruit del procés d'optimització presenten un nombre variable de connexions noves, que queda recollit a la Figura VIII.7.

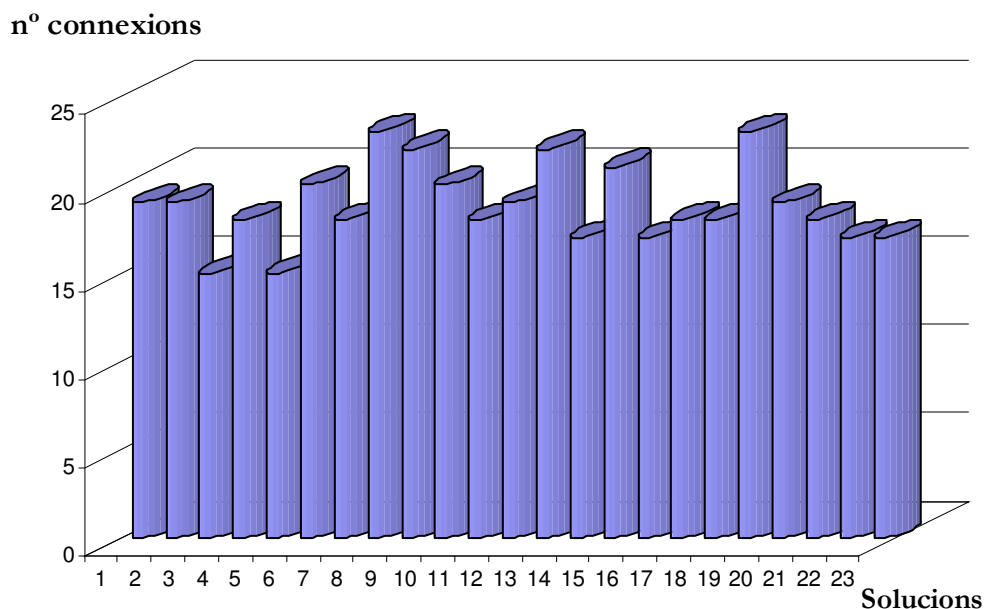


Figura VIII.7: Nombre de connexions de les solucions obtingudes

D'aquestes solucions s'ha resumit de forma sintètica els resultats referents a les connexions i als consums d'aigua, expressat a la Taula VIII.7. En primer terme s'inclou les característiques del cas base per poder comparar.

Taula VIII.7: Resum de la reconfiguració del procés després de l'optimització

Solució	Codi	nº connexions	Consum d'aigua (l/min)	Excedent (l/min)	Cabal dilució (l/min)
Cas base		-		-	15492
1	C16d-S4	18	5744	0	14744
2	C16d-S6	16	5743,8	0	14847
3	C16d-S9	14	5743,8	0	14745
4	C16d-S17	18	5743,9	0	14745

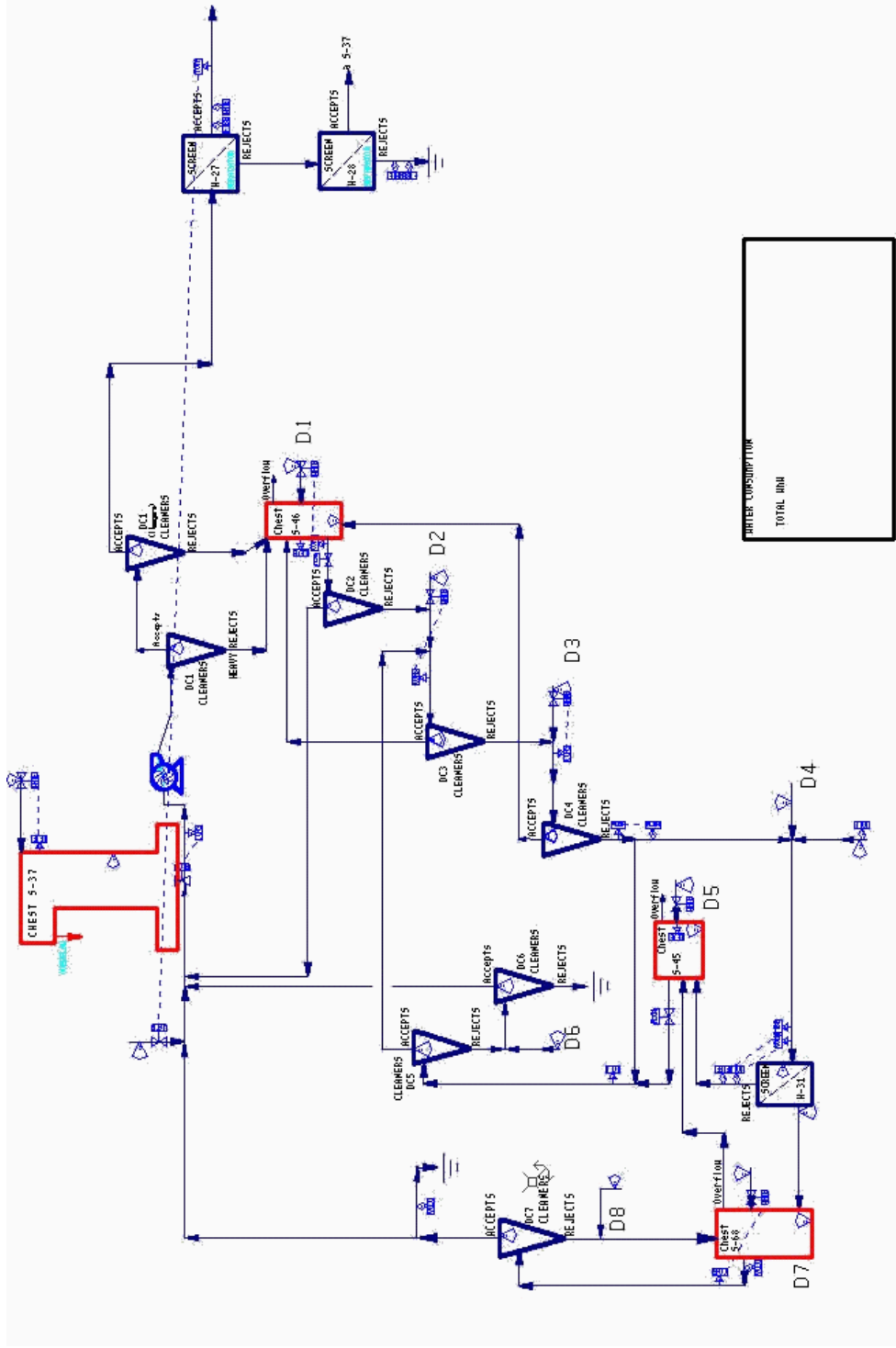


Figura VIII.8: Aspecte de la configuració del cas base a la simulació

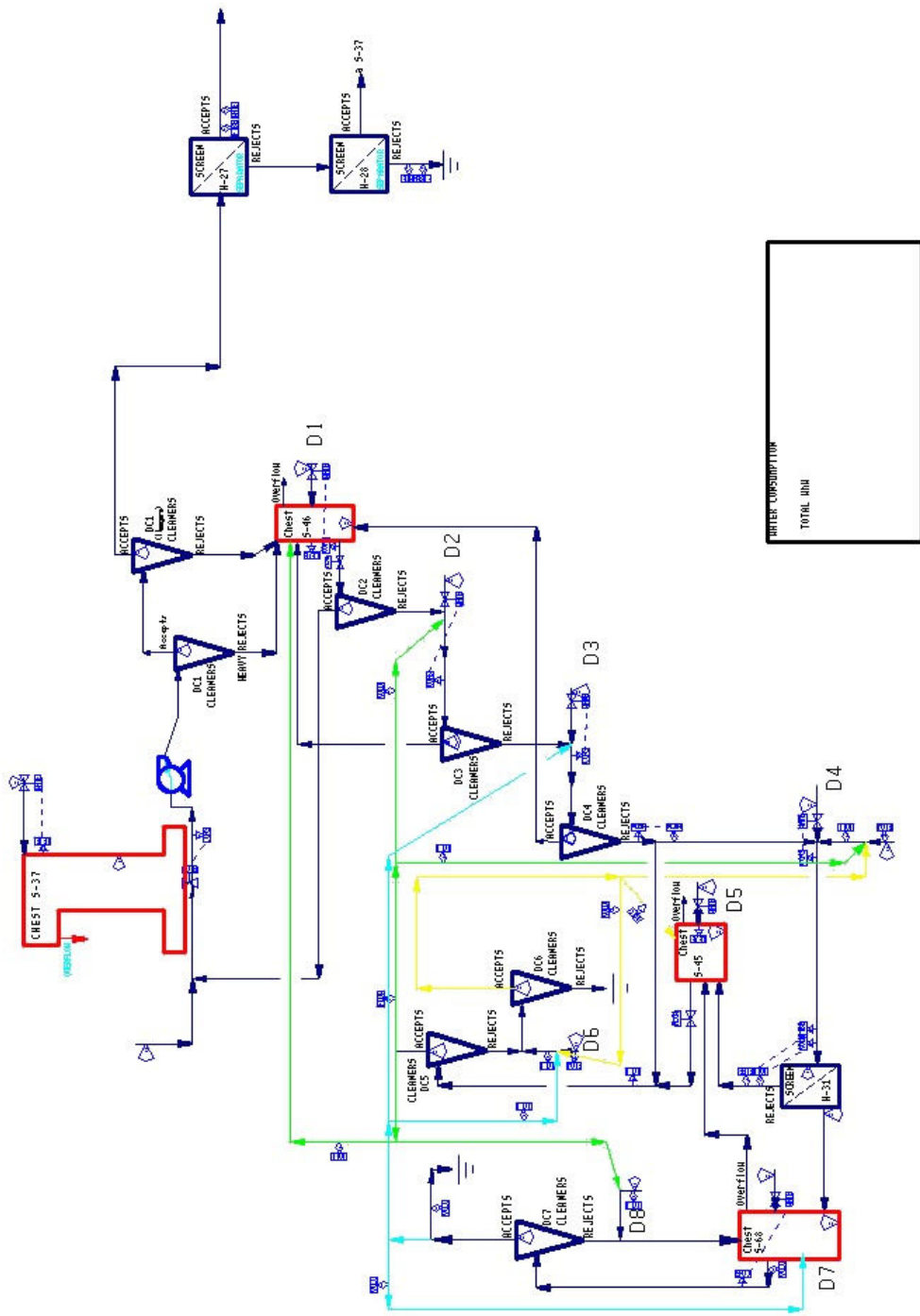


Figura VIII.9: Aspecte d'una reconfiguració a la simulació

Per tenir una imatge gràfica de les variacions que suposen aquestes noves configuracions, la Figura VIII.8 reflexa la configuració del cas base segons el disseny de la simulació construïda. Per contra, la Figura VIII.9 constata la variació del disseny del procés fruit de les noves connexions introduïdes a la simulació.

VIII.D.1.1. Repercussió interna de la reconfiguració

Més enllà de les repercussions de les noves configuracions el nombre de connexions i en el consum d'aigua, el redisseny de procés comporta variacions en els punts clau del propi procés. Per observar els canvis interns en el procés provocats per les noves configuracions, es controla l'evolució de diferents paràmetres en els següents punts:

- i. Entrada a la depuració ciclònica [DCin]
- ii. Entrada a la depuració pressuritzada (filtres, *screeners*) [DPin]
- iii. Sortida del sistema – pasta acceptada amb destí a la màquina de paper [Accept]
- iv. Rebuig de la depuració ciclònica [rebDC]
- v. Rebuig de la depuració pressuritzada [rebDP]

Aquest control sobre la repercussió interna de les noves configuracions es compara amb el cas base per establir una referència. També s'amplia el nombre de solucions avaluades per no realitzar aquesta avaluació únicament a dues solucions. Així, s'analitzen sis de les millors solucions per veure si les variacions interns dels procés són semblants entre les diverses reconfiguracions.

La Taula VIII.8 resumeix els paràmetres que caracteritzen el flux en cadascun d'aquests punts, cabal màssic de fibres i de càrregues, i

consistència. En primer lloc s'inclouen les característiques del cas base per tal d'introduir les comparatives de cada resultat respecte la configuració original.

Taula VIII.8: Impacte del canvi de configuració en el procés

Cas Base	Fibra (kg/min)	Càrregues (kg/min)	C (%)
DCin	317,601	54,820	1,064
DPin	244,807	46,131	1,038
Accept.	226,936	42,764	1,035
rebDC	0,842	0,559	6,412
rebDP	0,804	0,152	19,76

Aigua pasta (kg/min) 12215,2
 Aigua dilució (kg/min) 15492,3

OC-S4	Fibra (kg/min)		Càrregues (kg/min)		C (%)	
DCin	290,056	-8,67%	77,247	40,91%	1,064	0,000%
DPin	256,177	4,64%	34,761	-24,65%	1,054	1,550%
Accept.	237,475	4,64%	32,223	-24,65%	1,051	1,510%
rebDC	2,051	143,6%	1,786	219,4%	17,18	168,0%
rebDP	0,842	4,66%	0,114	-24,63%	19,99	1,221%

Aigua pasta (kg/min) 12581,9 3,00%
 Aigua dilució (kg/min) 14744,6 -4,83%

OC-S6	Fibra (kg/min)		Càrregues (kg/min)		C (%)	
DCin	288,822	-9,06%	79,667	45,32%	1,064	0,00%
DPin	255,087	4,20%	35,851	-22,29%	1,051	1,22%
Accept.	236,466	4,20%	45,069	5,39%	1,047	1,18%
rebDC	2,763	228,24%	6,685	1095,9%	42,01	555,3%
rebDP	0,838	4,22%	0,118	-22,26%	19,95	0,96%

Aigua pasta (kg/min) 12562,9 2,85%
 Aigua dilució (kg/min) 14847,2 -4,16%

Resultats de l'optimització del procés industrial existent

OC-S8	Fibra (kg/min)		Càrregues (kg/min)		C (%)	
DCin	316,399	-0,38%	55,921	2,01%	1,064	0,00%
DPin	243,880	-0,38%	47,057	2,01%	1,038	-0,01%
Accept.	226,077	-0,38%	43,622	2,01%	1,035	0,02%
rebDC	3,110	269,4%	0,615	10,0%	16,71	160,6%
rebDP	0,801	-0,37%	0,155	2,05%	19,76	0,02%

Aigua pasta (kg/min)	12196,4	-0,15%
Aigua dilució (kg/min)	15539,3	0,30%

OC-S9	Fibra (kg/min)		Càrregues (kg/min)		C (%)	
DCin	290,055	-8,67%	77,249	40,91%	1,064	0,00%
DPin	256,177	4,64%	34,762	-24,65%	1,054	1,55%
Accept.	237,476	4,64%	32,224	-24,65%	1,051	1,51%
rebDC	2,029	141,0%	178,5%	219,4%	17,1	166,5%
rebDP	0,842	4,67%	0,114	-24,63%	19,99	1,22%

Aigua pasta (kg/min)	11851,7	-2,98%
Aigua dilució (kg/min)	14744,6	-4,83%

OC-S10	Fibra (kg/min)		Càrregues (kg/min)		C (%)	
DCin	316,020	-0,50%	56,266	2,64%	1,060	-0,38%
DPin	243,590	-0,50%	47,348	2,64%	1,039	0,07%
Accept.	225,808	-0,50%	43,892	2,64%	1,036	0,03%
rebDC	4,045	380,5%	51,7%	-7,5%	20,3	216,1%
rebDP	0,800	-0,50%	0,156	2,64%	19,76	0,01%

Aigua pasta (kg/min)	12229,6	0,12%
Aigua dilució (kg/min)	15465,4	-0,17%

OC-S17	Fibra (kg/min)		Càrregues (kg/min)		C (%)	
DCin	290,055	-8,67%	77,248	40,91%	1,064	0,00%
DPin	256,177	4,64%	34,762	-24,65%	1,054	1,55%
Accept.	237,476	4,64%	32,224	-24,65%	1,051	1,51%
rebDC	2,029	141,0%	178,5%	219,4%	17,1	166,5%
rebDP	0,842	4,67%	0,114	-24,63%	19,99	1,22%
Aigua pasta (kg/min)			12581,9	3,00%		
Aigua dilució (kg/min)			14744,6	-4,83%		

En primer lloc, convé fixar-se en el consum acumulat d'aigua, consum que representa l'agregat d'aigua incorporada en la pasta i l'aigua necessària per les diferents dilucions dins el procés.

De les sis solucions presentades, aquest consum es manté molt proper al del cas base en dos casos, OC-S8 i OC-S10. En la resta de casos s'observen disminucions de consum. Concretament, tres casos (OC-S4, OC-S6 i OC-S17) els descensos de consum són lleugers però no menyspreables, entre 1,1% i 1,5%. I finalment el darrer cas, OC-S9, on s'obté una reducció de consum significativa d'un 4,2% de cabal i una magnitud de 350 kg/min.

La Figura VIII.10 reflexa aquesta comparativa de consums acumulats.

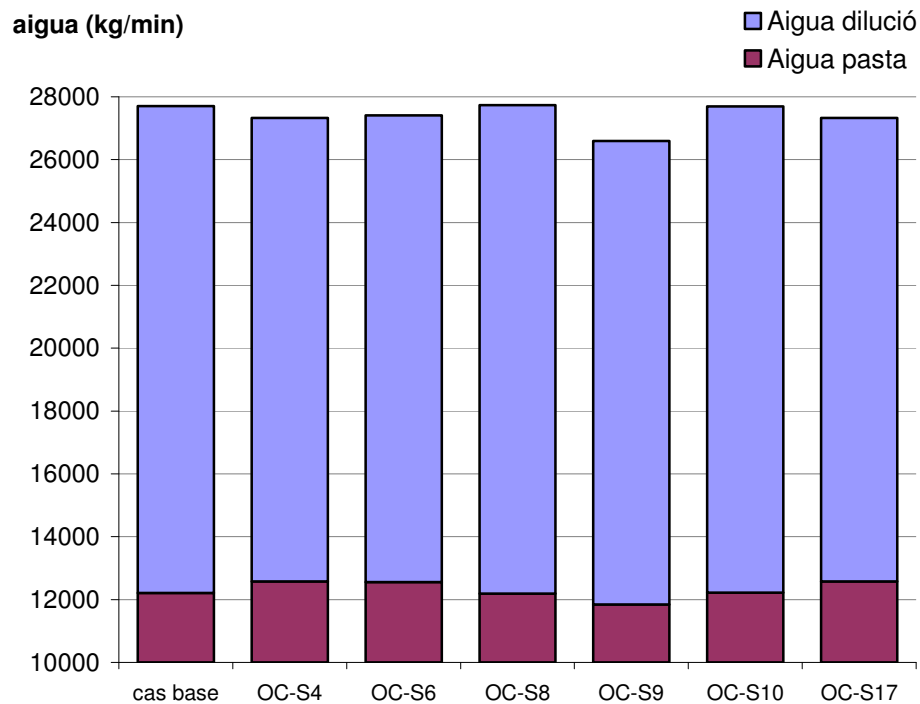


Figura VIII.10: Consum acumulat d'aigua per cada solució

VIII.D.1.1.1. Cabals de fibra

Si s'observa la variació del cabal màssic de fibra en kg/min en els diferents punts de control del procés pot donar una idea de les variacions tenen provoquen les reconfiguracions sobre els resultats del cas base. En primer lloc, els diferents cabals màssics de fibra a l'entrada a la depuració ciclònica queden reflexats a la Figura VIII.11

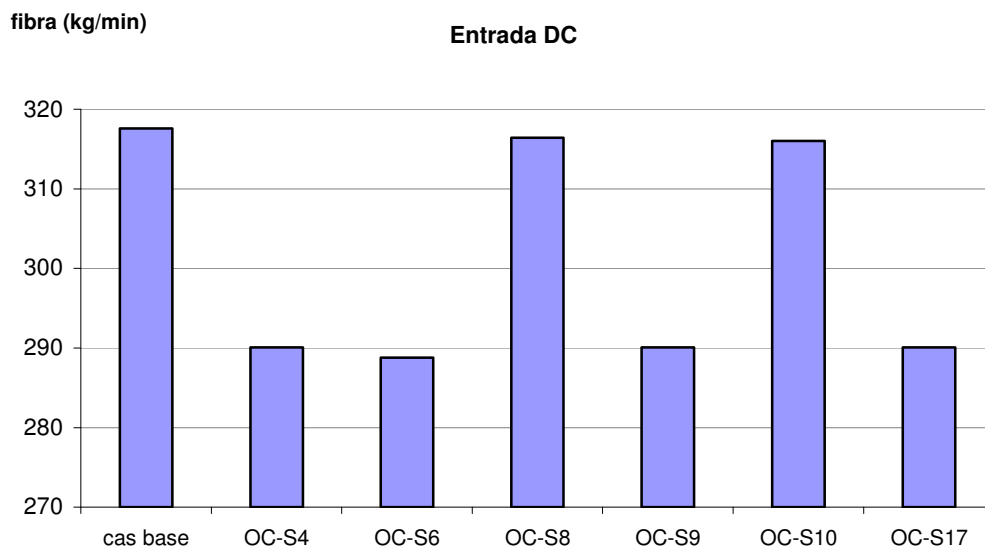


Figura VIII.11: Cabal màssic de fibra a l'entrada de la depuració ciclònica

En dues de les reconfiguracions, OC-S8 i OC-S10, els valors de fibra són pràcticament idèntics al cas de base. Mentre que en els altres quatre casos els valors de fibra consumida es troben al voltant d'un 9% menys que el cas base. Per tant aquestes quatre noves configuracions satisfan uns dels objectius pretesos, la reducció en el consum de la principal matèria primera.

Encara que els objectius de l'optimització recollits en la funció objectiu utilitzada en la programació matemàtica són la minimització de consums d'aigua i la minimització de la pèrdua de sòlids, és conseqüent pensar que la minimització de la pèrdua de sòlids va encaminada a reduir el consum de matèries primeres, que és finalment el que dona benefici a l'empresa.

En els altres dos casos on la reducció de consum de fibra és molt minsa, inferior al 1%, es poden aconseguir les reduccions en el consum d'aigua però l'estalvi de matèries és gairebé menyspreable.

El segon punt de control del cabal màssic de fibra es realitza a l'entrada de la depuració pressuritzada, un cop la pasta ja ha superat el procés de depuració ciclònica. La Figura VIII.12 recull els valors obtinguts amb la simulació corresponents a cas base i a les 6 reconfiguracions.

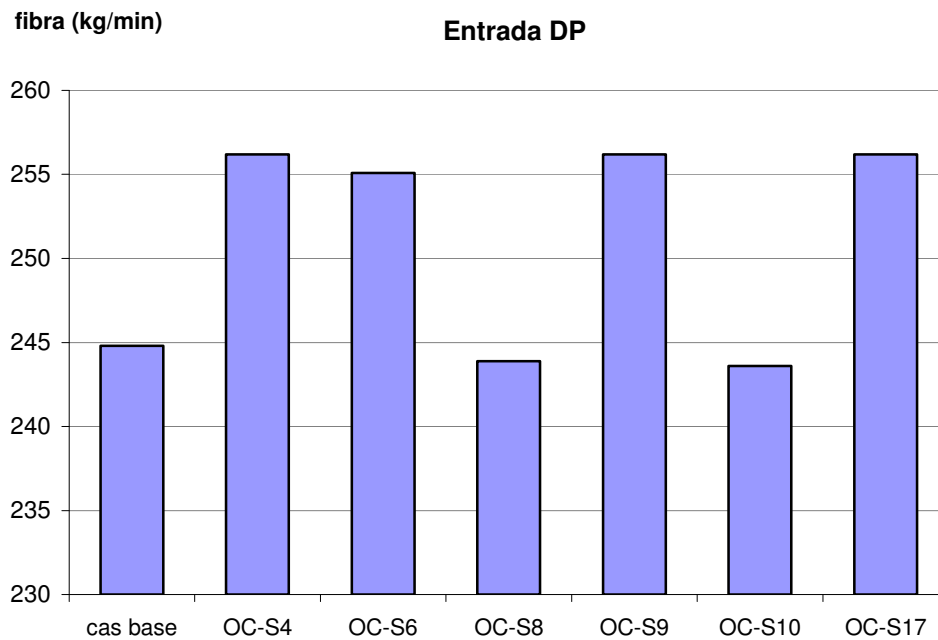


Figura VIII.12: Cabal màssic de fibra a l'entrada de la depuració pressuritzada

S'observa que de nou dos casos, OC-S8 i OC-S10 els mateixos que en el punt anterior, presenten valors semblants al cas de base amb diferències inferiors al 1%. La resta de solucions presenten valors al voltant del 5% superiors al cas base.

El tercer punt de control del cabal màssic de fibra es realitza a la caixa d'entrada de la màquina de paper, o el que és el mateix l'acceptat del procés de depuració pressuritzada.

La Figura VIII.13 il·lustra els valors obtinguts amb la simulació corresponents al cas base i a les 6 reconfiguracions.

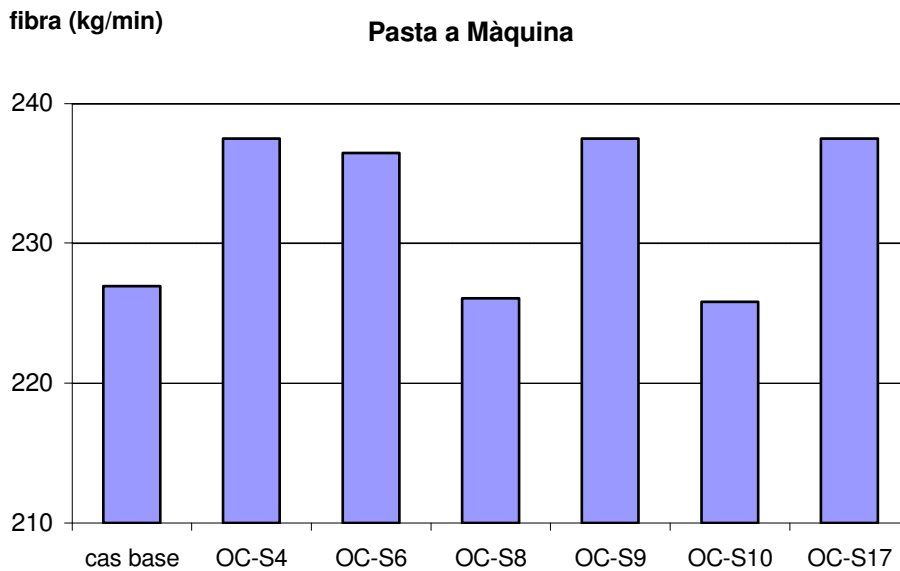


Figura VIII.13: Cabal màssic de fibra a la pasta enviada a màquina de paper

En aquest cas també s'observa que els dos casos, OC-S8 i OC-S10, presenten valors semblants al cas de base. Mentrestant la resta de solucions presenten valors superiors, entre el 4% i el 5% majors que el cas base.

L'últim punt de control de cabal màssic de fibra es realitza als rebuigs de les diferents etapes de depuració. La Figura VIII.14 il·lustra els valors obtinguts mitjançant la simulació.

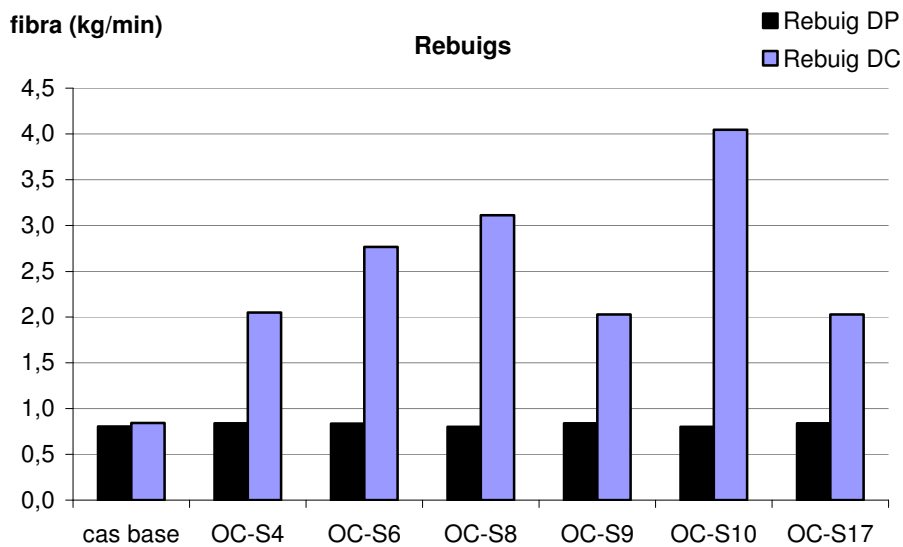


Figura VIII.14: Cabal màssic de fibra d'ambdós rebuigs de depuració

Els valors obtinguts en els rebuigs de les dues depuracions presenten un comportament diferenciat. En el cas de la depuració pressuritzada segueix una pauta semblant a la experimentada en els punts de control previs. Així els valors de OC-S8 i OC-S10 són lleugerament inferiors als valors del cas base (per sota l'1%). Per contra, els valors de la resta de solucions es situen entre un 4% i 5% per sobre dels valors de referència.

En canvi els rebuigs de la depuració ciclònica presenten diferències. En totes les reconfiguracions s'assoleix un cabal de fibra rebutjada molt més gran que el cas base, entre 2 i 4 vegades superiors. Curiosament els casos OC-S8 i OC-S10 que segueixen una pauta semblant al cas de referència, en aquest punt són els que més diferència presenten. Aquest augment està motivat sens dubte pel fet de mantenir les fibres dins del llaç de depuració ciclònica, amb una sola recirculació a l'inici (flux de pasta previ a l'ajust de consistència). Per contra, el cas base presenta 3 recirculacions a l'inici.

En resum, s'observen dues pautes diferents en les 6 solucions presentades. Una molt semblant al cas base i l'altre diferent. Els casos més semblants a la referència són els que presenten majors consums d'aigua i de fibra. Les diferències en punts clau del procés són apreciables, però no comprometen el bon funcionament del procés i, a priori, tampoc la qualitat del producte final. Ara bé, ni en uns casos ni en els altres els resultats no són prou satisfactoris.

VIII.D.1.1.2. Cabals de càrregues

A l'entrada de la depuració ciclònica, indicatiu del consum de matèria primera, el cabal màssic de càrregues és el representat a la Figura VIII.15.

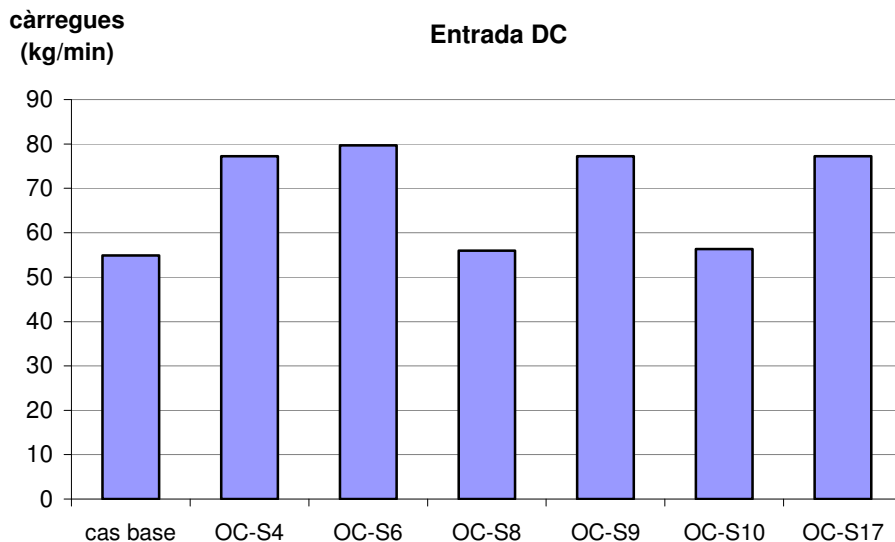


Figura VIII.15: Cabal màssic de càrregues a l'entrada de la depuració ciclònica

S'observa com el cabal de càrregues en aquest punt segueix el mateix comportament que el de fibres. Els valors de OC-S8 i OC-S10 són semblants als del cas base, un 2% superiors. Mentrestant els valors de les altres quatre

solucions es troben considerablement per damunt, entre un 40% i un 45% superiors.

El segon punt de control del cabal màssic de càrregues es realitza a l'entrada de la depuració pressuritzada. La Figura VIII.16 recull els valors obtinguts mitjançant la simulació.

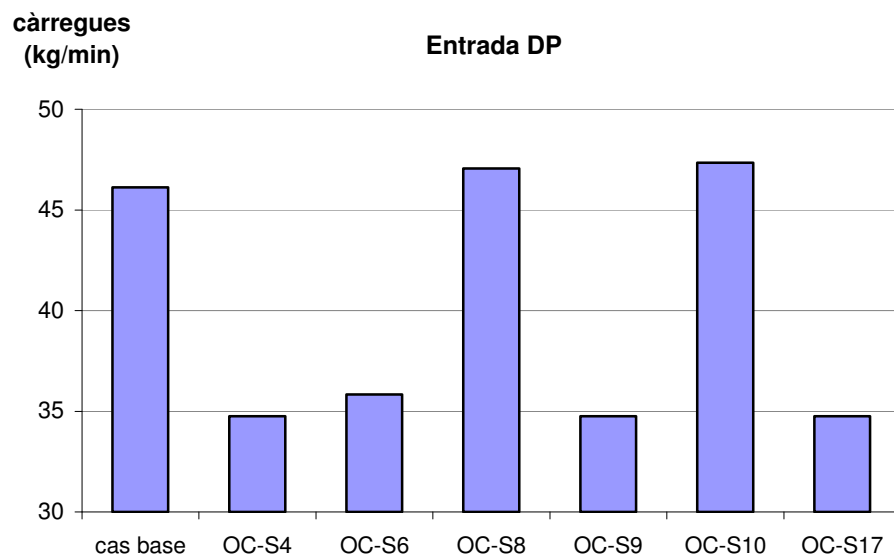


Figura VIII.16: Cabal màssic de càrregues a l'entrada de la depuració ciclònica

També en aquest cas els valors de OC-S8 i OC-S10 són semblants al cas base, un 2% superiors; i la resta de valors es troben significativament per sota, del 22% a 25% inferiors al valor de referència.

El tercer punt de control del cabal màssic de fibra es realitza a la caixa d'entrada de la màquina de paper. La Figura VIII.17 il·lustra els valors obtinguts amb la simulació.

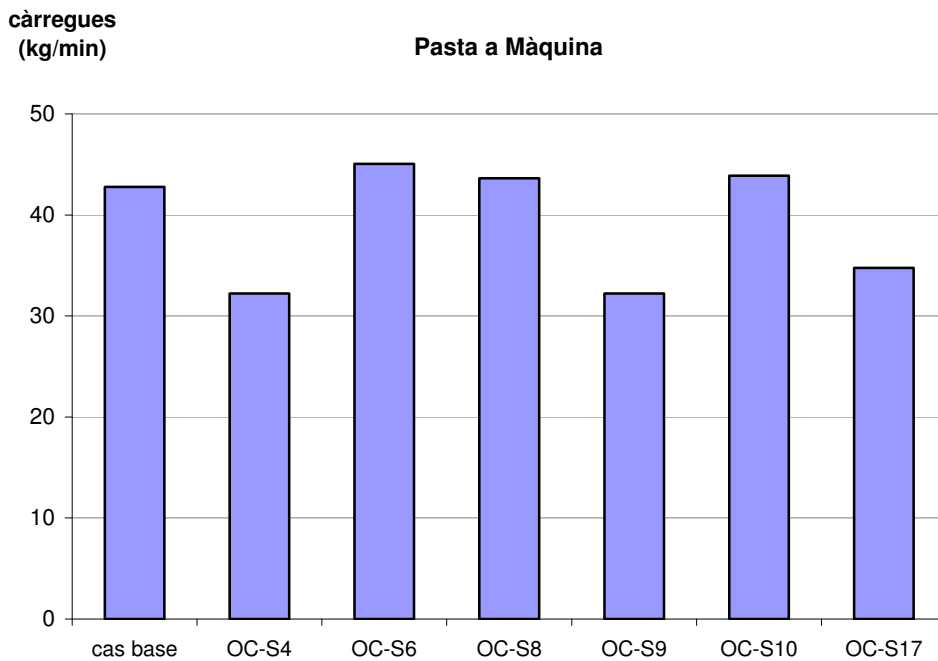


Figura VIII.17: Cabal màssic de càrregues a la pasta enviada a màquina de paper

En aquest punt hi ha tres de les solucions que presenten valors de càrregues lleugerament superiors al cas base, les dues solucions habituals OC-S8 i OC-S10 amb un 2% d'increment, i també OC-S6 amb un 5% d'increment. Per contra la resta de solucions substancialment inferiors, entre el 22% i el 24% menors al valor de referència.

L'últim punt de control es correspon als rebuigs de les diferents etapes de depuració. La Figura VIII.18 il·lustra els valors obtinguts mitjançant la simulació.

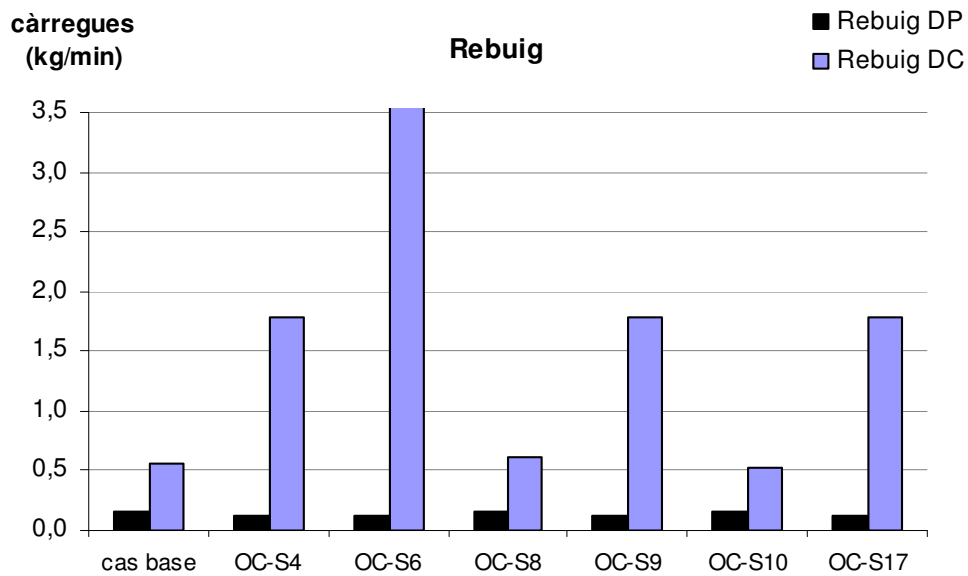


Figura VIII.18: Cabal màssic de càrregues d'ambdós rebuigs de depuració

Com en el cas del cabal de fibres rebutjat, el cabal màssic de càrregues a la depuració pressuritzada presenta valors semblants en les solucions OC-S8 i OC-S10, mentre que la resta estan entre el 22% i 24% per sota del valor del cas base. De la mateixa manera en els valors de rebuig de la depuració ciclònica les solucions OC-S8 i OC-S10 són semblants als cas base, un 10% superior i 7% inferior respectivament; per contra el valor de OC-S6 es dispara i supera en més de vegades el valor de referència. Les altres tres solucions presenten augments més moderats a l'entorn del 25%.

En resum, la pauta seguida en el cabal màssic de càrregues és semblant a la observada en el cas de les fibres. Excepte el cas OC-S6 que presenta uns valors diferents. Precisament aquesta solució presenta un augment molt important el rebuig de càrregues, que compensa amb un major consum de matèria primera però presenta valors normals en la resta de punts.

VIII.D.1.1.3. Consistències

L'últim paràmetre controlat és la variació de la consistència. Al primer punt, l'entrada de la depuració ciclònica, les diferents consistències observades es troben recollides a la Figura VIII.19.

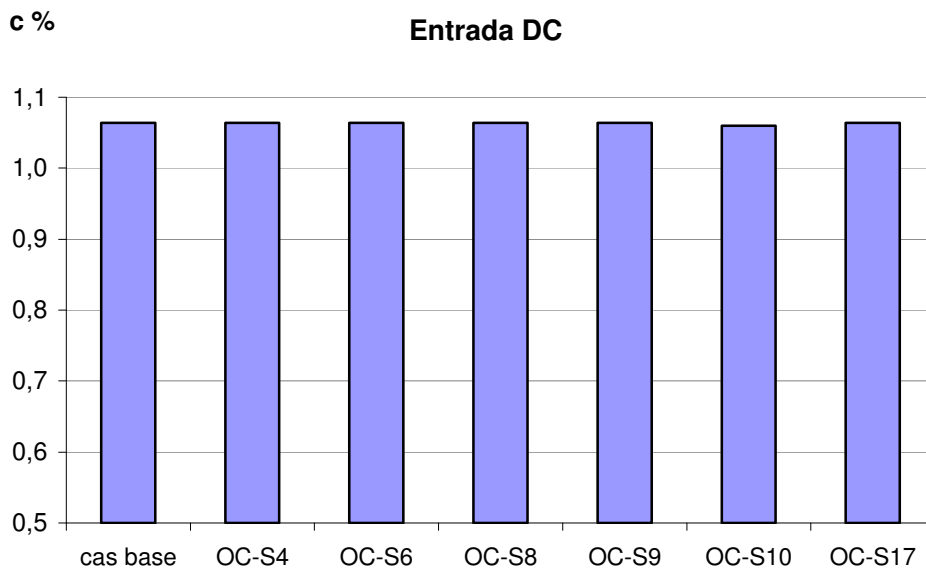


Figura VIII.19: Consistència de la pasta a l'entrada de la depuració ciclònica

Tots els valors són molt similars degut a que la consistència en aquest punt és un dels paràmetres regulats a la simulació.

A l'entrada de la depuració pressuritzada les consistències de les diferents solucions són les il·lustrades a la Figura VIII.20.

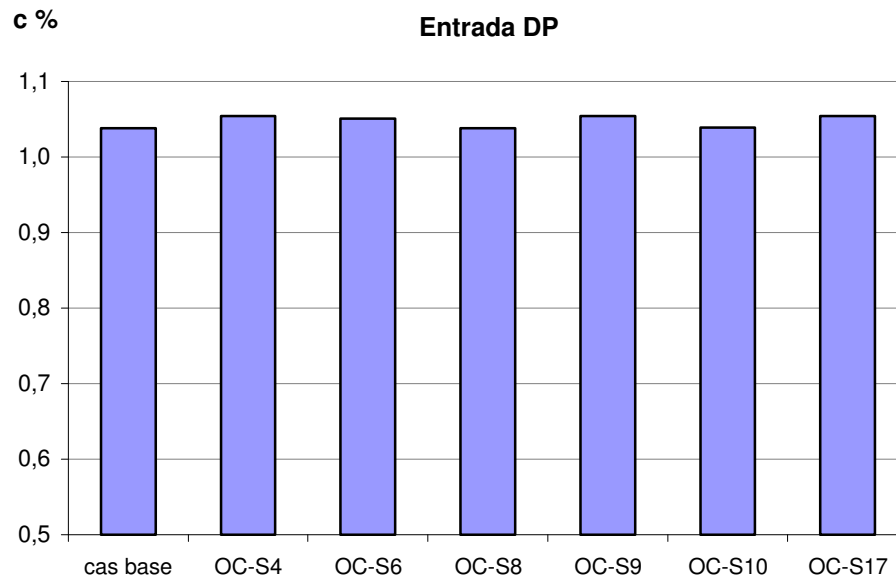


Figura VIII.20: Consistència de la pasta a l'entrada de la depuració pressuritzada

Els valors de consistència són molt semblants en aquest punt. Les solucions OC-S8 i OC-S10 de nou presenten valors gairebé idèntics al cas base, i la resta de solucions presenten valors lleugerament superiors, entre 1,2% i 1,5%.

El flux de pasta acceptat de la depuració pressuritzada enviat a la caixa d'entrada de la màquina de paper presenta una variació de valors de consistències com l'il·lustrat a la Figura VIII.21. En conjunt les diferències molt reduïdes respecte el cas base, totes però lleugerament superiors.

De nou els valors de OC-S8 i OC-S10 són mínimament superiors als valors de referència, mentre els altres quatre oscil·len entre el 1,2% i el 1,5% d'increment.

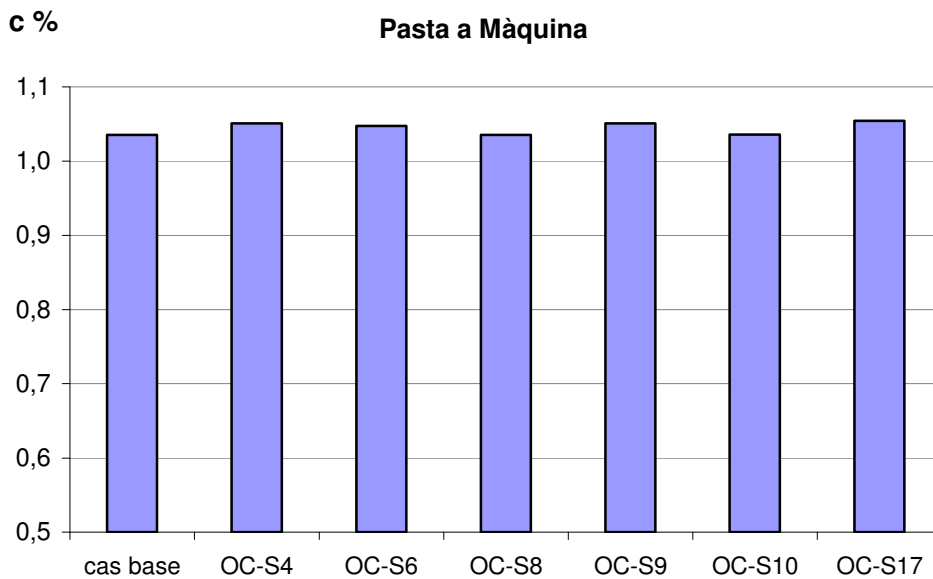


Figura VIII.21: Consistència de la pasta enviada a màquina

L'últim punt controlat, els rebuigs d'ambdues depuracions presenta una variació de consistències recollida a la Figura VIII.22.

En aquest cas també els valors observats a la depuració pressuritzada són molt més semblants al cas base que en la depuració ciclònica, encara que al contrari que en fibres i càrregues els valors de la depuració pressuritzada són més elevats. Les diferències en les consistències del rebuig a la depuració pressuritzada són petites del 1% com a màxim. Per contra, a la depuració ciclònica les diferències són més importants. Tots els valors són entre 2 i 3 vegades més grans que el valor de referència, excepte OC-S6 que és molt superior degut al major rebuig de càrregues observat anteriorment.

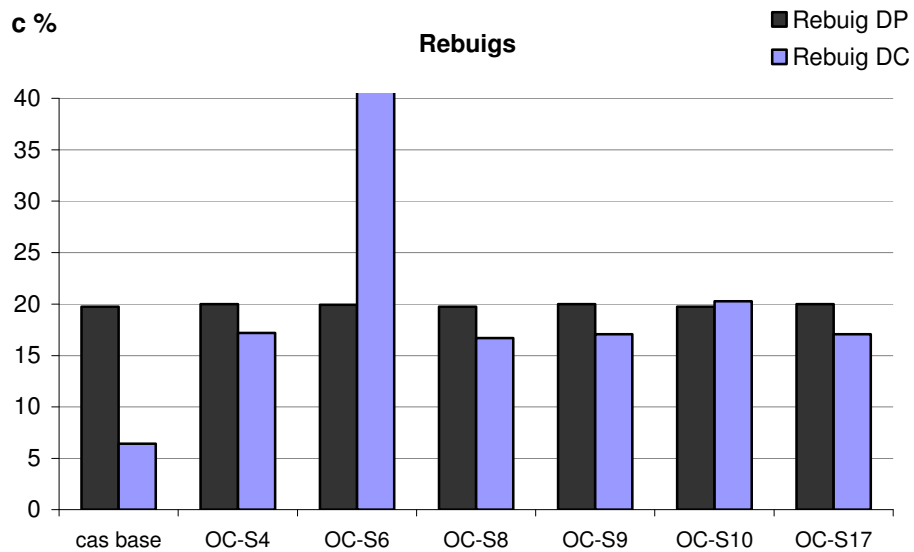


Figura VIII.22: Consistència d'ambdós rebuigs de depuració

Així doncs, les diferències en el valor de consistència entre les diferents solucions i el cas base no són importants i no comprometen el bon funcionament del procés

En aquest punt és important deixar constància que els objectius fixats fan referència exclusivament al valors d'entrada al sistema (consum d'aigua i matèries primeres). Aquest valors són els que han estat minimitzats. Les variacions secundàries en els valors de sortida o de rebuig s'han de tenir presents i analitzar posteriorment.

El procés de producció de paper té uns objectius clars: la maximització de sòlids presents en el flux de sortida, en el paper, i la minimització de sòlids rebutjats. No obstant a mesura que s'avança en la implementació de tècniques de tancament de circuits i de redisseny de procés sorgeixen serioses preocupacions i fins i tot problemes amb l'acumulació de contaminants, sobretot en certes unitats clau pel procés. Els problemes poden desembocar en situacions crítiques pel conjunt del procés o també per la qualitat del producte final.

Un nombre apreciable de solucions obtingudes i avaluades han estat rebutjades pel fet de provocar concentracions crítiques en certes unitats o punts del procés. Així, els resultats finals d'un procés de redisseny han de complir diversos criteris i requeriments específics de la producció, que s'han d'analitzar en el avaluar la idoneïtat de la solució obtinguda en el procés d'optimització. Generalment els bons resultats en aquests tipus de millores inclouen una solució de conveniència que satisfà les diferents necessitats.

VIII.E. NOU PLANTEJAMENT EN L'OPTIMITZACIÓ

Després dels resultats obtinguts amb el plantejament d'optimització inicial es decideix plantejar lleugeres modificacions al procés d'optimització.

En la simulació utilitzada en el plantejament inicial s'havia introduït un paràmetre addicional com són els fins de fibres. Al mateix temps, aquesta simulació presentava una variació en el sistema de càlcul utilitzat per la retenció de sòlids durant la formació del full de paper. Aquesta variació donava aproximació més realista centrada en la retenció parcial de cadascuna de les espècies que hi intervenen (aigua, fibres, fins i càrregues) [2].

Amb la intenció d'assolir noves configuracions i nous resultats, que puguin ésser comparats amb els resultats obtinguts fins al moment, es decideix realitzar un nou plantejament d'optimització. Aquest té el punt de partida en una simulació diferent i simplificada, sense fins de fibres. Així doncs, la simulació treballa amb tres paràmetres bàsics: aigua, fibra i càrregues. Aquests tres paràmetres són els que estan àmpliament controlats a la fàbrica, i per tant amb una major gamma i fiabilitat de les dades utilitzades en la simulació.

Aquesta variació provoca una modificació en els paràmetres de treball de l'optimització amb algoritmes genètics, s'introdueix el terme cabal de càrregues enlloc de cabal de fins de fibres. Les variacions que comporta aquest nou plantejament afecten tant a les dades dels paràmetres de treball com a les restriccions aplicades a l'algoritme de cerca. Els nous paràmetres que regeixen fonts i demandes queden recollits a la Taula VIII.9. Aquestes variacions són fruit del canvi de càrregues per fins de fibres i de les modificacions realitzades a la simulació informàtica.

Taula VIII.9: Quadre resum dels paràmetres principals de fonts i demandes del nou plantejament amb cabal de fibres i de càrregues.

Flux	Aigua (kg/min)	Fibra (kg/min)	Inorg (kg/min)
Font 1	1011,1	3,13	0,04
Font 2	267,8	1,39	0,02
Font 3	2968,1	8,46	0,02
Demanda 1	2245	-	-
Demanda 2	1530	-	-
Demanda 3	1249,5	-	-
Demanda 4	1212,7	-	-
Demanda 5	686	-	-
Demanda 6	243	-	-
Demanda 7	1515	-	-
Demanda 8	30	-	-

Tot seguit, de la mateixa manera que s'ha realitzat amb el paràmetres de treball es recullen les noves restriccions aplicades al procés d'optimització, il·lustrades a la Taula VIII.10.

A l'hora d'aplicar aquest tipus de metodologia és habitual plantejar inicialment l'optimització amb unes restriccions moderadament exigents, fruit de la configuració de base del sistema. En aquest cas les restriccions recollides a la Taula VIII.10.

Taula VIII.10: Restriccions aplicades a fonts i demandes del nou plantejament amb cabal de fibres i de càrregues.

Flux	Aigua (kg/min)	Fibra (kg/min)	Inorg. (kg/min)
Font 1	–	-	-
Font 2	–	-	-
Font 3	–	-	-
Demanda 1	*	3,37	1,20
Demanda 2	*	2,45	0,81
Demanda 3	*	2,07	0,74
Demanda 4	*	0,12	0,5
Demanda 5	*	0,04	0,03
Demanda 6	*	0,01	0,06
Demanda 7	*	0,09	0,06
Demanda 8	*	0,01	0,05

Les restriccions en el procés d'optimització corresponen als valors màxims admesos en una operació o unitat concreta.

En una segona fase del treball s'acostuma a plantejar un relaxament en l'exigència de les restriccions. Així es dona més llibertat al sistema i s'obtenen resultats diferents. Posteriorment es poden comparar i analitzar els resultats obtinguts fruit dels dos tipus de restriccions.

La Taula VIII.11 recull les dades corresponents a la relaxació de les restriccions realitzada, mentre que els valors dels paràmetres corresponents a fonts i demandes es conserven intactes.

Taula VIII.11: Restriccions més relaxades aplicades a fonts i demandes del plantejament amb cabal de fibres i de càrregues.

Flux	Aigua (kg/min)	Fibra (kg/min)	Inorg. (kg/min)
Font 1	—	-	-
Font 2	—	-	-
Font 3	—	-	-
Demanda 1	*	3,5	1,5
Demanda 2	*	2,45	1,0
Demanda 3	*	2,07	1,0
Demanda 4	*	3,5	1,0
Demanda 5	*	0,5	0,5
Demanda 6	*	1,0	1,0
Demanda 7	*	1,0	1,0
Demanda 8	*	1,0	1,0

Els nous valors de les restriccions presenten augments dels límits de fibra admesa en les demandes compreses entre D4 i D8, mentre que les tres primeres romanen constants. Aquesta decisió és fruit de l'anàlisi dels resultats obtinguts amb l'optimització. S'observa com les restriccions originals en el flux de fibres de les demandes compreses entre D4 i D8 són reduïdes.

Aquest fet és degut al cabal reduït que presenten el fluxos (demandes 5, 6 i 8) o a la utilització d'aigües filtrades de baixa concentració amb fibres. Per la naturalesa de les operacions s'assumeix que poden acceptar majors concentracions i per aquest motiu es relaxen les restriccions. El contingut de càrregues no presenta concentracions properes als nivells crítics, per tant també s'augmenten les restriccions aplicades.

El plantejament presentat fins al moment tracta el paràmetre fibres com a cabal màssic de fibres (kg/min). Sota aquest punt de vista el terme cabal de fibres va íntimament relacionat amb el cabal total. Aquest fet condiciona el procés d'optimització tal i com està plantejat. Per aquest motiu s'assaja amb una variant en la definició dels paràmetres de fonts i demandes. Aquesta variant únicament afecta el procés de cerca de solucions, els algoritmes genètics, i no té efecte a la resta de metodologia.

Es substitueix el cabal màssic de fibres i es comença a treballar amb consistències. D'aquesta manera els fluxos amb poc cabal però més concentrats poden satisfer les demandes menys exigents amb qualitat d'aigua, cosa que fins ara no succeïa. Aquesta variant en el plantejament provoca variacions en el quadre de paràmetres de fonts i demandes, recollit a la Taula VIII.12.

Taula VIII.12: Quadre resum dels paràmetres principals de fonts i demandes del nou plantejament amb consistències i cabal de càrregues.

Flux	Aigua (kg/min)	C (%)	Inorg (kg/min)
Font 1	1001,7	0,326	0,04
Font 2	267,4	0,542	0,02
Font 3	2968,1	0,278	0,02

Resultats de l'optimització del procés industrial existent

Flux	Aigua (kg/min)	C (%)	Inorg. (kg/min)
Demanda 1	2245	-	-
Demanda 2	1530	-	-
Demanda 3	1249,5	-	-
Demanda 4	1212,7	-	-
Demanda 5	686	-	-
Demanda 6	243	-	-
Demanda 7	1515	-	-
Demanda 8	30	-	-

Les noves restriccions recollides a la Taula VIII.13, ja són parcialment relaxades fruit de les experiències anteriors.

Taula VIII.13: Restriccions aplicades a fonts i demandes del nou plantejament amb cabal de fibres i de càrregues.

Flux	Aigua (kg/min)	C (%)	Inorg. (kg/min)
Font 1	—	-	-
Font 2	—	-	-
Font 3	—	-	-
Demanda 1	*	0,22	1,3
Demanda 2	*	0,22	0,89
Demanda 3	*	0,22	0,73
Demanda 4	*	1,0	0,01
Demanda 5	*	0,2	0,03
Demanda 6	*	0,5	0,01
Demanda 7	*	0,5	0,06
Demanda 8	*	0,5	0,01

VIII.E.1. Resultats

Per la presentació del resultat d'aquest nou plantejament de l'optimització, convé fixar la referència que permetrà establir les comparatives amb les diferents solucions proposades. El cas base amb la configuració original serà el punt fix de referència, concretament el balanç de matèria global resumit a la Figura VIII.23 i recollit més detalladament a l'annex del present treball.

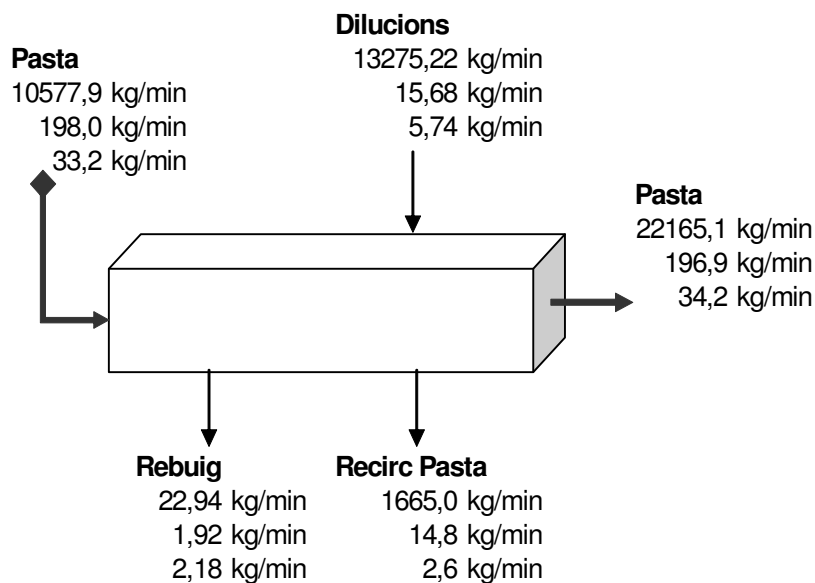


Figura VIII.23: Balanç global de matèria, cas base

El consum total, consum de pasta i consum total per dilucions, en aquest cas base és de 23853 kg/min d'aigua; 213,7 kg/min de fibres i 38,9 kg/min de càrregues.

El plantejament inicial d'aquest apartat, que afrontava l'optimització considerant el cabal màssic de fibres no va aportar millores significatives considerables, i per contra feia augmentar el consum d'aigua. Aquest augment en el consum d'aigua estava motivat per augment en la demanda d'aigua per dilucions, sobretot en la dilució inicial de pasta.

Per aquest motiu es decideix relaxar les restriccions aplicades. La relaxació de restriccions és habitual realitzar per comparar resultats, en aquest cas on els resultats inicials no són bons encara està més justificat.

La relaxació de restriccions comporta una redistribució de fluxos lleugerament diferent, que no aporta millores significatives en el resultat final del balanç de procés, reflexat a la Figura VII.24.

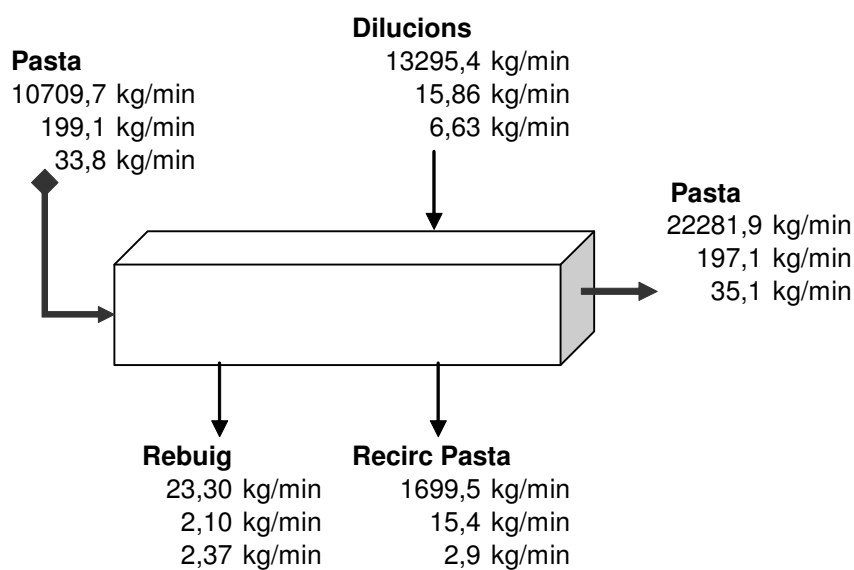


Figura VIII.24: Balanç global de matèria, optimització amb restriccions relaxades

Els resultats es resumeixen en un increment del consum d'aigua, en un 1,2%, i un augment del consum de fibres del 0,5 %. Els cabals de dilucions i rebuigs també augmenten.

Tal com s'ha apuntat en la presentació dels plantejaments, el treball amb el paràmetres de fibres expressat com a cabal, kg de fibra per minut, representa un impediment pel correcte funcionament de l'optimització.

La segona variant del plantejament portava a treballar amb consistències del flux enlloc d'utilitzar el cabal màssic. En aquest cas, les variacions de la redistribució de fluxos són apreciables i els resultats finals experimenten una apreciable millora.

La millor solució aconseguida fruit d'aquest el procés d'optimització és la presentada tot seguit. El balanç de matèria global queda resumit a la Figura VIII.25, i el balanç més desenvolupat és troba a l'annex.

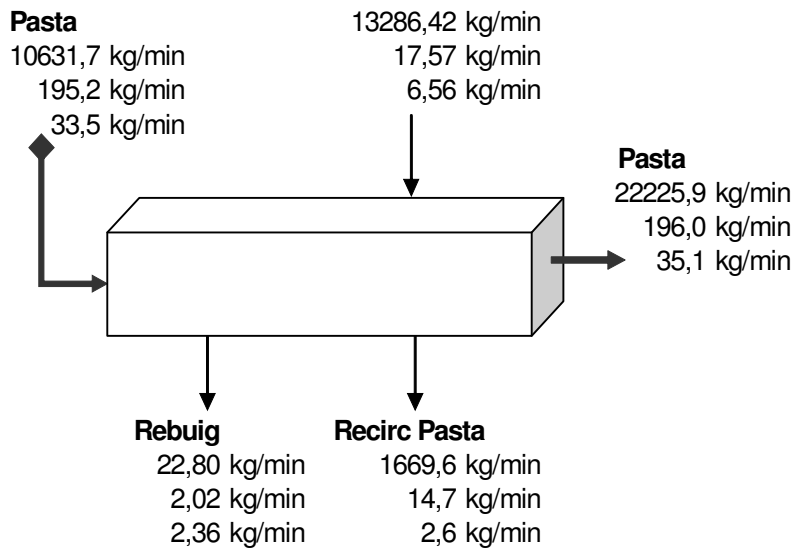


Figura VIII.25: Balanç global de matèria, millor solució

En resum, la comparativa amb el cas base mostra que el consum total d'aigua, suma de l'aigua incorporada a la pasta i el total de dilucions, és un 0,2% superior al consum total d'aigua del cas base. Per contra s'aconsegueix reduir el consum de fibra, en aquest cas és un 1,5% inferior al consum del cas base. Tot i ser la millor solució obtinguda amb aquest plantejament la voluntat és de seguir explorant altres millores de la configuració existent que puguin aportar estalvis més importants.

Per aquest motiu es tracta d'anar un pas més enllà i intentar trobar una nova configuració que satisfaci plenament el objectius fixats

VIII.E.2. Noves perspectives

Els resultats obtinguts fins al moment es poden qualificar d'èxit parcial, fet que motiva l'establiment de nous plantejaments per tal de millorar el procés. S'obren noves perspectives sobre la configuració existent. Una d'elles és porta a assajar amb una recirculació fora del llaç de procés format per la depuració ciclònica. S'ha observat com les diferents solucions aplicades milloren la demanda interna d'aigua, entenent com a demanda interna les dilucions relacionades amb les diferents etapes de la depuració ciclònica. Ara bé, el cabal d'aigua de dilució utilitzat per l'ajust de consistència previ a la depuració ciclònica augmenta significativament en tots els casos. Per aquest motiu es decideix provar els efectes d'una recirculació prèvia a l'ajust de consistència anterior a la primera etapa de la depuració ciclònica.

Una segona opció de millora pel procés és la introducció d'una o varies unitats de tractament secundari. L'objectiu d'aquesta variant és reduir els sòlids de l'aigua de les anomenades fonts, augmentant així la seva qualitat. Una font de major qualitat implica augmentar el grau de llibertat en la redistribució de fluxos que han de realitzar els algoritmes genètics.

Per tal de comparar els resultats obtinguts s'ha establert un quadre resum, Taula VIII.14, amb els resultats de cadascuna de les reconfiguracions obtingudes. Concretament, hi apareixen quatre noves configuracions fruit de la millor solució obtinguda en cada variant plantejada en l'optimització. La primera corresponent a la millor solució obtinguda fins al moment (identificada com a solució 1), que prové de l'optimització presentada anteriorment (secció VIII.E.1).

La resta de solucions obtingudes en aquest apartat de noves perspectives. En tots els casos les dades de la taula són diferències percentuals entre la solució proposada respecte el cas base.

Taula VIII.14: Resum de les diferències percentuals de les diferents reconfiguracions respecte el cas base.

	Sol1	1Filt	2Filt a D1	2Filt a S37
Pasta In				
Aigua (kg/min)	0.5%	1.4%	1.9%	1.7%
Fibra (kg/min)	-1.5%	0.7%	0.3%	0.8%
Càrregues (kg/min)	1.0%	1.9%	2.4%	2.2%
Dilucions				
Aigua (kg/min)	0.1%	-0.4%	-0.4%	-0.6%
Fibra (kg/min)	10.8%	3.3%	3.3%	1.3%
Càrregues (kg/min)	12.4%	5.3%	5.3%	2.6%
Rebuig				
Aigua (kg/min)	-0.7%	63.7%	69.5%	69.2%
Fibra (kg/min)	4.9%	59.0%	64.7%	56.3%
Càrregues (kg/min)	7.5%	3.4%	7.4%	7.2%
Recirc Pasta				
Aigua (kg/min)	0.3%	0.2%	0.4%	0.2%
Fibra (kg/min)	-0.5%	-0.4%	-0.6%	-0.4%
Càrregues (kg/min)	2.6%	2.4%	3.5%	2.0%
Pasta Out				
Aigua (kg/min)	0.3%	0.2%	0.4%	0.2%
Fibra (kg/min)	-0.5%	-0.4%	-0.6%	-0.4%
Càrregues (kg/min)	2.6%	2.3%	3.5%	2.0%

VIII.E.2.1. Recirculació fora del llaç de depuració ciclònica

La introducció d'una recirculació prèvia a l'ajust de consistència anterior a la primera etapa de la depuració ciclònica queda reflexada a la Figura VIII.26, on el cercle de punts indica la situació d'aquesta nova demanda.

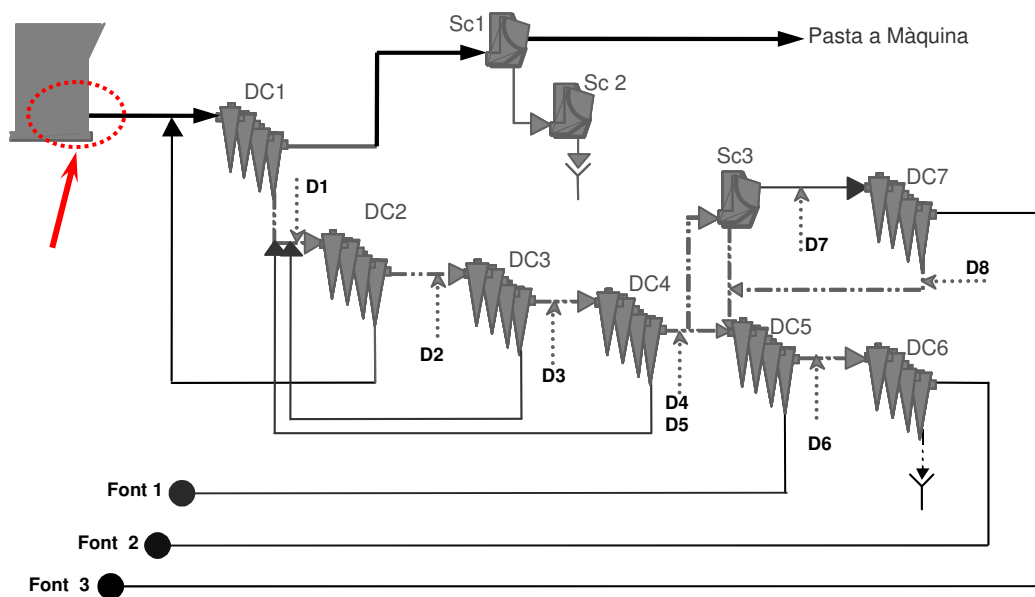


Figura VIII.26: Esquema del plantejament de recirculació fora del llaç de depuració ciclònica

El resultat obtingut amb aquesta variant no són satisfactoris. Les noves configuracions obtingudes redueixen notablement el consum de les dilucions, el punt feble detectat fins al moment. Però la reducció de consum de dilució no compensa suficientment l'augment de la demanda interna motivada per aquest canvi de configuració. Per tant s'abandona aquesta variant.

VIII.E.2.2. Tractament secundari

Una acció posterior per millorar la configuració del procés ha estat la inclusió d'un tractament secundari. Concretament es pretén eliminar sòlids d'una de les fonts, disminuint així la seva consistència i transformant-la en una font d'aigua de major qualitat.

L'eliminació de sòlids es realitza mitjançant un filtre, semblant als filtres instal·lats en les etapes de depuració pressuritzada, però amb un major índex de rebuig de sòlids, o sigui una llum de malla inferior. La font escollida per realitzar aquesta operació és la font número 1 (F1), degut a que és la font amb major consistència. La reducció de sòlids és sensible, de l'ordre del 85% de sòlids rebutjats.

La inclusió d'aquesta variant en el circuit no representa una millora significativa en el procés, com queda recollit en la el balanç inclòs a l'annex. El balanç desenvolupat també es pot trobar a l'annex del present treball.

En aquest cas, s'observa un lleuger augment en el consum de pasta, un 1,4% en aigua, 0,7% en fibra i un 1,9% en càrregues; com queda recollit a la Taula VIII.14. El conjunt de dilucions aplicades suposen una disminució en el consum d'aigua respecte el cas base, però augmenten les quantitats de sòlids introduïts al sistema. En conjunt, la pasta més les dilucions, el consum d'aigua és un 0,4% superior al cas base.

Els rebuigs en aquest cas són sensiblement superiors al cas base, del 63,7% en el cas de l'aigua, del 59% en fibra i el 3,4% en càrregues. Aquest augment és degut al rebuig addicional generat per la unitat de filtrat introduïda per eliminar sòlids.

En resum, la introducció d'una unitat de tractament que permet augmentar la qualitat de l'aigua no reporta una millora al conjunt del procés.

Després del poc èxit aconseguit amb la millora de qualitat de l'aigua de la mitjançant la unitat de tractament per filtració, es decideix introduir una segona unitat de tractament. Aquesta segona unitat és de característiques idèntiques a la primera. La seva missió també és augmentar la qualitat de l'aigua de la font. Els dos tractaments funcionen en paral·lel i s'encarreguen dels fluxos de les fonts 1 i 2 respectivament. Les fonts 1 i 2 són les dues de major consistència. La reducció de sòlids és sensible, amb un 85% de sòlids rebutjats.

A continuació es prova l'efecte de la recirculació d'aquestes dues fonts amb aigua de més qualitat aplicades a dues configuracions diferents. En primer lloc, les dues fonts satisfan la demanda 1, igual que el cas anterior (1 únic filtre). En la segona les dues fonts s'utilitzen per la dilució de la pasta en l'ajust de consistència previ a l'entrada al circuit de depuració ciclònica.

La primera variant satisfà la demanda 1, que està situada entre la primera i la segona etapa de la depuració ciclònica on la pasta té una major qualitat. La inclusió d'aquesta segona unitat de tractament tampoc representa una variació significativa en el procés, com queda recollit a la figura que il·lustra el balanç i el balanç de matèria desenvolupat, inclòs a l'annex. En aquest cas, s'observa un lleuger augment en el consum de pasta, un 1,4% en aigua, 0,7% en fibra i un 1,9% en càrregues; com queda recollit a la Taula VIII.14. El conjunt de dilucions aplicades suposen una disminució en el consum d'aigua respecte el cas base, però augmenten les quantitats de sòlids introduïts al sistema. En conjunt, la pasta més les dilucions, el consum d'aigua és un 0,4% superior al cas base.

Els rebuigs en aquest cas són superiors respecte la configuració amb un filtre. Respecte el cas base el valors són molt superiors, del 69,5% en el cas de l'aigua, del 64,7% en fibra i el 7,4% en càrregues. Aquests valors superiors tenen origen en la introducció d'una segona unitat de tractament per eliminar sòlids.

En la segona variant les dues noves fonts no satisfan cap de les 8 demandes del sistema. En aquest cas s'utilitza l'aigua filtrada per diluir la pasta en l'ajust de consistència que té lloc just abans d'iniciar la depuració ciclònica, al tanc S37. En totes les reconfiguracions anteriors s'observa com les variacions aplicades disminueixen la demanda interna d'aigua, però que augmenta significativament el cabal de dilució previ a la depuració ciclònica. Per aquest motiu es decideix provar els efectes d'una recirculació en aquest punt.

La segona variant d'aquesta reconfiguració amb dues unitats de tractament tampoc provoca una variació significativa en el procés, com queda recollit en la figura que il·lustra el balanç i en el balanç de matèria complet, inclosos a l'annex del treball.

En aquesta segona variant s'observa un lleuger augment en el consum de pasta semblant als dos casos anteriors. La pasta que entra al sistema consumeix un 1,7% més d'aigua, un 0,8% més en fibra i un 2,2% en càrregues; com queda recollit a la columna "2Filt a S37" de la Taula VIII.14. De nou, l'agregat de consums de les dilucions aplicades suposen una disminució en el consum d'aigua respecte el cas base; encara que també augmenten les quantitats de sòlids introduïts al sistema. De forma global el consum d'aigua és un 0,4% superior al cas base, sumant la pasta i les dilucions. Per tant, en consum d'aigua s'assoleix exactament el mateix efecte que la primera variant.

Els rebuigs en aquest cas són semblants a la primera variant, exceptuant una reducció significativa en el rebuig de fibres situant-se fins i tot per sota del valor de rebuig del cas amb un sol filtre. De tota manera, comparant amb el cas base l'augment és del 69,2% en el cas de l'aigua, del 56,3% en fibra i el 7,2% en càrregues.

VIII.F. CONCLUSIONS

A la vista dels resultats obtinguts amb els diferents plantejaments i variants assajades en el procés d'optimització, el millor resultat obtingut ha estat assolit amb el plantejament que utilitza els tres paràmetres bàsics (aigua, fibres i càrregues), i que tracta el flux de fibres en base a la consistència.

Fruit de la reconfiguració obtinguda del millor resultat s'augmenta un 0,2% el consum total d'aigua, aigua present a la pasta i aigua utilitzada en les dilucions, però l'estalvi en consum de fibres arriba al 1,5%. Si el consum de fibres de la fàbrica es troba al voltant de les 120 t/d, això suposa un estalvi de 1,8 t/d. En termes monetaris això suposa un estalvi diari superior al 25.000 €, que en el còmput anual representa un estalvi significatiu superior a 300.000 €.

Cal observar les repercussions globals d'aquesta, els efectes que suposa al conjunt del procés. Les variacions que provoca la nova configuració en el circuit d'aigües del procés queden resumits a la Taula VIII.15.

Taula VIII.15: Conseqüències de la reconfiguració: variacions de consum al circuit d'aigües

	Aig Blanques (l/min)	Aig Filtrades (l/min)
Original	21018,9	4016,7
Reconfiguració	22377,2	3247,9
Δ Consum	1358,4	-768,8
	6%	-19%

Com ja s'ha dit, la nova configuració provoca un augment del 0,2% d'aigua en la zona a optimitzar. Però les conseqüències al circuit d'aigües mostren que el nou procés consumeix més aigües blanques, concretament un 6%

més. Aquest augment no és dolent per al procés, tot el contrari, s'aprofita una major quantitat de matèria primera no retinguda en la formació de paper. Aquest augment de consum d'aigües blanques provoca òbviament un descens de la quantitat d'aigua blanca a tractar en el filtre de discs, per obtenir aigua filtrada. Això suposa una reducció de costos.

Al mateix temps, la variació de consums de la nova configuració de procés provoca una reducció del 19% del cabal d'aigües filtrades. Es tracta d'una reducció important en el consum de l'aigua més costosa, degut a la necessitat de tractament. Aquesta reducció en el consum d'una aigua de procés d'alta qualitat permet abordar nous reptes. L'excedent d'aigües filtrades generat permet plantejar-se la utilització d'aquest flux per reduir el major consum d'aigua fresca d'aquest procés: les dutxes i ruixadors de la màquina de paper.

Les dutxes de la màquina de paper tenen uns requeriments de qualitat d'aigua molt elevats. Són equipaments que utilitzen boques de sortida de diàmetre reduït, fàcilment obturables per contaminants presents a l'aigua. L'excedent d'aigües filtrades es podria utilitzar en les dutxes i ruixadors menys exigents, directament amb un petit tractament com ara un filtre de sorra per acabar d'eliminar algun sòlid de major diàmetre. Aquest fet permetria aconseguir una reducció en el consum d'aigua fresca afegit a l'estalvi de fibres aconseguit.

En conjunt, aquesta seria una proposta interessant a estudiar, avaluant els costos i beneficis esperats.

Tot i la dificultat que presentava el procés escollit per a optimitzar, s'obtenen uns resultats esperançadors que podrien suposar millores ambientals per a l'empresa i una reducció dels costos d'explotació.

REFERÈNCIES

- [1] Ashton, G.J., Cripps, H.R., Spriggs, D. "Application of Pinch technology to the pulp and paper industry", Tappi Journal, pp. 81-85 (1987).
- [2] Turon X., Labidi J., Paris J. "Simulation and optimization of a high grade coated paper mill", Journal of Cleaner Production (acceptat).

CAPÍTOL IX

IX. CONCLUSIONS

Fruit del treball realitzat s'ha desenvolupat i aplicat una metodologia amb l'objectiu d'optimitzar al mateix temps el consum d'aigua fresca i la pèrdua de matèria primera. Per aconseguir-ho s'ha elaborat una simulació a mida del procés, que ha servit d'eina d'avaluació de totes les noves configuracions dels circuits de fabricació generades a partir de la configuració inicial i sotmeses a la metodologia d'optimització mitjançant algorismes genètics.

La simulació desenvolupada per reproduir el procés seleccionat en aquest treball reproduceix acuradament el funcionament del procés productiu, que opera amb una àmplia gamma de condicions de treball. La simulació pot ser utilitzada per preveure els paràmetres operatius del procés, o de possibles modificacions del procés, i reduir els efectes del canvi de gramatge en virtut de:

- Una elecció sensata de les dades de procés a utilitzar per la simulació.
- Una elecció encertada dels models que defineixen les diferents operacions unitàries, els quals han de permetre la utilització de les dades disponibles i subministrar informació adequada sobre el procés.
- La metodologia empleada per l'ajust dels paràmetres de la simulació, que ha mostrat la seva eficiència.

S'han analitzat diferents configuracions de procés que persegueixen l'optimització global del procés. Les diferents configuracions han estat obtingudes a través dels resultats generats per la metodologia d'optimització

mitjançant algoritmes genètics. Els resultats assolits que han d'aportar solucions per reduir el consum d'aigua i de fibres han estat implementats a la simulació del procés per avaluar la seva viabilitat tècnica.

El procés industrial amb la configuració existent ja es podia considerar com un sistema amb un grau important de tancament de circuits. El consum d'aigua es situa a l'entorn de 7 m³ per tona de paper produït. Per tant, és raonable que les noves configuracions del procés aportin millores més significatives en la reducció del consum de fibres que no en l'estalvi d'aigua.

El present estudi ha assajat amb un bon nombre de situacions, plantejaments i variants a l'hora de realitzar la optimització. Es tracta de la primera aplicació d'aquesta metodologia en el tipus de procés típic de la indústria paperera mediterrània. El treball ha de constituir una base i una possible referència a l'hora de realitzar futurs treballs d'optimització, on amb processos amb un menor grau de tancament assoliran uns resultats d'estalvi més significatius.

El conjunt de situacions i configuracions analitzats demostren:

1. La importància de l'elecció del sistema a estudiar (nombre i tipus de fonts i demandes), per la importància que tenen sobre els resultats finals de l'optimització.
2. La incidència de la determinació de restriccions, que tenen una influència capital en els resultats de l'optimització. Aquest fet planteja un problema comú pel desconeixement dels límits admissibles ens el diferents fluxos i equipaments.

Per tant es fa necessària una familiarització i un grau elevat de coneixement del procés i de les seves limitacions per tal d'aplicar eficaçment aquesta metodologia.

En qualsevol cas, abans de plantejar la implementació de qualsevol de les noves configuracions assolides cal un estudi de la viabilitat econòmica del projecte, on es quantifiquin les despeses i els estalvis assolits per estimar el període de retorn de la inversió.

ANNEX A

Pàgina

A. ALGORITMES GENÈTICS.....	3
A.1. Introducció.....	3
A.2. Visió històrica.....	4
A.3. Descripció bàsica dels algoritmes genètics	5
A.3.1. Evolució Natural.....	5
A.3.2. Analogies amb la Biologia / Genètica.....	8
A.3.3. Execució de l'algoritme genètic	11
A.3.4. Codificació	12
A.3.5. Població inicial.....	13
A.3.6. Avaluació de l'adaptació dels individus	14
A.3.7. Selecció	16
A.3.8. Operadors genètics	19
A.3.9. Creuament.....	20
A.3.9.1. Mutació	22
A.3.10. Caracterització de l'algoritme genètic per a l'optimització	22
A.3.10.1. Població inicial	23
A.3.10.2. Funció d'adaptació	24
A.3.10.3. Selecció d'individus retinguts.....	25
A.3.11. Procés evolutiu.....	26
A.3.12. Aturada del procés	27
A.3.13. Estructura de l'algoritme	29
A.3.14. Vessant informàtica dels algoritmes genètics	30
A.3.15. Conclusions.....	32
REFERÈNCIES	34

INDEX DE FIGURES	Pàgina
Figura 1: Cromosoma - Cadena de gens d'un individu (12 gens).....	6
Figura 2: Població - Conjunt d'individus / solucions (9 individus)	7
Figura 3: Ruleta de Goldberg – Distribució de forces absolutes.....	18
Figura 4: Ruleta de Goldberg – Distribució de forces relatives	19
Figura 5: Creuament simple.....	21
Figura 6: Procés de generació d'una nova població	28
Figura 7: Estructura d'un algoritme genètic.....	29

INDEX DE TAULES	Pàgina
Taula 1: Relació de terminologia genètica vs. algoritmes genètics	8
Taula 2: Índex d'adaptació: Forces relatives.....	17

A. ALGORITMES GENÈTICS

A.1. INTRODUCCIÓ

Els algoritmes informàtics basats en les lleis de la genètica i l'evolució natural sorgeixen com una conjunció d'aportacions procedents de la matemàtica aplicada, la informàtica i la biologia. El desenvolupament d'aquests algoritmes ha facilitat l'aplicació de metodologies basades en algoritmes genètics en diferents camps de la ciència.

La base conceptual dels algoritmes genètics està clarament inspirada en les lleis de l'evolució natural postulades pel biòleg/naturalista anglès Charles Darwin. Aquestes lleis, revolucionàries i incompreses en el seu moment, explicaven l'evolució de les espècies segons el concepte de l'evolució natural, on els individus més ben adaptats al medi que els envolta són els que compten amb una major probabilitat de subsistir i fer perdurar la informació genètica que els caracteritza. Aquesta selecció natural provoca que la transmissió de la informació de generació en generació acabi millorant l'adaptació de l'espècie al medi. Aquesta millor adaptació dona majors garanties d'èxit i subsistència als individus de l'espècie.

En el present treball s'utilitzen els algoritmes genètics com a part d'una metodologia per millorar processos industrials, concretament per a la optimització de processos existents. Aquesta optimització es realitza mitjançant el redisseny o la reconfiguració del procés industrial existent. El treball amb la tècnica basada en algoritmes genètics ha de permetre superar limitacions presents en els mètodes clàssics d'integració de processos. La nova metodologia permet afrontar optimitzacions amb més d'un contaminant en el fluxos del procés; permet explorar un ampli espai de possibles solucions i constitueix un mètode robust de cerca de solucions, especialment indicat en casos d'escàs coneixement a priori del procés. Al mateix temps, la metodologia basada en algoritmes genètics permet aconseguir diferents

solucions en la zona propera a l'òptim. Aquesta característica ofereix la possibilitat de provar diferents solucions al problema plantejat i avaluar en conjunt quina és millor opció, considerant altres aspectes secundaris no inclosos com a paràmetres d'optimització.

En aquesta adaptació de la selecció natural per tal d'optimitzar processos industrials es produeixen moltes analogies respecte els processos naturals. Els algoritmes genètics tenen per objectiu trobar la millor solució a un problema d'optimització mitjançant l'evolució d'una "població" inicial de solucions, segons les condicions fixades.

En els algoritmes genètics, parlant en termes propers a la ecologia, una sèrie d'individus evolucionen per adaptar-se el màxim possible a les condicions existents. Per norma general, es pretén trobar la solució o solucions que maximitzen un problema d'optimització plantejat, seguint una sèrie de condicions i restriccions fixades, parlant en termes d'enginyeria de processos.

El vocabulari utilitzat en algoritmes genètics és en molts casos anàleg a l'utilitzat en termes de selecció natural i genètica.

A.2. VISIÓ HISTÒRICA

La idea de crear tècniques d'optimització basades en mecanismes de selecció natural la va introduir John Holland als anys 1960.

Els inicis de la utilització d'algoritmes genètics van començar a desenvolupar-se a la dècada dels 50 (1950), i s'emmirallaven en els principis d'evolució de les espècies. Inicialment, van ésser concebuts i desenvolupats per experts en biologia amb la intenció de reproduir l'evolució dels éssers vius, fins i tot abans de conèixer què eren els cromosomes i com s'estructurava la genètica tal i com coneixem ara.

Amb la progressiva evolució de la biologia i la genètica, identificació del material genètic, l'estructura de l'ADN i el seu paper en el procés d'evolució, els algoritmes genètics van seguir un procés de desenvolupament anàleg. Els que es podrien considerar els pares dels algoritmes genètics John Holland [1] i David Goldberg [2] van adaptar els avenços de la genètica a la resolució de problemes d'optimització amb alts índexs combinatoris. L'analogia amb la natura, que serveix de base del mètode, seria la selecció d'individus d'entre una població, que representa la selecció de la solució òptima d'un problema d'entre tot el conjunt de solucions possibles.

A.3. DESCRIPCIÓ BÀSICA DELS ALGORITMES GENÈTICS

A.3.1. Evolució Natural

Cada individu porta intrínsecament una informació característica i única codificada en el seu genotip. Aquest genotip (o cadena de gens) seria la unitat major d'informació, però es pot subdividir en unitats menors:

- Cromosomes - Orgànuls o unitats portadores del material genètic
- Gens - Unitat menor amb contingut de material hereditari, que duu informació per a un caràcter
- Al·lels - Cadascun dels diferents gens que hi pot haver en un mateix locus*. Diferents gens en un cromosoma són al·lels entre si mateixos

(* Locus - Lloc que ocupa un gen al cromosoma)

L'evolució natural ve motivada perquè els individus més ben adaptats al medi tenen un major índex de supervivència, amb més èxit reproductor, i per tant transmeten la seva informació genètica a les futures generacions. La

informació genètica d'aquests descendents és doncs una combinació dels gens dels seus parents.

Una altra de les característiques de l'evolució natural és la mutació, o alteració a l'atzar del material genètic, que fan aparèixer informació que no apareixia en el material genètic dels antecessors. La mutació comporta un aspecte positiu ja que aporta variabilitat a la població, evitant una excessiva homogeneïtzació. Les mutacions que suposen un èxit, una major adaptació al medi, perduren, les altres desapareixen per falta d'èxit reproductiu. De la mateixa manera, la informació genètica dels individus pitjor adaptats es perd per la falta d'èxit reproductiu.

Tots aquests mecanismes es veuen reproduïts en la tècnica dels algoritmes genètics.

En els algoritmes genètics es treballa amb una sèrie d'individus. Aquests individus representen resultats que compleixen els criteris establerts en el problema plantejat, i que, a la vegada, contenen la informació d'aquest resultat en forma codificada. Una de les simplificacions del mètode és que cada individu té només un sol cromosoma, que conté la informació única i específica que l'identifica. La Figura 1 mostra la configuració d'un individu - cromosoma típic.

El cromosoma està compost de diferents gens, cadascun dels quals conté la informació codificada.

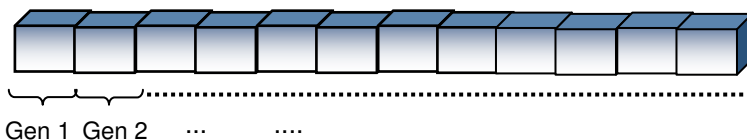


Figura 1: Cromosoma - Cadena de gens d'un individu (12 gens)

Una població és un conjunt d'individus que constitueix un ventall de solucions potencial al problema d'optimització, com la representada a la Figura 2 composta de 9 individus

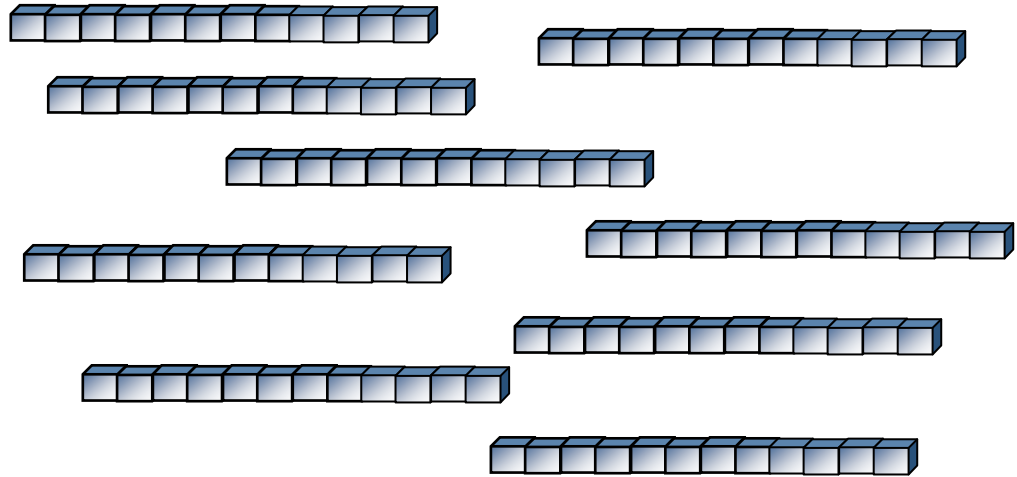


Figura 2: Població - Conjunt d'individus / solucions (9 individus)

L'evolució cap a les millors solucions del problema es realitza mitjançant mecanismes similars als d'evolució natural. Cada individu està sotmès a una determinació del seu grau d'adaptació al problema d'optimització. L'adaptació ve determinada per una funció producte dels criteris d'optimització utilitzats.

Els algoritmes genètics generen nous individus a través d'iteracions a partir de mecanismes com els de selecció, reproducció/creuament o evolució/mutació, esmentats anteriorment. Així mateix, els algoritmes genètics són els encarregats de generar poblacions cada cop més adaptades, o sigui trobar resultats que satisfacin millor la funció a optimitzar d'acord amb les restriccions fixades. La velocitat o el nombre de generacions necessàries per assolir el resultat desitjat dependrà de diferents variables. Per ordre d'importància caldria destacar el tipus de construcció/estructuració de l'algoritme i la codificació de la informació. En el primer cas, cal que els

algoritmes estiguin ben estructurats d'acord amb les característiques del problema plantejat. A més a més, cal que siguin consistents alhora d'aplicar les operacions de recombinació de gens, per seleccionar les millors seqüències codificades.

Totes aquestes característiques es corresponen amb la noció de blocs de construcció en els algoritmes genètics, introduïda per Goldberg als anys 1990 [3]. Altres referències bibliogràfiques permetem ampliar aquest apartat i aprofundir en les tècniques desenvolupades per tal de millorar el comportament dels algoritmes [1-5].

Quan es planteja un treball utilitzant els algoritmes genètics, inicialment és interessant aprofundir o almenys conèixer les diferents opcions existents a l'hora d'escollir entre les diferents opcions de construcció d'algoritmes genètics. Començant per la versió inicial o més clàssica (Holland, Goldberg) o alguna de les variants que han anat sorgint posteriorment, que introdueixen més mecanismes de selecció natural o variants d'aquests.

A.3.2. Analogies amb la Biologia / Genètica

Aquesta íntima relació entre terminologies i els analogismes existents s'il·lustren a la taula següent:

Taula 1: Relació de terminologia genètica vs. algoritmes genètics

Genètica (biologia)	Algoritmes genètics
Cromosomes	Codificació
Gens	Blocs elementals de la codificació
Població	Conjunt de solucions potencials
Adaptació individu al medi	Funció d'optimització
Generacions	Iteracions del procés

En genètica, els individus estan definits i diferenciats per la informació genètica inclosa en el seu genotip, o conjunt de gens. Els gens constitueixen els cromosomes, que són la forma superior d'organització del material genètic.

El genotip es pot representar com un codi de bases nucleiques (unitats bàsiques). En funció d'aquesta informació l'individu presenta un fenotip propi o característiques pròpies de l'individu observables a simple vista. El fenotip ve determinat pel genotip de l'individu, però es veu influenciat pel medi que l'envolta. Finalment serà el fenotip l'encarregat de determinar la capacitat d'adaptació de l'individu al medi.

Els cromosomes són producte de la recombinació per creuament dels gens de dos individus parents de la generació anterior, amb les variacions que hagin pogut patir per alteracions aleatòries per mutació. El creuament, en termes biològics i de reproducció sexual, correspon a la generació d'una cèl·lula filla a partir de les cèl·lules reproductores de dos individus. La informació d'aquests dos individus pares, sans i amb èxit reproductor, passa a la següent generació. Aquest nou individu gaudirà d'una gran probabilitat d'ésser també sa, amb èxit reproductiu i amb una bona adaptació al medi, que ha de permetre a l'individu reeixir en el procés de selecció natural.

Una altra analogia vindria determinada pel procés de mutació, encarregat de provocar una alteració aleatòria del genotip de l'individu, afavorint l'aparició de noves característiques que poden comportar diferents conseqüències antagòniques i imprevisibles a priori:

- i. Millora en la seva adaptació al medi, que comportaria una probabilitat més alta de perdurar i transmetre la seva informació genètica (amb l'alteració inclosa)

- ii. Empitjorament en la seva adaptació al medi, reduint la probabilitat de reproducció i transmissió d'aquesta informació. A l'extrem podríem trobar una aberració que causés la desaparició de l'individu.

Per analogia, en els algoritmes genètics un individu representa una solució possible d'un problema d'optimització. Aquesta solució també està caracteritzada per una codificació d'informació inclosa al seu genotip. Aquesta codificació ha de permetre avaluar la qualitat de la solució en la funció objectiu (seria equivalent a la força, a l'adaptació de l'individu a l'entorn).

Un grup d'individus constitueix la població d'una certa generació. Aquesta població experimenta una selecció dels individus més ben adaptats al problema que s'ha plantejat, de manera anàloga a la influència que exerceix el medi natural sobre la supervivència dels éssers vius. Els més ben adaptats seran els que gaudiran d'una major probabilitat d'èxit reproductiu.

La fase de reproducció, incloses les alteracions per mutació, els operadors responsables del creuament i de la mutació modifiquen l'estructura de dades codificada tot creant els nous individus de la següent generació. L'objectiu d'aquesta etapa no és altre que permetre la recerca i l'exploració de nous sectors de l'espai de solucions del problema, d'una part; i per l'altra, disminuir el risc que la recerca quedi restringida en un òptim local (gràcies bàsicament a la mutació). Curiosament, aquest fet contradiu les programacions matemàtiques clàssiques, pel fet de tolerar degradacions de la funció objectiu. Aquest tret característic dels algoritmes genètics permetrà superar les anomenades "trampes" que constitueixen els òptims locals dins un procés d'optimització.

La renovació d'una generació a l'altra està assegurada per les iteracions associades als algoritmes genètics. Així a cada generació es creen nous

individus, se'n mantenen d'altres i també en desapareixen d'altres, a imatge de la selecció natural.

A partir d'una població inicial, generalment poc adaptada a l'entorn, però que representa una gran diversitat dins l'espai de recerca de resultats (sempre i quan aquesta població inicial sigui generada de forma adequada), l'execució de l'algoritme genètic ha de permetre obtenir iteració rere iteració, una població final d'individus forts, o sigui un conjunt de resultats amb bones solucions al problema plantejat. Aquesta recerca s'atura en el moment que es satisfan uns criteris fixats a tal efecte.

A.3.3. Execució de l'algoritme genètic

L'execució d'un l'algoritme genètic necessita els següents elements:

- Un codi apropiat amb el qual es puguin representar les possibles solucions del problema, perquè totes les característiques han d'estar codificades al genotip
- Un procediment de generació d'una població inicial d'individus viables
- Una funció objectiu que permeti avaluar la força, el grau d'adaptació de cada solució respecte el problema plantejat
- Un procediment de selecció que afavoreixi l'elecció d'aquelles solucions que contenen una evolució envers l'òptim
- Operadors que executin els processos de creuament i mutació apropiats pel problema
- Paràmetres que regeixin l'evolució de les poblacions generació rere generació (i.e. dimensió de la població, probabilitat de creuament, probabilitat de mutació o taxa de supervivència)
- Un, o més d'un, criteri(s) per tal d'aturar el procés

Tota aquesta sèrie d'aspectes bàsics en l'execució de l'algoritme s'aniran desenvolupant en els següents apartats.

A.3.4. Codificació

El procés d'execució d'un algoritme genètic fa necessari un codi que permeti conceptualitzar el problema a tractar. La codificació esdevé el nexa d'unió entre el problema, la funció objectiu i la solució final. La codificació ha de permetre definir un espai de recerca que inclogui totes les solucions possibles.

Per utilitzar els algoritmes genètics cal que cada solució al problema pugui ser codificada de manera unívoca, en una cadena de longitud finita (cromosoma). Per realitzar aquesta codificació i per disposar d'un codi amb les característiques mencionades cal tenir un model clar d'estructura.

D'ençà les primeres implementacions d'algoritmes genètics, la codificació més comuna ha estat la realitzada en codi binari. Així un enter es codifica de manera anàloga a la descomposició binària. A tall d'exemple, un nombre enter es codificaria seguint les regles de la descomposició binària, de la següent manera:

Nombre a codificar = 32

$$32 = 1 \times 2^5 + 0 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 0 \times 2^0$$

(serà necessari utilitzar 6 dígitos o bits)

Nombre codificat **100000**

Nombre a codificar = 25

$$25 = 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0$$

(serà necessari utilitzar 5 dígitos o bits)

Nombre codificat **11001**

Aquest tipus de codificació només és aplicable a valors enters i no sempre satisfà el problema plantejat, sempre en funció de les seves característiques. A més a més, pot esdevenir un codi molt farragós o pesat en casos on les solucions no són simples variables matemàtiques.

A.3.5. Població inicial

La població inicial és el punt de partida de l'algoritme genètic. Està àmpliament reconegut que l'eficàcia final de l'algoritme està estretament lligada a la qualitat i a la varietat genètica de la població inicial d'individus. És molt important tenir una població inicial constituïda per individus que compleixin les restriccions intrínseques del problema i, a la vegada, que formin un grup variat dins el conjunt de solucions potencials del problema.

Si el procés d'iniciació no es fa correctament pot ser la causa de la manca d'èxit en la recerca d'una bona solució pel problema.

Existeixen diferents mètodes de generació d'aquesta població inicial, les utilitzades amb més freqüència serien:

- A l'atzar, on els cromosomes que constitueixen la població inicial són generats de manera totalment aleatòria. Aquest mètode presenta un avantatge clar, generar una població inicial realment variada, que asseguri una bona cobertura de l'espai de possibles solucions. Aquest procediment permet generar una població acceptable perquè inicialment no es disposa d'informació sobre la localització de l'òptim en l'espai de recerca.
- Heurística, on la primera generació està formada per certes solucions determinades per regles heurístiques, producte d'un bon coneixement del problema a tractar. Aquest mètode, de tota manera, pot conduir a una població inicial poc diversificada. Si és així, es pot donar el cas de conduir l'algoritme a convergir prematurament cap a un òptim local, d'on serà difícil

anar més enllà en el procés de recerca degut precisament a la homogeneïtat genètica present.

- Combinació de l'atzar i l'heurística, on la població inicial està composta per individus generats aleatòriament però també per solucions determinades heurísticament. Aquest mètode permet combinar la qualitat de les solucions heurístiques amb la varietat de les generades aleatòriament. D'aquesta manera, el risc de que el procés quedi restringit i no superi un òptim local pot encara persistir si el desenvolupament de solucions heurístiques és elevat i preval sobre les generades aleatòriament.

A.3.6. Avaluació de l'adaptació dels individus

La fase d'avaluació consisteix a calcular la força de cada individu de la població, definida aquí com la seva adaptació a l'entorn en el si del procés d'evolució natural. Un algoritme genètic tendeix a maximitzar la força dels individus generació rere generació, per tal d'assolir una població final molt ben adaptada al medi, o sigui un conjunt de bones solucions al problema proposat.

Per contra, en processos d'optimització (minimització de costos, d'efluents, de residus, etc.) sol ésser habitual perseguir la minimització d'una funció objectiu. Així es fa necessari utilitzar adaptar un procés de maximització a un problema de minimització. Contràriament als mètodes clàssics d'optimització, la minimització de la funció objectiu (anomenem C a la funció objectiu) no es pot reduir a la maximització de la funció $-C$, perquè no és concebible tractar amb forces negatives.

Es per aquest motiu que en diferents referències bibliogràfiques, com ara la que s'ha pres com a bàsica d'aquesta metodologia de David Goldberg [2], es proposa calcular la força $F(x)$ d'un individu x de la següent manera:

$$F(x) = C_{\max} - C(x) \quad \text{si } C(x) > 0 \quad (A.a)$$

$$F(x) = -C(x) \quad \text{si } C(x) < 0 \quad (A.b)$$

En conseqüència l'equació (A.b) condueix a un valor de $C_{\max} = 0$.

Parlant en termes generals el paràmetre C_{\max} pot ser, per exemple, el valor més gran observat a la funció $C(x)$, tant en la població existent o bé en la població posterior a la d'inici de la recerca. En certs problemes també es pot el cas de fixar el valor C_{\max} tot calculant-lo a priori, sempre i quan es coneguin bé les condicions i les restriccions del problema.

Una altra manera d'assolir la minimització seria mitjançant la utilització de la inversa de la funció a minimitzar. En efecte, minimitzar $C(x)$ consisteix a maximitzar $F(x) = 1 / C(x)$.

Existeixen certs inconvenients al utilitzar aquest mètode. Un exemple seria el cas que $C(x) \approx 0$. Respecte la funció objectiu, cal especificar que no és estrictament necessari complir cap condició particular relacionada amb la derivabilitat, continuïtat o convexitat del problema. Simplement, és suficient que la funció objectiu atorgui un valor numèric finit per cadascun dels individus en funció del seu cromosoma. Aquesta particularitat, entre d'altres de característiques (com per exemple possibilitat de tractar problemes extremadament combinatoris, obtenció d'un conjunt de bones solucions al problema no solament una única solució, etc.), fa que els algoritmes genètics es puguin considerar com apropiats i atractius a l'hora de plantejar la resolució de problemes on les propietats matemàtiques són poc conegudes,

com en els casos que són totalment desconegudes, o bé simplement considerades difícils de tractar.

A.3.7. Selecció

La selecció, com el seu nom indica, consisteix en triar els individus que formaran part la següent generació, en funció de les respectives forces.

El procés s'inicia amb la adjudicació a cada individu, d'una probabilitat de supervivència. Una probabilitat que es podria qualificar com a capacitat de perdurar en la següent generació, sempre en funció dels seu grau d'adaptació. Un altre cop aquest procés és un reflex fidel del procés de selecció natural. A la natura, la supervivència lligada a la l'adaptació està relacionada amb la capacitat de l'individu de sobreviure als depredadors, a les malalties, a les plagues, o altres tipus d'obstacles plantejats i que ha de superar abans d'arribar a la maduresa sexual, on pot culminar el procés i deixar descendència.

En els algoritmes genètics, el procés de selecció més utilitzat s'anomena selecció mitjançant la ruleta esbiaixada, introduïda per Goldberg [2]. Aquest procés permet seleccionar de manera estocàstica els individus amb una major adaptació a la funció plantejada, sense que això impedeixi la selecció d'aquells menys adaptats. Així, és important permetre en un cert grau, la selecció d'individus més febles per tal d'assegurar una certa diversitat genètica entre la població, que finalment garanteixi una bona exploració de l'espai de possibles solucions.

L'atzar també té un grau de protagonisme en el procés de selecció. En el procés a seguit en la ruleta esbiaixada, la fase inicial correspon a la suma de totes les forces corresponents als individus de la població. El resultat d'aquesta addició fixa les dimensions de la ruleta, com si es tractés d'un casino (aquest valor pot normalitzar a 1 per facilitar el maneig de les dades).

Tot seguit, cadascun dels individus de la població ocupa un sector de la ruleta, un sector que serà proporcional a la seva força relativa f . Així amb tots els individus fins a completar la ruleta. Aquest procediment s'il·lustra a la Figura 3.

La força relativa (f) abans mencionada es pot definir com la proporció de la força absoluta de cada individu (F) respecte del total de forces de la població.

La població que formarà part de la generació es selecciona fent tantes tirades com individus té la població i escollint en cada tirada els individus on a l'atzar s'ha aturat la boleta (continuant el símil de la ruleta de casino).

Per tal d'il·lustrar aquest procediment, es mostra el següent exemple que consta d'una població de cinc individus, Taula 2. Cadascun dels individus té assignat un valor de força (F_i) corresponent a les seves respectives forces absolutes i indicador de l'adaptació de l'individu.

Taula 2: Índex d'adaptació: Forces relatives

Individu	F_i	f_i
1	402	0,125
2	723	0,225
3	884	0,275
4	563	0,175
5	643	0,200
Total	3215	1,000

La taula també inclou les forces relatives (f_i) corresponents de cada individu, calculades segons la seva aportació particular al conjunt de la població a través de l'expressió A.c.

$$f_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^n F_i}$$

(A.c)

on n representa la dimensió de la població, en aquest cas concret n=5.

Ambdós valors, forces absolutes i forces relatives, seran els encarregats de determinar la configuració de la ruleta de Goldberg, de forces relatives i forces absolutes, recollides a la Figura 3 i a la Figura 4.

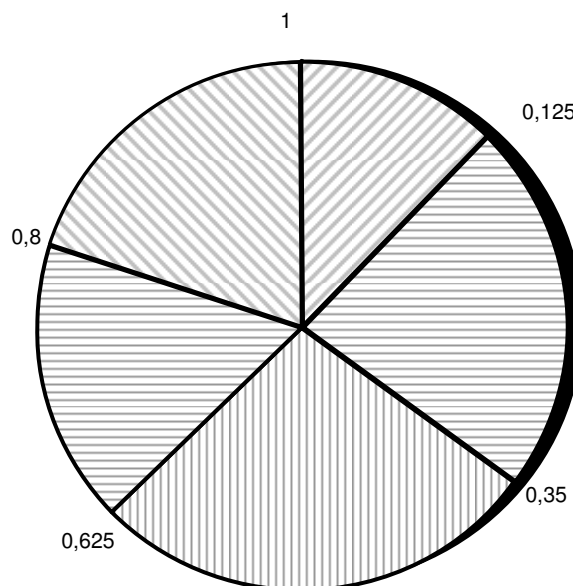


Figura 3: Ruleta de Goldberg – Distribució de forces absolutes

El procés de selecció d'un individu s'inicia amb la generació aleatòria d'un valor de probabilitat uniforme, P, comprès entre 0 i 1. Aquest procés equivaldria al llançament de la boleta de la ruleta. El valor obtingut correspon a un sector de la ruleta que prèviament s'ha dividit i en conseqüència a un individu.

Per exemple, un valor de 0.532 recau en el sector comprès entre P3 i P4 de la ruleta, cosa que suposaria en aquest cas la selecció de l'individu 4.

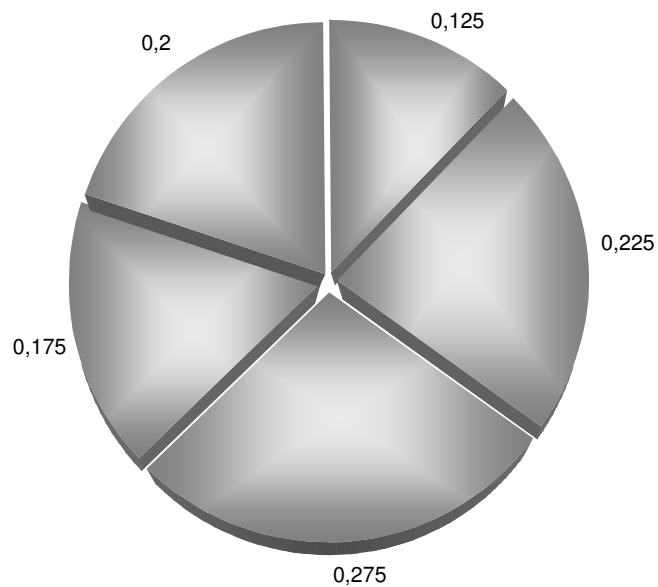


Figura 4: Ruleta de Goldberg – Distribució de forces relatives

A.3.8. Operadors genètics

Quan es parla d'operadors genètics es consideren dos tipus classes d'operacions lligades a la reproducció i a l'evolució natural, el creuament i les mutacions.

A través del fenomen de creuament es generen el conjunt de cromosomes de la següent generació, o fills. El creuament consisteix en l'acoblament de dues cadenes procedents dels parents (dues seccions dels cromosomes

considerats com a pares, o de l'anterior generació). En la implementació clàssica dels algoritmes genètics dos parents donen lloc a dos fills.

En contraposició, els operadors genètics que tan sols modifiquen un sol cromosoma pare per generar un nou individu, entrarien en la categoria denominada de mutació.

A.3.9. Creuament

Els fonaments de l'operació de creuament són bastant simples, basats sempre en les lleis d'evolució natural. Si dos individus sans i forts intercanvien una part de la seva informació genètica la seva descendència serà també forta, amb un índex de probabilitat bastant elevat. A més, aquest creuament enriquirà la diversitat de la població manipulant l'estructura dels cromosomes.

Els algoritmes genètics clàssics utilitzen un procediment de creuament senzill, anomenat creuament en un únic punt. Així, 2 parents (P1 i P2) són escollits aleatòriament d'entre la població. A continuació s'aplica l'operador de creuament, al qual se li ha associat una probabilitat fixa, P_{cre} . Al mateix temps es genera un nombre aleatori R , amb un valor entre 0 i 1. El creuament acabarà produint-se si aquest nombre $R \leq P_{cre}$, donant lloc a un intercanvi entre els gens. Com a conseqüència d'aquest creuament es generen dos descendents (D1 i D2) que formaran part de la nova generació. Per altre banda, si $R > P_{cre}$, no tindrà lloc el creuament i P1 i P2 passen a formar part de la següent generació.

En el cas exposat de creuament simple, es genera també aleatòriament un punt tall (PT) en el cromosoma. Els fragments resultants d'aquest tall són els que passaran formar part de l'intercanvi d'informació genètica en el procés de creuament.

Aquest procés s'il·lustra gràficament a la Figura 5

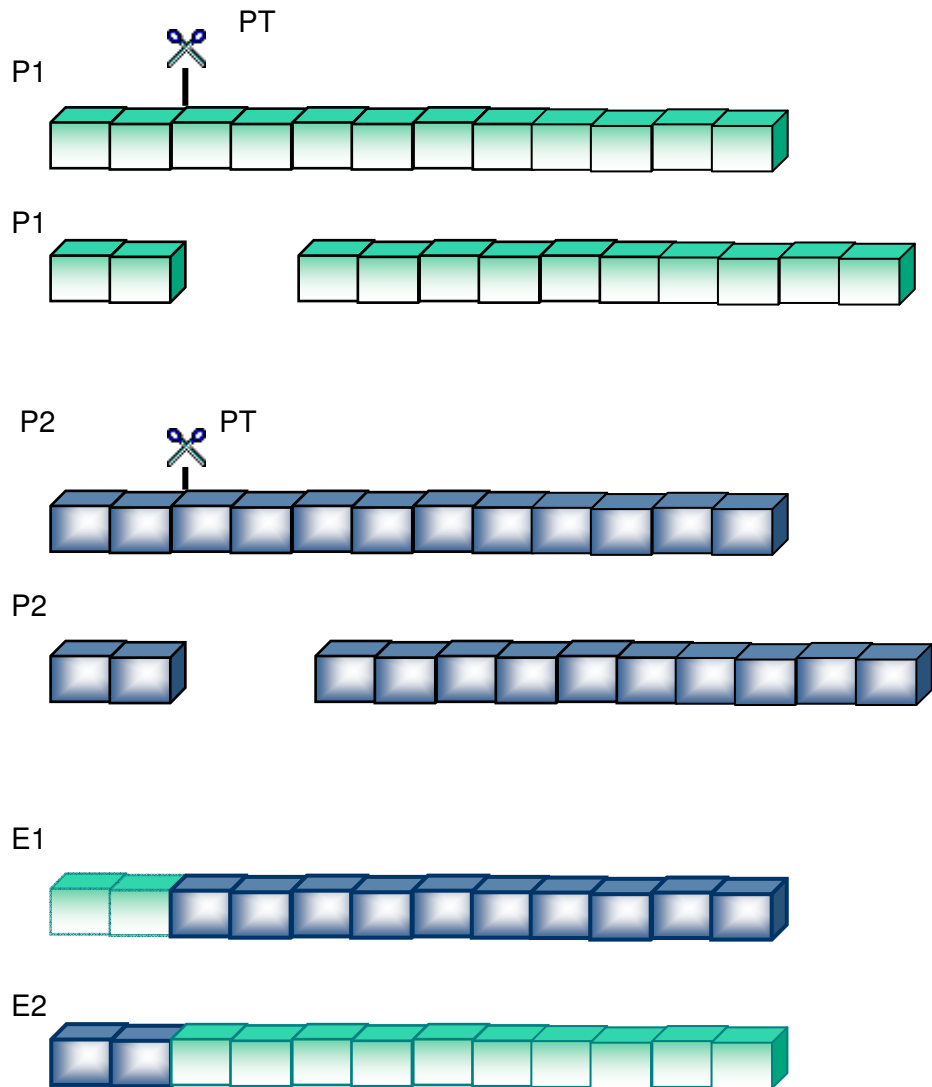


Figura 5: Creuament simple

A.3.9.1. Mutació

La mutació es una operador comunament anomenat asexual. Així, de la mateixa manera que succeeix en biologia, la mutació no té a veure amb parents, descendents, reproducció, etc. Les bases de la seva intervenció en el procés són sempre les mateixes, actuant de la mateixa manera sobre tots els individus. En cas dels algoritmes genètics la seva incidència va lligada a una sèrie de probabilitats fixades, i en cas de la biologia d'éssers vius té un caire més complex.

La introducció del paràmetre mutació en els algoritmes genètics té per objectiu contrarestar la possible homogeneïtzació de la població degut al procés de selecció dut a terme. La mutació és una font de major riquesa genètica, afegint informació que es podia haver perdut o generant seqüències noves, que finalment podrien tenir un paper important a l'hora de trobar la solució final.

A.3.10. Caracterització de l'algoritme genètic per a l'optimització

Pel plantejament i la resolució del problema d'optimització plantejat en aquest treball és fa necessari definir certs elements, com són:

- Codificació del individu
- Mètode de generació la població inicial
- Funció d'adaptació que ha d'avaluar cadascun dels individus
- Mecanismes de selecció, creuament i mutació

Existeixen també altres paràmetres relacionats amb el mètode d'optimització que han de ser fixats. Son paràmetres interrelacionats que determinen l'eficàcia del procés. Tot seguit es detallen.

A.3.10.1. Població inicial

La població inicial es genera de manera totalment aleatòria. El mètode de generació atorga, a sorts, els gens que formaran part dels diferents cromosomes, de la estructura.

Mitjançant un simple balanç de matèria es pot determinar si les estructures, o cadenes d'informació generades aleatòriament, són inviàbles, impossibles de portar a terme sota les condicions existents; amb l'objectiu de rebutjar i eliminar aquestes cadenes, o bé de refer-les tot adequant-les als paràmetres del procés.

Existeix també la possibilitat d'escollir la població inicial que es genera, per tal de poder provar determinada(es) estructura(es) de manera preferent. Cal dir però, que en aquest cas, la determinació total de la generació de la població inicial és opció delicada. Una millor solució seria la generació aleatòria i automàtica de la primera població i posteriorment substituir certes estructures presents per d'altres que s'hagi decidit que són necessàries i que es vulgui forçar la seva comprovació.

La dimensió de la població inicial, N_{pop} , representa el nombre d'elements de l'espai de solucions que seran presents a cada generació de l'algoritme genètic. Dit d'una altra manera, el nombre de cromosomes o individus presents a cada generació, perquè el cromosoma no deixa de ser una solució codificada del problema.

Aquesta grandària de població ha de representar un compromís entre la noció de paral·lelisme implícit del mètode (recerca paral·lela de solucions), i el nombre d'individus necessaris per tal d'obtenir unes solucions de qualitat. El fet d'augmentar la grandària de la població provoca que aquesta tingui un major grau de diversitat i així s'augmenta la recerca i l'exploració de l'espai de solucions potencials; però que al mateix temps significa un augment del nombre d'avaluacions de la funció objectiu que penalitza el temps de càlcul

necessari per portar a terme el procés d'optimització. Aquesta penalització es veu reduïda amb els avenços en matèria de velocitat de càlcul que s'experimenta constantment amb els processadors informàtics.

En el cas aquí tractat, una població que oscil·li entre els 20 i els 100 individus es pot considerar com la més apropiada. Cal remarcar que les dimensions de la població es mantenen forçadament constants al llarg de les diferents generacions de l'algoritme, amb un nombre d'individus sempre igual que la població inicial.

A.3.10.2. Funció d'adaptació

En un algoritmes genètics la definició d'una funció d'adaptació té un objectiu clar: permetre jutjar si un individu és adequat per la resolució del problema plantejat. Òbviament, l'adaptació dels individus ha de ser necessàriament forta per assolir bones soluciones.

En termes generals, el concepte més difícil d'assimilar i més important de la programació genètica és la funció de *fitness*, traduïda sovint de diferents maneres com capacitat, adequació. Aquesta funció quantifica el grau d'adequació de la solució avaluada respecte el problema plantejat, o el grau d'adaptació d'aquesta solució (en termes més propers a la biologia i genètica clàssica).

La determinació del grau d'adaptació possibilita un treball amb dades quantitatives i així poder elaborar una escala de valors que permeti saber en quin grau l'individu/resultat és "bo" o adequat per resoldre un problema.

En termes de selecció natural en biologia aquest grau d'adaptació té una relació directa amb a la probabilitat de l'individu de reeixir en l'entorn on viu, i que determina la capacitat de sobreviure fins l'edat de la reproducció i consumir-la.

Tornant al algoritmes genètics, cada tipus de problema a resoldre tindrà una manera ideal o més adequada de calcular el grau d'adaptació dels diferents individus. Segons el tipus de funció de d'adaptació seleccionada, l'avaluació d'un mateix individu i la mesura de la distància d'aquest respecte la resta d'individus de la població varia.

A.3.10.3. Selecció d'individus retinguts

Els processos de selecció i de creuament són lleugerament diferents del procediment general descrit anteriorment. Per determinar la probabilitat de selecció s'utilitza el terme de taxa de supervivència, que correspon al quocient entre els elements retinguts que han passat a la següent generació i el nombre inicial d'individus.

El mètode de selecció utilitzat per seleccionar el individus a conservar a la següent generació és el desenvolupat per Goldberg [3]. Aquest mètode parteix del concepte d'elitisme aplicat als algoritmes genètics, afavorint la selecció dels individus més ben adaptats en detriment de la resta. Aquest elitisme és limitat perquè només pot sobreviure una única còpia de cada individu a la següent generació. El procés de selecció consisteix en un sèrie de iteracions fins a assolir el total d'individus supervivents. En aquest mètode de selecció basat en la ruleta esbiaixada, mètode explicat a l'inici del capítol, quan un individu que ja ha estat seleccionat surt escollit de nou, es torna a posar en marxa la selecció aleatòria de la ruleta fins a seleccionar un individu que prèviament no ho hagués estat.

Un altra dels trets característics del mètode selecció aplicat és el fet de conservar la millor solució de cada generació, tot introduint-la sistemàticament a la següent generació.

Existeixen altres procediments de selecció diferents del descrit. Entre d'altres, es podria citar el mètode de selecció purament elitistes on els

individus es classifiquen segons el valor obtingut en la funció objectiu, i on només els millors individus sobreviuen i per tant són retinguts a la següent generació. Aquesta sistemàtica a priori està més adaptada a resoldre problemes amb variables contínues que no pas amb variables discretes. En aquest darrer cas s'observa com l'algoritme genètic condueix a una degeneració ràpida de la població cap a un sol tipus d'individu [3], i en conseqüència a la pèrdua total de diversitat.

La taxa de supervivència, T_{sup} , complementa la probabilitat de selecció tot determinant el que es podria anomenar barreja o recombinació genètica realitzada a cada generació. Si aquesta taxa és excessivament alta, el procés de selecció evoluciona de manera molt lenta. En aquest cas es fa necessari un gran nombre de generacions per tal d'explorar correctament l'espai de recerca, augmentant així el temps de càlcul necessari. Per altra banda, una taxa de supervivència excessivament baixa corre el risc de incidir amb massa violència sobre la població, eliminant ràpidament algunes de les estructures interessants que es trobaven presents en la població.

Els valors fixats a la taxa de supervivència acostumen a oscil·lar entre 0.4 i 0.6.

A.3.11. Procés evolutiu

Amb l'evolució dels individus és generen nous individus, els descendents de l'anterior generació, que completaran la nova generació un cop executat el procés de selecció. Aquesta evolució es realitza mitjançant dos mecanismes: el creuament i la mutació, que ja han estat descrits anteriorment en aquest capítol.

La reproducció per creuament comporta la generació de 2 descendents, o infants, a partir de 2 progenitors.

La reproducció en aquest cas està regida també per una probabilitat, definida com a taxa de reproducció.

La mutació és el mecanisme que evita que les poblacions degenerin ràpidament cap a poblacions d'individus idèntics. Al mateix temps, la mutació és la responsable de desencallar una població estancada en un mínim local. Però tampoc pot assumir un paper molt important o preponderant, perquè aquest fet conduiria a la degeneració de la població per destrucció excessivament ràpida d'estructures interessants; efecte semblant al que succeïa anteriorment amb la taxa de supervivència excessivament baixa.

A.3.12. Aturada del procés

En aquest exemple d'aplicació dels algoritmes genètics, únicament s'ha utilitzat com a motius d'aturada del procés el fet d'assolir el nombre màxim de generacions prefixat. Pels algoritmes genètics no existeixen condicions d'aturada que garanteixin totalment la convergència cap a un òptim absolut. El fet de fixar un nombre total de generacions a l'hora de realitzar els càlculs, representa una estimació de la dimensió de l'espai de recerca que es fa necessari explorar; i en conseqüència determinar el volum de càlculs. El nombre màxim de generacions, N_{gene} , ha de ser el suficient per permetre una correcta exploració de l'espai de recerca, sense ser excessivament gran per tal d'evitar penalitzar el temps de càlcul.

Si es tenen presents els valors que s'han fixat als anteriors paràmetres, que s'acaben de justificar als apartats precedents, a primera vista semblaria raonable que el nombre de generacions fos d'algunes desenes (no superar el centenar de generacions).

A continuació i a tall d'exemple s'il·lustrarà a la Figura 6 el procés de generació d'una nova població a partir d'una d'anterior.

Els valors escollits dels diferents paràmetres són:

Dimensió de la població, $N_{pop} = 10$

Taxa de supervivència $T_{sup} = 0,6$

Taxa de mutació $T_{mut} = 0.1$

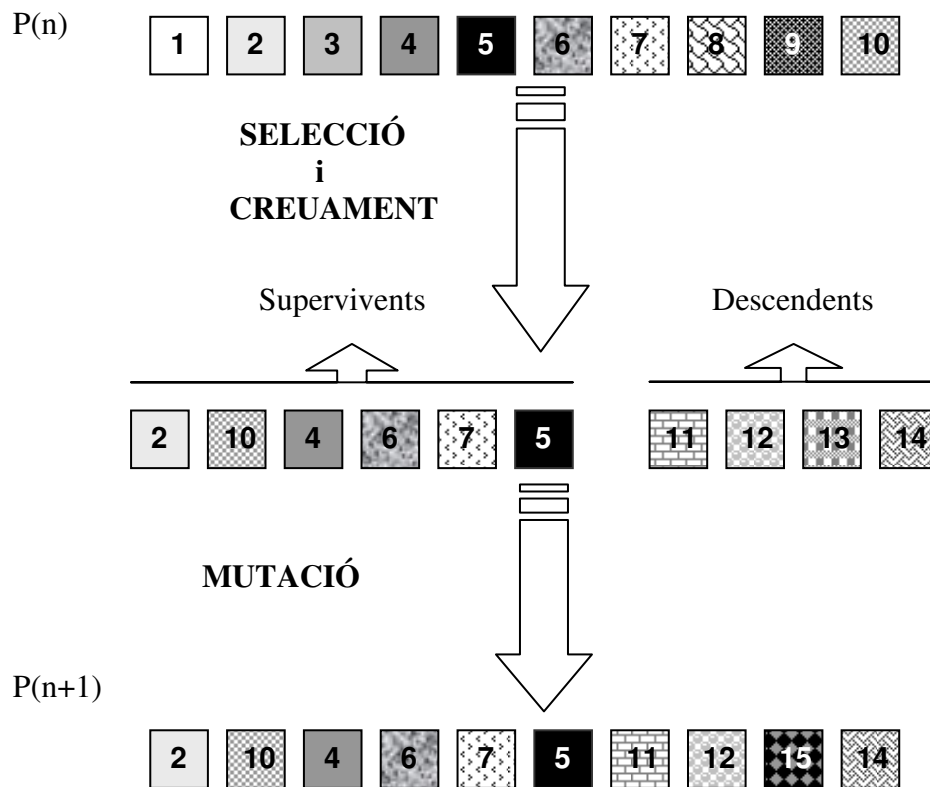


Figura 6: Procés de generació d'una nova població

A.3.13. Estructura de l'algoritme

En conclusió, després de descriure les diferents parts d'un algoritme genètic caldria sintetitzar com s'estructura el funcionament d'un algoritme genètic. De forma gràfica l'estructura del funcionament d'un algoritme genètic queda recollida a la Figura 7.

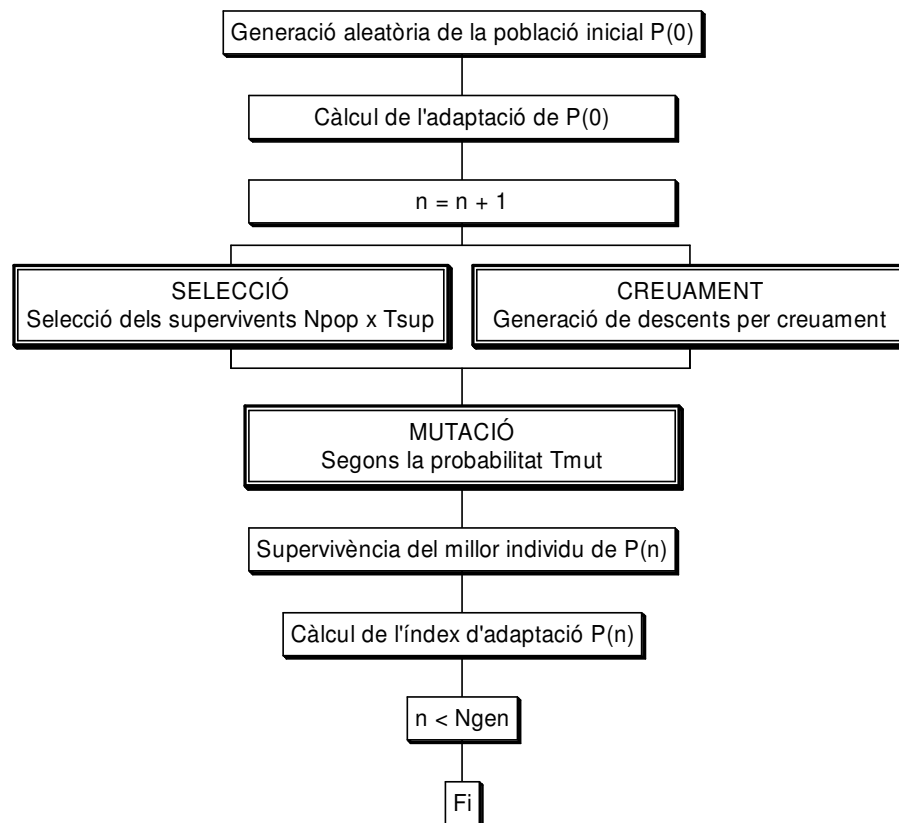


Figura 7: Estructura d'un algoritme genètic

A.3.14. Vessant informàtica dels algoritmes genètics

La visió dels algoritmes genètics per part dels professionals dedicats a camps afins a la informàtica difereix del punt de vista de la biologia o la genètica, tractat a l'anterior apartat.

La relació i els paral·lelismes entre medi natural/biologia i informàtica són habituals, i es remunten al origen d'aquesta disciplina. Així, ja en la concepció inicial dels primers ordinadors i computadors es va prendre com a model el cervell humà, la intenció era clara: reproduir i modelitzar el seu funcionament per tal d'imitar-ne característiques pròpies, com ara la capacitat d'aprenentatge o la capacitat d'evolució biològica dels individus.

Als anys 80 del segle XX les referències a les capacitats i estructures biològiques ressegueixen amb força. Alguns dels exemples més clars i rellevants serien l'aparició de xarxes neurals, els algorismes d'aprenentatge i la computació evolutiva.

Anteriorment, entre el anys 50 i 60, es realitzaren múltiples estudis sobre sistemes evolutius com a eina per optimitzar problemes d'enginyeria. Els algorismes genètics són un exemple d'aquesta computació evolutiva. La idea bàsica en la concepció dels algoritmes genètics era evolucionar a partir d'una solució inicial, cap a d'altres que siguin millors, utilitzant operadors inspirats en la selecció natural i la genètica.

Parlant en termes més propis del marketing, el món de la ciència i la recerca en diferents especialitats era un bon mercat per aplicar els algoritmes genètics. Oferia i segueix oferint moltes oportunitats d'aplicació on els algoritmes genètics ofereixen avantatges respecte la competència, la resta de tècniques i sistemes de cerca de solucions.

Els algoritmes genètics són especialment adequats en certs casos, per exemple quan:

- Els problemes requereixen una cerca en un espai de solucions molt gran.
- Els problemes necessiten ser resolts de forma adaptativa, per poder funcionar sota canvis en l'entorn.
- Els problemes requereixen solucions complexes.
- En biologia, amb la característica de l'existència de tantes seqüències genètiques possibles com solucions al problema. Així només les solucions més adequades/fortes o ben adaptades són les que sobreviuen.

Des del punt de vista de la informàtica, un algoritme genètic bàsic es caracteritza per:

- Ser un algoritme d'iteració repetitiva, on el conjunt resultant de la darrera generació s'anomena "execució".
- L'obtenció de resultats diferents en cada execució, degut a les probabilitats que hi intervenen.
- Els AG són un mètode de cerca en l'espai de solucions que només exploren una fracció de tot l'espai.
- Els GA es distingeixen d'altres algorismes de cerca per la seva combinació particular de cerca paral·lela sobre una població, amb la selecció estocàstica d'individus, creuament i mutació estocàstica.

A.3.15. Conclusions

En el camp de la integració de processos, i més concretament en l'especialitat d'optimització de processos, la tècnica basada en els algoritmes genètics ha esdevingut una eina d'utilització creixent en la recerca a nivell mundial. En funció del camp específic de recerca la seva importància relativa ha variat degut a les seves característiques. La complexitat en la concepció i adaptació d'una estructura genèrica d'algoritme genètic al problema a tractar pot haver allunyat aquesta tècnica d'un ús massiu. Però, en certs camps o allà on altres mètodes d'optimització han demostrat ser poc efectius, els algoritmes genètics han demostrat ser vàlids i adequats.

La utilització d'algoritmes genètics en estudis d'optimització presenta certs trets característics que suposen un avantatge respecte altres tècniques. Tot seguit es detallen aquests avantatges:

- La cerca de solucions òptimes mitjançant algoritmes genètics utilitza una població d'individus, enlloc de realitzar-se amb un sol individu. Aquest fet provoca un paral·lelisme implícit en el mètode que genera un conjunt de solucions diferents. Aquest tret característic provoca en termes generals un èxit superior en la recerca de solucions del problema plantejat. El conjunt de solucions pot permetre realitzar un anàlisi de sensibilitat dels resultats. Cal tenir present aquesta característica fonamental lligada als algoritmes genètics, perquè la determinació d'una zona òptima multicriteri, segons el criteri de Pareto, exigeix la presència d'un gran nombre d'individus, per garantir-ne l'eficàcia (Goldberg [3]; Dedieu [7])
- No és necessari tenir coneixements a priori de les propietats matemàtiques del problema a tractar, com ara continuïtat, derivabilitat, convexitat, etc... En particular, la recerca només requereix l'avaluació de la funció objectiu en certs punts del conjunt que formen l'espai de solucions possibles. Així mateix no és necessari el càlcul d'un gradient de

criteri sinó que el càlcul de la funció objectiu s'efectua per simulació numèrica. De fet, aquesta característica permet tractar problemes discrets; així en casos tractats a la bibliografia [7-10] s'ha demostrat que els algoritmes genètics permeten tractar problemes amb trets fortament combinatoris.

- Els algoritmes genètics utilitzen regles de transició probabilístiques i no deterministes, que poden tolerar les degradacions de la funció objectiu, que permetin a la vegada evitar els òptims locals.

Per contra, el desenvolupament teòric sobre la convergència d'aquests procediments són limitats, actualment, excepte en els casos de convergència asimptòtica, que en el cas que ens ocupa no tenen interès. Així doncs, la determinació dels paràmetres de funcionament s'efectuen sempre de manera empírica [2].

El camp d'aplicació dels algoritmes genètics és molt extens. Per citar es podria destacar:

- L'optimització global de funcions amb variables contínues, a través de la minimització de funcions matemàtiques no convexes [11]
- La resolució de problemes combinatoris com és l'exemple del viatger de comerç, el problema de concepció de seqüències de columnes de rectificació [12] o bé l'ordre d'un estudi de producció discontinu [9, 13].

Tot i aquests avantatges citats, cal remarcar que els algoritmes genètics, per la seva natura i capacitat d'adaptació a noves condicions, no garantitzen en cap cas l'obtenció de l'òptim. Així, en conseqüència, cal repetir l'execució de l'algoritme genètic diferents vegades, amb diferents inicialitzacions, per tal d'assegurar que la convergència obtinguda és correcte. Un estudi estadístic sobre els resultats obtinguts pot justificar-ne la utilització en el problema.

REFERÈNCIES

- [1] Holland J. "Adaptation in natural and artificial systems", MIT Press, Cambridge, Massachusetts (1975).
- [2] Goldberg D.E. "Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning" Ed. Addison Wesley Longman (1989).
- [3] Goldberg D.E. "Les algorithmes génétiques" Ed. Addison Wesley Longman (1994).
- [4] Davis L. "Handbook of genetic algorithms", Ed. Van Nostrand Reinhold (1991).
- [5] Alliot J.M., Scheix T. "Intelligence artificielle et informatique théorique" Ed. Cepadues (1993).
- [6] Koza, J.R. "Genetic Programming" MIT Press (1991).
- [7] Dedieu S. "Algorithme génétique multicritère: Conception et remodelage d'ateliers de chimie fine" Tesis doctoral, INPT Toulouse (2001).
- [8] Alliot J.M. "Techniques d'optimisation stochastiques appliqués aux problèmes du trafic aérien" INPT Toulouse (1996).
- [9] Baudet P. "Ordonnancement a court-terme d'un atelier discontinu de chimie : cas du fonctionnement job-shop" Tesis doctoral, INP ENSIGC Toulouse (1997).
- [10] Bernal Haro L., Azzaro C., Piboleau L., Domenech S. "Conception optimale d'un atelier de chimie fine par algorithme génétique" Symposium "le génie industriel dans un monde sans frontière", Albi, França (1997).
- [11] Perrin E., Mandrille A., Oumoun M., Fonteix C., Marc I. "Optimisation globale par stratégie d'évolution" RAIRO Recherche Opérationnelle, vol. 31(2), pp. 161-201 (1997).

- [12] Laquerbe C., Floquet P., Domenech S. Pibouleau L. "Conception de séquences de séparation par un algorithme génétique" RAIRO Recherche Opérationelle, vol. 31(4), pp. 375-398 (1997).
- [13] Charles A.S., Floquet P., Pibouleau L., Domenech S. "Genetic algorithms for optimal control of batch reactors" CHISA 98, Praga (1998).

ANNEX B	Pàgina
B. DADES I RESULTATS COMPLEMENTARIS	2
B.1. Dades per l'ajust i validació de la simulació	2
B.2. Dades complementàries de resultats.....	5

INDEX DE FIGURES	Pàgina
Figura 1: Balanç global de matèria, circuit amb un filtre secundari a F1	8
Figura 2: Balanç global de matèria, circuit amb dos filtres secundaris (F1 i F2) amb recirculació a D1	8
Figura 3: Balanç global de matèria, circuit amb dos filtres secundaris (F1 i F2) amb recirculació a S37	11

INDEX DE TAULES	Pàgina
Taula 1: Paràmetres controlats vs. gramatge	2
Taula 2: Dades suplementàries per cada gramatge (1).....	3
Taula 3: Dades suplementàries per cada gramatge (2).....	3
Taula 4: Dades utilitzades per elaborar mitjanes de valors per la validació	4
Taula 5: Balanç de matèria global del cas base	5
Taula 6: Balanç de matèria global de la millor solució aconseguida, solució 1	6
Taula 7: Balanç de matèria global del circuit amb un filtre secundari instal·lat a la Font1.....	7
Taula 8: Balanç de matèria global del circuit amb dos filtres secundaris instal·lats a les Fonts 1 i 2, i recirculat a la demanda 1.	9
Taula 9: Balanç de matèria global del circuit amb dos filtres secundaris instal·lats a les Fonts 1 i 2, i recirculat abans del llaç de depuració ciclònica.....	10

B. DADES I RESULTATS COMPLEMENTARIS

B.1. Dades per l'ajust i validació de la simulació

La Taula 1 mostra les dades dels paràmetres emmagatzemats en una fulla de càlcul i utilitzats per ajustar la simulació o bé per validar els resultats obtinguts per la simulació.

Taula 1: Paràmetres controlats vs. gramatge

Gramatge (g/m²)	110	150	175	175
Veloc. Tela	474	386	342	412
Veloc. Pope	492,4	400,5	354,6	425
Cabal	19752,2	20773,7	20889,7	26399,7
Prod. (kg/min)	167,9	186,2	192,4	231,1
C(%) caixa	0,80	0,85	0,91	0,95
C(%) k caixa	27,1	22,8	21,7	24
C(%) Aig. B	0,17	0,09	0,11	0,1
C(%) k Aig. B	50,8	36,1	36,1	55
Retenció total	79,9	87,3	89,5	90
Retenció k	61,4	79,3	81,8	84

Gramatge (g/m²)	175	175	275
Veloc. Tela	431	431	200
Veloc. Pope	445	425	206,5
Cabal	24527,6	-	20338,7
Prod. (kg/min)	241,4	230,6	176,0
C(%) caixa	1,00	1,05	1,04
C(%) k caixa	-	-	19,1
C(%) Aig. B	0,05	0,14	0,07
C(%) k Aig. B	-	-	28
Retenció total	90,1	86,6	93
Retenció k	73,7	65,9	90,8

La Taula 2 mostra dades suplementàries de velocitats, cabals a màquina i producció utilitzades per calcular les mitjanes dels paràmetres utilitzats per ajustar la simulació o bé per validar els resultats obtinguts per la simulació.

Taula 2: Dades suplementàries per cada gramatge (1)

Gramatge (g/m²)	110	135	135	135	150
Veloc. Tela	458	402	421,4	422	422
Veloc. Pope	479	420,7	438	437	439
Cabal	18863	20197	20529	20464	20142
Prod. (kg/min)	163,3	176,1	183,3	182,9	204,1

Gramatge (g/m²)	150	150	195	225
Veloc. Tela	388	397	318	253
Veloc. Pope	404	414	330	262
Cabal	20577	20977	21106	20294
Prod. (kg/min)	187,9	192,5	199,485	182,7

La Taula 3 mostra dades suplementàries de concentracions i retenció utilitzades per calcular les mitjanes dels paràmetres utilitzats per ajustar la simulació o bé per validar els resultats obtinguts per la simulació.

Taula 3: Dades suplementàries per cada gramatge (2)

Gramatge (g/m²)	110	110	110	135	135	135
C(%) caixa	0,73	0,8	0,78	0,82	0,85	0,89
C(%) k caixa	31,1	30,2	31,3	28,8	28,5	28,8
C(%) Aig. B	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17	0,18
C(%) k Aig. B	52,3	52,2	53,8	52	54,3	55,3
Retenció total	75,5	75,5	77,1	79,8	80,5	79,7
Retenció k	58	58	59,7	62,6	62,2	58

Gramatge (g/m²)	135	150	150	150	175	175
C(%) caixa	0,82	0,85	0,86	0,76	0,93	0,92
C(%) k caixa	28,5	27,3	28	28	21,7	21,8
C(%) Aig. B	0,16	0,16	0,17	0,14	0,11	0,09
C(%) k Aig. B	53,6	52,4	51,6	48,9	36,1	36,1
Retenció total	81	81,8	81,3	81,8	89,5	89,6
Retenció k	63	64,1	64,6	67,4	81,8	81,9

La Taula 2 mostra dades utilitzades per elaborar les mitjanes de valors reals observats a fàbrica per un mateix gramatge. Aquesta mitjana s'utilitza per comparar amb els resultats simulats i validar la simulació.

Taula 4: Dades utilitzades per elaborar mitjanes de valors per la validació

Gramatge (g/m²)	Caixa entrada (C%)	Aigües Blanques (C%)	Càrreg. a Aig. Blanq. (%)	Retenció Total (%)	Retenció càrreg. (%)
175	0,91	0,11	36,1	89,5	81,8
175	0,95	0,1	55	90	84
175	1,00	0,05	-	90,1	73,7
175	1,05	0,14	-	86,6	65,9
175	0,93	0,11	36,1	89,5	81,8
175	0,92	0,09	40,1	89,6	81,9
175	0,88	0,1	34,8	89,8	83,1

B.2. Dades complementàries de resultats

Dades complementàries corresponents al resultats exposats a la secció VIII.E. Nou plantejament en l'optimització.

Taula 5: Balanç de matèria global del cas base

Cas base				
	Aigua (kg/min)	Fibra (kg/min)	Càrreg. (kg/min)	C (%)
Pasta	10128,77	184,16	33,11	2,10
	449,11	13,83	0,06	3,00
Dilució	4577,74	7,34	2,75	0,22
In DC	29430,03	242,06	74,45	1,06
D1	2248,42	3,65	1,31	0,22
D2	1475,70	2,40	0,86	0,22
D3	1246,55	2,02	0,72	0,22
D4	1288,83	0,12	0,00	0,01
D5	718,87	0,04	0,03	0,01
D6	242,93	0,01	0,01	0,01
D7	1446,43	0,09	0,06	0,01
D8	29,75	0,00	0,00	0,01
Out	22165,15	196,94	34,16	1,03
Recirc Pasta	1665,01	14,81	2,57	1,03
Rebuig DP	3,34	0,70	0,12	19,71
Rebuig DC	19,61	1,22	2,06	14,34

**Taula 6: Balanç de matèria global de la millor solució
aconseguida, solució 1**

Solució1				
	Aigua (kg/min)	Fibra (kg/min)	Càrreg (kg/min)	C (%)
Pasta	10231,7	186,03	33,44	2,10
	400,0	9,20	0,06	2,26
Dilució	7766,7	12,45	4,67	0,22
In DC	29509,8	240,95	76,41	1,06
D1	307,6	0,50	0,18	0,22
D2	1530,0	2,48	0,89	0,22
D3	1225,7	1,99	0,71	0,22
D4	0,1	0,00	0,00	0,01
D5	706,5	0,04	0,03	0,01
D6	242,9	0,01	0,01	0,01
D7	1476,9	0,09	0,06	0,01
D8	30,0	0,00	0,00	0,01
Out	22225,86	196,04	35,06	1,03
Recirc Pasta	1669,57	14,74	2,64	1,03
Rebuig DP	3,46	0,69	0,12	19,66
Rebuig DC	19,34	1,33	2,23	15,55

Taula 7: Balanç de matèria global del circuit amb un filtre secundari instal·lat a la Font1

1Filtre F1				
	Aigua (kg/min)	Fibra (kg/min)	Càrreg (kg/min)	C (%)
Pasta	10323,0	187,69	33,74	2,10
	400,0	11,66	0,06	2,85
Dilució	7666,9	12,29	4,61	0,22
In DC	29501,0	241,07	76,18	1,06
D1	325,0	0,53	0,19	0,22
D2	1000,0	1,62	0,58	0,22
D3	953,7	1,55	0,55	0,22
D4	782,6	0,07	0,00	0,01
D5	709,8	0,04	0,03	0,01
D6	242,9	0,01	0,01	0,01
D7	1547,3	0,09	0,09	0,01
D8	0,0	0,00	0,00	0,01
Out	22219,2	196,14	34,97	1,03
Recirc Pasta	1669,0	14,75	2,63	1,03
Rebuig DP	3,34	0,70	0,13	19,67
Rebuig DC	19,48	1,22	2,09	14,50
Rebuig Filt1	40,47	2,77	0,04	6,49

A continuació la Figura 1 mostra de forma gràfica i reduïda el balanç de matèria d'aquesta variant de l'optimització.

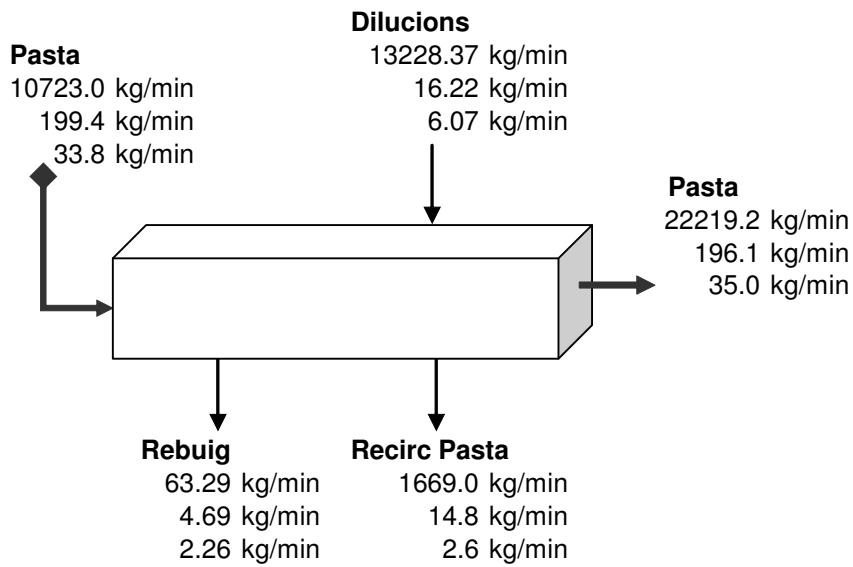


Figura 1: Balanç global de matèria, circuit amb un filtre secundari a F1

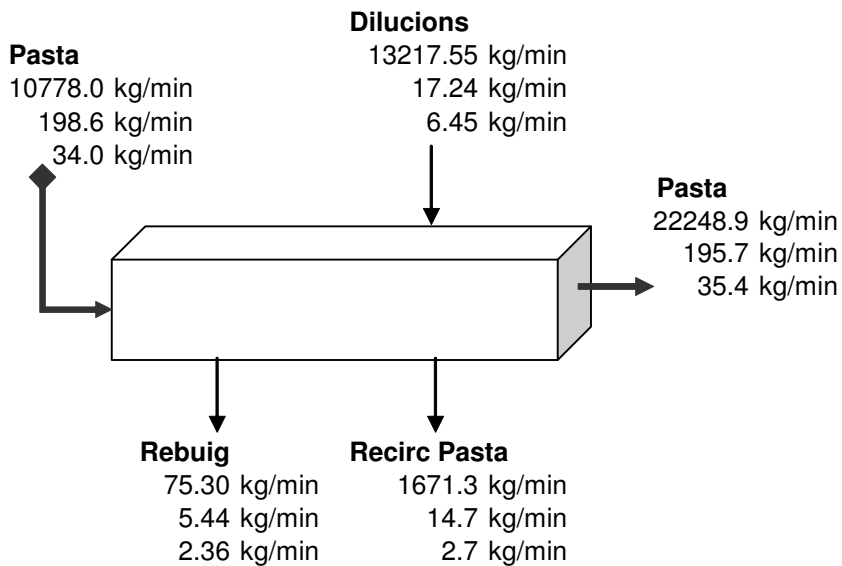


Figura 2: Balanç global de matèria, circuit amb dos filtres secundaris (F1 i F2) amb recirculació a D1

La Figura 2 mostra de forma gràfica i reduïda el balanç de matèria de la variant d'optimització que utilitza dos filtres secundaris i es recircula a la demanda número 1. El balanç complet es recull a la següent taula.

Taula 8: Balanç de matèria global del circuit amb dos filtres secundaris instal·lats a les Fonts 1 i 2, i recirculat a la demanda 1.

2Filt Recirc. a D1				
	Aigua (kg/min)	Fibra (kg/min)	Càrreg. (kg/min)	C (%)
Pasta	10378,0	188,69	33,92	2,10
	400,0	9,92	0,06	2,43
Dilució	7972,5	12,78	4,79	0,22
In DC	29540,1	240,53	77,16	1,06
D1	31,9	0,05	0,02	0,22
D2	1400,0	2,27	0,81	0,22
D3	1219,0	1,98	0,71	0,22
D4	0,3	0,00	0,00	0,01
D5	766,7	0,05	0,03	0,01
D6	242,9	0,01	0,01	0,01
D7	1584,2	0,10	0,06	0,06
D8	0,0	0,00	0,00	0,01
Out	22248,89	195,69	35,41	1,03
Recirc Pasta	1671,30	14,72	2,66	1,03
Rebuig DP	3,35	0,69	0,13	19,65
Rebuig DC	19,60	1,11	2,17	14,35
Rebuig Filt1	41,58	2,53	0,04	5,81
Rebuig Filt2	10,77	1,11	0,02	9,49

La Figura 3 mostra de forma gràfica i reduïda el balanç de matèria de la variant d'optimització que utilitza dos filtres secundaris i es recircula abans de l'ajust de consistència previ a la depuració ciclònica, a l'equip S-37. El balanç complet es recull a la següent Taula 9.

Taula 9: Balanç de matèria global del circuit amb dos filtres secundaris instal·lats a les Fonts 1 i 2, i recirculat abans del llaç de depuració ciclònica.

2 Filt. Recirc. A S37				
	Aigua (kg/min)	Fibra (kg/min)	Carrg (kg/min)	C (%)
Pasta	10364,2	188,44	33,87	2,10
	400,0	11,06	0,06	2,71
Dilució	6382,5	10,23	3,84	0,22
In DC	29491,7	241,20	75,97	1,06
D1	550,9	0,89	0,32	0,22
D2	1530,0	2,48	0,89	0,22
D3	1258,6	2,04	0,73	0,22
D4	745,2	0,07	0,00	0,01
D5	815,3	0,05	0,03	0,01
D6	242,9	0,01	0,01	0,01
D7	1665,4	0,10	0,07	0,01
D8	0,0	0,00	0,00	0,01
Out	22212,04	196,24	34,86	1,03
Recirc Pasta	1668,53	14,76	2,62	1,03
Reb DP	3,34	0,70	0,12	19,67
Reb DC	19,76	0,87	2,17	13,32
Reb Filt1	40,66	1,97	0,04	4,70
Reb Filt2	10,74	0,87	0,02	7,60

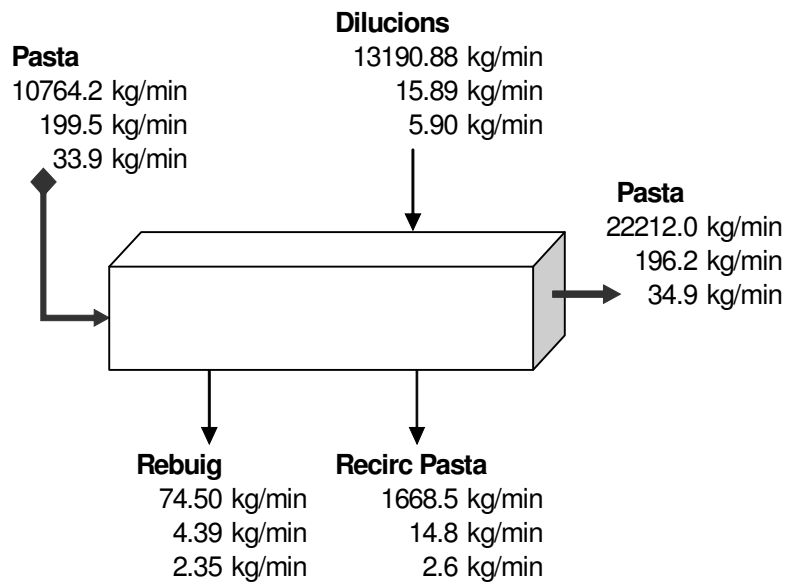


Figura 3: Balanç global de matèria, circuit amb dos filtres secundaris (F1 i F2) amb recirculació a S37