



L'eficiència energètica al sector industrial



Generalitat de Catalunya
**Departament de Territori
i Sostenibilitat**

L'eficiència energètica al sector industrial



Generalitat de Catalunya
**Departament de Territori
i Sostenibilitat**

L'eficiència energètica al sector industrial

© Generalitat de Catalunya

Departament de Territori i Sostenibilitat

Col·lecció: Documents de referència sobre les millors tècniques
disponibles aplicables a la indústria.

Primera edició

DL: B-26.247-2014

Direcció:

M^a José Sarrias Galcerán¹

Josep Maria Piguillem Delgado²

Coordinació:

Albert Avellaneda Bargués¹

Romà E. Suñé Lago²

Redacció:

Mariona Gibert Casamada¹

Sergi Martínez Lizarte²

Núria Font Mas²

Joan Rovira Piñol²

Juan Manuel Castro García²

Mariona Coll Raich³

¹ Direcció General de Qualitat Ambiental. Departament de Territori i Sostenibilitat

² EFIENER ENGINYERIA, SLP

³ ICAEN. Departament d'Empresa i Ocupació

TAULA DE CONTINGUTS

1. Introducció i indicadors d'eficiència energètica	15
1.1. Introducció	15
1.1.1. L'energia en el sector industrial de la UE	15
1.1.2. Els impactes mediambientals de l'ús de l'energia	15
1.1.3. La contribució de l'eficiència energètica en la reducció de l'escalfament global	17
1.1.4. L'eficiència energètica en el marc de la Directiva d'emissions industrials (DEI)	17
1.1.5. La Directiva d'eficiència energètica EE 2012/27	18
1.1.6. L'ús eficient i ineficient de l'energia	19
1.2. Definicions dels Indicadors d'eficiència energètica	19
1.2.1. Exemples d'indicadors d'eficiència energètica a la indústria	21
1.2.2. Aspectes a tenir en compte per definir els indicadors d'eficiència energètica	24
2. Millors tècniques disponibles per a l'assoliment de l'eficiència energètica a la indústria	29
2.1. Introducció	29
2.2. Aplicació de les millors tècniques disponibles per millorar l'eficiència energètica a nivell de gestió d'instal·lacions industrials	31
2.2.1. Sistemes de gestió de l'eficiència energètica (SGE)	32
2.2.2. Disseny energètic eficient (DEE) d'una nova instal·lació	34
2.2.3. Millora de la integració de processos	38
2.2.4. Control eficient de processos	39
2.2.5. Manteniment preventiu per assolir el funcionament òptim	40
2.2.6. Seguiment i anàlisi de mesures	40
2.2.7. Auditories energètiques	41
2.2.8. Mètodes d'anàlisi	41
2.3. Aplicació de les millors tècniques disponibles per millorar l'eficiència energètica pel que fa als sistemes consumidors d'energia, processos, activitats i equipaments	43
2.3.1. Processos de Combustió	44
2.3.1.1. Recuperació de calor dels gasos d'escapament (reducció de la temperatura dels gasos que surten de la cambra de combustió)	44
2.3.1.2. Cremadors recuperatius i regeneratius	48
2.3.1.3. Reducció de l'excés d'aire	51
2.3.1.4. Elecció del combustible adequat	51
2.3.1.5. Regulació i control dels cremadors	53
2.3.2. Processos i sistemes de Vapor	53
2.3.2.1. Preescalfament de l'aigua d'alimentació	54
2.3.2.2. Reutilització del vapor flash	57
2.3.2.3. Minimització de les purgues de la caldera	60
2.3.2.4. Recuperació de l'energia de les purgues de la caldera	62
2.3.2.5. Minimitzar les pèrdues degudes als cicles curts de calderes	63
2.3.2.6. Recollida i retorn del condensat a la caldera per a la seva recuperació	64
2.3.2.7. Tècniques d'operació i control	65
2.3.3. Processos de Recuperació de calor	65

2.3.3.1.	Recuperació directa de la calor residual	66
2.3.3.2.	Recuperació de calor mitjançant bombes de calor	68
2.3.4.	Sistemes de Cogeneració	71
2.3.4.1.	Els diferents tipus de cogeneració	73
2.3.4.2.	Aplicabilitat	78
2.3.4.3.	Trigeneració	79
2.3.5.	Subministrament d'Energia elèctrica	80
2.3.5.1.	Compensació d'energia reactiva	81
2.3.5.2.	Harmònics	85
2.3.5.3.	Gestió eficient d'energia en transformadors	88
2.3.6.	Sistemes accionats per Motors elèctrics	90
2.3.6.1.	Motors d'alta eficiència	94
2.3.6.2.	Rebobinar o reemplaçar	97
2.3.6.3.	Variadors de freqüència	98
2.3.6.4.	Correcte dimensionat del motor	100
2.3.7.	Instal·lacions d'Aire comprimit	102
2.3.7.1.	Disseny del sistema	105
2.3.7.2.	Sistema de control d'aire comprimit	105
2.3.7.3.	Variadors de freqüència	107
2.3.7.4.	Recuperació de la calor	108
2.3.7.5.	Reducció de les pèrdues d'aire comprimit	108
2.3.7.6.	Reducció de les pèrdues de pressió	111
2.3.7.7.	Altres tècniques per augmentar l'eficiència energètica	112
2.3.8.	Sistemes de Bombeig	112
2.3.8.1.	Inventari i avaluació d'un sistema de bombeig	113
2.3.8.2.	Elecció de la bomba	114
2.3.8.3.	Sistemes amb múltiples bombes	118
2.3.8.4.	Configuració del sistema de canonades	120
2.3.8.5.	Manteniment	121
2.3.8.6.	Control del cabal	122
2.3.8.7.	Selecció del motor	123
2.3.9.	Sistemes de climatització i ventilació (HVAC)	123
2.3.9.1.	Sistemes de climatització	123
2.3.9.1.1.	Sistemes de refredament gratuït: <i>free-cooling</i>	125
2.3.9.1.2.	Sistemes de calefacció per infrarojos (calefacció IR)	126
2.3.9.2.	Sistemes de ventilació	126
2.3.9.2.1.	Elecció del ventilador	128
2.3.9.2.2.	Disseny de la xarxa de distribució	128
2.3.9.2.3.	Elecció del motor	128
2.3.9.2.4.	Velocitat del ventilador	128
2.3.9.2.5.	Recuperadors de calor	129
2.3.9.2.6.	Instal·lació de filtres	129
2.3.9.2.7.	Diagnosi energètica	129
2.3.9.2.8.	Manteniment preventiu	129
2.3.9.2.9.	Accions sobre l'operació	129
2.3.10.	Sistemes de Refrigeració industrial	130
2.3.10.1.	Consum d'energia dels sistemes de refrigeració industrials	131
2.3.10.2.	Reducció del consum energètic als sistemes de refrigeració per aigua i aire	134
2.3.11.	Sistemes d'Enllumenat	137

2.3.12.	Processos d'assecatge, separació i concentració	142
2.3.12.1.	Selecció de la tecnologia òptima o combinació de tecnologies	143
2.3.12.2.	Processos mecànics	145
2.3.12.3.	Processos tèrmics	145
2.3.12.3.1.	Requisits energètics i d'eficiència	145
2.3.12.3.2.	Escalfament directe	146
2.3.12.3.3.	Escalfament indirecte	146
2.3.12.3.4.	Vapor reescalfat	147
2.3.12.3.5.	Energies radiants	148
2.3.12.4.	Recuperació de calor en processos d'assecatge, concentració i separació	149
2.3.12.5.	Optimització de l'aïllament del sistema d'assecatge	151
2.3.12.6.	Control de processos assistit per ordinador/procés d'automatització en processos tèrmics d'assecatge	151
3.	Exemples d'implementació	153
3.1.	Sistemes de gestió de l'eficiència energètica (SGE)	153
3.1.1.	Actuació. Implementació d'un sistema de gestió energètica (MTD 1)	153
3.2.	MTD per a processos de combustió	154
3.2.1.	Actuació. Implementació de sistemes avançats de gestió i control d'un procés (MTD 4)	154
3.2.2.	Actuació. Substitució d'un cremador recuperatiu (MTD 9) ...	155
3.2.3.	Actuació. Substitució d'un cremador amb control electrònic (MTD 9)	156
3.3.	MTD per a sistemes de vapor (MTD 10)	158
3.3.1.	Actuació. Instal·lació d'un economitzador	158
3.3.2.	Actuació. Estalvis de costos potencials d'una recuperació de condensat	158
3.4.	MTD per a processos de recuperació de calor (MTD 11)	159
3.4.1.	Actuació. Instal·lació de termocompressors (recompressió mecànica de vapor)	159
3.5.	MTD per a sistemes de cogeneració (MTD 12)	160
3.5.1.	Actuació. Instal·lació d'una màquina d'absorció (trigeneració)	160
3.6.	MTD en subministrament d'energia elèctrica (MTD 13)	161
3.6.1.	Actuació. Compensació de potència reactiva	161
3.7.	MTD per a sistemes accionats per motors elèctrics (MTD 14)	163
3.7.1.	Actuació. Substitució dels accionaments elèctrics d'una línia de producció	163
3.7.2.	Actuació. Instal·lació d'un sistema servomotor	164
3.8.	MTD per a instal·lacions d'aire comprimit (MTD 15)	165
3.8.1.	Actuació. Instal·lació d'un compressor d'aire variable	165
3.8.2.	Actuació. Instal·lació d'un Intercanviador de calor oli-aigua	166
3.9.	MTD per a sistemes de climatització i ventilació (HVAC)	167
3.9.1.	Actuació. Instal·lació de proteccions solars (MTD 17)	167
3.9.2.	Actuació. Sectorització zones de climatització (MTD 17)	168
3.9.3.	Actuació. Instal·lació d'un sistema de recuperació de calor de l'aire de ventilació (MTD 18)	169
3.10.	MTD per a sistemes de refrigeració industrial (MTD 19)	170
3.10.1.	Actuació. Instal·lació d'un intercanviador aire-aigua	170
3.10.2.	Actuació. Instal·lació d'un variador de freqüència	171

3.11. MTD per a processos d'assecatge (MTD 21)	172
3.11.1. Actuació. Millora dels assecadors	172
Annex de referències	175
Glossari d'acrònims	177

ÍNDEX DE LES MILLORS TÈCNIQUES DISPONIBLES

Per no generar confusió, cal destacar que la numeració de les MTD emprada en aquest document no coincideix amb la del document BREF de referència, ja que en aquest document s'ha generat una numeració adaptada al contingut propi del document per tal de poder referenciar els exemples inclosos a una MTD concreta.

MTD 1.	Implementar un sistema de gestió de l'eficiència energètica o ambiental	33
MTD 2.	Optimitzar l'eficiència energètica en el moment de planificar una nova instal·lació, unitat o sistema, o una gran actualització d'una instal·lació existent	37
MTD 3.	Optimitzar l'aprofitament de l'energia entre més d'un procés o sistema, tant a l'interior de la pròpia planta com amb plantes industrials properes	38
MTD 4.	Implementar tècniques de control eficient de processos	39
MTD 5.	Posar en pràctica programes de manteniment preventiu per optimitzar l'eficiència energètica	40
MTD 6.	Establir procediments per monitoritzar i mesurar de manera regular els paràmetres importants de l'operació que tenen un impacte significatiu en l'eficiència energètica de la planta	40
MTD 7.	Identificar els aspectes que més influència tenen sobre l'eficiència energètica mitjançant la realització d'una auditoria energètica	41
MTD 8.	La utilització d'eines i metodologies apropiades per identificar i quantificar l'optimització energètica	41
MTD 9.	Optimitzar l'eficiència energètica d'un procés industrial de combustió	44
MTD 10.	Optimitzar l'eficiència energètica en sistemes de vapor	54
MTD 11.	Recuperar el calor de procés	66
MTD 12.	Cercar oportunitats d'implantació de sistemes de cogeneració a les instal·lacions industrials, i/o al seu voltant	71
MTD 13.	Optimitzar l'eficiència energètica en l'àmbit del subministrament d'energia elèctrica	81
MTD 14.	Optimitzar globalment el sistema al qual està integrat el subsistema del motor, per posteriorment considerar la secció a la qual pertany el motor	94
MTD 15.	Optimitzar l'eficiència energètica en sistemes d'aire comprimit	104
MTD 16.	Optimitzar l'eficiència energètica en sistemes de bombeig	112
MTD 17.	Optimitzar l'eficiència energètica en l'àmbit de la calefacció/ refrigeració de l'aire industrial	124
MTD 18.	Optimitzar l'eficiència energètica en l'àmbit de la ventilació	127
MTD 19.	Optimitzar l'eficiència energètica en l'àmbit dels sistemes de refrigeració	134
MTD 20.	Minimitzar el consum d'energia dels sistemes d'enllumenat artificial en qualsevol tipologia d'edifici	140
MTD 21.	Optimitzar de l'eficiència energètica dels sistemes d'assecatge, concentració i separació	143

ÍNDEX DE FIGURES

Figura 1. Entrades i sortides d'energia i massa per a una unitat de producció simple [10]	21
Figura 2. Entrades i sortides d'energia i massa per a una unitat de producció complexa [10]	23
Figura 3. Sistema 1. Substitució d'un motor elèctric vell per un motor elèctric nou [10]	24
Figura 4. Sistema 2. Substitució de la bomba hidràulica [10]	25
Figura 5. Sistema 3. Consum del sistema mantenint la potència hidràulica constant [10]	25
Figura 6. Sistema 4. Addició al sistema d'un bescanviador de calor per refrigeració de procés [10]	26
Figura 7. Sistema 5. Adició al sistema d'un bescanviador de calor per refrigeració de procés i recuperació d'una part d'aquesta calor [10]	26
Figura 8. Millora continua d'un sistema de gestió de la eficiència energètica [10]	33
Figura 9. Exemple dels costos totals d'equips industrials típics (més de 10 anys de vida útil) [10]	35
Figura 10. L'organització recomana incloure un expert en energies en la planificació i el disseny de noves instal·lacions [10]	38
Figura 11. Exemple de diagrama de Sankey d'una central de cicle combinat [11]	41
Figura 12. Esquema d'un sistema amb pre-escalfador d'aire de combustió [10]	46
Figura 13. Cremador autorecuperatiu en configuració de flama indirecta (tub radiant tipus SER) [12]	48
Figura 14. Cremador autorecuperatiu en configuració de flama directa [12]	48
Figura 15. Principi de funcionament dels cremadors regeneratius [10]	49
Figura 16. Les diferents regions de la combustió [10]	49
Figura 17. Exemple de retorn per cremador auto-recuperatiu ECOMAX 5M de 250 kW a forn de tractament tèrmic d'acer inoxidable [12]	50
Figura 18. Subministrament d'aigua calenta [10]	55
Figura 19. Sistema modern de control per optimitzar l'ús d'una caldera [10]	65
Figura 20. Evolució del consum d'energia a les instal·lacions de cogeneració en funció del combustible emprat [1]	71
Figura 21. Evolució de la potència instal·lada a Catalunya en règim especial, 2011 [1]	71
Figura 22. Contribució de l'energia provinent de sistemes de cogeneració quant als consums elèctrics i tèrmics de la indústria [1]	72
Figura 23. Evolució del REE de les instal·lacions de cogeneració, 1994-2010 [1]	73
Figura 24. Central de cicle combinat	74
Figura 25. Turbina de vapor de contrapressió [10]	75
Figura 26. Turbina de vapor de condensació amb extracció [10]	75
Figura 27. Turbina de gas amb caldera de recuperació de calor [10]	76

Figura 28. Motor alternatiu de combustió interna [10]	77
Figura 29. Comparativa entre l'eficiència d'una planta de cogeneració contra una planta de producció elèctrica i caldera individual [10]	78
Figura 30. La trigeneració possibilita el funcionament de la planta durant tot l'any [10]	80
Figura 31. Diagrama vectorial de potència	81
Figura 32. Factor de potència, $\cos \phi$, per a les diferents fases	84
Figura 33. Potència activa i potència aparent trifàsiques	84
Figura 34. Mesures experimentals del factor de potència ($\cos \phi$) realitzades per a les diferents fases	85
Figura 35. Harmònics (corrent)	87
Figura 36. Harmònics (tensió)	87
Figura 37. Taxa de distorsió harmònica: intensitat (a dalt) i tensió (a sota) ..	88
Figura 38. Relació entre les pèrdues en el ferro i el coure en l'eficiència i en el factor de càrrega	89
Figura 39. Costos durant el cicle de vida d'un motor elèctric amb el seu corresponent controlador (<i>Font: elaboració pròpia</i>)	91
Figura 40. Bandes d'eficiència per a un motor de 4 pols, segons la classificació IEC [18]	95
Figura 41. Comparació de les classes d'eficiència de motors [18]	96
Figura 42. Rebobinar vs. substituir [18]	98
Figura 43. Eficiència típica per a diferents càrregues i potències [19]	100
Figura 44. Components d'un sistema d'aire comprimit [10]	103
Figura 45. Característiques d'una bomba centrífuga [20]	114
Figura 46. Efecte sobre l'eficiència de l'estrangulament d'una bomba [20]	115
Figura 47. Característiques d'una bomba segons diferents diàmetres de l'element impulsor [20]	115
Figura 48. Efecte de la reducció de velocitat a les característiques de la bomba [20]	116
Figura 49. Corbes per a la selecció de les bombes de servei [20]	117
Figura 50. Operació amb múltiples bombes [21]	118
Figura 51. Costos derivats de pèrdues per fregament al bombar aigua (basat en càlculs per 305 m de canonada de ferro i d'acer per bombar aigua a 21 °C. Cost de l'electricitat 0,05 \$/kWh i 8.760 hores de funcionament anuals. Eficiència combinada de la bomba i motor - 70 %) [22]	120
Figura 52. Tendències mitjanes al desgast de bombes amb manteniment i sense [20]	121
Figura 53. Efecte del desgast a les característiques de la bomba [20]	122
Figura 54. Esquema d'implementació d'un refredament gratuït indirecte	125
Figura 55. Esquema d'implementació d'un refredament gratuït directe	126
Figura 56. Diagrama de flux per optimitzar el consum energètic en un sistema de ventilació [10]	127
Figura 57. Diferents models de làmpades de descàrrega	128
Figura 58. Làmpades LED dissenyades per la substitució d'halògenes (GU5,3, GU10)	139

Figura 59. Comparativa gràfica d'eficiència de les diferents tecnologies emprades en enllumenat [elaboració pròpia segons les dades de fabricants i diferents tecnologies]	139
Figura 60. Impacte del manteniment en sistemes d'enllumenat	141
Figura 61. Consum d'energia d'alguns processos de separació [10]	145
Figura 62. Consum específic de diferents tipus d'assegador [10]	146
Figura 63. Forn d'escalfament de lingots de coure i llautó [12]	156
Figura 64. Diagrama esquemàtic d'instal·lació del sistema intercanviador [1]	166

ÍNDEX DE TAULES

Taula 1.	Consum d'energia final del sector industrial a Catalunya dels anys 2003-2009 [1]	15
Taula 2.	Emissions de contaminants a l'atmosfera	16
Taula 3.	Activitats del procés de disseny eficient [10]	35
Taula 4.	Estalvis aconseguits per un DEE a diferents tipus d'indústria [10]	36
Taula 5.	Potencial d'estalvi de preescalfament de l'aire de combustió [10]	47
Taula 6.	Emissions i altres paràmetres relacionats amb diferents combustibles [4]	52
Taula 7.	Valors basats en gas natural com a combustible, l'excés d'aire del 15 % i temperatura final la xemeneia de 120 °C. Adaptat de [16]	56
Taula 8.	Percentatge de l'energia total en el condensat a diferents pressions i vapor flash [17]	58
Taula 9.	Energia recuperada en un condensador d'aireig per diferents velocitats de vapor i diàmetres de canonada [10]	59
Taula 10.	Contingut d'energia d'una purga [17]	61
Taula 11.	L'energia recuperada de les purgues per 10 tm/h de vapor [17]	62
Taula 12.	Llista de tecnologies de cogeneració i les relacions electricitat/calor [10]	74
Taula 13.	Taula de reducció de potència en funció del cos ϕ inicial i final	83
Taula 14.	Valors límit de distorsió harmònica total i individual recomanats	86
Taula 15.	Valors límits de distorsió de corrent	86
Taula 16.	Distorsió d'harmònics de tensió límit (EN 50160-EN 61000)	87
Taula 17.	Millores d'eficiència energètica en sistemes d'aire comprimit i aplicabilitat [10]	104
Taula 18.	Consum energètic d'alguns sistemes de refrigeració industrials per aigua i aire [10]	134
Taula 19.	Contribució del consum de l'enllumenat sobre el consum total d'edificis	137
Taula 20.	Característiques i eficàcia lluminosa dels diferents tipus de làmpades [23]	139
Taula 21.	Resum de l'impacte de la mesura d'eficiència energètica en ús d'oficina	141
Taula 22.	Resum de l'impacte de la mesura d'eficiència energètica en ús d'hostaleria	142
Taula 23.	Tipus d'evaporadors i consums específics	150



1. INTRODUCCIÓ I INDICADORS D'EFICIÈNCIA ENERGÈTICA

1.1. INTRODUCCIÓ

1.1.1. L'energia en el sector industrial de la UE

El sector industrial al conjunt de la Unió Europea, durant l'any 2011, va consumir un total d'energia final de 287 milions de tones equivalents de petroli (tep)¹, volum que representa aproximadament el 26 % de l'energia anual total consumida per tots els països de la UE.

Pel que fa a Catalunya, el consum d'energia final durant els anys 2003-2009 és el que figura en la taula següent. L'any 2008 va ser de 4,5 milions de tones equivalents de petroli, per un total de 26,7 tep a tot l'Estat:

Taula 1. Consum d'energia final del sector industrial a Catalunya dels anys 2003-2009 [1]

Subsector industrial	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Extractives no energètiques	71,5	77,4	73,7	74,0	72,5	65,7	52,5
Siderúrgia i foneria fèrrica	198,8	197,9	257,2	270,0	279,2	261,3	247,8
Metal·lúrgia no fèrrica	57,0	59,3	57,4	58,1	58,7	57,7	48,9
Transformats metàl·lics	411,7	420,2	419,3	412,5	399,7	381,2	316,9
Ciment artificial	737,1	752,1	766,2	750,2	728,1	625,5	484,0
Vidre	183,1	179,1	178,6	176,3	169,1	157,9	133,3
Altres productes minerals no metàl·lics	362,3	370,1	377,7	379,5	365,4	296,0	208,2
Químic	1.223,4	1.204,7	1.203,2	1.176,9	1.203,4	1.123,7	1.016,8
Alimentació, begudes i tabac	592,4	612,3	634,7	643,2	648,4	654,3	626,2
Tèxtil i confecció	392,3	350,3	312,3	272,9	251,5	203,9	162,8
Cuir i calçat	26,8	25,1	20,3	17,6	14,8	13,4	11,0
Fusta, suro i mobles de fusta	44,2	45,4	44,5	45,2	44,4	40,4	32,2
Pasta de paper, paper i cartró	381,2	375,6	373,1	383,2	406,1	382,3	342,0
Arts gràfiques	52,8	51,4	54,5	56,1	51,8	51,3	42,0
Transformats del cautxú	41,0	40,5	39,0	37,7	36,4	30,5	20,0
Transformats plàstics	157,8	161,0	160,8	163,8	163,9	149,3	125,1
Indústria diversa	12,1	11,6	12,1	11,7	11,6	10,9	9,1
TOTAL CATALUNYA	4.945,5	4.934,0	4.984,6	4.928,9	4.905,0	4.505,3	3.878,8

1.1.2. Els impactes mediambientals de l'ús de l'energia

L'efecte hivernacle és un fenomen en què determinats gasos (vapor d'aigua, diòxid de carboni, metà, ozó, diòxid de nitrogen), que són components de l'atmosfera terrestre, retenen part de l'energia que la superfície planetària emet a causa de l'escalfament de la radiació solar. La radiació solar, d'alta freqüència i, per tant, d'alta energia, entra a l'atmosfera terrestre i escalfa la superfície planetària. Com a conseqüència d'aquest escalfament, la superfície de la Terra

¹ Segons dades d'EUROSTAT.

emet calor per radiació de baixa freqüència i no aconsegueix travessar de nou l'atmosfera terrestre i, en conseqüència, queda atrapada. Aquest escalfament és un procés natural i fonamental pel manteniment de l'ecosistema de la Terra. No obstant això, la concentració del principal gas d'efecte hivernacle (CO_2) ha augmentat un 34 % respecte dels nivells preindustrials, fent que la temperatura del planeta augmenti.

D'altra banda, la Directiva 2008/50/CE i el Reial decret 102/2011, de 28 de gener, relatiu a la millora de la qualitat de l'aire, que fa la transposició de la normativa europea, fixen valors límit de qualitat de l'aire per a les partícules de diàmetre inferior a 10 micres (PM_{10}) i el diòxid de nitrogen, els quals tenen efectes nocius per a la salut humana i el medi ambient. A Catalunya, prop del 60 % dels seus habitants viuen en zones on es superen aquests valors límit. L'anàlisi del problema conclou que l'única manera de combatre la contaminació atmosfèrica local és actuant sobre els focus emissors. Per aquest motiu, la Direcció General de Qualitat Ambiental ha elaborat el Pla d'actuació per a la millora de la qualitat de l'aire aprovat el mes de setembre de 2014 i les mesures previstes en aquest Pla inclouen mesures per promoure l'eficiència energètica en la indústria i la diversificació energètica.

L'ús de combustibles fòssils implica emissions de quantitats importants de gasos amb efecte hivernacle, com el diòxid de carboni (CO_2), metà (CH_4), òxid nítrós (N_2O), a més d'altres contaminants com els òxids de nitrogen (NO_x), òxids de sofre (SO_x), partícules, hidrocarburs (H_xC_y), etc...

Taula 2. Emissions de contaminants a l'atmosfera

	Emissions CO_2	Emissions CH_4	Emissions N_2O	Emissions NO_x	Emissions PST
	<i>kgCO₂/MWh</i>	<i>kgCO₂/MWh</i>	<i>kgCO₂/MWh</i>	<i>kgNO_x/MWh</i>	<i>kgPST/MWh</i>
Fuel	273 ^[2]	0,01044 ^[2]	0,00540 ^[2]	1,84680 ^[3]	0,07200 ^[3]
Gasoil C	263 ^[2]	0,00612 ^[2]	0,00252 ^[2]		
GN	202 ^[2]	0,00504 ^[2]	0,00324 ^[2]	0,26640 ^[3]	0,00281 ^[3]
GLP	234 ^[2]	0,00324 ^[2]	0,009 ^[2]		
Biomassa (fusta)	320,3 ^[6]	0,10920 ^[6]	0,01433 ^[6]	0,32760 ^[3]	0,54000 ^[3]
Electricitat	240 ^[5]	-	-	-	-

D'altra banda, els processos industrials també provoquen l'emissió d'altres contaminants a l'atmosfera, com són: metalls pesants, substàncies halogenades. El risc associat a aquests contaminants pot augmentar per causa que en el si de l'atmosfera es poden desencadenar transformacions físiques i químiques que donen lloc a contaminants secundaris (àcid sulfúric, àcid nítric, ozó troposfèric, sals d'òxids de nitrogen i de sofre, etc.) els quals poden causar greus deterioraments a la salut humana, als ecosistemes naturals i als béns materials.

Actualment, les estimacions de projeccions de referència mostren que les concentracions de gasos arribaran a nivells de 550 ppm de CO_2 abans del 2050, la qual cosa provocaria un continu augment de la temperatura que propiciaria canvis climàtics alarmants.

1.1.3. La contribució de l'eficiència energètica en la reducció de l'escalfament global

L'estalvi energètic a través de l'eficiència energètica és, sens dubte, la manera més ràpida de reduir les emissions de gasos d'efecte hivernacle, així com un factor important en l'aprofitament dels recursos naturals i el desenvolupament sostenible. És per això que la UE ha posat en marxa un pla d'acció amb horitzó al 2020 per l'eficiència energètica, per tal d'estalviar fins un 20 % (390 Mtep) de l'energia en tot la Unió Europea i el 25% de l'energia industrial de procés [7]. D'aquesta manera, s'estalviaran 780 milions de tones de CO₂ i es reduiran uns costos importants per la UE quant a l'adquisició de combustible, que representen un import aproximat d'uns 100.000 milions d'euros anuals.

La necessitat de mantenir les millores d'eficiència energètica és vital. Les projeccions mostren que amb el compliment de la normativa en la matèria, l'any 2050 les emissions de CO₂ relacionades amb l'energia podrien tornar als nivells del 2006. L'eficiència energètica és, per tant, una prioritat per a un futur energètic més sostenible i més respectuós amb el medi ambient.

1.1.4. L'eficiència energètica en el marc de la Directiva d'emissions industrials (DEI)

Les activitats industrials regulades per la Directiva 2010/75/UE del Parlament europeu i del Consell, de 24 de novembre, sobre les emissions industrials, anomenada DEI, s'enumeren en el seu annex 1. A continuació es mostren alguns exemples de processos de producció, unitats de producció i instal·lacions industrials incloses en aquesta Directiva:

- Una planta de generació d'electricitat alimentada per gas (matèria primera), genera l'energia elèctrica a partir de calor (turbina de vapor). Per causa del refredament es perd energia tèrmica que es podria utilitzar, per exemple, per a un sistema de calefacció de districte. Amb aquesta proposta es millora l'eficiència energètica específica.
- En una refineria, a partir de petroli cru s'obté gasolina, gasoil, fuel i altres derivats. Una part dels hidrocarburs processats a la refineria es cremen internament per tal d'obtenir l'energia necessària per al procés tot i que, generalment, també s'ha d'importar electricitat. En cas que s'instal·li una planta de cogeneració a la refineria, passaria a exportar electricitat a la xarxa.
- En una planta de craqueig, a partir de líquids i gasos provinents de la refineria s'obté etilè i propilè i altres subproductes. Una part de l'energia consumida es genera internament en el procés, complementat per la importació de vapor, d'electricitat i de combustible.
- Una planta incineradora de residus genera electricitat per al mateix funcionament de la planta i per exportar a la xarxa. Si també hi ha demanda de calor, la planta pot funcionar en mode de cogeneració en què el vapor d'alta pressió es pot utilitzar per obtenir electricitat i el vapor a baixa/mitjana pressió es pot utilitzar en una xarxa de *district-heating o cooling*, o per a la indústria. És més eficient generar calor, i quan la calor s'utilitza a fora de les instal·lacions, la quantitat d'electricitat generada és més petita. Si hi ha suficient demanda de calor, la planta es pot construir per subministrar només calor. El subministrament i el balanç d'electricitat generada i calor produïda depèn de la demanda de calor i altres condicions de contracte.
- Una granja de pollastres té una sèrie de consums com, per exemple, calefacció, il·luminació, sistemes d'alimentació, etc. Els fems és poden revalorar en una planta de generació de biogàs. Aquest biogàs pot ser utilitzat per escalfar el mateix bestiar.

Totes les instal·lacions de la DEI tenen associades activitats i altres instal·lacions de suport que també utilitzen energia, com poden ser els sistemes hidràulics, els sistemes de lubricació, l'aire comprimit, la ventilació, la calefacció, els motors, etc. També hi ha àrees que requereixin calefacció o refrigeració, aigua calenta, il·luminació com poden ser els tallers de manteniment, de personal, oficines, vestuaris, zones de botigues, etc.

En el seu preàmbul, la DEI explica que cal facilitar un plantejament integrat en la prevenció i el control de les emissions a l'atmosfera, l'aigua i el sol, a la gestió de residus, en l'**eficiència energètica** i la prevenció d'accidents. Situa, doncs, al mateix nivell l'eficiència energètica que la prevenció i el control de les emissions al medi i la prevenció d'accidents. En el seu articulat, estableix que els estats membres (EM) prendran les mesures necessàries per tal que l'**explotació de les instal·lacions de l'annex I utilitzin l'energia de manera eficaç**.

Si aplicar mesures individuals d'eficiència energètica estalvia energia, encara s'estalvia més quantitat d'energia si es considera la instal·lació industrial en conjunt. En alguns casos, l'aplicació de tècniques molt específiques a algun subsistema de la planta pot portar a l'ajornament d'altres decisions que afecten a la seva totalitat i que tenen més beneficis ambientals. Per tant, l'optimització dels subsistemes de la planta per separat no ha de portar obligatòriament a una optimització global de la planta.

1.1.5. La Directiva d'eficiència energètica EE 2012/27

La Directiva 2012/27 estableix un marc comú de mesures per al foment de l'eficiència energètica dins de la Unió a fi d'assegurar la consecució de l'objectiu principal d'eficiència energètica de la Unió d'un 20 % d'estalvi pel 2020, i a fi de preparar el camí per a millores posteriors d'eficiència energètica més enllà d'aquest horitzó.

Així mateix, es disposa l'establiment d'objectius nacionals orientatius d'eficiència energètica per al 2020. Cada estat membre ha de fixar un objectiu nacional d'eficiència energètica orientatiu basat en l'estalvi d'energia primària o final o en la intensitat energètica.

Per fixar els objectius, els estats membres han de tenir en compte que el consum d'energia de la Unió l'any 2020 no ha de ser superior a 1.474 Mtep d'energia primària o 1.078 Mtep d'energia final.

Per tal d'aconseguir aquest objectiu, s'hauran d'executar una sèrie de mesures com renovar el parc d'edificis, establir un sistema d'obligacions d'eficiència energètica per als distribuïdors d'energia, fomentar les auditories energètiques, planificar tasques per a la conscienciació de les persones usuàries sobre l'energia que consumeixen, fomentar la cogeneració i les xarxes urbanes de calor i fred, fomentar el mercat dels serveis energètics, etc.

L'eficiència energètica permet fer front a diferents reptes:

- Millorar la qualitat de l'aire.
- Reduir les emissions de carboni (protecció del clima).
- Millorar la seguretat d'abastament de l'energia (a través de la producció sostenible).
- Reduir els costos industrials (millora de la competitivitat de les empreses).

Pel que fa a la directiva DEI no hi ha una definició genèrica de l'eficiència energètica, però es pot resumir com aquella mesura o conjunt de mesures que permeten reduir l'ús d'energia amb el mateix resultat de producció i millorar, d'aquesta manera, els impactes ambientals en el seu conjunt.

Una altra definició és la que proposa la Directiva d'eficiència 2012/27, que defineix l'eficiència energètica com “la relació entre la producció d'un rendiment, servei, bé o energia, i el consum d'energia”.

L'eficiència energètica es defineix, a la Directiva 2005/32/CE, com una “relació entre l'energia necessària per la producció d'una operació, d'un servei o d'un bé i el consum energètic associat”.

La Directiva EuP [147,EC,2006] sobre disseny ecològic defineix les millores en l'eficiència energètica com una optimització de l'ús final de la energia, com a resultat de canvis tecnològics, de comportament o econòmics. Es pot resumir de la manera següent:

- L'obtenció del mateix valor de producció per a un nivell reduït del consum previ d'energia.
- L'obtenció d'un valor de producció més alt amb el mateix consum d'energia.
- L'obtenció d'un valor de producció que en termes relatius supera l'augment del consum de l'energia.

1.1.6. L'ús eficient i ineficient de l'energia

L'eficiència energètica i, el contrari, la ineficiència energètica en instal·lacions, poden considerar-se des de dos enfocaments. Es pot assolir l'ús eficient de la manera següent:

1. Reduir les ineficiències de funcionament dels sistemes consumidors, ja que l'energia útil en cap cas és la consumida en una instal·lació industrial. Per exemple, en el cas d'utilitzar calor es produeixen pèrdues per transferència d'energia per conducció, convecció o radiació. Malauradament, la transferència de calor no és produïda només en la direcció desitjada (direcció cap al procés), sinó també cap a elements que l'envolten.
2. Utilitzar de manera efectiva l'energia quan sigui necessària i en quantitats òptimes. La ineficiència resulta de la mala adequació entre el consum d'energia i l'energia demanada, de disposar d'un disseny deficient, equips encesos quan no són necessaris, processos en execució a una temperatura més alta de la necessària, etc.

1.2. DEFINICIONS DELS INDICADORS D'EFICIÈNCIA ENERGÈTICA

L'objectiu principal dels indicadors d'eficiència energètica és que siguin capaçs de controlar el progrés de l'eficiència energètica d'una unitat de producció determinada i observar l'impacte de les mesures de millora.

Alguns indicadors que valoren objectivament el concepte d'eficiència energètica són el SEC, l'EIF i l'EEI:

- El **SEC** o “**consum específic d'energia**” és la quantitat d'energia consumida per unitat de producte o sortida. En la seva forma més simple, el SEC es pot definir com:

$$\text{SEC} = \frac{\text{energia utilitzada}}{\text{productes produïts}} = \frac{(\text{energia importada} - \text{energia exportada})}{\text{productes o resultats produïts}}$$

El SEC té com a unitats el GJ per unitats de producció mesurades en unitats de massa [GJ/Tn].

En molts casos es poden haver múltiples productes, per exemple en grans refineries o plantes químiques, on la mescla de productes varia amb el temps o, simplement, que l'alternativa sigui un servei. A continuació es mostren altres criteris per determinar les unitats de producció pel càlcul del SEC:

1. Si hi ha un nombre de productes igualment importants es pot utilitzar com a divisor la suma d'aquests productes:

$$SEC = \frac{\text{energia utilitzada}}{\sum \text{productes produïts}} = \frac{(\text{energia importada} - \text{energia exportada})}{\sum \text{productes produïts}}$$

2. Si hi ha diversos fluxos de productes i el nombre de fluxos de matèria prima és baix, el denominador pot ser la matèria primera. Aquest supòsit es recomana si el consum d'energia està determinat, principalment, per la quantitat de matèria primera i no tant pels productes:

$$SEC = \frac{\text{energia utilitzada}}{\sum \text{entrada de la matèria prima}} = \frac{(\text{energia importada} - \text{energia exportada})}{\sum \text{entrada de la matèria prima}}$$

3. Si hi ha diversos productes (diferents especificacions) fabricats per lots. Per exemple en la fabricació d'un polímer de diferents graus de qualitat, cada grau tindrà el seu propi consum energètic. Generalment, els graus més alts de qualitat requeriran més aportació energètica.

$$SEC = \frac{\sum_{i=A,B,C} X_i * SEC_{ref,i}}{\frac{\text{Energia utilitzada en la unitat de producció durant el període considerat}}{\text{Suma dels productes A,B i C fabricats durant el període}}}$$

On:

X_i: La fracció de grau "i" en el producte total produït durant el període indicat.

SEC_{ref,i}: El factor d'eficiència energètica de referència pel grau "i" (calculat, per exemple, fent la mitjana de l'indicador d'eficiència energètica durant un període de referència quan només s'ha fabricat el grau "i").

4. Si no hi ha cap producte i la sortida és un servei, per exemple en algunes instal·lacions de gestió de residus, el criteri de producció relacionat amb el consum d'energia és el residu entrant:

$$SEC = \frac{(\text{importació d'energia pel recolzament del procés d'incineració} - \text{energia exportada})}{\text{Tones de residus tractats}}$$

5. En altres casos en què la quantitat d'energia per al producte és massa variable per ser significativa com, per exemple, en instal·lacions d'impressió on la quantitat d'entrada/sortida de paper imprès no sempre es relaciona amb l'ús de l'energia.

El SEC (consum específic d'energia), mostra quanta energia es fa servir per a una producció determinada, però si no es disposen d'altres dades de referència un sol indicador té una utilitat limitada.

- **L'indicador d'eficiència energètica (EEI)** es pot utilitzar per mostrar canvis en el període de temps determinat i és més útil en el seguiment de l'eficiència energètica d'un sistema, procés o instal·lació. Aquest es defineix de la manera següent:

$$EEI = \frac{SEC_{ref}}{SEC} = [\text{adimensional}]$$

On:

SEC_{ref} : número de referència que és generalment acceptat pel sector de la indústria a la qual pertany el procés de producció o pot ser la SEC del procés de producció en un any de referència determinat.

Nota: SEC és un número que disminueix amb l'augment de l'eficiència energètica, mentre que EEI és un número que augmenta. Per tant, la gestió de l'energia s'orienta a la SEC més baixa possible i la EEI a la més alta possible.

- **Factor d'intensitat d'energia (EIF).** Els economistes solen entendre l'EIF com la relació entre l'energia utilitzada i un valor financer, com pot ser el volum de negoci, el valor agregat, el PIB, etc:

$$EIF = \frac{\text{energia utilitzada}}{\text{facturació de la instal·lació}} = \left[\frac{\text{GJ}}{\text{EUR facturació}} \right]$$

Per tal d'utilitzar adequadament aquest indicador, cal tenir en compte que el cost dels productes pot variar de diferent manera que el cost de l'energia i, per tant, l'EIF pot augmentar o disminuir sense un augment o disminució de l'eficiència energètica d'una planta.

1.2.1. Exemples d'indicadors d'eficiència energètica a la indústria

A continuació es mostren dos exemples de millora de l'eficiència energètica que il·lustren els conceptes de SEC i EEI.

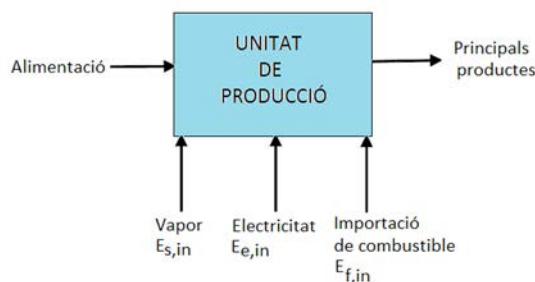
En primer lloc, s'especifiquen els conceptes d'energia primària, energia final i energia útil. L'energia primària és l'energia que s'agafa de la naturalesa i que va associada al combustible fòssil o al recurs renovable utilitzat, a partir dels quals s'obté l'energia final després de diverses transformacions. L'energia útil és aquella que s'obté com a resultat de l'ús de l'energia final. L'energia final és, per exemple, el moviment rotatiu del rodet d'una bomba o la calor generada per una caldera. L'electricitat és un tipus d'energia final, mentre que el gas natural pot ser tant energia primària (si s'utilitza com a input per a la transformació en una energia final com l'electricitat), com energia final (si s'utilitza com a combustible per a la indústria).

Exemple 1. Cas simple:

Per simplicitat, el procés es mostra sense exportacions d'energia i amb una sola matèria prima i producte.

El procés de producció en qüestió fa ús de vapor, electricitat i combustible.

Figura 1. Entrades i sortides d'energia i massa per a una unitat de producció simple [10]



El SEC del procés és:

$$\text{SEC} = \frac{E_{s,\text{in}} + E_{e,\text{in}} + E_{f,\text{in}}}{P}$$

On:

$E_{s,\text{in}}$: Energia subministrada al procés a través de vapor d'aigua per produir una quantitat de producte P

$E_{e,\text{in}}$: Energia subministrada al procés a través d'electricitat per produir una quantitat de producte P

$E_{f,\text{in}}$: Energia subministrada al procés a través de combustible per produir una quantitat de producte P

P : Quantitat de producte P

És essencial que els diferents vectors d'energia s'expressin com a energia primària. Per exemple, per produir 1MWh d'electricitat es requereix més energia que 1MWh de vapor, ja que l'electricitat es genera típicament amb una eficiència del 35-58 % i el vapor d'aigua amb una eficiència del 85-95 %.

Per exemple, per produir 1 tona de producte P hem de tenir en compte els vectors d'energia següents:

- 0,01 tones de combustible
- 10 kWh d'electricitat
- 0,1 tones de vapor

Suposem el següent:

- PCI del combustible = 50GJ/ton
- Eficiència producció d'electricitat = 40 %
- El vapor es genera a partir d'aigua a 25 °C i la diferència entre l'entalpia de vapor i l'entalpia de l'aigua a 25 °C = 2,8GJ/tones
- El vapor es genera amb una eficiència del 85 %

Per tant, per produir 1 tona de producte P , el consum d'energia és:

- $E_{f,\text{in}}$: 0,01 tones de combustible $\times$ 50 GJ/tona = 0,50GJ
- $E_{e,\text{in}}$: 10kWh $\times$ 0,0036GJ/kWh $\times$ 100/40 = 0,09GJ (on 1kWh = 0,0036GJ)
- $E_{s,\text{in}}$: 0,1 tones de vapor $\times$ 2,8 GJ/tona $\times$ 1/0,85 = 0,33GJ

$$\text{SEC} = (0,50 + 0,09 + 0,33) = 0,92 \text{ GJ/ton}$$

Per determinar l'EEl, suposem que els 0,92 és el SEC de referència. Ara suposem que la planta duu a terme un número de projectes de millora de l'eficiència energètica, de manera que un any més tard el consum d'energia del procés de producció s'ha convertit en:

- 0,01 tones de combustible
- 15kWh d'electricitat
- 0,05 tones de vapor

Com a resultat d'aquest projecte de millora de l'eficiència energètica, el nou SEC del procés és:

$$\text{SEC} = (0,50 + 0,135 + 0,165) = 0,8 \text{ GJ/ton}$$

La EEl d'aquest és, en conseqüència:

$$\text{EEI} = 0,92/0,8 = 1,15$$

Ens indica que l'eficiència energètica del procés de producció ha augmentat un 15 %.

És important tenir en compte que les ineficiències de la producció d'electricitat en aquest cas han estat internalitzades. Aquestes ineficiències són, en realitat, externes a la planta i tenen un valor de:

$$\left(10kWh \times \frac{0,0036GJ}{kWh} \times \frac{100GJ_{comb}}{40GJ_u}\right) - \left(10kWh \times \frac{0,0036GJ}{kWh}\right) = 0,054GJ$$

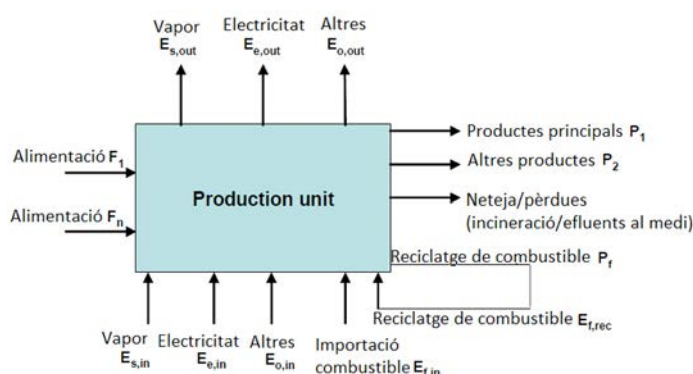
Si això no es tingués en compte, les entrades d'energia elèctrica serien el 50 % més eficients del que són:

$$\frac{0,054}{0,036} = 1,5 \rightarrow 150 \%$$

Exemple 2. Cas típic:

Aquest exemple tracta d'un cas més complex, en què hi ha exportació d'energia i reaprofitament intern de combustible o d'energia. Aquest cas il·lustra els principis que s'apliquen a moltes indústries amb ajustaments adequats.

Figura 2. Entrades i sortides d'energia i massa per a una unitat de producció complexa [10]



La SEC del procés és:

$$SEC = \frac{E_{s,in} + E_{e,in} + (E_{f,in} + E_{f,rec}) + E_{o,in} - (E_{s,out} + E_{e,out} + E_{o,out})}{P_1}$$

**Fórmula genèrica que pot ser aplicada a cada procés de producció/unitat/instal·lació, però els seus components s'han d'adaptar a cada procés/unitat/emplaçament de producció específic. No obstant això, hi poden haver diversos productes o un producte principal i uns subproductes.*

A continuació s'indiquen algunes consideracions que s'han de tenir en compte a l'hora d'aplicar la fórmula:

- Alimentació/flux de productes (F_{1-n} , P_1). L'alimentació (F_1) són les diferents matèries primeres utilitzades per produir els principals productes P_1 i els subproductes. Aquests subproductes es divideixen en dues fraccions: una fracció es recicla com a combustible (P_f) i la resta són els subproductes (P_2).
- Vectors energètics (flux d'energia) (E_{in}). Els vectors d'energia mostren els diferents tipus de fluxos d'energia dins i fora de la unitat. L'energia importada i exportada es mostra al pla vertical de l'esquema anterior. L'energia associada amb el refredament del procés amb aigua o aire de refrigeració mai no ha

d'estar inclosa com a energia a l'equació. També han d'estar excloses altres pèrdues de calor a l'aire.

- Diferents nivells de vapor (E_s). Una planta de producció podria utilitzar més d'un tipus de vapor (diferents pressions i/o temperatures). Cada nivell de vapor o aigua ha de produir el seu propi factor d'eficiència. Cada un d'aquests nivells ha de ser inclòs en el terme de E_s mitjançant la suma energètica.
- Càlculs o estimacions. A vegades, per un procés de producció típic, alguns paràmetres (aigua de refrigeració, nitrogen, vapor, electricitat) no han estat mesurats sinó que són estimacions. Aquesta pràctica ha d'estar definida i documentada d'una manera transparent.

1.2.2. Aspectes a tenir en compte per definir els indicadors d'eficiència energètica

En aquest apartat es tracten dos aspectes: els límits del sistema i els paràmetres importants pel que fa a la instal·lació industrial.

Definir límits del sistema

Es tracta d'establir els límits segons el sistema del qual es vol optimitzar la seva eficiència energètica. S'han de considerar tant els impactes relatius a l'eficiència energètica dels components com els del sistema en la seva globalitat.

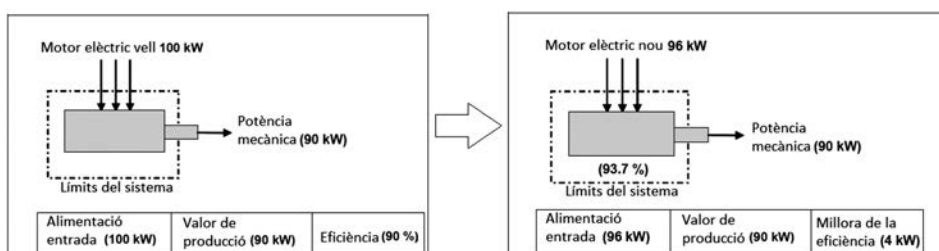
Els exemples següents mostren els components, els subsistemes i els sistemes individuals, i tracten d'examinar la millora en l'eficiència energètica.

$$\text{Eficiència energètica } \mu = \frac{\text{sortida d'energia}}{\text{entrada d'energia}} [\%]$$

$$\text{Millores en l'eficiència energètica} = \frac{\text{canvis en l'energia utilitzada}}{\text{ús de l'energia original}}$$

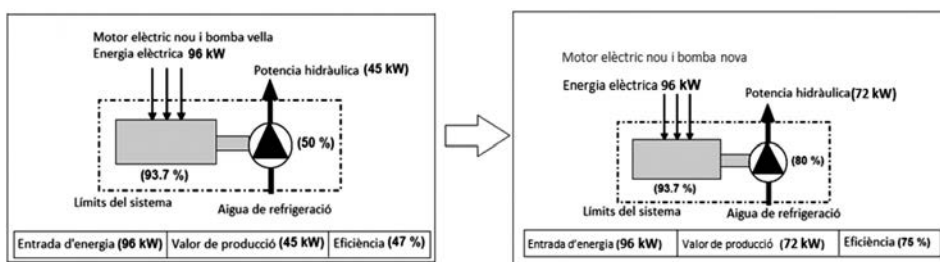
Per exemple, en el cas d'un motor que ha estat substituït per un altre motor d'alta eficiència. La millora energètica és de 4 kW. Els efectes d'aquest canvi es mostren a la figura següent.

Figura 3. Sistema 1. Substitució d'un motor elèctric vell per un motor elèctric nou [10]



Si es considera que el nou motor elèctric anterior s'utilitza per accionar una bomba que proporciona aigua per un sistema de refrigeració. Els nous límits del sistema inclouen el motor i la bomba mentre que el motor sol es considera un subsistema.

Figura 4. Sistema 2. Substitució de la bomba hidràulica [10]



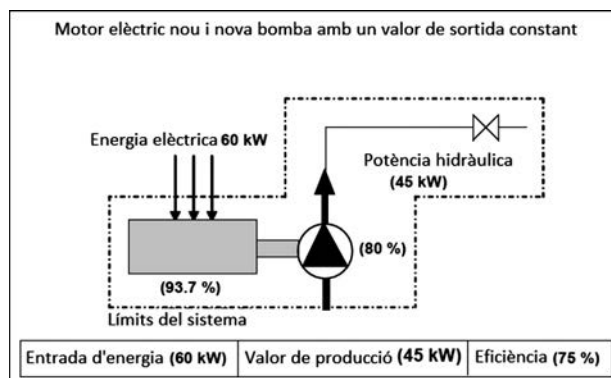
L'eficiència del sistema motor-bomba original és molt inferior a la del mateix sistema en el cas que la bomba sigui substituïda per una de més eficient, malgrat que el subsistema motor tingui en ambdós casos la mateixa eficiència. La nova bomba dona una potència hidràulica molt superior per a la mateixa aportació d'energia elèctrica. La potència hidràulica de la bomba augmenta de 45 a 72 kW. La millora de l'eficiència energètica és:

$$\text{Milliores en l'eficiència energètica} = \frac{75}{47} = 1,6 \text{ (és a dir, un 60 \% de millora de l'eficiència energètica)}$$

Els efectes d'aquest canvi es mostren en la figura 4.

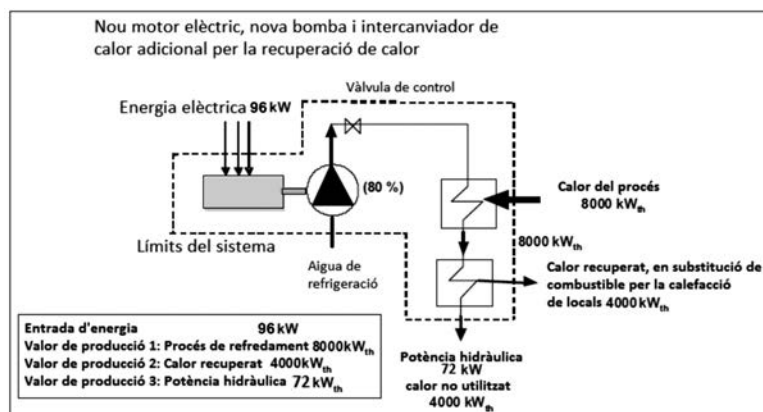
Continuant amb l'exemple anterior, un estudi del sistema de refrigeració pot haver demostrat que una potència hidràulica de 45 kW és suficient. En aquest cas, la potència a l'eix es pot estimar en $45/0,8 = 56$ kW. L'energia elèctrica necessària per impulsar el motor seria llavors de $56/0,937 = 60$ kW, molt per sota del 96 kW consumits inicialment. Això representa una reducció del 40 % en la potència elèctrica d'entrada respecte del sistema 1 i del 37,5% respecte del sistema 2. Els efectes d'aquest canvi es mostren en la figura 5.

Figura 5. Sistema 3. Consum del sistema mantenint la potència hidràulica constant [10]



Els límits del sistema anterior s'amplien novament i s'inclou un vell intercanviador de calor pel refredament del procés. El sistema està dissenyat per una potència de refredament de 13.000 kW tèrmics. La calor del procés en aquest sistema no s'aprofita. L'eficiència segueix sent d'un 75 % si es divideix la potència de sortida entre la d'entrada.

Figura 6. Sistema 4. Addició al sistema d'un bescanviador de calor per refrigeració de procés [10]



No obstant això, si es calcula el SEC:

$$SEC = \frac{\text{Energia utilitzada}}{\text{Productes produïts}} = \frac{(\text{Energia importada} - \text{Energia exportada})}{\text{Productes produïts}} = \frac{96 - 72}{13.000} = 0,00185 \frac{\text{kW}}{\text{kW}_{th}}$$

Els efectes d'aquest canvi es mostren en la figura 6.

I si, degut a les necessitats de producció, es reduïssin les necessitats de refrigeració a 8.000 kW_{th}, el SEC seria de 0,003 kW/kW_{th}, el que suposa una pèrdua d'eficiència del 62 %.

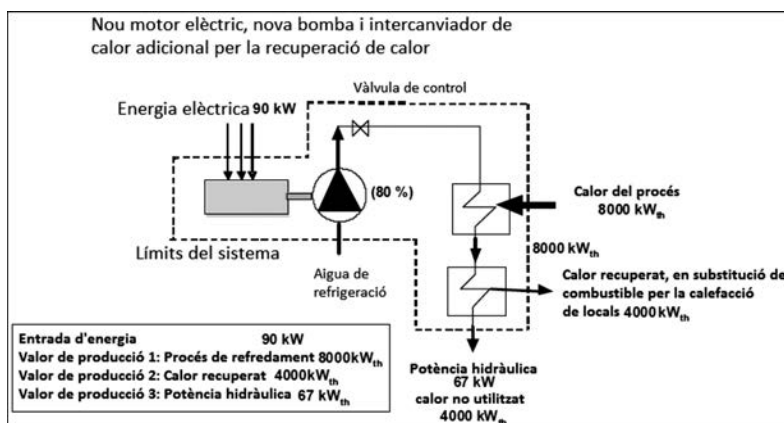
Si s'aprofités la meitat de la calor extreta d'aquest procés (4.000 kW_{th}) per a una planta de calefacció:

$$SEC = \frac{\text{Energia utilitzada}}{\text{Productes produïts}} = \frac{(\text{Energia importada} - \text{Energia exportada})}{\text{Productes produïts}} = \frac{96 - 72}{4.000} = 0,006 \frac{\text{kW}}{\text{kW}_{th}}$$

Això suposaria, paradoxalment, una pèrdua d'eficiència del sistema analitzat, mentre que l'eficiència de la planta de calefacció augmentaria. És evident que l'eficiència energètica global ha pujat; és per això que s'hauria d'incloure, també, aquesta planta a l'anàlisi global. Per tant, queda demostrada la importància de definir correctament els límits del sistema analitzat.

Els efectes d'aquest canvi es mostren en la figura següent.

Figura 7. Sistema 5. Addició al sistema d'un bescanviador de calor per refrigeració de procés i recuperació d'una part d'aquest calor [10]



L'eficiència energètica global màxima d'una instal·lació industrial pot implicar que algun sistema que forma part de la planta no treballi al seu punt de rendiment òptim, en benefici de la millora d'eficiència global de la instal·lació.

Altres aspectes importants a tenir en compte per al càlcul dels indicadors d'una instal·lació industrial:

Els aspectes importants a considerar per l'operador del sistema i que s'haurien de tenir en compte per al càlcul dels indicadors d'eficiència energètica:

- Mantenir un registre d'operació del sistema i dels seus límits i actualitzar la base de dades històrica per mantenir la comparativa entre els diferents anys.
- Producció interna d'energia.
- Recuperació de residus i de gasos.
- Factor de càrrega de la instal·lació (reducció del SEC amb l'augment de la producció).
- Canvis en les tècniques de producció i en el desenvolupament de productes.
- Integració energètica.
- Calefacció i refrigeració de locals.
- Factors regionals.



2. MILLORS TÈCNiques DISPONIBLES PER A L'ASSOLIMENT DE L'EFICIÈNCIA ENERGÈTICA A LA INDÚSTRIA

2.1. INTRODUCCIÓ

Aquest document és una aproximació al marc de la directiva de prevenció i control integrat de la contaminació procedent d'activitats industrials (directiva DEI). És interessant presentar alguns dels conceptes als que fa esment la DEI, com són les millors tècniques disponibles (MTD) i alguns dels objectius que s'hi persegueixen. La clau de la DEI rau en explotar tot el potencial de les MTD.

La DEI té com a objectiu la prevenció i el control integrat de la contaminació pel que fa a les activitats industrials per tal d'aconseguir un alt nivell de protecció del medi ambient en el seu conjunt, incloent també l'eficiència energètica com a gran actor en la prevenció. El fonament jurídic de la directiva es refereix a la protecció del medi ambient i de la salut de les persones.

La Directiva IPPC, derogada per la DEI, preveia específicament un sistema de permisos per a determinades categories d'instal·lacions industrials que requereixen als operadors reguladors adoptar una visió global i integrada del potencial de reducció del consum energètic i de la contaminació de la seva instal·lació. L'objectiu general d'aquest enfocament integrat era millorar el disseny i la construcció, així com la gestió i el control, dels processos industrials per assegurar un alt nivell de protecció del medi ambient en el seu conjunt. El nucli d'aquest enfocament era el principi general establert en l'article 3 de la Directiva en què s'establí que els operadors de les instal·lacions havien de prendre totes les mesures preventives adequades contra la contaminació, en particular mitjançant l'aplicació de les "millors tècniques disponibles" per millorar el seu acompliment ambiental, incloent també l'eficiència energètica.

Durant els anys d'aplicació de la IPPC, s'ha observat una insuficient aplicació de les MTD. Amb la DEI, els documents BREF esdevenen pràcticament un paper vinculant, davant del perfil exclusivament tècnic que tenien amb la Directiva IPPC. No seran vinculants les mateixes MTD en si mateixes, però sí que ho seran els nivells de protecció ambiental que es poden aconseguir amb la seva aplicació. Algunes de les principals novetats de la DEI són les següents:

- Concreta més el concepte de MTD, així com el paper dels documents BREF.
- Les MTD són la referència per establir les condicions del permís.
- Actualització de les condicions del permís / Informe de compliment de les condicions del permís.
- Estableix límits dels contaminants: SO₂, NO_x i partícules per certs sectors.
- Defineix els instruments de control ambiental: informe de situació de partida / cessament d'activitat / inspeccions mediambientals.
- Simplifica el marc jurídic i les càrregues administratives innecessàries.

La Directiva desplega definits els conceptes següents:

"Millors tècniques disponibles" (MTD): són la via més eficaç i avançada per tal d'evitar o reduir les emissions. Les MTD aplicades al desenvolupament de les activitats i de les seves modalitats d'explotació han de constituir la base dels valors límit d'emissió.

Document de referència MTD (*BREF*): document resultant d'un intercanvi d'informació, elaborat per a determinades activitats, en el qual es descriuen, en particular, les tècniques aplicades, les emissions actuals i els nivells de consum, les tècniques que es tenen en compte per determinar les millors tècniques disponibles, així com les conclusions sobre les MTD i les tècniques emergents.

Conclusions sobre les MTDs: document que conté les parts d'un document de referència MTD en què s'estableixen les conclusions sobre les millors tècniques disponibles, la descripció, la informació per avaluar la seva aplicació, els nivells d'emissió associats a les millors tècniques disponibles, les monitoritzacions associades, els nivells de consum associats i, si escau, les mesures de rehabilitació delemplaçament en qüestió.

Nivells d'emissió associats a les MTDs (*NE-MTD*): el rang de nivells d'emissió obtingut en condicions normals de funcionament fent ús d'una de les millors tècniques disponibles o d'una combinació de les millors tècniques disponibles, segons es descriu en les conclusions sobre les MTD, expressat com una mitjana durant un determinat període de temps en condicions de referència específiques.

A l'hora d'estudiar detingudament la possibilitat d'implementar millores que portin a la protecció del medi ambient en una instal·lació industrial, com representen les MTD, hi ha dos enfocaments de naturalesa diferent, però alhora complementaris, que comporten una optimització del consum energètic de l'establiment industrial.

Un primer enfocament és el detallat en l'apartat 2.2, que són tècniques que consideren la instal·lació industrial completa amb l'objectiu d'aconseguir una eficiència energètica òptima. Dins d'aquest conjunt de tècniques figuren els sistemes de gestió de l'eficiència, la planificació i l'establiment d'objectius, el disseny energètic eficient, la integració de processos, la comunicació i la motivació, el control i la monitorització de processos i el seu manteniment.

El segon enfocament és el que s'exposa en l'apartat 2.3 d'aquesta guia, en què s'hi descriuen les tècniques a considerar quant als sistemes consumidors d'energia (aire comprimit, vapor, etc.) i pel que fa als components individuals d'aquests sistemes (motors, etc.).

Cap dels dos apartats representa una llista exhaustiva de les tècniques i eines existents a desenvolupar en el marc de la directiva d'emissions industrials DEI i del concepte de millors tècniques disponibles quant a eficiència energètica. Les tècniques presentades es poden fer servir soles o en combinació i són complementàries amb els conceptes presentats al capítol anterior per complir amb els objectius de la DEI.

En la determinació de les millors tècniques disponibles, ja siguin les que es presenten en els dos propers apartats o d'altres tècniques que puguin sorgir o existir, convé prendre especialment en consideració els elements de l'annex 3 de la DEI i que s'enumeren a continuació, tenint en compte els costos i avantatges que se'n poden derivar i els principis de precaució i prevenció:

- Ús de tècniques que produeixin menys quantitat de residus.
- Ús de substàncies menys nocives.
- Desenvolupament de les tècniques de recuperació i reciclatge de substàncies generades i utilitzades en el procés, i dels residus quan escaigui.
- Comparar processos, instal·lacions o mètodes de funcionament amb els que hagin donat resultats positius a escala industrial.

- Avenços tècnics i evolució dels coneixements científics.
- Caràcter, efectes i volum de les emissions de què es tracti.
- Dates d'entrada en funcionament de les instal·lacions noves o existents.
- Termini que requereix la implantació d'una millor tècnica disponible.
- Consum i naturalesa de les matèries primeres (inclosa l'aigua) utilitzada en procediments d'eficiència energètica.
- Necessitat de prevenir o reduir al mínim possible l'impacte global de les emissions i dels riscos en el medi ambient.
- Necessitat de prevenir qualsevol risc d'accident o de reduir les seves conseqüències per al medi ambient.
- Informació publicada per la Comissió o per organitzacions internacionals.

En aquest context de protecció del medi ambient, des de l'Oficina Catalana del Canvi Climàtic s'ha establert un programa d'acords voluntaris amb el que des de la Generalitat, s'estimula i estableix mecanismes per tal de que les organitzacions, entitats i col·lectius adherits redueixin les seves emissions de gasos amb efecte hivernacle més enllà del que fixa la normativa. Per a més informació es pot consultar l'enllaç següent.

<http://www20.gencat.cat/portal/site/canviclimatic/menuitem>

2.2. APLICACIÓ DE LES MILLORS TÈCNIQUES DISPONIBLES PER MILLORAR L'EFICIÈNCIA ENERGÈTICA A NIVELL DE GESTIÓ D'INSTAL·LACIONS INDUSTRIALS

L'aplicació de les millors tècniques disponibles en noves instal·lacions i instal·lacions objecte de grans modificacions no sol ser un problema. En la majoria de casos, l'optimització de l'eficiència energètica és econòmicament viable, però s'ha de mantenir un compromís entre l'elecció de la millor tecnologia i una implementació econòmicament sostenible (és a dir, el punt en el que les millores en el disseny ja no es poden assumir de manera econòmicament viable). No obstant, l'aplicació d'aquestes tècniques en sistemes existents, generalment, no és tan senzilla a causa de la infraestructura existent i de les circumstàncies locals de cada instal·lació.

En general s'ha de realitzar una anàlisi que consideri els següents factors:

- Edat i disseny inicial dels equips.
- La situació de la instal·lació en el seu cicle d'inversió.
- Complexitat dels processos i l'elecció de les tècniques que actualment s'utilitzen en la instal·lació.
- La capacitat de producció, el volum i el mix de productes produïts.
- Tipus de tractaments aplicats i qualitats requerides.
- Espai.
- Cost, disponibilitat i robustesa de les tècniques amb la immediatesa requerida.
- Temps requerit per fer canvis en les operacions dins de la instal·lació i com s'optimitza juntament amb els requisits de producció.
- Anàlisi del cost/benefici de les mesures ambientals en progrés.
- Tecnologies noves i emergents.
- Costos financers i costos col·laterals.
- Formació dels operaris a càrrec dels nous equips.

Algunes de les tècniques que es presenten en aquest capítol s'apliquen contínuament i altres de forma periòdica. Per exemple, algunes tasques de manteniment es duen a terme tots els dies, mentre que altres es duen a terme d'acord amb un calendari adequat com passa, per exemple, amb el manteniment dels equips durant les parades tècniques.

L'eficiència energètica és un aspecte que s'ha d'impulsar, promoure i gestionar des dels rangs més alts de la direcció de l'empresa, ja que habitualment comporta decisions que impliquen a més d'un departament.

La presa de decisions en matèria d'eficiència energètica és un procés que exigeix planificació tant en l'àmbit tècnic (previsió d'espais i de temps per dur a terme les accions de millora) com en l'econòmic (per exemple, en l'aprovisionament dels recursos economicofinancers a dedicar per promoure accions de millora tant per a l'exercici en curs com, sobretot, en el següents).

És molt habitual, malauradament, els enfocaments a curt termini que impedeixen l'execució d'altres accions a llarg termini que comportarien uns estalvis molt més importants si l'estratègia fos la correcta. També són freqüents les actuacions dutes a terme amb precipitació, degut a la proximitat de la data límit per a la presentació de resultats.

És per causa dels motius anteriors que orientar esforços en la gestió de l'eficiència energètica de les plantes industrials és de vital importància. Per tant, es considera oportú, amb el propòsit d'orientar en la presa de decisions, incloure en la present guia un apartat en què es comenten, succintament, tècniques que ajuden a gestionar les millores de l'eficiència en l'àmbit industrial.

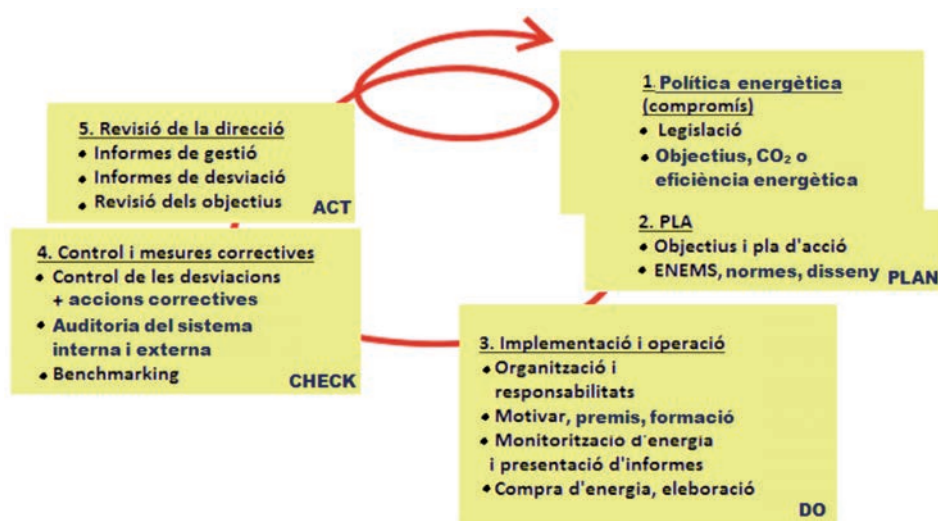
2.2.1. Sistemes de gestió de l'eficiència energètica (SGE)

Totes les empreses industrials poden estalviar energia mitjançant l'aplicació dels mateixos principis i tècniques que utilitzen habitualment per gestionar els seus recursos clau com són el financer, les matèries primeres, els recursos humans, salut i seguretat, etc. Aquestes pràctiques inclouen la completa responsabilitat de la gestió de l'ús de l'energia. La gestió del consum d'energia i dels seus costos elimina malbarataments i residus i aporta un estalvi acumulat al llarg del temps. No obstant això, no s'han de confondre els estalvis financers que poden aportar algunes tècniques de gestió de l'energia amb els estalvis reals en el consum d'energia.

Un sistema de gestió ambiental (SGA) és una eina que els operadors poden utilitzar per fer front a qüestions de disseny, construcció, manteniment, operació i desmantellament d'una manera sistemàtica i demostrable. El sistema de gestió ambiental inclou l'estructura organitzativa, responsabilitats pràctiques, procediments, processos i recursos per desenvolupar, implementar, mantenir, revisar i monitoritzar la política mediambiental. Un SGA és més eficaç si és part de la gestió i de l'operació global de la instal·lació. Quan el consum energètic té un pes important en una instal·lació, una part fonamental del SGA és el sistema de gestió energètica.

Hi ha diversos dissenys de procés per a la millora continua d'un sistema de gestió d'eficiència energètica, però la majoria dels sistemes de gestió es basen en el "plan-do-check-act", ja que s'utilitza àmpliament en altres àmbits de la gestió de l'empresa:

Figura 8. Millora continua d'un sistema de gestió de la eficiència energètica [10]



Els millors resultats s'han associat amb els sistemes de gestió d'energia que mostren els elements següents:

- Política energètica: plans d'acció i revisions regulars.
- Organització: gestió de l'energia plenament integrada a l'estructura administrativa.
- Motivació: canals formals i informals de comunicació utilitzats regularment per la gestió energètica.
- Sistemes d'informació: sistema integral d'objectius conjunts, identificació de fallades, quantificació d'estalvi,...
- Màrqueting: valor de l'eficiència energètica i rendiment de l'energia.
- Inversió: discriminació positiva a favor dels "plans verds" amb detall de l'avaluació de la inversió de totes les oportunitats de nova construcció i reforma.

MTD 1. Implementar un sistema de gestió de l'eficiència energètica o ambiental

Per considerar-se MTD, un sistema de gestió de l'eficiència energètica per a una instal·lació, segons la DEI, ha d'incloure els components següents:

- El compromís de l'alta direcció.
- La definició d'una política d'eficiència energètica.
- La planificació i l'establiment d'objectius i fites.
- La implementació i operació dels procediments.
- L'avaluació comparativa (*benchmarking*).
- La comprovació i acció correctiva.
- La revisió de la gestió.
- La preparació regular d'una declaració d'eficiència energètica.
- La validació per part d'organismes de certificació interns (auditories internes).
- Consideracions per al tancament de les instal·lacions al final de la seva vida.
- El desenvolupament de tecnologies d'eficiència energètica.

Les tècniques de gestió de l'eficiència energètica s'haurien de dissenyar per ser integrades amb la resta d'objectius ambientals i considerar-ne el seu impacte ambiental global, segons indica la directiva DEI, en què l'eficiència

energètica serà un més dels objectius a aconseguir, juntament amb la reducció d'emissions, la millora de la qualitat dels productes, l'estalvi de matèries primeres, etc.

L'objectiu i la naturalesa d'un sistema de gestió de l'eficiència energètica estarà relacionat amb la naturalesa, escala i complexitat de la instal·lació, així com amb el seu ús de l'energia, d'igual manera que amb els altres impactes que pugui generar la mateixa instal·lació.

Dins de la Unió Europea moltes organitzacions han decidit de forma voluntària implementar sistemes de gestió de l'energia. Aquests sistemes es poden concebre afegint requisits específics per l'eficiència energètica a un sistema de gestió existent o mitjançant la creació d'un sistema propi de gestió de l'eficiència energètica separat.

Hi ha sistemes de gestió de l'eficiència energètica estandaritzats i no estandaritzats. L'aplicació i el compliment d'un sistema estandaritzat acceptat internacionalment com l'EN ISO 50.001 pot donar més credibilitat, especialment quan el sistema se sotmet a una verificació externa. No obstant això, els sistemes no estandaritzats poden, en principi, ser igual d'eficaços sempre que estiguin correctament dissenyats i executats.

Els avantatges que poden proporcionar els sistemes de gestió de l'eficiència energètica són els següents:

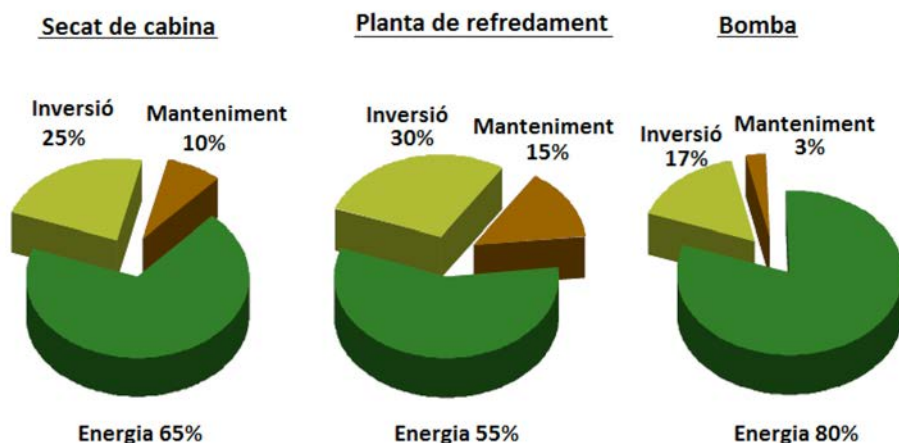
- Millor comprensió dels aspectes d'eficiència energètica de l'empresa.
- Millora del rendiment de l'eficiència energètica.
- Millora de la competitivitat.
- Oportunitats addicionals per la reducció de costos operatius i millora de la qualitat del producte.
- Millor base per prendre decisions.
- Millora de la imatge i la motivació del personal de l'empresa.
- Augment de la confiança dels reguladors.
- Facilita l'ús del mercat liberalitzat d'energia.
- Reducció d'emissions de contaminants, tant in situ com en origen.

En l'apartat 3.1.1 de la present Guia es presenta un exemple d'implementació d'un sistema de gestió de l'eficiència energètica.

2.2.2. Disseny energètic eficient (DEE) d'una nova instal·lació

Durant la fase de planificació d'una nova planta o instal·lació, a més del cost d'inversió, també s'han d'avaluar els costos derivats del consum energètic dels processos, equips i sistemes durant tota la seva vida útil. Tal i com es mostra en la figura següent, en cas de comprar una bomba, per exemple, a llarg termini aconseguirem més estalvi si escollim aquella que tingui menys consum en el seu funcionament que si només ens fixem en el seu preu d'adquisició. Tot i tenir en compte tota la vida útil de l'equip, és molt més important el cost de l'energia consumida que no pas el seu cost d'adquisició.

Figura 9. Exemple dels costos totals d'equips industrials típics (més de 10 anys de vida útil) [10]



L'experiència demostra que si es consideren criteris d'eficiència energètica durant la fase de planificació i disseny d'una nova planta, els estalvis potencials durant tota la seva vida útil són més alts i les inversions necessàries per aconseguir aquests estalvis són més baixes que si es fessin un cop la planta està en marxa. No obstant això, són un sobrecost en relació amb la inversió inicial d'una solució estàndard.

El disseny energètic eficient utilitza els mateixos coneixements tècnics i les mateixes activitats i metodologies que la realització d'auditories energètiques en establiments existents. La principal diferència és que aborda l'anàlisi en la fase de disseny i que permet una selecció de les tecnologies d'eficiència energètica més àmplia, rigorosa, acurada i adaptada a les necessitats reals de les instal·lacions consumidores.

Les decisions clau que afectaran al consum energètic són les associades al cabal d'aire a instal·lacions de climatització i ventilació, la temperatura de consigna a sistemes de refrigeració, la potència tèrmica a sistemes d'assecatge, les necessitats de vapor pel que fa als sistemes de generació i la pressió necessària en sistemes d'aire comprimit.

Freqüentment, les tasques de disseny segueixen un calendari de planificació que no és possible d'alterar. A fi de no cometre errades, el procés de disseny energètic eficient (DEE) hauria de seguir les activitats de la taula següent.

Taula 3. Activitats del procés de disseny eficient [10]

Fase de construcció	Activitat de DEE
Disseny bàsic/disseny conceptual	● Recollida de dades aplicades pel que fa a l'ús d'energia per noves instal·lacions. ● Avaluació de les necessitats reals d'energia. ● Avaluació dels costos d'energia durant el cicle de vida. ● Revisió dels paràmetres bàsics de disseny que influeixen en el consum d'energia. ● Identificació de les persones que influeixen en l'eficiència energètica per a les noves instal·lacions. ● Minimització dels serveis energètics. ● Introducció de les millors tecnologies disponibles.

Fase de construcció	Activitat de DEE
Disseny detallat	- El disseny de plantes de processos òptims i sistemes de servei públics. - Avaluació de les necessitats de control i instrumentació. - Minimització de les pèrdues de pressió, les pèrdues de temperatura, etc. - Selecció de motors eficients, unitats, bombes, etc. - Especificacions complementàries als materials de licitació en matèria d'eficiència energètica.
Procés de licitació	- Demanar ofertes i solucions als fabricants d'eficiència energètica. - Control de qualitat dels dissenys i especificacions de la planta en les licitacions.
Construcció	Control de qualitat de les especificacions pels equips instal·lats en comparació dels equips inclosos en les ofertes.
Posada en marxa	Optimització dels processos i instal·lacions d'acord amb les especificacions.
Fase operativa	- Auditories energètiques. - Gestió de l'energia.

L'avaluació de les necessitats energètiques reals és fonamental durant el treball de disseny, com també és fonamental la identificació de les àrees amb més potencial per centrar el DEE durant les últimes etapes del procés de planificació i disseny. És important, també, que les principals inversions es planifiquin i es pressupostin a les revisions anuals de la gestió i s'emfatitzi la necessitat de posar atenció específica en l'eficiència energètica.

El DEE aconsegueix els màxims estalvis a la indústria i permet aplicar tècniques d'eficiència energètica que no es podrien aplicar durant un procés d'actualització o renovació. Els estalvis que es poden aconseguir amb aquesta estratègia són d'entre un 20 % i un 30 %. En la taula següent es mostren exemples de DEE per diferents tipologies d'indústria:

Taula 4. Estalvis aconseguits per un DEE a diferents tipus d'indústria [10]

Indústria	Estalvis (€/any)	Estalvis (%)	Inversions (%)	Termini de recuperació (anys)
<i>Ingredients alimentaris:</i> - Nous conceptes de refredament. - Canvi de mètode de fermentació. - Reduir HVAC en zones emalatge. - Recuperació de calor fermentadors. - Nous principis d'il·luminació.	130.000	30	115.000,00	0,8
<i>Dolços:</i> - Millorar del control del procés d'assecatge. - Circuit d'optimització refredament. - Reducció de l'assecatge per infrarojos. - Reduir la pressió de l'aire comprimit. - Utilització de fonts de calor més barates (calefacció urbana).	65.000	20	50.000	0,7

Indústria	Estalvis (€/any)	Estalvis (%)	Inversions (%)	Termini de recuperació (anys)
Menjar preparat: ● Canvi de la font de calor dels forns. ● Noves tecnologies de congelació. ● Nous conceptes de recuperació de calor. ● Optimització de les refredadores de NH₃. ● Optimització dels bescanviadors de calor.	740.000	30	1.500.000	2,1
Plàstics: ● Nous conceptes de refredament (refrigeració natural). ● Recuperació de calor per a la calefacció de l'edifici. ● Reduir pressió de l'aire comprimit. ● Reducció del sistema de climatització.	130.000	20	410.000	3,2
Escorxador: ● Recuperació de calor. ● Optimització de processos neteja. ● Reduir la càrrega de refredament. ● Millorar el control processos refredament. ● Utilització del greix animal per a calefacció.	2.000.000	30	5.000.000	2,5

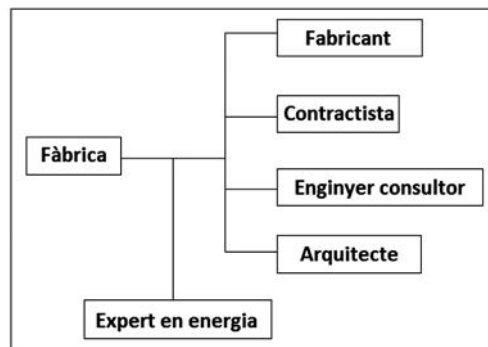
En comparació amb les auditories energètiques tradicionals, la proporció de costos socioeconòmics totals - beneficis per l'estalvi d'un DEE és de 3 a 4 vegades superior.

MTD 2. Optimitzar l'eficiència energètica en el moment de planificar una nova instal·lació, unitat o sistema, o una gran actualització d'una instal·lació existent.

Per aconseguir els millors resultats possibles del DEE cal tenir molt presents els criteris següents:

- El DEE ha d'iniciar-se en les primeres etapes per aconseguir el màxim estalvi.
- Totes les dades de consum d'energia i costos d'explotació i manteniment durant la vida útil han de ser calculats en l'etapa de disseny conceptual. És molt important que totes les dades de consum siguin avaluades per la persona responsable del DEE.
- El treball de DEE l'ha de realitzar una persona experta en energia independent com s'il·lustra en la figura següent:

Figura 10. L'organització recomana incloure un expert en energies en la planificació i el disseny de noves instal·lacions [10]



- Els fabricants es beneficiaran de l'optimització de l'eficiència energètica en una hipotètica avaluació de riscos en relació amb els competidors.
- La identificació de l'eficiència energètica com un factor clau en el procés de licitació per les noves instal·lacions.

L'aplicació del DEE ha demostrat ser una de les maneres més rendibles i atractives per millorar l'eficiència energètica a la indústria. El DEE s'ha aplicat amb èxit a la majoria de sectors industrials i s'ha introduït en el terreny de la instal·lació, de la unitat de processos i dels sistemes de serveis públics.

A Dinamarca es van realitzar 10 projectes pilot: el més significatiu d'aquests projectes es va dur a terme a un escorxador a "DanishCrown". Tot i ser un dels més grans de la Unió Europea, l'operador de la instal·lació tenia una àmplia experiència en gestió de l'energia, ja que el cost energètic era un cost operatiu molt significatiu. No obstant això, sotmetre el disseny inicial del projecte a un procés de disseny eficient de l'energia extern va identificar estalvis d'energia addicionals de per vida per sobre del 30 % [8].

2.2.3. Millora de la integració de processos

Actualment l'activitat industrial ha intensificat l'ús de l'energia i de les matèries primeres.

MTD 3. Optimitzar l'aprofitament de l'energia entre més d'un procés o sistema, tant a l'interior de la mateixa planta com amb plantes industrials properes.

Una bona eina per optimitzar l'ús d'aquests recursos és mitjançant la integració de processos, és a dir, l'ús de l'energia residual o dels mateixos residus d'un procés per part d'un altre procés. Amb la integració de processos podem aconseguir:

- Millorar l'eficiència energètica.
- Millorar l'eficiència de les matèries primeres.
- Reduir les emissions a l'atmosfera.

Especialment aplicable en casos de processos que ja són interdependents, encara que les millors opcions dependran de cada cas en particular. No obstant això, s'ha de tenir en compte que en aquest cas els canvis en una part de la planta poden afectar als paràmetres de funcionament de la resta.

Exemple: integració de processos de dues plantes

Integració de dues plantes, una d'àcid nítric i l'altra de nitrat d'amoni, en la qual s'adopten les mesures següent [10]:

- Les dues plantes comparteixen vaporitzador d'amoníac, ja que ambdues en necessiten.
- El vapor a baixa pressió disponible a la planta de nitrat d'amoni s'utilitza per escalfar l'aigua d'alimentació d'una caldera a través de dos intercanviadors de calor.
- L'aigua d'alimentació de la caldera s'utilitza també per preescalfar el gas de cua de la planta d'àcid nítric.
- El condensat de la planta de nitrat d'amoni es recicla a la columna d'absorció de la planta d'àcid nítric.

S'aconsegueix:

- Millorar l'eficiència energètica.
- Menys consum d'aigua desmineralitzada
- Menys inversió mitjançant l'ús d'un vaporitzador d'amoníac comú.

Aplicant aquestes mesures s'aconsegueixen uns estalvis d'operació de més d'1.000.000 €/any.

2.2.4. Control eficient de processos

L'automatització d'una planta de fabricació consisteix en el disseny i construcció d'un sistema de control basat en eines de mesura (senyors, instruments, equips, etc.) i l'aplicació de tractaments de dades.

L'automatització de processos de fabricació és important, no només per millorar la qualitat del producte i la seguretat en el treball sinó també per augmentar l'eficiència del procés en si mateix i contribuir a l'eficiència energètica.

MTD 4. Implementar tècniques de control eficient de processos.

En aquesta línia, es poden remarcar les tècniques següents:

- El control adequat del procés en tots els modes de funcionament.
- Identificar els indicadors importants pel que fa al rendiment i dels mètodes per mesurar i controlar adequadament aquests paràmetres (flux, pressió, temperatura).
- Documentar i analitzar les condicions anormals de funcionament per identificar les causes i contrarestar-les, a fi de garantir que els esdeveniments no desitjats no es repeteixin.

Cal tenir en compte diferents factors a considerar en el disseny d'un sistema de control. Una anàlisi inicial dels sistemes que formen part del procés pot desenvolupar les restriccions existents per l'eficiència del procés. A més, és necessari identificar els nivells d'acompliment en termes de qualitat del producte i els requisits reglamentaris i de seguretat en el lloc de treball. El sistema de control ha de ser fiable i fàcil d'utilitzar. La gestió i el processament de les dades recollides són també factors que han de ser considerats en el disseny del sistema de control.

El sistema de control ha de mantenir l'equilibri entre la precisió, la consistència i la flexibilitat necessària per augmentar l'eficiència global del procés de fabricació en relació amb la necessitat de controlar els costos de producció. En aquest sentit, és important determinar si és necessari implantar una tecnologia de control de processos més sofisticada o si, en canvi, és suficient una solució simple.

Els sistemes moderns de control de processos es basen en un conjunt de tècniques com les següents:

- Els controls convencionals com els PID i control en cascada i avançats com el MBPC (models predictius basats en models) o el control adaptatiu.
- Monitorització i control estadístic.

El controlador lògic programable (PLC) és el cervell del sistema de control. Es tracta d'un petit ordinador industrial que funciona de forma fiable a l'entorn d'una instal·lació de fabricació. Aquesta tecnologia redueix efectivament la mà d'obra involucrada en el funcionament d'equips complexos i proporciona una gran fiabilitat i flexibilitat. Les dades operatives són recollides i tractades per una infraestructura que, generalment, incorpora sensors i instrumentació de planta, així com elements de control finals (SCADA). El sistema SCADA ha estat una part integral del disseny d'un sistema de control, que proporciona a la persona usuària una "finestra a temps real" del procés.

2.2.5. Manteniment preventiu per assolir el funcionament òptim

El manteniment de totes les plantes i equips és essencial i forma part d'un ENEMS. És important mantenir un programa de manteniment i registre de totes les inspeccions i de les activitats de manteniment.

El manteniment preventiu té com a objectiu mantenir operativa la producció i els processos productius durant tota la vida útil de les instal·lacions. Actualment, els programes de manteniment preventius gestionen fàcilment utilitzant programes informàtics. L'ús de programari facilita el registre dels problemes i la creació d'una base de dades estadística que pot ajudar a preveure futures incidències, entre altres qüestions.

MTD 5. Posar en pràctica programes de manteniment preventiu per optimitzar l'eficiència energètica.

Els operadors de les plantes industrials han d'encarregar-se de la realització de tasques com les següents:

- Netejar la brutícia de les superfícies d'intercanvi i canonades.
- Assegurar que els equips amb funcionament ajustable estan optimitzats.
- Apagar els equips quan no estan en ús o no són necessaris.
- Reportar fuites dels sistemes de distribució.
- Substitució, per exemple, dels coixinets gastats.

2.2.6. Seguiment i anàlisi de mesures

La comprovació de mesures és una part essencial d'un sistema de gestió de l'eficiència energètica, ja que és un pas imprescindible en qualsevol sistema de gestió (planificar-fer-verificar-actuar).

MTD 6. Establir procediments per monitoritzar i mesurar de manera regular els paràmetres importants de l'operació que tenen un impacte significatiu en l'eficiència energètica de la planta.

La mesura i el seguiment formen part del control del procés. Les mesures aporten informació sobre les dades que influeixen directament en l'eficiència energètica (MWh, kg vapor, temperatura, pressió, etc.).

Un aspecte clau del seguiment i anàlisi de mesures és extreure'n els costos energètics reals i no els valors hipotètics. Aquest valor dona arguments sòlids per millorar l'eficiència energètica. No obstant això, en les plantes existents en les quals pot resultar difícil implementar nous dispositius de control, es poden

utilitzar estimacions (sobre la base d'hipòtesi raonables justificades), càlculs o mesures indirectes.

2.2.7. Auditories energètiques

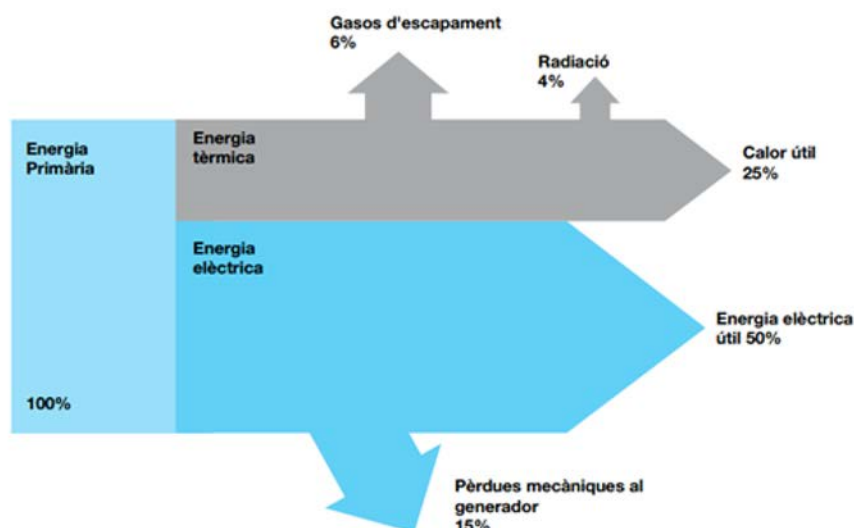
MTD 7. Identificar els aspectes que més influència tenen sobre l'eficiència energètica mitjançant la realització d'una auditoria energètica.

El terme “auditoria energètica” s'entén com una inspecció sistemàtica que inclou un estudi i anàlisi dels fluxos d'energia en un edifici, procés o sistema amb l'objectiu de comprendre la dinàmica de l'energia del sistema objecte d'estudi. Típicament, una auditoria d'energia es porta a terme per buscar oportunitats per reduir la quantitat demandada d'energia en el sistema sense impactar negativament en la sortida.

Les auditories es realitzen per determinar la validesa i fiabilitat de la informació, així com per proporcionar una avaluació del control intern d'un sistema. L'auditoria es basa en el mostreig, no és una garantia que les seves conclusions siguin exactes, però si aporten una mesura de magnitud raonable. No obstant això, l'objectiu és reduir al mínim qualsevol error i, per tant, fer que la informació sigui vàlida i fiable.

Un dels resultats d'una auditoria energètica que resulta molt útil és el diagrama de Sankey que representa la distribució de les energies involucrades en un procés o transformació energètica determinada. És un bon instrument per analitzar els fluxos d'energia i avaluar-ne les pèrdues i els rendiments.

Figura 11. Exemple de diagrama de Sankey d'una central de cicle combinat [11]



2.2.8. Mètodes d'anàlisi

MTD 8. La utilització d'eines i metodologies apropiades per identificar i quantificar l'optimització energètica.

Alguns d'aquests mètodes són els següents:

Anàlisi Pinch

Es tracta d'una metodologia per minimitzar el consum d'energia en els processos mitjançant el càlcul de reducció de consum energètic termodinàmicament

factible, i assolir-ho mitjançant l'optimització dels sistemes de recuperació de calor i millores en el subministrament d'energia i en les condicions d'operació del procés. També es coneix com integració de processos o d'integració energètica (vegeu l'apartat 2.2.3), però són aquestes últimes les que són conseqüència d'haver aplicat la metodologia Pinch.

Aquesta metodologia es basa en convertir tots els processos on hi ha transferència de calor en processos d'extracció de calor o fred. Una extracció de calor es defineix com un refredament, i una extracció de fred com un escalfament.

L'Anàlisi Pinch representa en un mateix gràfic temperatura-entalpia dues línies que acumulen les extraccions de calor i les de fred per tal fer el gràfic de les possibles transferències teòriques entre ambdós sistemes.

Anàlisi energètica i exergètica

L'anàlisi energètica (o entàlpica) i l'anàlisi exergètica són tècniques basades en la determinació de l'energia o exergia dels fluxos del sistema tèrmic estudiat i dels balanços d'energia o exergia dels components connectats per aquests fluxos.

Les anàlisis d'energia i exergia es poden realitzar en paral·lel, i es mesuren en les mateixes unitats. No obstant això, l'anàlisi d'exergia s'utilitza menys i és més complexa, tot i ser més útil perquè apunta directament allà on es pot estalviar energia.

L'anàlisi d'energia només té en compte l'energia perduda a través de la frontera del sistema (pèrdues de calor, etc.). No obstant això, cada transformació d'energia condueix a una reducció de la qualitat de l'energia: l'energia es conserva però la seva utilitat sempre disminueix. En aquest marc, l'exergia és una mesura definida per tenir en compte la qualitat de l'energia. L'electricitat o el treball mecànic són formes de l'energia de més alta qualitat, de manera que la seva energia i exergia són exactament els mateixos. D'altra banda, una massa d'aigua escalfada 20 °C per sobre de la temperatura ambient té energia, però el seu contingut d'exergia és insignificant. El contingut d'exergia mesura exactament la convertibilitat màxima (en unitats d'energia) d'un flux determinat en altres formes d'energia. Per tant, l'exergia no és conservativa, ja que en cada procés l'exergia d'entrada és sempre més gran que l'exergia del flux que en surt. Aquesta diferència s'anomena irreversibilitat i la seva quantificació es realitza a través de l'anàlisi exergètica que permet detectar on es perd la qualitat de l'energia, és a dir, on es pot estalviar energia.

Es pot aplicar l'anàlisi energètica i exergètica a un procés, per exemple, en el que es disposa d'una caldera per produir vapor a baixa pressió. Si es porta a terme una anàlisi de l'energia, aquesta caldera pot tenir una eficiència en l'ús de l'energia del 90 %, que pot conduir a ser percebut com un dispositiu eficient. No obstant això, la qualitat de l'energia continguda en forma de vapor d'aigua és baixa, per la qual cosa l'eficiència d'exergia de la caldera és, aproximadament, un 25 %. Aquesta xifra tan baixa indica que hi ha un gran potencial d'estalvi d'energia si la caldera és substituïda, per exemple, per un generador de vapor de recuperació de calor d'un sistema de cogeneració, en el qual els gasos calents d'entrada s'utilitzen per accionar una turbina que captura energia d'alta qualitat. Es pot considerar intuïtivament que a menys qualitat de l'energia de sortida de la caldera, més serà la seva eficiència energètica.

Anàlisi termoeconòmica

Aquestes tècniques ajuden a comprendre el procés de formació de costos, minimitzar els costos globals dels productes i assignar els costos a més d'un producte produït pel mateix procés.

La termoeconomia avalua el cost dels recursos consumits i les irreversibilitats del sistema en termes del procés de producció global. Assenyala com els recursos poden ser utilitzats de forma més eficient per tal d'estalviar-los, expressa l'efecte econòmic de les ineficiències i s'utilitza per millorar la rendibilitat dels processos de producció.

Avaluar el cost de les transferències de calor i dels processos en una planta ajuda a entendre el procés de formació de costos, des del consum energètic fins a la transferència d'exergia als productes finals.

Models energètics

Els models energètics, bases de dades i balanços, són eines útils per dur a terme una anàlisi en profunditat de l'ús global que es fa de l'energia i és probable que siguin part d'una auditoria energètica.

Un model és un pla o descripció dissenyada per mostrar com i on s'utilitza l'energia en una instal·lació o sistema. Per tant, el model busca registrar la informació tècnica sobre la instal·lació, l'equip o el sistema. Es registrarà el tipus d'equip, el consum d'energia i les dades de funcionament, com ara el temps de funcionament. Ha de ser prou complet però no amb excés de detall, de fàcil interpretació i d'accés a diversos usuaris (departaments com ara operacions, gestió d'energia, manteniment, compres, comptabilitat analítica, etc.).

A l'hora d'aplicar un model energètic o un balanç és cabdal definir els límits del sistema.

2.3. Aplicació de les millors tècniques disponibles per millorar l'eficiència energètica pel que fa als sistemes consumidors d'energia, processos, activitats i equips

Un cop revisades les MTD derivades d'analitzar les instal·lacions industrials com un tot, en aquest apartat es presenten les MTD en un detall més concret: sistemes consumidors d'energia, processos, activitats i equips, com són els processos de combustió, de generació elèctrica, de producció de vapor o d'aire comprimit. En aquest apartat s'assumeix que les tècniques descrites en la secció 2.2 també han estat implementades als sistemes, dins del seu procés d'optimització.

Dins de cada procés o sistema, s'expliquen les diferents tècniques considerades com a MTD.

Totes les mesures en eficiència energètica tenen com a objectiu reduir el consum de combustible, de manera que el benefici obtingut és doble: per una banda l'estalvi econòmic i, per altra banda, la reducció de les emissions associades a la quantitat de combustible estalviat.

Per il·lustrar les MTD següents se suggereix consultar els infogrames que l'Institut Català d'Energia té a la seva pàgina web amb mapes de mesures en eficiència energètica a la indústria [9]. Aquests mapes de mesures permeten visualitzar sobre una representació esquemàtica de la instal·lació les mesures aplicables a cadascun dels seus components com: cremadors, canonades, motor, alhora que els diferents paràmetres del sistema com la pressió o el cabal, etc.

2.3.1. Processos de Combustió

La combustió és una reacció química exotèrmica que es produeix entre un combustible i un comburent (oxigen). Aquesta gran quantitat d'energia que s'allibera s'aprofita en processos industrials molt diversos. Així, el procés de combustió s'utilitza àmpliament tant per a l'escalfament directe com l'indirecte. En el primer dels casos la calor es transfereix directament al procés (per exemple en una instal·lació d'un forn de ceràmica o una torre de fusió d'alumini), mentre que en el cas de l'escalfament indirecte la calor es transporta mitjançant la circulació d'un fluid (per exemple els circuits de vapor, d'oli tèrmic o bé d'aigua).

Les reaccions de combustió només es poden produir de forma perfecta en condicions de laboratori. Només en aquest cas es pot aconseguir la reacció completa del carboni amb l'oxigen per donar CO_2 i calor en les proporcions estequiomètriques adequades. L'aplicació del procés a la indústria no permet obtenir la combustió perfecta però si una reacció completa, sempre que es treballi amb excés d'oxigen. Evidentment, quan la reacció és incompleta s'empitjora l'eficiència del procés tèrmic i es generen emissions indesitjades, doncs la quantitat de la calor alliberada és menor i, a més, s'allibera CO en comptes de CO_2 .

La principal ineficiència en un procés de combustió són les pèrdues de calor, de manera que en els processos de combustió l'energia es pot perdre en forma de calor associada als gasos d'escapament i/o de pèrdues per les parets o obertures del mateix sistema.

Pel que fa a les pèrdues de calor per les parets del sistema de combustió es poden minimitzar amb l'ús de material suficientment aïllant. Les operacions de col·locació d'aïllament tenen un cost reduït, poden programar-se aprofitant períodes d'aturada de la instal·lació per tal de minimitzar l'impacte sobre el procés de producció, i acostumen a caracteritzar-se per períodes de retorn de la inversió breus.

Reduir les pèrdues de calor suposa un estalvi d'energia i una reducció dels contaminants de la combustió. A continuació, es detallen les tècniques, probablement més emprades, que redueixen les possibles pèrdues de calor mitjançant la recuperació de l'energia associada als gasos d'escapament.

MTD 9. Optimitzar l'eficiència energètica d'un procés industrial de combustió

Són MTD per a l'optimització de la combustió industrial els factors següents:

- Reducció de la temperatura dels gasos d'escapament (per aprofitar aquesta temperatura per al preescalfament a l'entrada de procés).
- Cremadors recuperatius i regeneratius.
- Reducció de l'excés d'aire.
- Canvi de combustible i/o elecció del més adequat a cada cas.
- Tècniques específiques d'operació i control.
- L'oxicombustió consisteix en utilitzar oxigen pur com a comburent en comptes d'aire, la qual cosa implica un augment tant de la temperatura de combustió com de la transferència d'energia al procés i ajudar, així, a reduir la quantitat de combustible no cremat i augmentar, per tant, l'eficiència energètica, alhora que es redueixen les emissions de NO_x .

2.3.1.1. Recuperació de calor dels gasos d'escapament (reducció de la temperatura dels gasos que surten de la cambra de combustió)

En l'àmbit operatiu, com més baixa sigui la temperatura dels gasos de combustió millor serà l'eficiència energètica. No obstant això, es poden presentar alguns inconvenients si la temperatura dels gasos de combustió es redueix per sota de

determinats nivells. En particular, operant per sota del punt de rosada dels àcids presents es pot produir un deteriorament de les superfícies metàl·liques degut a la seva condensació. No obstant això, per reduir aquests efectes negatius és possible utilitzar materials que siguin resistents a la corrosió, tot i que a vegades cal recollir i tractar el condensat.

La reducció de la temperatura dels gasos d'escapament es pot aconseguir de les maneres següents:

- Dissenyar la instal·lació per funcionar amb la càrrega màxima.
- Maximitzar la transferència de calor mitjançant la instal·lació de deflectors o altres dispositius per generar la turbulència del fluid, amb la qual cosa augmenta d'aquesta manera l'eficiència del bescanvi de calor i la millora o l'ampliació de les superfícies de transferència de calor.
- Aprofitar el calor residual dels gasos de combustió mitjançant la seva utilització en un altre procés com, per exemple, mitjançant la generació de vapor utilitzant economitzadors.
- Instal·lar un preescalfador d'aire (o aigua) o preescalfar el combustible mitjançant el bescanvi de calor amb els gasos de combustió (vegeu el cas particular següent). Convé remarcar que un determinat procés de fabricació per si mateix ja pot requerir preescalfament de l'aire quan es requereix una temperatura de flama alta. També es pot utilitzar per preescalfar l'aigua d'alimentació de la caldera o per escalfar aigua per a ser utilitzada en sistemes d'aigua calenta de xarxes de calor urbanes.
- Mantenint netes les superfícies de transferència de calor, que es poden anar cobrint gradualment de sutge, per tal de mantenir una alta eficiència en la transferència de calor. Es poden utilitzar bufadors de sutge periòdicament per mantenir les àrees de convecció netes. La neteja de les superfícies de transferència de calor a la zona de combustió es fa, generalment, durant les interrupcions per a inspecció i manteniment, però en alguns casos es pot realitzar una neteja d'aquestes zones sense necessitat d'aturada.
- Amb un bon disseny del sistema que assegurí que les necessitats de calor del procés en qüestió coincideixin amb la potència tèrmica alliberada durant la combustió (no ha d'haver-hi excés de potència tèrmica). Això implica haver de tenir un control acurat de la potència d'escalfament del cremador mitjançant la reducció del flux de combustible, per exemple amb la instal·lació d'uns injectors menys potents (en cas de combustibles líquids) o mitjançant la reducció de la pressió de subministrament del combustible (en cas de combustibles gasosos).

L'efecte col·lateral més important d'aplicar les tècniques de reducció de la temperatura dels gasos de combustió és que, en alguns casos, poden augmentar les emissions que afecten a la qualitat de l'aire, per exemple:

- Preescalfar l'aire de combustió provoca un augment de la temperatura de flama, que provoca un augment en la formació i emissió de NO_x i que pot conduir a superar els límits d'emissió establerts per la normativa o per l'Administració.
- Alguns sistemes d'eliminació de gasos, com ara NO_x o SO_x, només treballen en un interval de temperatures determinat. Quan s'instal·len per disminuir, el compromís entre el sistema de depuració de gasos i la recuperació de calor es torna més complicat i és difícil de justificar des del punt de vista econòmic.
- En alguns casos, és necessària una temperatura mínima a la xemeneia per assegurar la dispersió adequada dels gasos de combustió. Una opció per millorar la dispersió és escalfar-los amb gas natural abans que surtin de la xemeneia, tot i que aquesta opció no és un procediment que s'apliqui de manera regular a la petita indústria, sinó als grans complexos industrials de l'àmbit químic o petrolier.

L'aplicació de la tècnica de reducció de la temperatura dels gasos de combustió es pot implementar en plantes existents, tot i que la condició de tenir l'espai necessari per a aquest fi n'és un factor limitant.

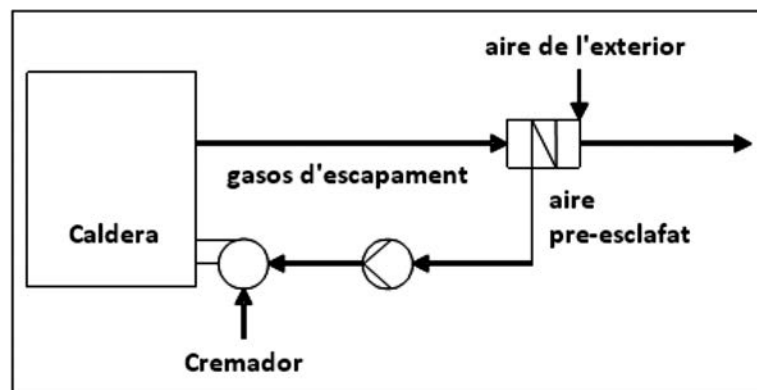
Algunes aplicacions estan limitades per la diferència entre la temperatura d'entrada al procés i la temperatura d'escapament dels gasos de combustió. El valor d'aquesta diferència és el resultat d'un compromís entre la recuperació d'energia i el cost dels equips.

Evidentment, la recuperació de calor depèn de l'existència d'un procés adjacent que la pugui aprofitar (consulteu la secció 2.3.3).

Cas particular: preescalfador d'aire (bescanviador de calor aire-aire)

Un cas particular de l'aplicació d'aquesta tècnica és l'ús d'un preescalfador d'aire. L'objectiu del preescalfador d'aire és escalfar l'aire exterior que alimenta el cremador. En altres paraules, els gasos de la combustió es refreden en entrar en contacte indirecte amb l'aire que entra al cremador, que és sovint a temperatura ambient (més freda que la dels gasos d'escapament). Com més alta sigui la temperatura de l'aire d'entrada millor serà la combustió i l'eficiència general de la caldera s'incrementarà. A més, per cada 20 °C de disminució en la temperatura dels gasos d'escapament, es pot considerar un augment de rendiment d'un 1 %. La figura 11 mostra un diagrama d'un sistema de combustió amb un preescalfador d'aire.

Figura 12. Esquema d'un sistema amb preescalfador d'aire de combustió [10]



Una manera menys eficient, però més simple per aconseguir un lleuger preescalfament, és instal·lar la presa d'aire del cremador al sostre de la sala de calderes on, en general, l'aire és sovint de 10 a 20 °C més calent, en comparació amb la temperatura exterior. D'aquesta manera, és possible compensar parcialment la pèrdua d'eficiència.

Aquesta darrera opció, amb un cost d'implementació insignificant, pot produir augments en l'eficiència prop de l'1 % per a calderes de vapor amb gasos de combustió que tinguin una temperatura de $T_{\text{gas}} = 240$ °C, si en lloc d'agafar aire a una temperatura mitjana de 10 °C s'agafa a la temperatura de 30 °C que té l'aire a la part superior de la sala de calderes.

Una altra solució per escalfar l'aire d'entrada al cremador és fer-ho a través d'un tub d'escapament de doble paret. Els gasos de combustió que surten de la caldera es fan passar pel tub interior i l'aire que alimenta el cremador per la segona capa.

A la pràctica, un preescalfador d'aire pot contribuir a un augment del rendiment d'un 3 a un 5 %.

Altres beneficis d'un preescalfador d'aire són els següents:

- L'aire calent asseca el combustible, per la qual cosa és particularment aplicable a combustibles com el carbó o els biocombustibles.
- És possible utilitzar una caldera més petita si es planeja utilitzar un APH (o bescanviador de calor d'aire-aire) en la fase de disseny.
- Preescalfament de les matèries primeres o productes del mateix procés.

Tot i que el preescalfador d'aire presenta molts avantatges teòrics, poden haver-hi algunes dificultats pràctiques associades a la instal·lació:

- Un APH és un bescanviador de calor d'aire-aire amb unes dimensions considerables i, per tant, l'espai necessari per a la seva instal·lació és important. A més, l'intercanvi de calor entre gasos no és sempre tan eficient com l'intercanvi de calor entre l'aire i un líquid com l'aigua.
- La seva instal·lació provocarà una pèrdua més gran de càrrega dels gasos de combustió, fet que implica que el ventilador del cremador hagi de proporcionar una pressió més alta per vèncer-la.
- Cal assegurar en tot moment que el cremador rep aire preescalfat per no comprometre l'estabilitat de la flama. L'aire escalfat ocupa un volum més gran, el que complica el control de la flama si la temperatura de l'aire d'entrada és variable.
- Com s'ha comentat abans, es poden tenir més emissions de NOx a causa de temperatures de flama més altes.
- El fet d'alimentar el cremador amb l'aire calent té un impacte en les pèrdues de calor associades als gasos de combustió de la caldera.

La instal·lació d'un preescalfador d'aire és una operació relativament poc costosa amb una gran aplicació per a calderes noves en fase de disseny. En canvi, el muntatge d'un APH a una caldera existent sovint és una operació massa complexa i presenta un augment de l'eficiència limitat. A més, les operacions que impliquen una modificació de les condicions de l'aire d'entrada sovint hi ha limitacions tècniques o de seguretat contra incendis.

Els preescalfadors d'aire són intercanviadors de calor aire-aire, el disseny dels quals depèn del rang de temperatura. Així, per exemple, el preescalfament d'aire no és possible en cremadors de tiratge natural.

A la pràctica, l'estalvi econòmic obtingut per l'acció de preescalfar l'aire de combustió pot representar un percentatge considerable en termes de la quantitat de vapor generada, com es mostra en la taula 5. Fins i tot en calderes petites, els estalvis poden variar en diversos GWh per any. Per exemple, per a una caldera de 15 MW, és possible aconseguir un estalvi d'uns 2 GWh/any o 30.000 €/any i evitar l'emissió d'unes 400 tones de CO₂ a l'any.

Taula 5. Potencial d'estalvi de preescalfament de l'aire de combustió [10]

Paràmetres	Valor
Estalvi d'energia	1.000 - 10.000 MWh/any
Reducció CO ₂	200 - 2.000 tm/any
Reducció NOx	266 - 2.660 kg/any ^[3]
Reducció PST	2,8 - 28 kg/any ^[3]
Estalvi en EUR	30.000 - 300.000 €/any
Hores de funcionament anuals	8.700 h/any

Com s'ha comentat anteriorment, mitjançant els gasos de combustió també és possible pre-escalfar l'aigua d'alimentació de la caldera en comptes de l'aire o escalfar aigua per ser utilitzada en sistemes d'aigua calenta (com ara els *district-heatings* urbans).

2.3.1.2. Cremadors recuperatius i regeneratius

Els cremadors recuperatius i regeneratius s'han desenvolupat per permetre la recuperació directa de calor residual per ser utilitzada per al preescalfament de l'aire de combustió:

- Els **cremadors autorecuperatius** són un tipus de cremador que fa també la funció de recuperador de calor per extreure calor dels gasos residuals que surten del forn i preescalfar l'entrada d'aire de combustió. **Amb els sistemes de cremadors recuperatius s'aconsegueixen estalvis d'energia prop del 30 % en comparació amb els cremadors convencionals.** Normalment, però, l'aire només es preescalfa fins a una temperatura màxima de 550 a 600 °C. L'ús de cremadors recuperatius és possible als processos que requereixen temperatura elevada (700-1.100 °C).

Figura 13. Cremador autorecuperatiu en configuració de flama indirecta (tub radiant tipus SER) [12]

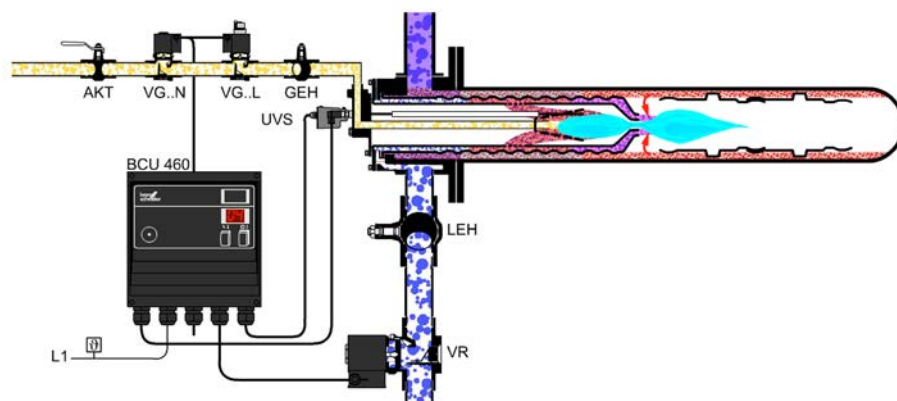
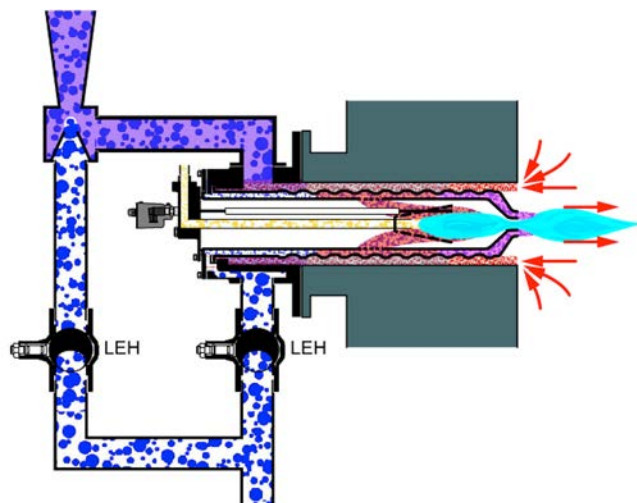


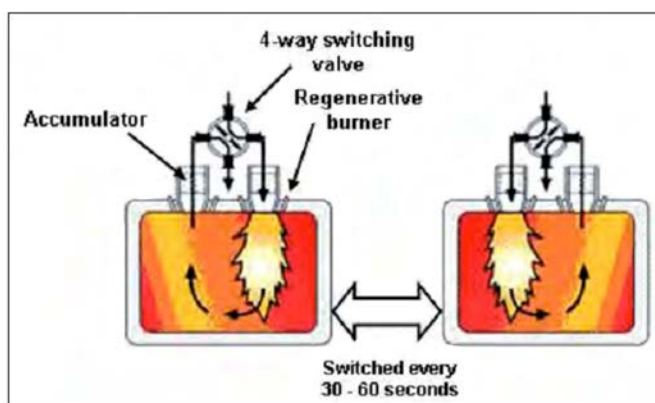
Figura 14. Cremador autorecuperatiu en configuració de flama directa [12]



- Els **cremadors regeneratius** operen per parelles i funcionen segons el principi d'acumulació de calor de curta durada mitjançant l'ús de regeneradors de

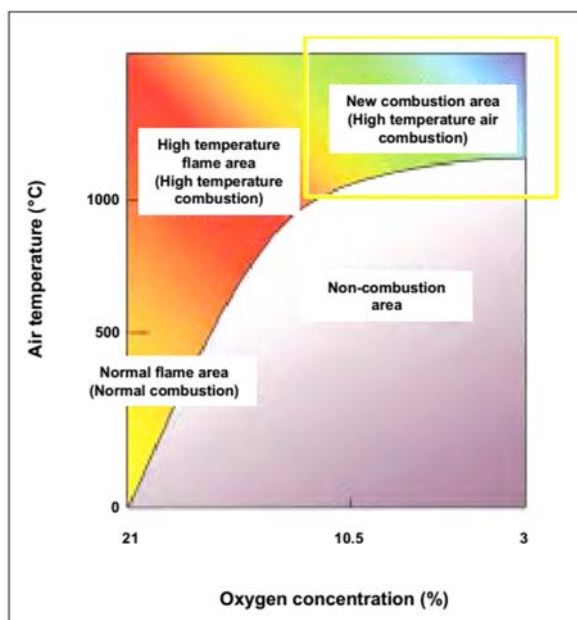
calor ceràmics (vegeu figura 15). **Permeten recuperar entre el 85 % i el 90 % de la calor dels gasos d'escapament**, de manera que l'aire de combustió d'alimentació es pot preescalfar a altes temperatures fins a 100 o 150 °C per sota de la temperatura de funcionament del forn. Amb les aplicacions habituals d'aquest tipus de cremadors es treballa a temperatures des de 800 a 1.500 °C. La reducció del consum de combustible pot arribar fins a un 60 %.

Figura 15. Principi de funcionament dels cremadors regeneratius [10]



Actualment, tant els cremadors recuperatius com els regeneratius (tecnologia HiTAC) s'estan utilitzant juntament amb un nou mode de combustió que es caracteritza per mantenir una temperatura de flama homogènia, sense els pics de temperatura d'una combustió convencional, i amb una zona de combustió ampliada considerablement. La figura 16 mostra les diferents regions de la combustió, en funció de la concentracions d'oxigen i la temperatura de l'aire.

Figura 16. Les diferents regions de la combustió [10]



Quant a les temperatures d'operació habituals, l'aire d'alimentació dels forns industrials pot arribar a temperatures d'entre 800 i 1.350 °C amb l'ús d'un intercanviador de calor d'alt rendiment. Un intercanviador de calor regeneratiu modern pot recuperar prop del 90 % de la calor residual, el que representa un estalvi energètic molt important.

La limitació més important de la tecnologia actual de cremadors recuperatius/regeneratius és el conflicte entre l'augment de l'eficiència energètica i la reducció dels productes de combustió (CO_2 i CO) amb l'augment d'emissions de NO_x . A causa de les altes temperatures de l'aire preescalfat i dels temps de residència, les flames convencionals tenen grans pics de temperatura que comporten un fort augment de les emissions de NO_x . Això és provocat perquè la formació de NO_x , per combustibles que no contenen nitrogen, és causada per la concentració d'oxigen i del temps de residència però, principalment, per la temperatura.

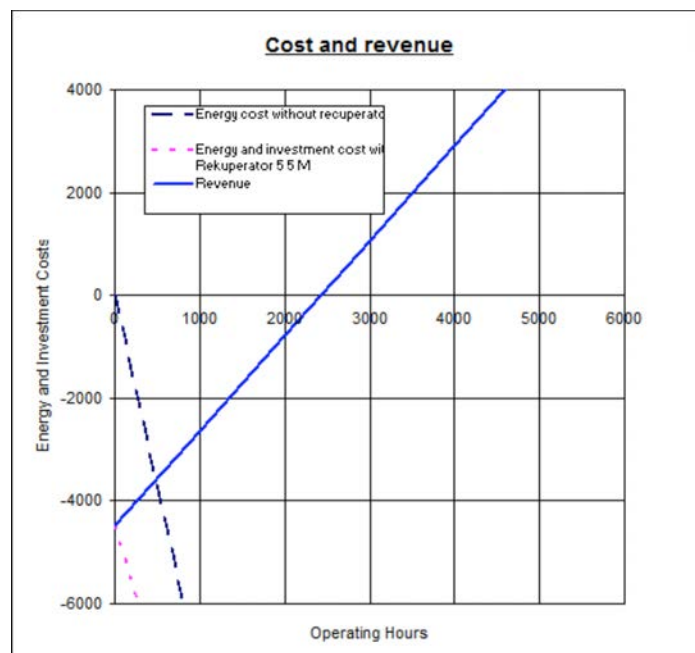
Els cremadors recuperatius i regeneratius són d'ús generalitzat, tot i que la seva aplicació en sistemes de combustió acostuma a estar vinculada a processos tèrmics d'alta temperatura (per sobre dels 800 o 850 °C) i que, addicionalment, siguin de cicle continu (365 dies/any i amb una sola parada anual per manteniment). El motiu és, bàsicament, que el rendiment d'aquests sistemes és més alt quan més alta és la temperatura dels fums i, per tant, com més alta és la temperatura requerida pel procés.

Per altra banda, els grups de regulació de combustible i comburent d'aquests sistemes d'aire calent són més complexos que els que es fan servir per aire fred ja que s'ha de compensar la disminució d'oxigen a l'aire quan està calent (degut, bàsicament, a la dilatació de les molècules d' O_2 i N_2), el que es tradueix amb unes lambdes reductores a temperatures d'aire fred i lambdes estequiomètriques o oxidants amb aire calent.

Aquests cremadors tenen com a desavantatge els costos d'inversió. La reducció dels costos d'energia en pocs casos compensa el cost d'inversió. Per això, l'augment de la productivitat en el forn és un factor important a incloure en l'anàlisi cost/benefici.

Habitualment, es realitzen els càlculs de costos d'instal·lació d'un sistema de combustió amb aire fred i els càlculs de costos també amb aire calent. Posteriorment, coneixent el cost per kWh de gas i les hores de funcionament del sistema de combustió (idealment, 24 h/dia), es fa una valoració del retorn de la inversió a realitzar en hores de funcionament (figura 17).

Figura 17. Exemple de retorn per cremador autorecuperatiu ECOMAX 5M de 250 kW a forn de tractament tèrmic d'acer inoxidable [12]



En l'apartat 3.2.2 de la present Guia es presenta un exemple de substitució d'un cremador autorecuperatiu.

2.3.1.3. Reducció de l'excés d'aire

En qualsevol procés de combustió industrial s'ajusten els paràmetres de treball amb un determinat excés de comburent, habitualment d'aire, per compensar les fluctuacions de les propietats del combustible, la variació de les condicions ambientals, del tiratge de la xemeneia, del cabal d'aportació de combustible i de la relació de combustible/aire a diferents règims de treball del cremador, amb l'objectiu d'evitar la formació d'incrementats (sutge, CO, etc.) i d'aconseguir extreure la màxima calor de la reacció.

Atès que una bona part de l'energia aportada pel combustible es perd pels gasos d'escapament, una bona manera de reduir les pèrdues és reduint el cabal d'aquests gasos de sortida. A fi de reduir aquest cabal, cal reduir al mínim l'excés d'aire, ajustant el flux d'aire proporcionalment al flux de combustible. Una bona opció per portar això a la pràctica és mitjançant la mesura automàtica del contingut d'oxigen dels gasos de combustió i fer que el sistema actuï en conseqüència.

Depenent de la velocitat de fluctuació de la demanda tèrmica del procés, l'excés d'aire es pot ajustar manualment, o bé controlar automàticament. Un nivell insuficient d'aire provoca l'extinció de la flama, i la seva reignició pot causar danys al sistema. Per tant, per raons de seguretat sempre cal mantenir un cert grau d'excés d'aire (generalment, d'un 1 a un 2 % per a combustibles gasosos i del 10 % per a combustibles líquids).

Per cada reducció de l'1 % d'O₂ el rendiment de la combustió s'incrementa un 0,6% per al gas natural, un 0,7 % per al gasoil i un 0,75 % per al fuel. En calderes industrials és factible augmentar el rendiment de la combustió prop d'un 2 %. En calderes i cremadors que no treballen sempre a potència nominal l'estalvi pot ser, a la pràctica, molt més gran.

La reducció de l'excés d'aire pot donar lloc a la combustió incompleta i, conseqüentment, a la formació de monòxid de carboni, hidrocarburs i sutge, els quals poden superar els valors límit d'emissions. A la pràctica, l'excés d'aire s'estableix en valors amb què les emissions queden per sota del valor límit. A més, la reducció de l'excés d'aire és limitada ja que provoca l'augment de la temperatura dels gasos i temperatures excessivament altes podrien danyar tot el sistema.

L'ajustament mínim de l'excés d'aire per tal de mantenir les emissions per sota del valor límit depèn tant del cremador com del procés. Cal tenir en compte que l'excés d'aire augmentarà si s'utilitzen com a combustible residus sòlids. No obstant això, les incineradores de residus es dissenyen optimitzades per a finalitat.

L'optimització de la combustió en calderes, mitjançant el control en continu d'O₂ als gasos de combustió, permet estalvis importants, sense grans inversions. A més, en no haver d'escalfar tanta quantitat d'aire, es redueix el consum de combustible i, per tant, també de les emissions relacionades.

A l'apartat 3.2.3 de la present Guia es presenta un exemple de substitució d'un cremador amb control de velocitat del ventilador per a l'aportació d'aire a la cambra de combustió mitjançant un variador de freqüència i control d'oxigen a la sortida de fums.

2.3.1.4. Elecció del combustible adequat

El tipus de combustible utilitzat en el procés de combustió té un impacte cabdal en la quantitat d'energia calorífica alliberada per unitat de combustible utilitzat.

Així mateix, el percentatge d'excés d'aire necessari també depèn del combustible utilitzat, accentuant encara més aquesta dependència en el cas de combustibles sòlids. L'elecció del combustible, per tant, és una opció que permet reduir l'excés d'aire i augmentar l'eficiència energètica del procés de combustió. Com a regla general, com més elevat és el valor del poder calorífic del combustible, més alta és l'eficiència del procés de combustió.

Certes emissions s'associen amb determinats combustibles, com les partícules, els SO_x i els metalls que s'associen amb el carbó i, per altra banda, alguns combustibles produeixen menys contaminants durant la combustió (com el gas natural, que conté molt poc sofre que s'oxida a SO_x). Es disposa d'informació sobre les emissions i els beneficis aportats per diferents combustibles als diversos BREF verticals de cada sector, en els quals l'elecció de combustible es considera que té un efecte significatiu sobre les emissions. Les emissions dels tres principals gasos amb efecte hivernacle, de NO_x i PST per a cada combustible fòssil, es detallen en la taula següent:

Taula 6. Emissions i altres paràmetres relacionats amb diferents combustibles [4]

	PCI	Densitat	Preu	Emissions				
				CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NO _x	PST
	kWh/kg	kg/m ³	€/kWh	kgCO ₂ /MWh			kgNO _x /MWh	kgPST/MWh
Fuel	11,16 ^[2]	1.000	0,0498 ^[13]	273 ^[2]	0,01044 ^[2]	0,00540 ^[2]	1,84680 ^[3]	0,07200 ^[3]
Gasoil C	11,78 ^[2]	900	0,086 ^[13]	263 ^[2]	0,00612 ^[2]	0,00252 ^[2]		
GN	17,18 ^[2]	0,62	0,0362 ^[14]	202 ^[2]	0,00504 ^[2]	0,00324 ^[2]	0,26640 ^[3]	0,00281 ^[3]
GLP	12,63 ^[2]	-	-	234 ^[2]	0,00324 ^[2]	0,009 ^[2]		
Biomassa (fusta)	4,7 ^[6]	700	-	320,3 ^[6]	0,10920 ^[6]	0,01433 ^[6]	0,32760 ^[3]	0,54000 ^[3]
Electricitat	-	-	0,1022 ^[14]	240 ^[15]	-	-	-	-

L'opció d'utilitzar un combustible amb un valor calorífic inferior pot venir motivat per altres factors ambientals, com ara:

- que el combustible provingui d'una font sostenible (per exemple: central de producció d'electricitat i/o calor a partir de biomassa);
- la recuperació de l'energia tèrmica de gasos residuals, efluents líquids o sòlids utilitzats com a combustibles (per exemple: hidrocarburs gasosos en una refinaria o CO en el tractament de metalls no ferrosos, instal·lacions d'aprofitament energètic de residus);
- minimitzar altres impactes ambientals com ara el del transport.

L'elecció del combustible per a una instal·lació industrial se sol dur a terme majoritàriament durant la fase de disseny d'una nova instal·lació o durant el procés d'actualització o renovació de les instal·lacions existents i està fonamentada, predominantment, en el seu cost.

En el cas d'instal·lacions existents, l'elecció del combustible està limitat pel disseny de la instal·lació de combustió (per exemple, una instal·lació de combustió amb carbó no es pot adaptar fàcilment per funcionar amb gas natural). Contràriament, el canvi de gasoil a gas natural es pot dur a terme sense gaires complicacions de caire tècnic, és molt típic a la indústria catalana i s'amortitza en menys de dos anys. Aquesta elecció pot també estar limitada per l'activitat

de la planta. Per exemple, en el cas d'una incineradora de residus. L'elecció del combustible també pot estar influïda per la legislació i els reglaments, tant a escala local com nacional i per normatives d'àmbit europeu.

Com a factors incentivadors per a la implementació de la mesura, es poden subratllar els següents:

- augment de l'eficiència del procés de combustió, amb la disminució dels consum de combustible;
- reducció de les emissions d'altres contaminants;
- estalvis econòmics.

2.3.1.5. Regulació i control dels cremadors

La regulació i el control automàtic dels cremadors poden controlar la combustió mitjançant el monitoratge i el seguiment de diversos paràmetres, com són el flux de combustible, el flux d'aire, el contingut de diversos components en els gasos de combustió, com ara d'oxigen, i la demanda de calor.

En general, els beneficis ambientals aportats per aquesta millora tècnica deriven de mantenir valors optimitzats en cadascuna de les variables controlades.

En l'apartat 3.2.1 de la present Guia es presenta un exemple de millora en la regulació i la modificació del sistema integrat de control de processos que permet optimitzar la combustió tèrmica.

2.3.2. Processos i sistemes de Vapor

El vapor d'aigua s'utilitza generalment com a fluid en el transport de calor per raons de la seva naturalesa no tòxica, la seva estabilitat, el seu baix cost, l'alta capacitat tèrmica i la seva versatilitat. Sovint l'eficiència en la utilització del vapor d'aigua es passa per alt, perquè no és tan fàcil de mesurar com ho és l'eficiència tèrmica d'una caldera.

Un sistema de vapor consta d'un element de producció; la caldera, i d'un sistema de distribució. El sistema de distribució condueix el vapor des de la caldera fins als diferents punts de consum. Tot i que els sistemes de distribució semblen tenir un funcionament passiu, en realitat s'encarreguen de regular el subministrament de vapor i de respondre a les fluctuacions de temperatura i requeriments de pressió.

Els elements del sistema de distribució que cal tenir controlats pel que fa a l'eficiència energètica són les canonades de vapor, el sistema de recollida de condensat amb les trampes de vapor i el sistema de purgues.

Les canonades de vapor i les línies de retorn de condensat que no estan aïllades són una font constant de pèrdua de calor que és fàcil de solucionar. En la majoria de casos, és suficient aïllar tèrmicament totes les superfícies. A més, els danys localitzats en la superfície de l'aïllament són fàcils de reparar. Quan es transfereix calor a un procés per mitjà d'un intercanviador de calor, el vapor, en condensar-se torna l'energia en forma de calor latent. Aquesta aigua provinent de la condensació del vapor generalment es recull i es retorna a la caldera. La reutilització del condensat té entre els seus objectius la reutilització de l'energia continguda en el condensat calent, els estalvis en el cost de l'aigua, estalvis en el cost de tractament d'aigua de la caldera i estalvi de costos d'abocament d'aigües residuals.

Per altra banda, les trampes de vapor amb fuites perden quantitats significatives de vapor que impliquen grans pèrdues d'energia i un manteniment adequat redueix significativament aquestes pèrdues.

Quant a les purgues de la caldera és possible recuperar-ne l'energia utilitzant un intercanviador de calor per escalfar l'aigua de reposició.

Pel que fa al sistema d'alimentació d'aigua a la caldera, es pot optimitzar el cabal de vapor que alimenta els desairejadors per no produir pics de vapor flash, que constitueixen una pèrdua directa d'energia. Els desairejadors són dispositius mecànics que eliminen els gasos dissolts continguts en l'aigua d'alimentació de la caldera. Tanmateix, aquestes operacions s'han d'optimitzar per permetre una separació satisfactòria, amb una pèrdua petita de vapor d'aigua.

Pel que fa al manteniment del sistema de vapor, l'eliminació regular dels dipòsits i incrustacions redueix en un estalvi d'energia i en la reducció dels costos d'operació anual.

MTD 10. Optimitzar l'eficiència energètica en sistemes de vapor

Les millors tècniques disponibles per a optimitzar l'eficiència energètica en sistemes de vapor es poden classificar en tècniques aplicables durant l'etapa de disseny del sistema, tècniques de generació, tècniques de distribució, tècniques de recuperació i tècniques d'operació i control. Són les següents:

- preescalfament de l'aigua d'alimentació;
- utilització del vapor flash;
- minimització de les purgues;
- sistema de control adequat a l'operació del sistema de vapor.

2.3.2.1. Preescalfament de l'aigua d'alimentació

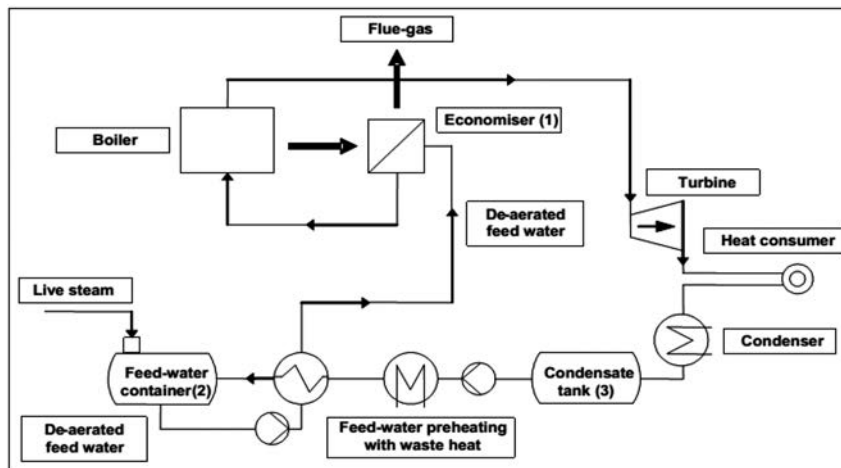
Les calderes de vapor són alimentades amb aigua per compensar les pèrdues del sistema. L'aigua d'alimentació prové del desairejador, que és l'element que elimina l'oxigen dissolt a l'aigua, el qual perjudica als materials de la caldera. L'aigua que surt del desairejador i que retorna a la caldera té, en general, temperatures d'aproximadament 105 °C, però l'aigua de la caldera, a una pressió més elevada, té una temperatura més alta. Per reduir el consum de combustible de la caldera és possible recuperar calor residual d'alguna font propera i utilitzar-la per elevar la temperatura de l'aigua d'alimentació.

Per aconseguir el preescalfament de l'aigua d'alimentació es disposa de quatre alternatives:

- Aprofitar calor residual (per exemple, d'un procés): l'aigua pot ser preescalfada per la calor residual proporcionada, per exemple, per intercanviadors de calor aigua/aigua.
- Utilitzar economitadors: un economitador (1) (en la figura 18) és un intercanviador de calor que redueix les necessitats de combustible de la caldera mitjançant la transferència de calor dels gasos de combustió a l'entrada de l'aigua d'alimentació (vegeu l'exemple de l'apartat 3.3.1).
- Emprar aigua d'alimentació desairejada: l'objectiu d'aquesta tècnica és aconseguir un augment en l'eficiència global augmentant la diferència de temperatures a l'economitador, per tal d'aprofitar el màxim d'energia provinent dels gasos d'escapament. En la figura 18 es pot observar com el condensat que prové del tanc (3) es pot preescalfar amb aigua d'alimentació desairejada provinent del tanc (2). A través d'un intercanviador de calor, l'aigua d'alimentació desairejada es refreda degut a l'intercanvi de calor amb el condensat (la calor es transferenceix a l'aigua del tanc de condensat). Com a resultat, s'aconsegueix que l'aigua desairejada d'alimentació, impulsada per la bomba d'aigua d'alimentació, tingui una temperatura més petita a l'entrada de l'economitador (1). D'això se'n deriva un augment de l'eficiència a causa

d'una diferència més gran de temperatures i la reducció tant de la temperatura dels gasos com de les pèrdues degudes a aquests gasos. En general, això estalvia vapor viu, ja que l'aigua del tanc d'alimentació està més calenta i, per tant, la quantitat de vapor necessari per desairejar l'aigua és més petita.

Figura 18. Subministrament d'aigua calenta [10]



- Preescalfant l'aigua d'alimentació que entra al desairejador mitjançant la condensació del mateix vapor utilitzat per desairejar.

La recuperació d'energia que es pot aconseguir és funció de la temperatura dels gasos de combustió (o de la temperatura del procés principal), de la selecció de la superfície i, en gran mesura, de la pressió del vapor. S'accepta àmpliament que **un economitzador pot augmentar l'eficiència de la producció de vapor en un 6 %**, tot i que cal controlar el subministrament d'aigua per tal de tenir un ús continu de l'economitzador.

D'acord amb les especificacions dels fabricants, generalment, hi ha economitzadors disponibles a partir de 0,5 MW de potència nominal. Els economitzadors dissenyats amb tubs acanalats són utilitzats per potències nominals de fins a 2 MW, i els equipats amb tubs aletejats s'utilitzen per a potències superiors a 2 MW. En el cas de potències de més de 2 MW, aproximadament el 80 % de les grans calderes aquotubulars estan equipades amb economitzadors, doncs són rendibles fins i tot quan les hores de funcionament de la caldera es troben al voltant de les 8 hores al dia (amb càrregues del 60-70 %).

Generalment, la temperatura dels gasos d'escapament excedeix en uns 70 °C a la temperatura del vapor saturat. Per un generador de vapor estàndard industrial aquesta temperatura dels gasos de combustió és d'aproximadament 180 °C, després de passar per l'economitzador.

A l'economitzador, cal tenir en compte que la temperatura mínima a que es poden refredar els gasos és el punt de rosada de l'àcid present als gasos de combustió. Aquesta temperatura depèn del combustible utilitzat i/o el contingut de sofre del combustible (és d'aproximadament 160 °C per combustibles pesants, 130 °C per a combustibles lleugers, 100 °C per al gas natural i 110 °C per residus sòlids). Les calderes d'oli tèrmic són més susceptibles a la corrosió i algunes parts de l'economitzador han d'estar dissenyades de manera que es puguin anar substituint al llarg de la seva vida útil. Si la temperatura dels gasos d'escapament es redueix significativament per sota del punt de rosada, els economitzadors poden estar subjectes als efectes de la corrosió, en general

quan el combustible té un alt contingut en sofre. Addicionalment, i a menys que es prenguin mesures especials, per sota de la temperatura de rosada el sutge s'acumula a les xemeneies i, per evitar-ho, els economitadors solen estar equipats amb un controlador de by-pass que desvia una part dels gasos d'escapament fora de l'economitador en cas que la temperatura del gasos a la xemeneia baixi massa.

En general, **s'assumeix que una reducció de la temperatura de 20 °C dels gasos d'escapament augmenta el rendiment en aproximadament un 1 %, i implica que, depenent de la temperatura del vapor i del descens de la temperatura que aconsegueix l'economitador, es pot millorar l'eficiència del sistema fins a un 6-7 % i reduir el consum de combustible entre un 5 % i un 10 %.** La temperatura de l'aigua d'alimentació augmenta generalment d'uns 100 a uns 140 °C al passar per l'economitador.

Els potencials desavantatges d'aquestes quatre possibles alternatives són el requeriment d'espai i la dificultat d'implementació en instal·lacions industrials complexes.

En plantes industrials existents, els sistemes de preescalfament de l'aigua d'alimentació no es poden integrar amb facilitat. Per exemple, la tècnica de preescalfament de l'aigua d'alimentació amb aigua d'alimentació provinent del desairejador comentada en aquest apartat és una tècnica molt poc implementada a la pràctica.

En canvi, **en plantes que produeixen gran quantitat de vapor, el preescalfament de l'aigua d'alimentació mitjançant un economitador és una pràctica habitual.** L'aprofitament de la calor residual produït per altres processos també és factible en la majoria de les instal·lacions, essent aplicable inclús en plantes amb una producció mitjana o baixa.

L'estalvi potencial d'energia a través d'aquestes tècniques depenen de diversos factors, com ara els requisits del sistema, l'estat del conducte d'extracció o la qualitat dels gasos de combustió. El retorn de la inversió per un sistema de distribució de vapor és proporcional al nombre d'hores de funcionament i el preu del combustible. A la pràctica, els estalvis d'energia poden ser significatius inclús en calderes petites. Per exemple, per a una caldera de 15 MW, es pot aconseguir un estalvi d'uns 5 GWh/any, que representa un estalvi d'uns 60.000 €/any en valor i una reducció de les emissions de l'ordre de 1.000 tones de CO₂/any, 1,3 tones de NO_x/any i 14 kg de PPT/any. Aquests estalvis són proporcionals a les dimensions de la instal·lació i, per tant, instal·lacions més grans registren un major estalvi. El període de retorn de la inversió es pot situar per sota dels dos anys. La Taula 7 mostra exemples del potencial de recuperació de calor.

Taula 7. Valors basats en gas natural com a combustible, l'excés d'aire del 15 % i temperatura final la xemeneia de 120 °C. Adaptat de [16]

Calor recuperable estimat dels gasos de combustió de calderes				
Temperatura inicial dels gasos, °C	Calor recuperable (kW)			
	Potència tèrmica de la caldera			
	7.322 kW	14.640 kW	29.290 kW	58.550 kW
205 °C	381	762	1.552	3.105
260 °C	674	1.347	2.694	5.389
315 °C	967	1.904	3.807	7.644

2.3.2.2. Reutilització del vapor flash

El vapor flash es forma quan es produeix una expansió sobtada del condensat des d'alta pressió, aleshores, una part del condensat vaporitza i forma el vapor flash. Aquest vapor flash conté aigua ja purificada i energia disponible que encara resta al condensat.

La recuperació d'aquesta energia es pot obtenir per intercanvi de calor amb l'aigua d'alimentació. Si l'aigua de descàrrega redueix prèviament la pressió en un tanc de relaxació, es forma el vapor flash a una pressió més baixa i aquest vapor pot ser enviat directament al desgasificador i mesclat amb l'aigua d'aportació. El vapor flash no conté cap sal dissolta, i representa una quantitat gens menyspreable de l'energia del condensat.

El vapor flash ocupa, però, un volum molt més important que el condensat. Per tant, cal dissenyar les canonades de retorn per evitar l'augment de la pressió ja que, en cas contrari, aquesta contrapressió generada pot obstaculitzar el bon funcionament de les trapes de vapor i d'altres components aigües amunt del sistema.

A la caldera, tal i com es fa amb el condensat, el vapor flash es pot utilitzar per escalfar l'aigua al desgasificador, tot i que hi ha altres alternatives pel seu aprofitament, com pot ser l'ús del vapor flash per escalfar aire. A l'exterior de la caldera, el vapor flash pot ser utilitzat per escalfar a temperatures inferiors als 100 °C. A la pràctica, hi ha usos del vapor fins a pressions d'1 bar.

Els requeriments del vapor de procés de baixa pressió se solen aconseguir mitjançant una reducció de la pressió del vapor d'alta pressió, però una part dels requeriments del procés es poden satisfer a baix cost mitjançant l'obtenció de vapor flash gràcies als condensats a alta pressió, tècnica particularment atractiva quan no és econòmicament viable retornar el condensat a alta pressió a la caldera.

Si es produeix vapor flash a partir d'un condensat a alta pressió, la temperatura (i el contingut d'energia) del condensat que retorna a la caldera es redueix. No obstant això, una bona combinació que permet compensar aquesta pèrdua és instal·lar també un economitador per recuperar l'energia dels gasos d'escapament de la xemeneia en benefici de l'aigua d'alimentació, fet que implica una millora de l'eficiència del conjunt. Aquesta és l'opció més rendible en termes d'eficiència energètica.

Per poder implementar aquesta solució ha d'existir un punt de consum final pel vapor de baixa pressió (BP), tenint en compte que, en general, el vapor de baixa pressió només es pot transportar a curtes distàncies. En molts casos (com en les refineries i plantes químiques) hi ha un excés de vapor a baixa pressió i, moltes vegades, no hi ha un ús per aquest vapor. Davant aquesta situació, la millor opció és tornar el condensat al desairejador (i des d'aquest lloc a la caldera), ja que alliberar el vapor flash a l'atmosfera és un malbaratament de l'energia. Per evitar problemes de condensació, els condensats han de ser recollits localment en una unitat específica, i una bomba els ha d'impulsar de tornada al desairejador.

A una pressió d'1 bar el condensat té una temperatura de 100 °C i una entalpia de 419 kJ/kg. Si es recupera el vapor flash o el vapor de postevaporació, llavors el contingut total d'energia depèn de la càrrega de treball del sistema. L'energia que deixa el sistema via els condensats es pot observar en la taula 8, que també mostra el contingut relatiu d'energia als condensats i al vapor flash. S'observa com el vapor flash a altes pressions conté la fracció més gran de l'energia.

Taula 8. Percentatge de l'energia total en el condensat a diferents pressions i vapor flash [17]

Pressió absoluta (Bar)	Contingut d'energia al condensat a pressió atmosfèrica (%)	Contingut d'energia al condensat + vapor post evaporació a pressió de caldera (%)	Fracció de l'energia que pot ser recuperada al vapor flash
1	13,6	13,6	0,0
2	13,4	16,7	19,9
3	13,3	18,7	28,9
5	13,2	21,5	38,6
8	13,1	24,3	46,2
10	13,0	25,8	49,4
15	13,0	28,7	54,7
20	12,9	30,9	58,2
25	12,9	32,8	60,6
40	12,9	37,4	65,4

Nota. L'aigua de subministrament a la instal·lació sovint té una temperatura mitjana anual aproximada de 15 °C. Aquestes xifres han estat calculades segons una situació en què la instal·lació de subministrament d'aigua es realitza a 15 °C, o amb una entalpia de 63 kJ/kg

La reutilització del vapor flash és possible en un gran nombre de casos, sovint per un escalfament a temperatures inferiors a 100 °C. Hi ha diverses alternatives per a la seva implementació:

- **Recollida de vapor flash a la canonada de condensat.** Durant la vida d'una instal·lació, es poden afegir molts consums a la mateixa canonada, de manera que la línia de retorn de condensat pot esdevenir massa petita per la quantitat de condensat a recuperar. En la majoria dels casos, aquest condensat es recupera a pressió atmosfèrica i, per tant, gran part de la canonada s'omple de vapor flash. Si hi ha un augment de la descàrrega de condensats, la pressió en les canonades pot elevar-se per sobre d'1 bar i això pot generar problemes aigües amunt, per exemple, dificultant el bon funcionament de les trampes de vapor.
- **Descàrrega del vapor flash a un tanc d'evaporació instantània** instal·lat en un punt apropiat en la línia de retorn. Posteriorment, el vapor es pot utilitzar per un escalfament local o preescalfament a una temperatura per sota de 100 °C. Simultàniament, la pressió a la canonada de retorn del condensat es redueix a la normal, el que impedeix el retorn de condensat a la xarxa.

Quan s'utilitza vapor, per exemple per a l'escalfament a una temperatura per sota a 100 °C, és possible que la pressió real al serpentí d'escalfament, després de l'ajustament, sigui inferior a 1 bar. Això implicarà una succió del condensat cap a l'interior del serpentí i la seva inundació. Aquest risc es pot evitar mitjançant la recuperació del condensat a baixa pressió. En reduir més la pressió del condensat es podrà produir més vapor flash i recuperar més energia del condensat. Els components que treballen a aquestes baixes temperatures poden ser commutatats a una xarxa separada. No obstant això, és necessària la instal·lació de bombes per mantenir aquesta pressió i

per eliminar qualsevol entrada d'aire a les canonades des de l'exterior. Per aquest motiu, és recomanable que durant la revisió d'una xarxa existent, es tingui en compte l'opció de retornar el condensat a una pressió més baixa, ja que, com ja s'ha comentat, té l'efecte de produir més vapor flash i de reduir la temperatura per sota de 100 °C.

Aquesta tècnica s'aplica quan la instal·lació compta amb una xarxa de vapor amb pressió més petita que la pressió de producció de vapor. Aleshores, la reutilització del vapor flash pot ser, en termes d'exergia, més favorable que un simple intercanvi de calor amb les purgues a través d'un intercanviador de calor. En teoria, qualsevol ús a una temperatura més baixa pot ser una possibilitat per utilitzar vapor flash en lloc de vapor "de nova producció" i hi ha un ampli ventall d'oportunitats que actualment estan en fase d'investigació, tot i que la seva aplicació no sempre és fàcil. Aquesta tècnica és àmpliament aplicable a la indústria petroquímica.

La recuperació de vapor flash estalvia aigua extra i tractament, tot i que els principals estalvis es produeixen en termes d'energia. **La recuperació del vapor flash proporciona un estalvi d'energia més important que la simple recollida de condensat.**

Exemple. Recuperació d'energia de vapor flash

En una canonada d'aireig amb les característiques següents:

- velocitat del vapor flash: 1,5 m/s
- diàmetre de la canonada 102 mm
- hores d'utilització 8.000 h/any
- eficiència de la caldera 82 %
- cost del fuel 13,83 €/GJ (0,0498 €/kWh)

Un condensador d'aireig podria condensar el vapor flash, transferir la seva energia tèrmica a l'aigua tractada d'alimentació i tornar-lo de nou a la caldera. L'energia es recupera de dues maneres: via una temperatura més alta de l'aigua d'alimentació tractada i via un condensat net i preparat per utilitzar-se.

Taula 9. Energia recuperada en un condensador d'aireig per diferents velocitats de vapor i diàmetres de canonada [10]

Potència de recuperació d'energia d'un condensador d'aireig					
Diàmetre de la canonada (mm)	Contingut d'energia (GJ/any)*				
	Velocitat del vapor (m/s)				
	1	1,5	2	2,5	3
50 mm	95	148	195	243	295
102 mm	390	586	781	976	1.171
152 mm	881	1.319	1.757	2.200	2.638
254 mm	2.442	3.661	4.885	6.198	7.327
*Assumint una operació continua, temperatura de l'aigua d'alimentació tractada a 21 °C, i vapor condensat a 38 °C					

Segons la taula anterior, l'energia recuperada és de 586 GJ/any, amb una operació anual de 8.760 h. Tenint en compte el rendiment de la caldera i les hores de funcionament, l'estalvi de combustible és de 652 GJ/any, el que representa un estalvi econòmic de 9.017 €/any.

2.3.2.3. Minimització de les purgues de la caldera

La reducció al mínim de la freqüència de purga redueix substancialment les pèrdues d'energia, atès que la temperatura de les purgues està directament relacionada amb la del vapor generat a la caldera.

A mesura que l'aigua es vaporitza a la caldera durant la generació de vapor, les impureses de l'aigua contribueixen a l'augment de la concentració de sòlids en suspensió a la caldera. Aquests sòlids en suspensió poden formar sediments que degraden la transferència de calor i arrossegueu escuma i aigua des de la caldera al mateix vapor produït.

La freqüència de purgues òptima està determinada per diversos factors, incloent la qualitat de l'aigua de subministrament i el tractament associat, la proporció de recuperació de condensats, el tipus de caldera i les seves característiques i les condicions de funcionament (cabal, pressió, tipus de combustible, etc.).

El flux de purgues constitueix, de mitjana, entre el 4 % i el 8 % de la quantitat d'aigua d'alimentació, tot i que pot arribar al 10 % si l'aigua té un alt contingut de sòlids. Per a una caldera optimitzada, aquest flux de purgues és inferior al 4 %. El cabal de purgues també determina obligatòriament la quantitat de productes antiescumants i agents eliminadors de l'oxigen a afegir durant el tractament de l'aigua d'alimentació.

Si la freqüència de purgues es redueix per sota d'un nivell crític, poden sorgir problemes d'escumes i incrustacions. Altrament, una freqüència o una taxa de purgues massa alta també pot donar lloc a una degradació del sistema.

Per tal de reduir els nivells de materials sòlids suspesos i dissolts totals (TDS) a límits acceptables, cal purgar el circuit utilitzant els procediments següents, en mode automàtic o mode manual:

- La purga de fons es porta a terme des de la part inferior per permetre un bon intercanvi tèrmic a la caldera. En general, són uns procediments manuals d'uns segons de durada i amb diverses hores de diferència.
- La purga de superfície o "purga *skimming*" està dissenyada per eliminar els sòlids dissolts que es concentren prop de la superfície del líquid i sovint és un procés continu.
- La purga d'altres residus minerals provoca pèrdues, que representen entre l'1 % i el 3 % del vapor d'aigua generat. A més, el refredament dels residus de la purga fins una temperatura prescrita per les autoritats administratives també pot induir a altres costos.

Per reduir la quantitat de purgues requerides i les pèrdues d'energia associades, es proposen diverses alternatives:

- **Recuperació del condensat del vapor enviat al procés.** Aquest condensat ja està purificat i no conté impureses, que han quedat a dintre de la caldera. **Recuperant la meitat del condensat, la pèrdua d'aigua en purgues es pot reduir en un 50 %.**
- Depenent de la qualitat de l'aigua d'alimentació, poden ser necessaris **elements de descalcificació, de descarbonatació i de desmineralització de l'aigua**. A més, desairejar l'aigua i afegir productes per condicionar-la també pot esdevenir necessari. **En cas d'alimentació directa de la caldera, les taxes de purgues d'entre el 7 % i el 8 %, poden reduir-se fins a un 3% o menys quan l'aigua és pretractada.**
- **Instal·lació de sistemes de control de purga automàtica**, en general mitjançant el control de la conductivitat, que milloren la fiabilitat i redueixen les pèrdues d'energia per excés de purga. El flux de purgues està determinat pel component de l'aigua que té la concentració més alta.

- L'aprofitament de l'energia del vapor flash obtingut de les purgues a mitjana o baixa pressió és una altra forma de posar en valor l'energia disponible a la purga. Aquesta tècnica s'aplica quan es té una xarxa de vapor de pressions més baixes que la del vapor generat. Aquesta solució pot ser més favorable en termes d'exergia que un d'intercanviador de calor que recuperi calor directament de les purgues.

L'evaporació d'alguns components de l'aigua també provoca pèrdues d'energia d'entre un 1 % i un 3 %. És el cas del CO_2 i l'oxigen, que es retiren de l'aigua exercint un lleuger excés de pressió a una temperatura de 103 °C. Aquesta pèrdua pot ser minimitzada mitjançant l'optimització de la taxa de ventilació de l'airejador.

La quantitat d'energia estalviada depèn de la pressió a l'interior de la caldera. La taula 10 mostra el contingut d'energia d'una purga, expressant el flux de les purgues com el percentatge del total d'aigua requerida. Per tant, un flux de purga de 5 % és una pèrdua del 5 % d'aigua d'alimentació de la caldera a través de la purga, mentre el 95 % restant es converteix en vapor. Així doncs, s'observa immediatament que és possible estalviar energia en reduir la freqüència de les purgues.

Taula 10. Contingut d'energia d'una purga [17]

Contingut d'energia d'una purga en kJ/kg de vapor produït					
Taxa de purgues (% de vapor sortida)	Pressió de la caldera				
	2 bar g	5 bar g	10 bar g	20 bar g	50 bar g
1 %	4,8	5,9	7,0	8,4	10,8
2 %	9,6	11,7	14,0	16,7	21,5
4 %	19,1	23,5	27,9	33,5	43,1
6 %	28,7	35,2	41,9	50,2	64,6
8 %	38,3	47,0	55,8	66,9	86,1
10 %	47,8	58,7	69,8	83,6	107,7

La quantitat d'aigua perduda també es pot reduir si es redueix la freqüència de les purgues, i l'energia de l'aigua de refrigeració utilitzada per refredar les purgues també es pot recuperar.

A la pràctica, el mètode més estès a l'hora de minimitzar la quantitat de purgues és el del retorn de condensat, llevat quan el vapor s'injecta directament al procés, ja que en aquest cas no es produeix retorn de condensat. En l'apartat 3.3.2 de la present Guia es presenta un exemple de recuperació de condensat.

El principal desavantatge, en el vessant mediambiental, són els possibles abocaments de productes químics provinents del tractament de l'aigua per causade les purgues i els utilitzats en la regeneració dels desionitzadors.

En general, a banda d'aconseguir importants estalvis d'energia, també s'aconsegueixen estalvis en productes químics, aigua d'alimentació i en energia per refredament. Acostuma a ser, per tant, una tècnica econòmicament viable de forma generalitzada.

Exemple. Reducció del percentatge de purgues per control automatitzat

Una caldera piro-tubular es dota d'un sistema de control automatitzat per tal de reduir la taxa del sistema de purgues des del 8 % inicial fins a un 6 %.

Tenint en compte les característiques de la caldera les següents:

- genera vapor a 25 bar durant 5.500 h/any;
- proporciona 25.000 kg/h de vapor;
- la seva eficiència és d'un 82 %.

Tenint en compte els costos associats al combustible i al consum d'aigua els següents:

- gas natural, 0,0362 €/kWh (vegeu l'apartat 2.3.1.4);
- aigua d'alimentació, 1,3 €/m³ (subministrada a 20 °C, i amb tractament inclòs);
- taxa d'abocament de l'aigua residual, 0,10 €/m³;

la taxa de purgues inicials és del 8 %, el que representa 2.000 L/h i un cabal d'aigua tractada d'alimentació de 28.000 L/h. Després de la instal·lació del sistema de control de purgues, la taxa de purgues es redueix al 6% (1.500 L/h), i el cabal obtingut d'aigua tractada és de 26.500 L/h. L'estalvi de combustible equival a uns 24.500 €/any i l'estalvi d'aigua a 3.850 €/any, en total 28.350 €/any.

2.3.2.4. Recuperació de l'energia de les purgues de la caldera

Les pèrdues d'energia que representen les purgues de la caldera poden recuperar-se utilitzant un intercanviador de calor per escalfar l'aigua de reposició. Qualsevol caldera amb un flux de purgues continu que excedeixi en un 4 % de la taxa de producció de vapor és una bona candidata per a la implementació de sistemes de recuperació de calor d'aquestes purgues. El màxim estalvi d'energia s'aconsegueix en calderes d'alta pressió.

Com a alternativa, l'alliberament de les purgues fins a baixa o mitjana pressió és una altra forma de revalorar l'energia disponible (vegeu la secció 2.3.2.2).

La taula següent mostra el potencial energètic dels guanys de la calor residual de purgues en funció de la taxa de purgues i la pressió de treball de la caldera:

Taula 11. L'energia recuperada de les purgues per 10 tm/h de vapor [17]

Energia recuperada de les purgues, en MJ/h					
Taxa de purgues % energia tèrmica sortida caldera	Pressió d'operació de la caldera				
	2 bar	5 bar	10 bar	20 bar	50 bar
1 %	42	52	61	74	95
2 %	84	103	123	147	190
4 %	168	207	246	294	379
6 %	252	310	368	442	569
8 %	337	413	491	589	758
10 %	421	516	614	736	948

A més, una reducció de la temperatura de les purgues permet complir més fàcilment amb les regulacions ambientals, les quals estableixen que les aigües residuals es descarreguin per sota d'una certa temperatura.

Exemple. Recuperació de calor de les purgues

S'instal·la un bescanviador entre la canonada de purgues d'una caldera i la de subministrament d'aigua d'alimentació. La caldera treballa durant 7.600 h/any a una pressió de $p=10$ bar, té una eficiència del 82 %, la taxa de purgues és del 6 % sobre el vapor produït i utilitza gas natural com a combustible, amb un cost de 10,055 €/GJ (0,0362 €/kWh).

Per una caldera de 10 bar de pressió amb un cabal de purgues del 6 %, segons la taula 11, es poden recuperar 368 MJ/h de la purga amb un bescanviador de calor amb l'aigua d'alimentació. Considerant un cabal de subministrament d'aigua d'alimentació de 5,3 tm/h, s'aconsegueix una recuperació d'energia de la purga al bescanviador de:

$$\frac{5,3 \frac{Tm}{h}}{\frac{10 Tm}{h}} \cdot \frac{368 MJ}{h} = 195 \frac{MJ}{h}$$

que tenint en compte les hores de funcionament anuals de la caldera, representen un estalvi de 14.901 €/any.

2.3.2.5. Minimitzar les pèrdues degudes als cicles curts de calderes

Quan la caldera treballa de forma intermitent, en règims d'operació de cicle curt, es produeixen pèrdues d'energia en el fluid vapor durant aquests breus períodes d'inactivitat, a banda d'un increment de consum de combustible pel fet d'estar sotmesa a enceses successives en períodes de temps molt curts. El cicle d'una caldera inclou un període de purga, un període de postpurga, un període d'inactivitat, un període de prepurga i l'encesa posterior. Algunes de les pèrdues que es produeixen durant períodes de purga i inactivitat es poden reduir en calderes modernes, que estan ben aïllades, però són notables en calderes antigues amb aïllaments deficients.

Un punt que demana una atenció especial en la fase de disseny de les instal·lacions de vapor és l'elecció del tipus de caldera. Les calderes pirotubulars tenen una inèrcia tèrmica significativament més gran i un gran contingut d'aigua, equipades per respondre a una demanda continua de vapor i fer front als pics de càrrega elevats. Per altra banda, els generadors de vapor aquotubulars també poden proporcionar vapor en grans quantitats; en canvi, el seu contingut d'aigua és més petit, i això fa que siguin més adequades per a instal·lacions amb altes fluctuacions de càrrega.

L'aplicació de tècniques per evitar l'impacte negatiu dels règims de cicle curt són d'ús generalitzat per a qualsevol caldera de potència mitjana/alta, tenint com a límit inferior utilitzacions de la capacitat de la caldera prop del 25 %, tot i que s'ha de considerar la possibilitat de substitució de la caldera en els casos en què la seva utilització sigui inferior.

Les pèrdues generades pels cicles curts de treball poden arribar a ser considerables si la caldera genera la calor requerida en un període molt curt de temps. Aquesta generació de calor instantània es pot aconseguir si la potència instal·lada de la caldera està molt per sobre de la que es requeriria pel consum de vapor a satisfer, o bé quan la demanda de vapor de procés és variable en el temps i, per tant, és necessari fer ajustaments de forma periòdica. Això ocorre quan, per exemple, com a resultat de l'aplicació de mesures d'eficiència energètica, la demanda total de vapor que ha de cobrir la caldera es redueix, o quan se sobredimensiona la capacitat de la caldera en previsió de futurs augments de demanda que, finalment, no s'han assolit.

La minimització de l'aparició de cicles curts es pot dur a terme mitjançant les alternatives següents:

- **Instal·lació de calderes amb potència modular: substituint una sola caldera d'alta potència per un grup de calderes de potències més petites,** de manera que també s'aconsegueix guanyar en flexibilitat i fiabilitat. Per gestionar el sistema de calderes pot implementar-se un control automatitzat de l'eficiència de producció i dels costos marginals de generació de vapor de cada caldera, de manera que permeti proveir una demanda addicional de vapor pel generador que tingui un cost marginal més baix.
- **Instal·lar una caldera d'espera.** La caldera ha d'estar ben aïllada i equipada amb una vàlvula d'aire pel cremador. La temperatura de la caldera es pot mantenir estable mitjançant la circulació d'aigua des de la caldera principal fins a la caldera d'espera, minimitzant així les pèrdues pels gasos de combustió de la caldera en espera. El manteniment de la caldera en espera de la temperatura adequada exigeix un subministrament continu d'energia durant tot l'any, la qual cosa representa aproximadament el 8 % de la capacitat total de la caldera principal.

És evident que la instal·lació de diverses calderes que permetin modular la potència de treball del sistema, en substitució d'un equip de potència més gran, implica una inversió inicial superior. No obstant això, l'estalvi que representa la reducció de les pèrdues provocades per l'encadenament de cicles curts de treball en l'operació de la caldera sobredimensionada permet amortitzar aquest sobrecost en terminis raonables.

Exemple. Substitució d'una caldera infrautilitzada

La substitució d'una caldera infrautilitzada d'una $P=750$ kW, amb eficiència de 72,7 %, per una caldera més petita de $P=450$ kW, amb una eficiència del 78,8 %, aporta un estalvi anual de combustible del 7,7 %, el que representa un estalvi anual de 52.500,00 €/any.

2.3.2.6. Recollida i retorn del condensat a la caldera per a la seva recuperació

En el procés de transferència de calor a un procés per mitjà d'un intercanviador de calor, el vapor produït a la caldera cedeix calor latent i condensa. L'aigua calenta resultant, que històricament no es reutilitzava, actualment es recupera pel retorn de la caldera. Aquesta recuperació del condensat té quatre objectius:

- reutilitzar l'energia continguda en el condensat calent, que és prop del 25 % de l'energia que contenia el vapor;
- reduir la quantitat d'aigua d'alimentació;
- estalviar en el cost de tractament d'aigua de la caldera, atès que el condensat ja està tractat i, per tant, es redueix el consum de productes químics;
- reduir els costos corresponents a l'abocament d'aigües residuals.

La recuperació de condensats és una tècnica d'aplicació general i generalitzada a la indústria, i ofereix avantatges significatius. Cal considerar-la en tots els casos, llevat que la quantitat de condensat sigui baixa. No és aplicable tampoc en els casos en què el condensat a recuperar surti contaminat del procés (casos excepcionals), ni en els casos en què el vapor s'injecta directament a procés, ja que no es genera condensat.

El condensat es recull a pressió atmosfèrica o a pressions negatives (en aquest cas es requereix una purga d'aire) i pot provenir d'usos en dispositius que funcionen a una pressió molt més elevada. Quan el condensat es retorna a la pres-

sió atmosfèrica, hi ha una creació espontània de vapor flash, que també pot ser recuperat (vegeu l'apartat 2.3.2.2).

En l'execució de nous projectes, algunes instal·lacions que, per la tipologia del seu procés ho exigeixi, preveuen en el seu disseny la separació dels condensats de flux potencialment contaminat dels de flux net. Els condensats nets són aquells que provenen de fonts que, en principi, no estan contaminades, mentre que els condensats potencialment contaminats són aquells que poden esdevenir contaminats en cas d'incident (per exemple, trencament de tubs dels reescalfadors quan la pressió del costat del procés és més alta que la del costat del vapor). Els condensats nets poden, evidentment, ser recuperats sense cap precaució addicional; per altra banda, els condensats potencialment contaminats poden ser recuperats, excepte en el cas de detecció d'una contaminació real. En l'apartat 3.3.2 de la present Guia es presenta un exemple de recuperació de condensat.

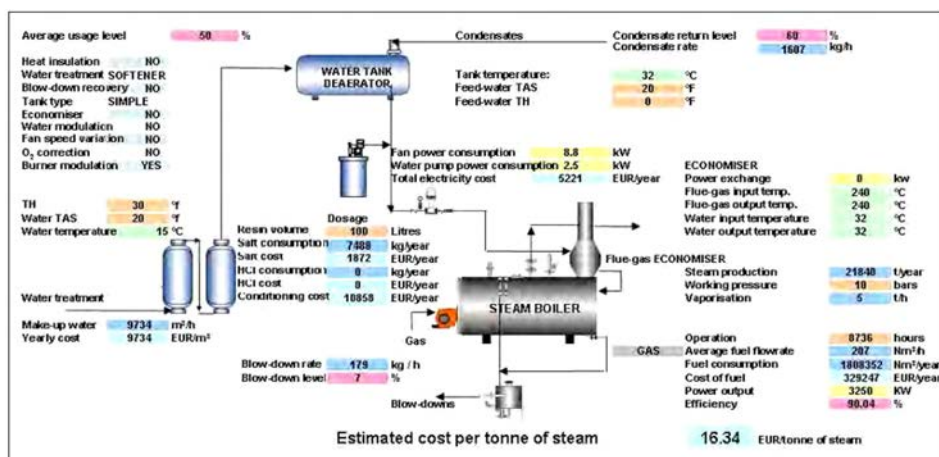
2.3.2.7. Tècniques d'operació i control

Algunes tècniques bàsiques d'operació i control de la demandada energètica en sistemes de vapor són:

- Millorar els procediments d'operació i control de la caldera. Un sistema de control modern per optimitzar l'ús de la caldera es mostra en la figura 19.
- Utilitzar ordres seqüencials a les calderes. Quan una instal·lació industrial té diverses calderes, cal analitzar diversos paràmetres (demanda de vapor, nombre de calderes disponibles, potència, rendiment, etc.), amb l'objectiu d'optimitzar el consum d'energia, reduir els temps de cicle, etc.

L'ús de la tècnica de calderes seqüencials es limita, de vegades, a aquelles instal·lacions en les quals s'ha de garantir la total disponibilitat de les calderes de vapor.

Figura 19. Sistema modern de control per optimitzar l'ús d'una caldera [10]



La instal·lació de més d'una caldera és una opció per fer front als canvis de la demanda durant el cicle de funcionament. Les calderes poden ser de tipus diferents, en funció de la corba de demanda, els temps de cicle, etc.

2.3.3. Processos de Recuperació de calor

La calor es transmet des d'un procés o sistema cap al seu entorn a causa d'un diferencial negatiu de temperatures. Exemples de processos de transmissió de

la calor a l'ambient poden ser: pèrdues de calor a les obertures d'un forn, pèrdues a través de les parts calentes en zones amb aïllament insuficient, o bé l'alliberament de calor de fragments de parts metàl·liques en moviment. En processos industrials, també es transfereix calor a través de l'energia associada a cabals de gasos de combustió, cabals d'aigua de refrigeració, cabals d'aire de condensadors, etc.

La manera d'aprofitar aquesta calor residual depèn, en gran mesura, de la seva exergia, és a dir, de la capacitat potencial de realitzar treball que el sistema encara conservi. És evident que la capacitat potencial de treball útil que es pot extreure d'un procés industrial que genera un flux de calor a 500 °C no és, en absolut, la mateixa que la calor emesa per la radiació d'una font calenta a 80 °C.

MTD 11. Recuperar el calor de procés.

Les millors tècniques disponibles utilitzades habitualment per recuperar el calor residual d'un procés industrial són les següents:

- Ús directe: intercanviadors de calor, que fan ús de la calor associada a un cabal d'aire, d'aigua, etc.
- Bombes de calor, que revaloren una calor de baixa exergia segons l'aportació de més energia addicional, per aconseguir una calor d'alta exergia.
- Operacions multietapa tals com evaporació multiefecte, vapor flash i combinacions de les dues alternatives anteriors.

Abans de dur a terme la recuperació de calor residual, és important realitzar una optimització del procés del qual es recupera aquesta calor. Una optimització posterior del procés podria provocar el sobredimensionat, o infradimensionat del mateix sistema de recuperació. Per tant, és essencial quantificar la calor que es podrà recuperar, garantir la quantitat i la seva estabilitat i, finalment, identificar-ne els possibles usos.

La recuperació de calor s'aplica a un nombre creixent de situacions en el sector industrial i, en la majoria, la demanda del calor recuperat està a l'exterior de la mateixa instal·lació. Per tal de casar oferta i demanda, és imprescindible que la corba de demanda de calor es correspongui amb la taxa de recuperació d'aquesta calor residual. Així, un profund coneixement de l'operativa del procés, juntament amb el coneixement de les limitacions dels paràmetres a modificar, són essencials per aconseguir la perfecta integració de la recuperació de calor dins del procés.

La mesura dels paràmetres necessaris proporciona un bon punt de partida i ajuda al personal tècnic per identificar correctament els estalvis potencials. En aquest sentit, hi ha dues opcions:

- Reutilitzar la calor recuperada en el mateix procés que l'origina, mitjançant recirculacions, sovint utilitzant intercanviadors, economitadors, etc.
- Aprofitar la calor en un altre sistema o unitat de procés, opció vàlida per a casos en què la temperatura de la calor recuperada no és el suficientment alta. En funció de la destinació de l'energia aprofitada, podem distingir dos casos: —aprofitament de l'energia dins de la mateixa indústria; o bé, —en un altre recinte industrial però dins del propi complex: com és el cas de les xarxes de *district-heating*, per exemple.

2.3.3.1. Recuperació directa de la calor residual

La recuperació directa de la calor residual es fa mitjançant intercanviadors de calor, dispositius que permeten la transferència d'energia entre dos medis: la calor és transferida des d'un fluid a un altre, per conducció i convecció, a través

de les parets que separen els diferents corrents. Normalment, aquests sistemes s'utilitzen per escalfar o refredar fluids de processos.

La transferència de calor a un intercanviador està determinada per un coeficient de transferència de calor que depèn, principalment, dels paràmetres següents: la conductivitat tèrmica del fluid, la superfície de transferència, el gruix del material, la velocitat del fluid, la seva temperatura i la seva viscositat. Un dels paràmetres més importants és la superfície de transferència, que es pot augmentar mitjançant l'ús de diferents tècniques com, per exemple, la incorporació d'aletes o el ribetejat de la superfície. D'altra banda, un augment de la velocitat del flux també incrementa notablement la transferència de calor, tot i que també contribueix en un augment de les pèrdues de càrrega a través de l'intercanviador.

L'aplicació de les tècniques disponibles per a l'aprofitament de la calor residual de processos permet, no només aconseguir la reducció de costos d'energia millorant el rendiment energètic de les instal·lacions, si no que també proporciona estalvis en càrrega d'efluents requerits.

Hi ha nombroses tipologies d'intercanviadors, segons la naturalesa dels fluids involucrats en l'intercanvi, així com de la temperatura d'operació, la qual pot oscil·lar entre els 70 °C i els 500 °C en indústries com la química, la indústria alimentària, del paper i a la indústria tèxtil o inclús temperatures superiors en el sector metal·lúrgic (Fe, Cu o Al), la indústria ceràmica o del vidre.

Per aplicacions de fins als 500 °C es poden haver intercanviadors dels tipus següents:

- rotatius;
- de serpentí;
- termosifons;
- economitadors;
- de carcassa i tubs;
- de plaques.

Per a aplicacions a temperatures per sobre dels 500 °C, a part d'alguns dels tipus anteriors, també s'acostumen a utilitzar sistemes més complexos per recuperar la calor dels gasos, com els següents:

- tubs de radiació;
- tubs de convecció amb recuperadors;
- cremadors recuperatius;
- cremador regeneratiu de llit integral;
- regeneradors estàtics;
- regeneradors rotatius;
- regeneradors ceràmics compactes.

Cada tipus d'intercanviador està dissenyat per a unes condicions de treball determinades, de manera que qualsevol variació d'aquestes condicions modifica el coeficient de transferència de calor per al qual està caracteritzat i, per tant, afecta la quantitat d'energia transferida.

L'acumulació de brutícia (fouling) a la superfície de transferència fa que l'intercanvi perdi eficiència i, per consegüent, una neteja automàtica de les superfícies és bàsica per assegurar que l'eficiència es manté en valors acceptables. L'acumulació de brutícia en algun punt de la superfície es pot detectar mitjançant l'ús de fotografies termogràfiques per detectar punts calents. No obstant això, el mètode i la freqüència de neteja depenen del tipus de intercanviador. Els de plaques, per exemple, necessiten desmuntatges periòdics, mentre que la neteja dels de tubs es pot realitzar amb àcid.

Dur a terme un manteniment adequat, i específic, als intercanviadors de calor per tal de garantir el nivell d'eficiència. Amb aquesta finalitat cal:

- controlar l'eficiència dels equips periòdicament;
- controlar les condicions de manteniment dels tubs del intercanviador mitjançant imatges infraroges o simulacions CFD (dinàmica de fluids computeritzada), per tal d'identificar la possible formació de dipòsits interns de material biològic o químic;
- evitar el seu embrutiment i, en el seu cas, desmuntar i netejar periòdicament els elements;
- netejar l'interior dels intercanviadors de tubs amb àcid.

Tots els intercanviadors de calor demanen un pla de manteniment. Això no obstant, cada tipus requereix tècniques i procediments específics. Per a més informació es poden consultar els BREF verticals de cada sector.

2.3.3.2. Recuperació de calor mitjançant bombes de calor

L'objectiu principal de les bombes de calor és transformar (revalorar) un flux d'energia residual amb un nivell de temperatura més baix (baixa exergia) fins a un nivell de temperatura superior (alta exergia).

Les bombes de calor poden transferir la calor de fonts de calor antropogèniques (com ara els processos industrials), o bé de fonts de calor natural (com ara l'aire, el sòl o l'aigua), tant per aplicacions comercials com industrials. No obstant això, l'ús més comú de les bombes de calor està en els sistemes de refrigeració, en els quals la calor es transfereix de l'aplicació que es refreda a l'ambient. De vegades, l'excedent de calor d'aquest refredament s'utilitza per satisfer una demanda de calor simultània en un altre sistema.

Per a la transferència de calor des d'una font de calor a una altra ubicació es requereix disposar d'una font d'alimentació externa que accioni la bomba de calor. L'accionament pot ser de qualsevol tipus, com ara un motor elèctric, un motor de combustió, una turbina o una font de calor per a bombes de calor d'absorció.

Els fluxos de calor residual més comuns a la indústria són fluids provinents de refredaments, efluents, condensats, la humitat i el calor de condensadors de plantes de refrigeració. A causa de les fluctuacions en el subministrament de calor residual, pot ser necessari utilitzar grans tancs d'emmagatzematge per garantir un funcionament estable de la bomba de la calor.

Les bombes de calor s'utilitzen en equips i sistemes en què la manera habitual d'eliminar la calor residual és alliberar-la a l'ambient. No obstant això, queda demostrat que aquesta tecnologia és robusta i ben desenvolupada i que es pot utilitzar en àmbits molt amplis:

- calefacció;
- calefacció i refrigeració de fluxos de procés;
- escalfament d'aigua per neteja i desinfectar;
- producció de vapor;
- assecat/deshumidificació;
- evaporació;
- destil·lació;
- concentració (deshidratació);
- també s'utilitzen en sistemes de cogeneració i trigeneració.

Malauradament, en indústries en funcionament es disposa de poques bombes de calor instal·lades amb l'objectiu de recuperar calor de procés. No

obstant això, generalment, sí que es preveu la seva implantació en la planificació de noves instal·lacions. Són una solució rendible quan els costos de combustibles són alts, ja que el cost d'inversió necessari és elevat. Aquest tipus de sistemes tendeixen a ser més complexos que els sistemes alimentats per combustible fòssil, tot i que tenen una tecnologia molt robusta.

A continuació es presenten els tres procediments de revaloració de l'energia associada a fluxos de calor residuals més utilitzats al sector industrial: les bombes de calor per compressió, les bombes de calor d'absorció i la recompressió mecànica de vapor.

Bombes de calor de compressió (cicle tancat)

Habitualment, la bomba accionada per un compressor és la més utilitzada. Es tracta d'una màquina tèrmica que funciona segons un cicle tancat de compressió-condensació-expansió-evaporació que descriu un fluid refrigerant.

Les etapes en què s'absorbeix calor d'un focus i es transfereix a un altre són les d'evaporació i condensació, procés en el qual el fluid canvia d'estat absorbit i expulsant el seu calor latent respectivament. Les etapes de compressió i expansió serveixen per canviar la pressió del fluid refrigerant i facilitar-ne la transferència de calor amb el medi.

En una bomba de calor per compressió, el nivell d'eficiència s'indica com a *Coeficient de Rendiment (COP)*, que indica la relació entre la potència calorífica de sortida en relació amb l'energia d'entrada, com ara l'electricitat consumida pel motor del compressor. El rendiment màxim d'aquest tipus de màquina tèrmica és el rendiment de Carnot, que es pot considerar com a constant per fluctuacions de temperatura moderades.

Les bombes de calor per compressió poden assolir un COP de 6, el que significa que pot generar una sortida de calor de 6 kWh amb una entrada d'1 kWh d'energia en el compressor elèctric. A les plantes de revaloració de residus (WtE), la relació entre la calor de sortida i la potència aportada al compressor, pot ser aproximadament de 5.

No obstant això, el COP és vàlid només per a un estat estable. Per això, aquest coeficient no sempre és adequat per avaluar el rendiment d'una bomba de calor, i no és representatiu per a llargs períodes de temps. **A la pràctica, només el rendiment total estacional (ESEER) pot descriure correctament el rendiment d'una bomba de calor.**

Per obtenir un bon rendiment global estacional, cal que es compleixin les condicions següents:

- qualitat de la mateixa bomba de calor;
- temperatura alta i constant de la font de calor (la calor provinent d'una font és millor que l'aire circumdant);
- baixa temperatura del focus calent de calor (la diferència entre les temperatures d'ambdós focus no ha de ser excessiu);
- integració de tots els components – bomba de calor, font de calor, focus fred, control, distribució de calor – en un únic sistema optimitzat.

Els fluids de treball que s'utilitzen habitualment limiten la temperatura de sortida a 120 °C.

Bombes de calor d'absorció

La bomba de calor d'absorció no s'utilitza de forma tan generalitzada com la de compressió. En lloc de la compressió d'un fluid refrigerant, el flux es manté per

l'absorció d'aigua en una solució salina, generalment, de bromur de liti o amoníac. L'absorció es produeix a l'absorbidor.

L'aportació d'energia necessària per al funcionament d'una bomba d'absorció és baixa, en comparació amb la requerida pel funcionament del compressor d'una bomba de calor de compressió ja que l'energia requerida per bombejar un líquid és inferior a la requerida per la compressió i el transport d'un gas.

A les bombes de calor d'absorció, el nivell de rendiment es determina amb el coeficient d'eficiència tèrmica, i es defineix com la relació entre l'energia tèrmica de sortida i l'energia tèrmica d'entrada. Les bombes d'absorció modernes poden assolir una eficiència tèrmica fins a 1,5. No obstant això, cal tenir en compte que l'energia tèrmica d'entrada que necessita la bomba per funcionar prové d'una font residual i que, d'altra manera, s'alliberaria a l'ambient i es malbarataria. Per tant, es pot considerar que no té un cost directament imputable al mateix funcionament de la màquina. Els sistemes actuals, amb una solució d'aigua/bromur de liti com a mescla de treball, poden aconseguir una temperatura de sortida de 100 °C amb un augment de temperatura de 65 °C. Es preveu que la nova generació de sistemes permetrà temperatures de sortida més altes (de fins a 260 °C) i augments també més alts.

La principal aplicació de les bombes de calor d'absorció és en sistemes industrials o comercials, on hi hagi de forma simultània gran quantitat de calor residual i necessitats de refrigeració d'algun espai o procés. En l'apartat 3.5.1 de la present Guia es presenta un exemple d'aplicació d'una màquina d'absorció.

Recompressió mecànica de vapor (MVR)

El MVR és una bomba de calor oberta o semioberta. El vapor d'escapament de baixa pressió dels processos industrials com ara calderes, evaporadors i sistemes de calefacció, es comprimeix i posteriorment es condensa per recuperar calor a una temperatura més alta i així, reemplaçar l'ús de vapor viu o d'altres fonts d'energia. L'energia necessària per accionar el compressor és, en general, d'un 5 % a un 10 % de la calor que es recupera posteriorment al condensador.

Si es neteja el vapor d'aigua pot ser utilitzat directament, però en el cas de vapor contaminat cal un intercanviador de calor intermedi (reescalfador). És un sistema semiobert perquè una part del vapor es perd, es deixa anar a l'atmosfera, i en cap cas el fluid de treball realitza un cicle tancat.

L'avantatge de la recompressió mecànica de vapor és que s'han eliminat un o dos intercanviadors de calor intermedis (l'evaporador i/o condensador de les bombes de calor convencionals) i, per tant, generalment, el rendiment és alt. El rendiment també s'expressa com un coeficient d'operació (COP) i es defineix com la relació entre la calor subministrada i el treball a l'eix del compressor. Els valors normals del COP per MVR estan situats entre 10 i 30.

Els sistemes MVR actuals treballen amb temperatures de les fonts de calor entre 70 °C i 80 °C, i amb una temperatura de sortida d'entre 110 °C fins a 150 °C (en alguns casos fins a 200 °C). El vapor comprimit més comú és el vapor d'aigua, encara que també es poden utilitzar d'altres vapors de procés, especialment en la indústria petroquímica.

La majoria d'instal·lacions MVR corresponen a operacions individuals com ara destil·lació, evaporació i assecat, però també és habitual la producció de vapor per a una xarxa de distribució de vapor.

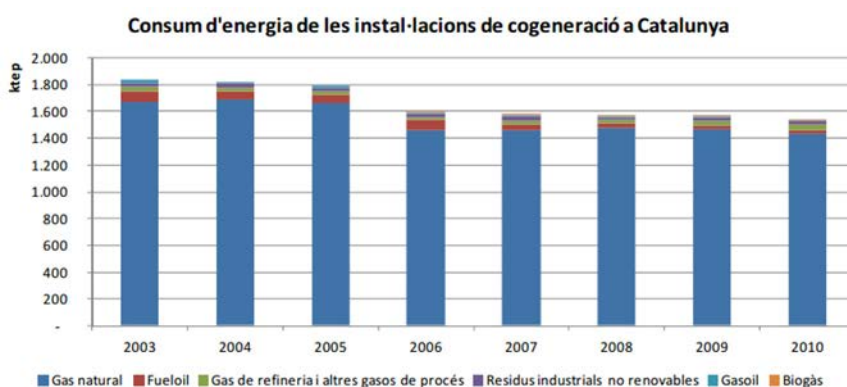
2.3.4. Sistemes de Cogeneració

La Unió Europea dona suport i promou activament la utilització de la tecnologia de la cogeneració mitjançant l'adopció de la Directiva 2004/8/CE sobre el foment de la cogeneració (derogada posteriorment per la Directiva 2012/27/UE relativa a l'eficiència energètica), i la Directiva 2003/96/CE relativa a l'aplicació d'impostos als productes energètics i l'electricitat. No obstant això, actualment al nostre país aquesta tecnologia no disposa del marc normatiu adequat per al seu desenvolupament.

MTD 12. Cercar oportunitats d'implantació de sistemes de cogeneració a les instal·lacions industrials, i/o al seu voltant.

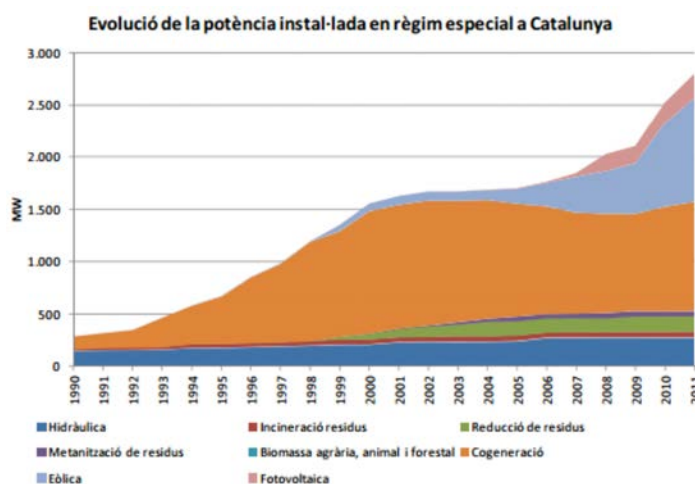
En la figura següent, es pot observar l'evolució del pes dels diferents combustibles utilitzats en la producció d'energia mitjançant la tecnologia de cogeneració pel que fa al consum total de les instal·lacions de cogeneració a Catalunya entre 2003 i 2010, en queda queda palès el domini del gas natural.

Figura 20. Evolució del consum d'energia a les instal·lacions de cogeneració en funció del combustible emprat [1]



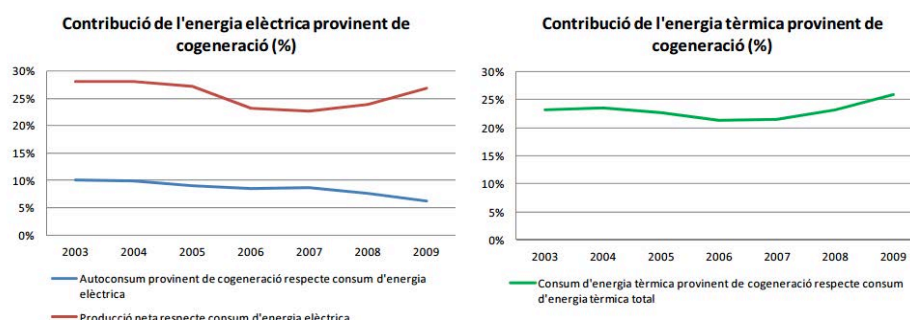
A Catalunya, d'acord amb les dades oficials de 2011, la potència instal·lada de cogeneració en règim especial era de 1.039,6 MW (un 37,1 % del total de la potència instal·lada en règim especial), el que representava el 8,1 % de la potència elèctrica total instal·lada l'any 2011. Pel que fa referència a la producció d'energia elèctrica, la producció bruta d'energia elèctrica en règim especial mitjançant la tecnologia de cogeneració va ascendir a un total de 5.910,8 GWh (el 54,8 % de la producció total bruta en règim especial), producció que representa el 13,0 % de la producció bruta d'energia elèctrica total.

Figura 21. Evolució de la potència instal·lada a Catalunya en règim especial, 2011 [1]



Segons es detalla en la següent figura, actualment el 26 % del consum total d'energia tèrmica de la indústria catalana prové de les instal·lacions de cogeneració. Així mateix, la producció neta d'energia elèctrica mitjançant la cogeneració representa, aproximadament, el 27 % del consum d'energia elèctrica total del sector.

Figura 22. Contribució de l'energia provinent de sistemes de cogeneració quant als consums elèctrics i tèrmics de la indústria [1]



Els processos de cogeneració consisteixen en la producció d'energia elèctrica (o mecànica) i energia calorífica útil provinents d'una font d'energia primària. La cogeneració és una tecnologia madura i amb una important implantació a Catalunya que, a més, suposa un increment notable de l'eficiència energètica en comparació a les centrals convencionals. Els sistemes de cogeneració són una alternativa a la tradicional obtenció d'energia elèctrica subministrada per la xarxa, així com a la generació d'energia tèrmica mitjançant la combustió de fueloil, gas natural o altres combustibles disponibles en un generador.

El rendiment elèctric equivalent, REE, és el paràmetre que permet avaluar l'eficiència energètica d'una planta de cogeneració, i s'expressa de la manera següent:

$$REE = \frac{E}{Q - \frac{V}{Ref.H\eta}}$$

en què:

E, l'energia elèctrica generada, mesurada a les barres de l'alternador;

Q, el consum d'energia primària, mesurada amb el poder calorífic inferior (PCI) dels combustibles emprats;

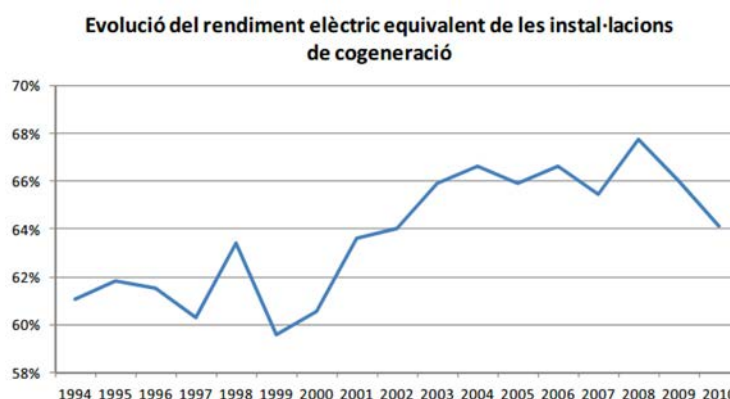
V, la producció de calor útil;

$R_{ef}.H\eta$, el valor de referència de l'eficiència per la producció separada de calor².

De tal manera, es pot observar com, **per a una determinada quantitat d'energia elèctrica generada, a més quantitat de calor aprofitada, més és l'REE.**

² Vegeu els valors de referència de l'eficiència en l'apartat 3.6 de la *GUÍA TÉCNICA PARA LA MEDIDA Y DETERMINACIÓN DEL CALOR ÚTIL, DE LA ELECTRICIDAD Y DEL AHORRO DE ENERGÍA PRIMARIA DE COGENERACIÓN DE ALTA EFICIENCIA*. IDAE, abril de 2008.

Figura 23. Evolució del REE de les instal·lacions de cogeneració, 1994-2010 [1]



El percentatge d'estalvi d'energia elèctrica primària (PER) es pot calcular segons l'expressió següent:

$$PER = \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{CHP H_{\eta}}{Ref.H_{\eta}} + \frac{CHP E_{\eta}}{Ref.E_{\eta}} \right)} \right] \cdot 100 \%$$

en la qual:

CHP H_{η} , l'eficiència tèrmica de la producció mitjançant cogeneració;

Ref H_{η} , el valor de referència de la eficiència per la producció separada de calor³;

CHP E_{η} , l'eficiència elèctrica de la producció mitjançant cogeneració;

Ref E_{η} , el valor de referència de l'eficiència per la producció separada d'electricitat, 52,5 % (central de cicle combinat).

Les oportunitats d'inversió en la implantació de sistemes de cogeneració requereixen d'un estudi previ d'identificació dels potencials consumidors, del volum de demanda actual i les expectatives de creixement, així com dels possibles canvis en les condicions econòmiques (preus dels combustibles, preu de l'electricitat, incentius estatals, etc.).

En general, la cogeneració es pot considerar una alternativa real en el cas que:

- hi hagi una demanda de calor i d'electricitat de forma simultània;
- la demanda tèrmica sigui estable (tan sigui dins de les mateixes instal·lacions industrials i/o com en zones properes) i es pugui satisfer tècnicament mitjançant la cogeneració.

2.3.4.1. Els diferents tipus de cogeneració

La taula 12 presenta diverses tecnologies de cogeneració i la seva relació de demanda real electricitat/calor de la planta. Així, en funció d'aquesta proporció entre la demanda real d'electricitat i calor específica de cada indústria serà més adequada la implantació d'una o una altra tecnologia.

Tanmateix, per tal de determinar la seva potència cal tenir en compte la potència de la corba de càrrega anual (monòtona decreixent) en relació amb el temps.

³ Vegeu els valors de referència de l'eficiència en l'apartat 3.6 de la *GUÍA TÉCNICA PARA LA MEDIDA Y DETERMINACIÓN DEL CALOR ÚTIL, DE LA ELECTRICIDAD Y DEL AHORRO DE ENERGÍA PRIMARIA DE COGENERACIÓN DE ALTA EFICIENCIA*. IDAE, abril de 2008.

Taula 12. Llista de tecnologies de cogeneració i les relacions electricitat/calor [10]

Tecnologia de cogeneració	Ràtio electricitat/calor
Cicle combinat de turbina de gas (turbina de gas combinada amb caldera de recuperació de calor i turbina de vapor)	0,95
Plantes de turbines de vapor (turbina de vapor de contrapressió)	0,45
Turbina de vapor de condensació i extracció (contrapressió, turbines de condensació amb extracció no controlada de vapor i turbines de condensació amb extracció de vapor)	0,45
Turbina de gas amb calderes de recuperació de calor	0,55
Motors de combustió interna (alternatius, Otto o Diesel, amb aprofitament de la calor)	0,75

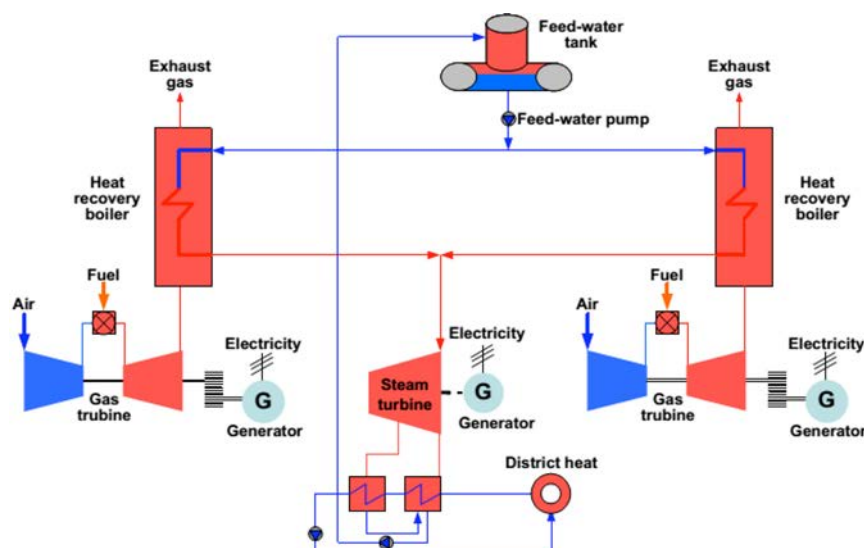
A part de les tecnologies de la taula anterior, n'hi ha d'altres com les microturbines, els motors Stirling o les piles de combustible. No obstant això, tenen aplicacions molt més especials i restringides i, per tant, gaudeixen de menys implantació a la indústria.

Central de cicle combinat

Una planta de *cicle combinat* inclou una o més turbines de gas connectades a una o més turbines de vapor. La calor dels gasos d'escapament de la turbina de gas es recupera a la turbina de vapor. La calor recuperada és, en molts casos, convertida posteriorment en electricitat addicional en lloc de ser utilitzada en processos d'escalfament. L'avantatge del sistema resideix en una relació electricitat/calor alta i en una alta eficiència.

Els últims avenços en tecnologies de combustió i en la gasificació de combustibles sòlids s'estan aplicant a centrals de cicle combinat i cogeneració. La tecnologia de gasificació redueix les emissions d'òxids de sofre (SO_x) i òxids de nitrogen (NO_x) fins a uns nivells considerablement més baixos que les tècniques de combustió convencionals, mitjançant el processament del gas abans de l'entrada a la turbina de gas de cicle combinat.

Figura 24. Central de cicle combinat



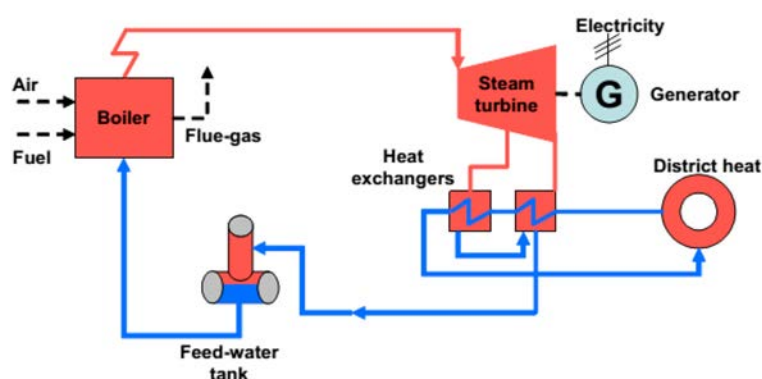
Turbines de vapor de contrapressió

La planta de cogeneració més simple és l'anomenada de "contrapressió", on l'electricitat i la calor es generen en una turbina de vapor. La potència de les centrals amb turbines de vapor de contrapressió és, en general, de menys de 50 MW. El valor de la ràtio electricitat/calor està, normalment, entre 0,3 i 0,5. En general, per exemple, la potència de les plantes amb turbina de gas és lleugerament inferior a les de turbina de vapor, però la seva relació electricitat/calor és més propera a 0,5.

La potència de les turbines de contrapressió industrials dependrà del consum de calor del procés i de les propietats del vapor d'alta pressió, mitja pressió i contrapressió. El factor determinant de la producció de vapor de contrapressió és la proporció electricitat/calor.

En una planta de generació de *district heating* el vapor es condensa en els intercanviadors de calor situats per sota de la turbina de vapor i la calor és transferida als consumidors a través d'aigua calenta. En les unitats industrials, el vapor a contrapressió es torna a introduir a la fàbrica on cedeix la seva energia tèrmica. En la majoria de casos, l'aprofitament de calor en una planta industrial és superior al d'una instal·lació de *district heating*, això explica perquè la relació electricitat/calor industrial és més baixa que a les plantes urbanes de *district heating*.

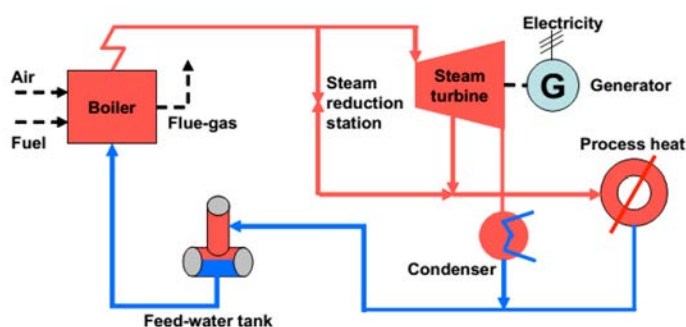
Figura 25. Turbina de vapor de contrapressió [10]



Turbina de vapor de condensació amb extracció

Una planta de producció elèctrica basada en una turbina de vapor de condensació genera només electricitat. En canvi, en una planta de condensació amb extracció es pot extreure una part del vapor de la turbina per generar calor.

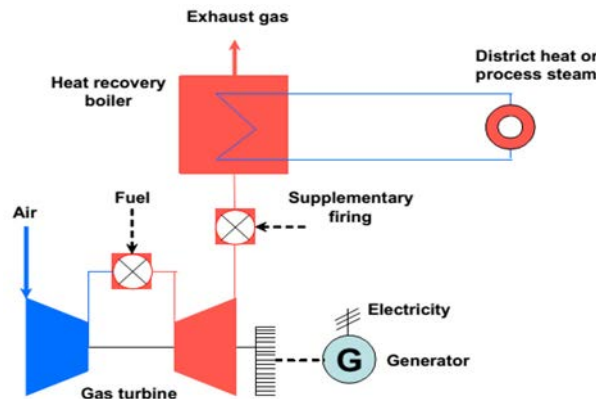
Figura 26. Turbina de vapor de condensació amb extracció [10]



Turbina de gas amb caldera de recuperació de calor

A les plantes de generació elèctrica de turbina de gas amb caldera de recuperació de calor, la calor es genera amb els gasos de combustió calents de la turbina. En la majoria dels casos, el combustible utilitzat és gas natural, fuel o una combinació d'ambdós. Les turbines de gas també es poden alimentar amb combustibles sòlids o amb líquids gasificats.

Figura 27. Turbina de gas amb caldera de recuperació de calor [10]



Motors alternatius de combustió interna

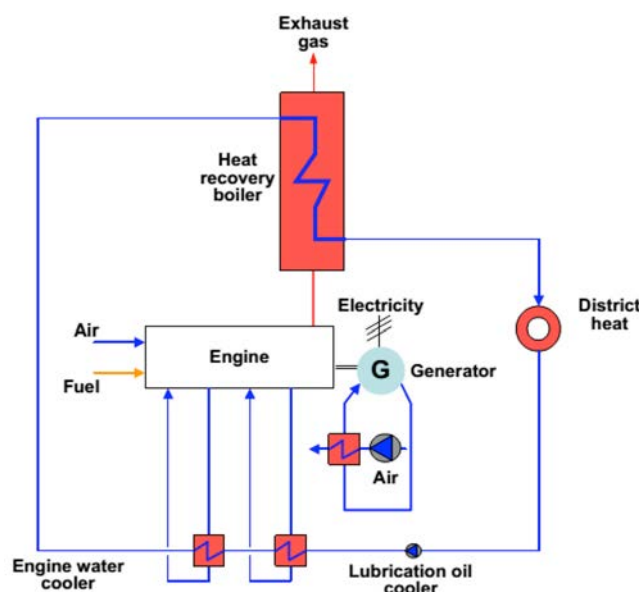
En un motor de combustió interna és possible recuperar la calor de l'oli lubricant, de l'aigua de refrigeració del motor i dels gasos d'escapament.

Els motors de combustió interna converteixen l'energia dels enllaços químics continguts al combustible en energia tèrmica mitjançant la combustió. L'expansió tèrmica del gas durant la combustió es produeix en un cilindre, provocant el moviment alternatiu d'un pistó. L'energia mecànica del moviment del pistó es transfereix al cigonyal per un volant d'inèrcia i és, posteriorment, convertida en electricitat mitjançant un generador connectat al volant d'inèrcia. Aquesta conversió directa de l'expansió tèrmica a temperatura elevada en energia mecànica i en energia elèctrica confereix als motors de combustió interna l'eficiència tèrmica més alta (energia elèctrica produïda per unitat de combustible consumit) d'entre les màquines motores de cicle simple, així com també les emissions de CO₂ més baixes.

Els motors de dos temps a velocitat baixa ($n < 300$ rpm) estan disponibles fins a potències de 80 MW_e. Per a motors de velocitat mitjana de quatre temps ($300 < n < 1.500$ rpm) es disposa de potències màximes de 20 MW_e i s'utilitzen, generalment, per aplicacions de generació contínua d'electricitat. Els motors de quatre temps a alta velocitat ($n > 1500$ rpm), disponibles fins, aproximadament, 3 MW_e, s'utilitzen, principalment, per a aplicacions de cobertura de pics de càrrega màxima.

Les plantes amb motors estacionaris (motors que, generalment, funcionen al mateix règim de gir i no estan acoblats a cap vehicle mòbil) poden disposar de conjunts de generadors accionats per motors funcionant en paral·lel. Les instal·lacions amb motors múltiples, juntament amb la capacitat d'aquests de mantenir una alta eficiència quan funcionen a càrregues parcials, aporten gran flexibilitat i n'asseguren la disponibilitat. El temps d'arrencada en fred és curt en comparació al de les plantes de turbines amb calderes de vapor alimentades per gas, fuel-oil o carbó, o per turbines de gas de centrals de cicle combinat. Els motors tenen una ràpida capacitat de resposta als canvis de la xarxa i es poden utilitzar per estabilitzar-la ràpidament.

Figura 28. Motor alternatiu de combustió interna [10]



Gràcies al seu disseny compacte, els motors són adequats per la producció distribuïda d'electricitat i calor (CHP), en distàncies properes al consumidor d'electricitat i la calor de les zones urbanes i industrials. Per tant, es redueixen les pèrdues d'energia associades a transformadors i línies de transmissió, així com en canonades de fluid tèrmic.

Per regla general, **aproximadament el 30 % de l'energia alliberada en la combustió del combustible és en el gas d'escapament i, aproximadament, el 20 % en el flux d'aigua de refrigeració.**

És possible recuperar l'energia dels gasos d'escapament mitjançant una caldera que produeixi vapor, aigua calenta o oli tèrmic. A més, aquests gasos d'escapament calents també poden ser utilitzats directa o indirectament mitjançant intercanviadors de calor com, per exemple, en processos d'assecatge (vegeu els apartats 2.3.2 i 2.3.3).

Per altra banda, la calor evacuada pel sistema de refrigeració per aigua del motor també es pot recuperar. El flux d'aigua de refrigeració es pot dividir en circuit d'alta temperatura i circuit de baixa temperatura, i el seu potencial de recuperació està relacionat amb la temperatura més baixa que necessita l'aplicació que demanda calor. Tota l'energia continguda en l'aigua de refrigeració es pot recuperar en les xarxes de calefacció urbana, gràcies a les baixes temperatures del retorn. **La recuperació del calor del circuit de refrigeració, en combinació amb una caldera de recuperació de l'energia dels gasos d'escapament amb econòmitzador, es pot traduir en una eficiència del conjunt del 85% amb combustibles líquids, i fins al 90 % per al cas de combustibles gasosos.**

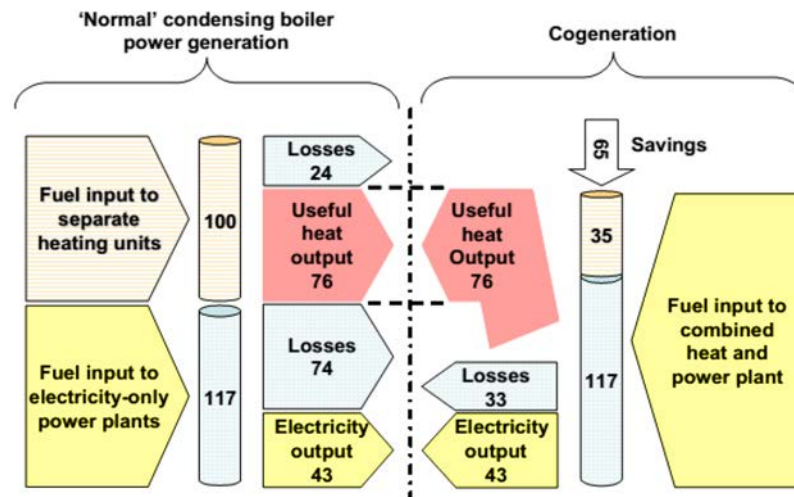
L'energia tèrmica es proporciona a les persones usuàries finals en forma de vapor (en general, sobreescalfat a 20 bar), d'aigua calenta o d'oli tèrmic, segons les necessitats de les persones usuàries finals. Addicionalment, aquesta calor també pot ser utilitzada en una màquina d'absorció per produir aigua freda. I, finalment, també és possible utilitzar bombes de calor per a valorar l'energia de baixa temperatura del circuit de refrigeració del motor fins a una temperatura més alta per poder ser utilitzada en calefacció urbana amb temperatures de retorn altes.

Com a solució per tal d'equilibrar les corbes de producció d'electricitat i la demanda de calor, es poden utilitzar acumuladors d'aigua freda i calenta durant períodes curts de temps.

El motor de combustió interna, generalment, té un rendiment aproximat entre el 40 % i el 48 % quan s'utilitzen per a la generació d'electricitat, però els seus rendiments poden arribar fins al 85 % o al 90 % en cogeneracions, quan es pot aprofitar de manera efectiva la calor produïda.

En la figura següent es poden observar els estalvis en combustible i, per tant, en emissions, que aporten les instal·lacions de producció combinada de calor i electricitat:

Figura 29. Comparativa entre l'eficiència d'una planta de cogeneració contra una planta de producció elèctrica i caldera individual [10]



2.3.4.2. Aplicabilitat

L'elecció del tipus de planta de cogeneració està basada en diversos factors que poden fer que, fins i tot en el cas d'instal·lacions amb la mateixa demanda, la decisió del tipus de sistema a implantar sigui diferent. Els principals factors en els quals cal basar la decisió són els següents:

- l'existència de demanda suficient de calor, tant en termes de quantitat, com de temperatura;
- la demanda base de potència elèctrica;
- la concurrència de la demanda de calor i d'electricitat;
- l'adequació del preu del combustible en relació amb el preu de l'electricitat;
- un elevat nombre d'hores anuals d'operació, generalment per sobre de 4.000 hores.

En general, la demanda de calor de la planta ha de ser elevada i amb temperatures dintre del rang de mitjana i baixa pressió. A continuació, es descriuen alguns dels criteris que, de manera general, prescriuran una o altra tecnologia d'entre les disponibles.

Les turbines de vapor seran adequades per a plantes en què:

- la demanda base d'electricitat està entre 3 i 5 MW_e;
- hi ha una demanda de vapor de baixa qualitat i la relació electricitat/calor és més gran de 0,25;
- hi ha una font de combustible econòmica i de baixa qualitat;
- la superfície de la parcel·la és l'adequada;
- hi ha disponible calor residual de procés d'alta qualitat (per exemple, de forns o incineradors);

- la caldera existent de la planta és susceptible de ser substituïda;
- la relació entre electricitat i calor es redueix al mínim.

Les turbines de gas són apropiades quan:

- es planifica maximitzar la relació electricitat/calor;
- la demanda d'electricitat és continua, i per sobre de 3 MW, tot i que hi ha turbines de gas per demandes més petites;
- disponibilitat de gas natural (encara que això no és un factor limitant);
- hi ha demanda de vapor d'alta i mitjana pressió, o aigua calenta a temperatures superiors a 500 °C;
- hi ha demanda de gasos calents a 450 °C, per exemple, per escalfar aire mitjançant un intercanviador d'aire (o com a part d'un cicle combinat amb una turbina de vapor).

Un motor de combustió interna serà adequat quan:

- la demanda d'electricitat i els processos són cíclics o no continus;
- es requereix de vapor de baixa pressió, o aigua calenta a temperatura mitjana o baixa;
- la relació electricitat/calor és alta;
- el gas natural està disponible, ja que són preferibles els motors de combustió interna a gas. En canvi, si no hi ha disponibilitat de gas natural, els motors poden ser de fuel- o dièsel GLP;
- la potència elèctrica és més petita d'1 MWe en motors d'encesa per espurna, de combustible benzina (potències disponibles des de 3 kWe fins a 10 MWe);
- la potència elèctrica és més gran d'1 MWe en motors d'encesa per compressió, de combustible dièsel (potències disponibles des de 3 MWe fins a 20 MWe).

2.3.4.3. Trigeneració

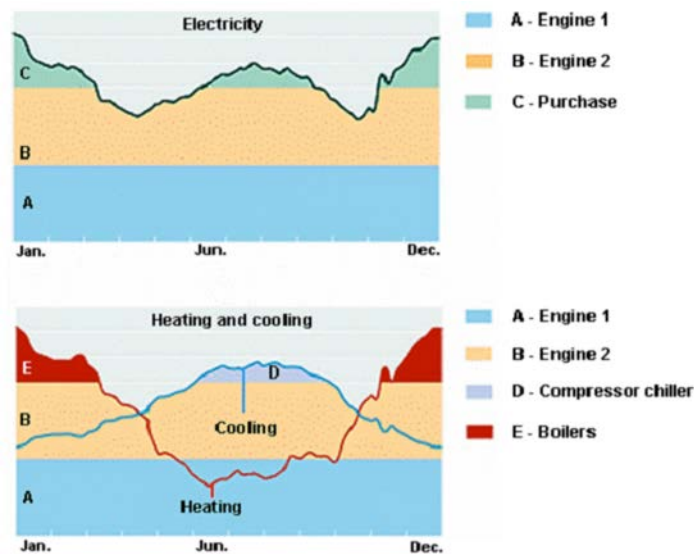
S'entén per *trigeneració* el procés de conversió simultània d'un combustible en tres productes energètics útils: electricitat, aigua calenta o vapor i aigua freda. En realitat, un sistema de trigeneració és un sistema de cogeneració amb una màquina d'absorció que utilitza una part de la calor produïda per la producció d'aigua refrigerada.

Les refredadores d'absorció de bromur de liti d'una etapa són capaces d'utilitzar aigua calenta amb temperatures de fins a 90 °C per la banda baixa com a font d'energia, mentre que les de dues etapes necessiten 170 °C, fet que implica que normalment treballin amb vapor. Aquestes refredadores d'una sola etapa poden produir aigua a 6-8 °C amb un coeficient d'operació (COP) de 0,7, mentre que una de dues etapes pot treballar amb un COP d'1,2. Aquests valors signifiquen que poden produir una quantitat de fred d'entre 0,7 a 1,2 vegades la quantitat de calor que reben.

El fet de poder recuperar la calor produïda per la màquina de cogeneració tant a l'hivern com a l'estiu (per calefacció i per refredament, respectivament) aporta una gran flexibilitat, augmentant les hores de funcionament del sistema, amb els beneficis ambientals que això suposa.

Com es pot observar en la figura següent, la capacitat de la màquina d'absorció no cobreix la totalitat de la demanda d'aigua freda: una opció acceptada sol ser produir el 70 % d'aquesta aigua, mentre que l'altre 30 %, corresponent als pics de demanda, queda cobert per la refredadora de compressor elèctric.

Figura 30. La trigeneració possibilita el funcionament de la planta durant tot l'any [10]



L'aplicabilitat de la trigeneració se centra a aquells casos en què conflueixen els aspectes següents:

- proximitat entre la planta de trigeneració i els punts de consum;
- existència d'excedents de la calor produïda per la màquina de cogeneració, ja que si s'utilitzés tota la calor generada no tindria sentit la instal·lació d'una màquina d'absorció;
- quan tot i no haver demanda de calor a la planta, sí hi ha demanda de fred.

En l'apartat 3.5.1 de la present Guia es presenta un exemple d'implementació d'una màquina d'absorció.

2.3.5. Subministrament d'Energia elèctrica

El sistema elèctric és el conjunt d'elements que s'encarreguen de la producció, el transport i la distribució de l'energia elèctrica. Així com la generació d'electricitat es realitza a mitjana tensió (MT), el seu transport es realitza a través de xarxes d'alta tensió (AT), amb l'objectiu de minimitzar la intensitat i, així, reduir les pèrdues per l'efecte Joule i les caigudes de tensió, de manera que s'aconsegueix que el procés sigui més eficient. En la posterior distribució de l'electricitat, conforme es produeix l'aproximació als diferents consums, la potència es redueix fins a mitjana i/o baixa tensió (MT o BT). En general, la tensió dels punts de consum és de 400V per a l'ús industrial i 230V per al terciari.

Hi ha diversos factors que afecten el subministrament i l'ús de l'energia, inclosa la resistència dels sistemes de subministrament, i els usos i efectes d'alguns equips. La qualitat de la tensió requereix estabilitat del voltatge i formes d'ona sinusoidal sense distorsions en els sistemes de potència.

El consum d'energia elèctrica a Catalunya durant 2009⁴ va ser de 45.952,20 GWh, amb unes pèrdues de 3.387 GWh, un 6,9 % de tota l'energia produïda en barres de central. El consumidor més important va ser la indústria amb 17.269,7 GWh (37,6 %), seguit del sector serveis amb 15.152,30 GWh (33 %) i del domèstic amb 11.452,80 GWh (24,9 %). Tots tres sectors esmentats van representar, en conjunt, prop del 95,5% del consum total.

⁴ Segons les darreres dades estadístiques publicades per l'ICAEN corresponents a l'any 2009.

MTD 13. Optimitzar l'eficiència energètica en l'àmbit del subministrament d'energia elèctrica.

Les tècniques següents són considerades MTD en aquest àmbit:

- Augmentar el factor de potència mitjançant l'ús de tècniques com ara: la instal·lació de bateries de condensadors, la minimització del funcionament de motors al ralenti o a baixa càrrega, evitar el funcionament dels equips per sobre de la seva tensió nominal i emprar motors de baix consum.
- Eliminar la presència d'harmònics amb l'aplicació de filtres per tal de reduir o eliminar les distorsions a la xarxa que poden perjudicar els equips connectats.
- Optimitzar l'eficiència del subministrament d'energia mitjançant l'ús de tècniques directament relacionades amb el disseny de les instal·lacions, com ara les següents:
 - la realització d'un correcte dimensionament del cablejat d'alimentació ajustat a la demanda d'energia real;
 - fer treballar els transformadors a un factor de càrrega superior al 50 %;
 - utilitzar transformadors d'alta eficiència;
 - ubicar els equips gran consumidors d'energia el més a prop possible de les fonts d'alimentació.

2.3.5.1. Compensació d'energia reactiva

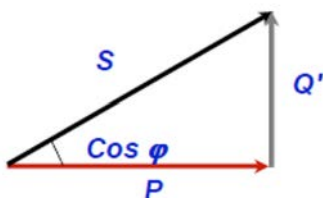
Hi ha diversos dispositius elèctrics que tenen càrregues inductives, com, per exemple:

- motors monofàsics i trifàsics (vegeu secció 2.3.6)
- variadors de velocitat (vegeu la secció 2.3.6.3)
- transformadors (vegeu la secció 2.3.5.3)
- il·luminació de descàrrega d'alta intensitat (vegeu la secció 2.3.11).

Tots aquests dispositius requereixen tant de l'energia elèctrica activa com de la reactiva. La potència elèctrica activa es converteix en energia mecànica útil, mentre que l'energia elèctrica reactiva no és una veritable energia consumida pels dispositius, sinó que només s'utilitza per mantenir els camps magnètics del dispositiu. Aquesta energia elèctrica reactiva es transfereix periòdicament en ambdues direccions entre el generador i la càrrega (en la mateixa freqüència que el subministrament), tot i que mai no es consumeix. Cal remarcar que les mateixes bateries de condensadors i les preses de terra també consumeixen energia reactiva.

El vector resultant de la potència elèctrica activa (P) i la potència elèctrica reactiva (Q) s'anomena potència aparent (S).

Figura 31. Diagrama vectorial de potència



$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

L'energia reactiva, tot i ser una energia addicional que no és útil, és necessària i, per tant, les instal·lacions de generació d'energia l'han de generar, i els operadors de xarxa transmetre-la, de manera que, cal que totes les instal·lacions im-

plicades en el procés al llarg de tota la cadena de distribució i subministrament (generadors, transformadors, línies d'energia, interruptors, etc.) han d'estar dimensionats per suportar potències superiors a les corresponents a l'energia elèctrica activa. Aquest fet comporta l'assumpció de costos addicionals, ocasionats tant pels requeriments de disseny dels equips com per les pròpies pèrdues d'energia addicionals.

Les comercialitzadores d'energia, per tant, apliquen penalitzacions i recàrrecs als consumidors que els generen aquests perjudicis quan superen un determinat llindar, ja que els obliga a produir més energia de la que realment s'utilitza.

El factor de potència, que es calcula com la relació entre la potència real (activa) i l'aparent, ens dona informació del percentatge d'energia elèctrica subministrat que és realment emprat per la producció de treball útil. D'acord amb el criteri anterior, cal mantenir aquest percentatge entre el 90 % i el 100 % atès que entre aquests valors es redueix significativament la quantitat d'energia reactiva requerida.

$$\cos \phi = \frac{S}{P}$$

Si el factor de potència es corregeix, per exemple mitjançant la instal·lació d'una bateria de condensadors, es pot reduir o, fins i tot, eliminar totalment el consum d'energia reactiva del consumidor. Amb aquesta mesura, no només s'elimina la necessitat de produir electricitat addicional a l'empresa productora, sinó que, paral·lelament, el consumidor es beneficia de la reducció de les anomenades penalitzacions d'energia reactiva. Per tant, el benefici és doble, en el sentit que tan el consumidor com el productor obtenen estalvis econòmics i, per altra banda, s'obtenen els beneficis mediambientals resultants de la reducció d'emissions de CO₂ associades a la combinació de producció elèctrica.

En el disseny del sistema de compensació de l'energia reactiva, la correcció del factor de potència és més eficaç quan més a prop de la càrrega és en la bateria de condensadors. Cal remarcar que, per tal de poder realitzar un correcte disseny de la bateria necessària, cal disposar de la informació següent:

- La potència activa total màxima de la instal·lació, P (kW);
- El cos ϕ inicial;
- El cos ϕ objectiu, que ha d'estar situat entre $0,9 < \cos \phi < 1$.

El disseny de la bateria ha de permetre que la capacitat dels diversos condensadors que la integren garanteixi un correcte funcionament al llarg de la corba de potència de la instal·lació, per tal de garantir l'estabilitat del cos ϕ objectiu.

Cal tenir molt present que el factor de potència es pot anar modificant al llarg del temps. Per aquest motiu, és recomanable que es revisi periòdicament (entre els 3 i els 10 anys, segons el tipus de consum i d'instal·lacions). A més, els mateixos elements que s'utilitzen per corregir el factor de potència també es deterioren amb el temps i, per tant, també requereixen de proves periòdiques. No obstant això, els grans consumidors industrials disposen de sistemes de gestió d'energia que fan un control continu de tots els paràmetres elèctrics de la planta, entre els quals el factor de potència global (vegeu la figura 32).

Altres mesures a prendre per tal de contribuir a la maximització del factor de potència són les següents:

- minimitzar el funcionament dels motors al ralenti o lleugerament carregades (vegeu la secció 2.3.6);

- evitar l'operació dels equips per sobre de la tensió nominal;
- reemplaçar els motors convencional per motors de baix consum (vegeu la secció 2.3.6);
- les variacions de càrrega en els motors, fins i tot en el cas dels motors eficients, afecten significativament al factor de potència. Per tant, cal tenir en compte que els motors han d'operar prop de la seva capacitat nominal per mantenir un factor de potència elevat (vegeu la secció 2.3.6).

S'estima que el sector industrial en el marc de la UE, amb un $\cos \phi = 0,95$, podria arribar a estalviar fins a 31 TWh d'energia, tenint en compte una estimació de consum elèctric industrial del 65 % sobre el consum total d'electricitat de la UE-25.

Taula 13. Taula de reducció de potència en funció del $\cos \phi$ inicial i final

Reducció de kV-A i A sol·licitats a la red en funció del valor de compensació del $\cos \phi$			
$\cos \phi$ inicial	$\cos \phi$ final		
	0,95	0,98	1
0,5	47,4 %	49,0 %	50,0 %
0,55	42,1 %	43,9 %	45,0 %
0,6	36,8 %	38,8 %	40,0 %
0,65	31,6 %	33,7 %	35,0 %
0,7	26,3 %	28,6 %	30,0 %
0,75	21,1 %	23,5 %	25,0 %
0,8	15,8 %	18,4 %	20,0 %
0,85	10,5 %	13,3 %	15,0 %
0,9	5,3 %	8,2 %	10,0 %
0,93	2,1 %	5,1 %	7,0 %
0,95	0,0 %	3,1 %	5,0 %
0,98		0,0 %	2,0 %
1			0,0 %

En l'apartat 3.6.1 de la present Guia s'exposa un exemple de compensació de l'energia reactiva.

Exemple. Problemes de disseny en el dimensionat de bateries de condensadors.

En els gràfics següents, corresponents a la presa de mesures elèctriques reals en una instal·lació trifàsica dotada de bateries de condensadors, s'observa com el factor de potència està corregit fins un valor superior al 0,95. No obstant això, quan la potència que demana la instal·lació baixa per sota del llindar dels 500 kW el $\cos \phi$ inicia una reducció progressiva fins a arribar a valors inferiors a 0,7 per al cas de $P < 200\text{kW}$. Aquestes reduccions sobtades i puntuals són molt significatives i llasten l'eficiència de la instal·lació, al marge de reduir el període de retorn de la inversió efectuada en la instal·lació de la bateria de condensa-

dor. La raó del problema rau en un mal disseny de la bateria, ja que caldria haver-la dissenyat tenint en compte que la instal·lació no treballa contínuament a la màxima potència i, per tant, caldria haver previst el conjunt de bateries de manera que la capacitat de cada un dels elements permetés l'entrada parcial en funció de la corba de potència.

Figura 32. Factor de potència, $\cos \phi$, per a les diferents fases

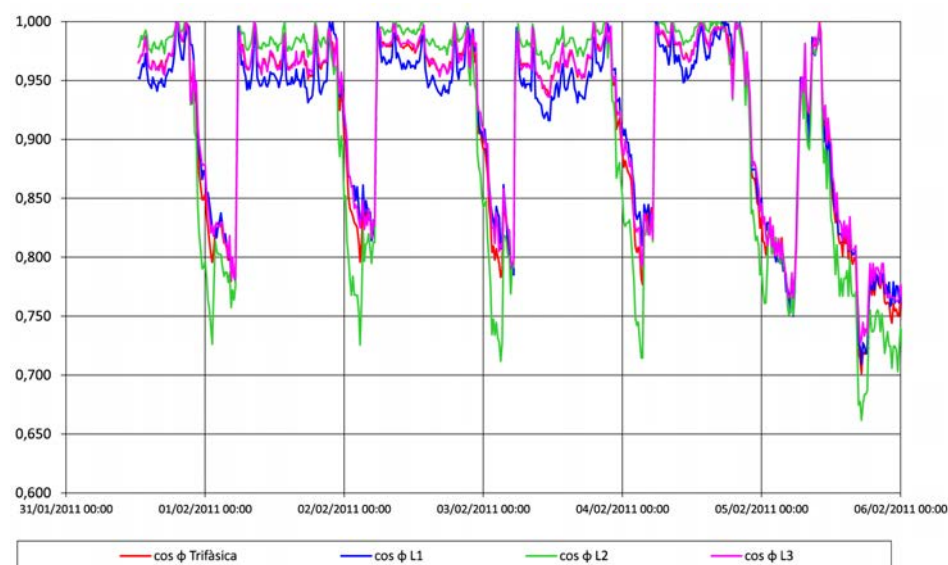
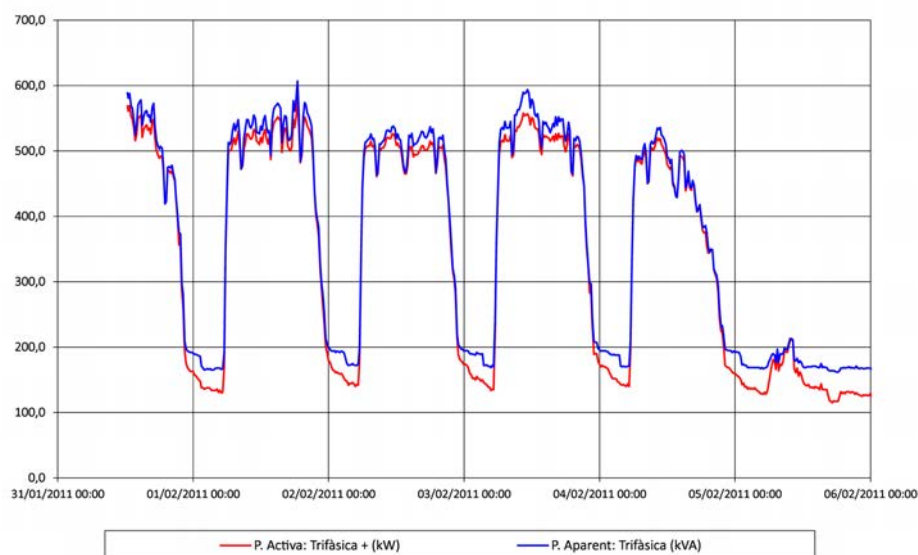
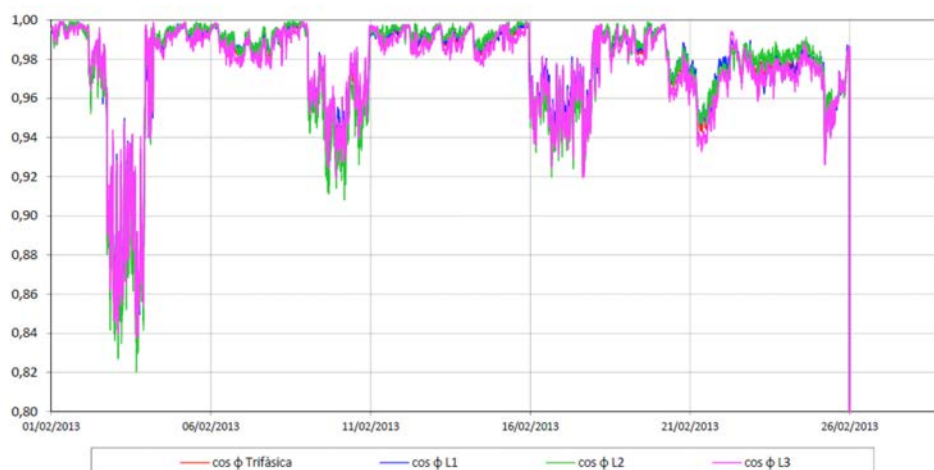


Figura 33. Potència activa i potència aparent trifàsiques



En el gràfic de mesures següent, corresponent a les mesures experimentals del $\cos \phi$ d'una altra instal·lació, també es pot observar el mateix fenomen al qual cal parar atenció en el disseny de la bateria de condensadors.

Figura 34. Mesures experimentals del factor de potència ($\cos \phi$) realitzades per a les diferents fases



2.3.5.2. Harmònics

Actualment, el fenomen de les pertorbacions elèctriques ha pres una importància cabdal, atès que els equips electrònics són molt sensibles i exigeixen qualitat del subministrament elèctric, és a dir, disposar d'un servei de subministrament de qualitat, el que implica disposar d'una tensió i freqüència dins d'uns determinats marges, així com d'una forma de les ones de tensió i corrent sinusoidals.

Paradoxalment, són precisament els equips elèctrics aquells que tendeixen a generar pertorbacions, ja que estan equipats amb dispositius electrònics amb càrregues no lineals, com ara rectificadors o inversors, els quals absorbeixen de la xarxa corrents periòdiques no sinusoidals. Aquests corrents estan formats per una component fonamental de 50 Hz més una sèrie de corrents superposades de freqüències múltiples de la fonamental anomenades harmònics, els quals distorsionen la forma d'ona sinusoidal de la tensió i la intensitat de corrent. Aquests corrents impliquen una deformació de l'ona de corrent i de tensió i un augment dels valors eficaços tant de corrent com de tensió, fet que implica més pèrdues per efecte Joule i pèrdues magnètiques. Es fa necessari, en conseqüència, quantificar la presència d'harmònics a la xarxa per determinar si hi ha deformacions elevades de corrent i tensió. Un dels paràmetres utilitzats és la taxa de distorsió d'harmònics total (THD) que relaciona en tant per cent el valor eficaç del residu harmònic i el corresponent valor de la component fonamental.

Alguns exemples de càrregues no lineals són els rectificadors, arrencadors, variadors de velocitat, algunes formes d'il·luminació elèctrica, els forns elèctrics d'arc, equips de soldadura i ordinadors.

Els harmònics poden causar:

- disparaments intempestius de les proteccions;
- sobreescalfaments per efecte Joule;
- mal funcionament dels sistemes d'UPS i sistemes de generador;
- problemes de mesura;
- sobrecàrrega de conductors;
- errors en ordinadors;
- problemes de sobretensió;
- reducció del factor de potència.

Les principals raons que motiven el seu ús són les següents:

- més fiabilitat dels equips;
- reducció de pèrdues en els temps de parada;
- amb harmònics, corrent reduïda en terres;
- els problemes de seguretat de connexió a terra de disseny depassant si hi ha harmònics.

Per tal de reduir o bé eliminar els harmònics es poden aplicar filtres. La UE ha establert límits per als harmònics com un mètode per millorar el factor de potència, i hi ha normes com l'EN 61000-3-2 i EN 61000-3-12, que requereixen a les fonts d'alimentació commutades tenir filtres d'harmònics.

A causa de la seva naturalesa, els harmònics no poden ser detectats per analitzadors convencionals, ja que els analitzadors utilitzen un mètode de càlcul exclusivament vàlid per a senyals sinusoidals perfectes. Així, els harmònics només poden mesurar-se correctament mitjançant l'ús de mesuradors que incorporin tecnologia RMS real.

Hi ha diferents recomanacions per als valors límit de distorsió harmònica total i individual de corrent i tensió. Concretament, la normativa IEEE Standard 519-1992 estableix els valors límit següents de distorsió d'harmònics de tensió:

Taula 14. Valors límit de distorsió harmònica total i individual recomanats

Tensió al punt de connexió	Distorsió de tensió individual (%)	Distorsió de tensió total (THD) (%)
$U \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < U \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < U$	1,0	1,5

Pel que fa als valors límit de distorsió de corrent, els valors segons la normativa són els següents:

Taula 15. Valors límits de distorsió de corrent

I_{cc}/I_L	Distorsió de corrent individual (valors senars) (%)					TDD (100%)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
$20 < 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
$50 < 100$	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
$100 < 1.000$	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1.000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
Valors parells limitats al 25% dels valors senars límit						

En el cas de la determinació dels límits de distorsió de corrent, la normativa IEEE 519-1992 fa referència a la distorsió de demanda total (TDD) que relaciona en tant per cent el valor eficaç del residu harmònic i el corresponent valor de la component fonamental de la demanda màxima de corrent per trams d'entre 15

i 30 minuts (anomenada I_L). Així mateix, per a la determinació del límit corresponent s'utilitza la relació existent entre el corrent de curtcircuit (I_{CC}) i I_L .

Figura 35. Harmònics (corrent)

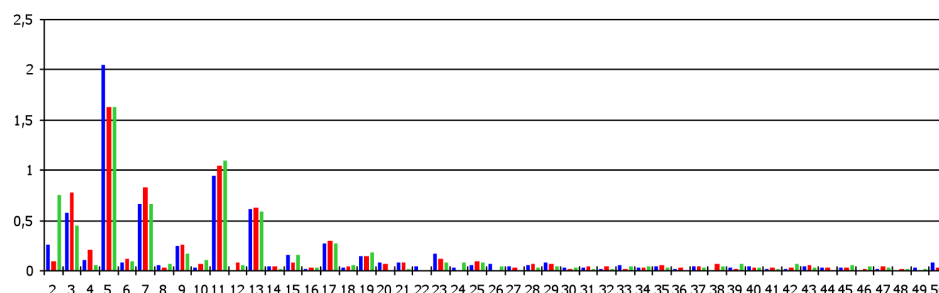
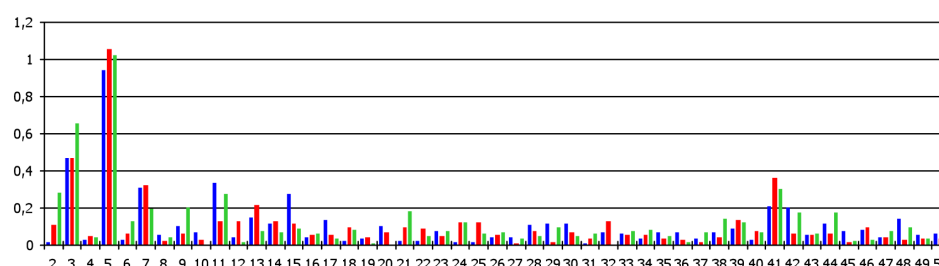


Figura 36. Harmònics (tensió)



En el cas de les normes EN 50160 i EN 61000 s'estableixen com a valors intolerables aquells superiors al 8 % per a THD(U), i es recomana la planificació d'accions necessàries per eliminar-los quan el valor de THD(U) és superior al 2,5 %. Per als diferents components individuals s'estableixen els límits següents:

Taula 16. Distorsió d'harmònics de tensió límit (EN 50160-EN 61000)

Ordre h	3	5	7	9	11	13	15	17
U relativa (%)	5	6	5	1,5	3,5	3	0,5	2

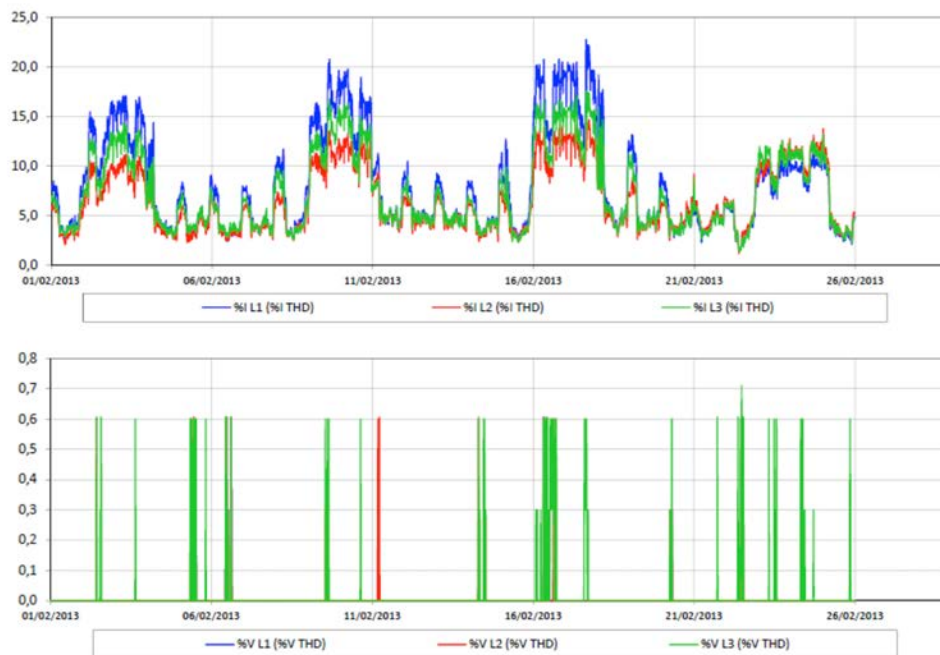
Pel que fa als valors límit de distorsió de corrent, la normativa no estableix límits però es recomana que el valor de THD(I) no superi en cap cas el 15 %.

Exemple. Distorsió per a harmònics

En la figura següent es pot observar la THD d'intensitat (TDH(I)) i la tensió (TDH(U)) d'una instal·lació industrial.

S'observa com, en el cas de la THD(I), les línies 1 i 2 (L1 i L2) presenten distorsions per sobre del límit del 15 % recomanat, en diverses ocasions al llarg del període mesurat. No obstant això, els valors de THD (U) se situen dins dels límits acceptables.

Figura 37. Taxa de distorsió harmònica: intensitat (a dalt) i tensió (a sota)



2.3.5.3. Gestió eficient d'energia en transformadors

Els transformadors són màquines estàtiques constituïdes per un nucli que comprèn una sèrie de plaques ferromagnètiques, amb les bobines primària i secundària enrotllades al voltant dels costats oposats del nucli. La taxa de transformació de les tensions és proporcionada per la relació entre els voltatges d'ambdues bobines, V_2/V_1 .

Tenint en compte que P_1 és la potència elèctrica d'entrada al transformador, la potència P_2 la de sortida i P_L les pèrdues, l'equilibri d'energia és el següent:

$$P_1 = P_2 + P_L$$

Tanmateix, l'eficiència del transformador es defineix com:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_L}{P_1}$$

Com en tota la resta de màquines elèctriques, en un transformador es produeixen pèrdues energètiques les quals són, principalment, de dos tipus: les pèrdues del ferro del circuit magnètic i les del coure dels bobinats.

Pel que fa a les pèrdues en el ferro del transformador, es poden determinar mitjançant l'assaig del seu buit. En aquesta prova, s'alimenta el transformador amb el secundari en buit (obert) de manera que la potència absorbida correspon exactament a les pèrdues magnètiques en el ferro, en ser nul·la la intensitat de corrent en el bobinat secundari fent que no hi apareguin pèrdues de potència. Consegüentment, es pot afirmar que el total de la potència absorbida per un transformador funcionant en buit a la seva tensió nominal representa el valor de la potència perduda en el ferro del circuit magnètic, que roman constant, ja sigui en buit o en càrrega del transformador. Aquestes pèrdues són causades pel fenomen d'histeresi i per les corrents de Foucault, les quals depenen de la tensió de la xarxa, de la freqüència i de la inductància a què està sotmès el circuit magnètic.

Per altra banda, pel que fa a les pèrdues en el coure, són la suma de les potències perdudes en els bobinats d'un transformador, funcionant a càrrega nominal.

El valor d'aquesta potència depèn de la intensitat de corrent tant en el bobinat primari com en el secundari, la qual varia i molt entre el funcionament en buit i el de plena càrrega. La variació del valor de la potència perduda en el coure és proporcional al quadrat de les intensitats de corrent de càrrega i a la resistència dels bobinats, com les pèrdues per efecte Joule de qualsevol conductor a través del qual circula un corrent elèctric.

Les pèrdues de potència totals seran el resultat de les pèrdues en el nucli (pèrdues en el ferro) més les pèrdues en el coure dels bobinats:

- les pèrdues en el ferro són proporcionals a V_2 i assoleixen valors d'entre el 0,2 % i el 0,5 % de la potència nominal $P_n (= P_2)$;
- les pèrdues en el coure són proporcionals a I_2 , i s'estimen entre un 1% i un 3 % de la potència nominal P_n (al 100 % de la càrrega).

La variació del rendiment nominal és funció de la suma de les pèrdues produïdes en el ferro i en els debanats. La característica diferencial entre ambdues classes de pèrdues és que, mentre les del ferro es mantenen constants per un mateix transformador, les del coure dels debanats són funció de la càrrega i, per tant, depenen de la intensitat que circula en cada moment.

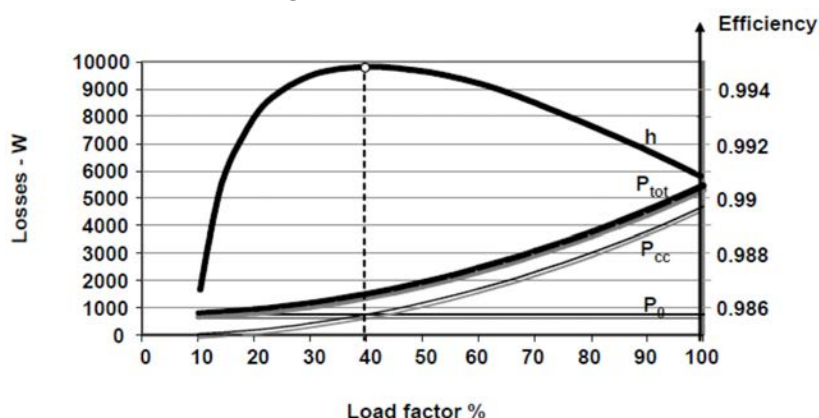
Les diferències entre un transformador d'alta eficiència en comparació amb un transformador estàndard són les següents:

- més qualitat i menys gruix en les laminacions d'acer del nucli del transformador;
- més quantitat de coure en els debanats;
- menys pèrdues en el ferro i en el coure, conseqüència dels punts anteriors;
- dimensions més grans.

Cal destacar que és bàsic disposar de transformadors amb baixes pèrdues en el ferro, ja que aquestes pèrdues es produeixen de manera contínua sempre que el transformador està en tensió al primari, independentment que no hi hagi consum d'energia en el secundari. És a dir, majoritàriament es tracta de pèrdues que es produeixen de manera continuada sempre que no es deixi el transformador sense tensió.

Si un transformador treballa amb un factor de càrrega mitjana inferior al 100 %, es pot demostrar que la relació entre l'eficiència de la transformació i el factor de càrrega segueix la corba en la figura següent (per a un transformador de 250 kVA). En aquest cas, el transformador té un punt màxim en un valor del 40 % del factor de càrrega.

Figura 38. Relació entre les pèrdues en el ferro i el coure en l'eficiència i en el factor de càrrega



Per a qualsevol potència d'un transformador, la relació entre l'eficiència i el factor de càrrega sempre mostra un màxim que, normalment, està prop del 45 % de la càrrega nominal.

És precisament a causa d'aquesta característica del seu comportament que és possible avaluar les alternatives que cal tenir en compte en funció de la càrrega global en què està sotmesa una estació transformadora:

- En el cas que la càrrega elèctrica global sigui inferior al 40-50 % de la potència nominal, es poden reduir les pèrdues ajustant el nombre de transformadors connectats per tal de fer-los treballar amb un factor de càrrega ajustat en el seu valor òptim.
- En el cas que la càrrega elèctrica global sigui superior al 75 % de la potència nominal, cal instal·lar capacitat addicional per evitar pèrdues en la instal·lació.
- En cas de necessitat de substitució de transformadors, actualment és comú l'ús de transformadors eficients, els quals proporcionen una reducció de les pèrdues entre un 20 i un 60 %.

No obstant això, cal tenir en compte que, normalment, a les estacions de transformació hi ha un excés capacitat instal·lada, de manera que el factor de càrrega mitjana és generalment baix. Sempre és preferible disposar de marge de seguretat per garantir una font d'alimentació contínua en el cas de fallada d'un o més dels transformadors, i per tenir capacitat d'ampliació de les instal·lacions.

En general, s'estima que els criteris d'optimització energètica en transformadors són aplicables en un 25 % dels casos. Per altra banda, s'estima que la indústria renova anualment en 5 % del parc de transformadors, casos en què, tal i com s'ha comentat, és recomanable considerar l'alternativa de transformadors eficients per criteris d'eficiència energètica.

Finalment, cal esmentar que, tenint en compte l'elevat nombre d'hores de funcionament en què operen els transformadors, els períodes de retorn de la inversió de projectes de nova instal·lació de transformadors eficients en relació amb els transformadors convencionals, o bé de substitució de transformadors de baixa eficiència, són força curts, amb temps mitjans d'amortització de prop d'un any per a casos específics.

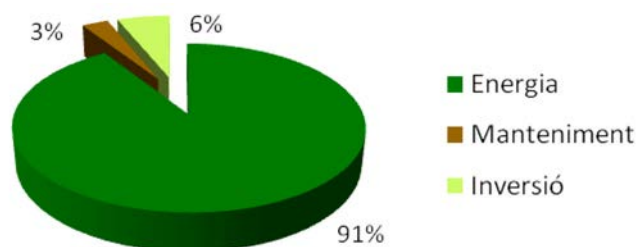
2.3.6. Sistemes accionats per Motors elèctrics

Un subsistema impulsat per un motor elèctric converteix energia elèctrica en mecànica. En la majoria de les aplicacions industrials, el treball mecànic es transfereix a una màquina com a energia mecànica rotatòria a través d'un eix. Els motors elèctrics són els principals dispositius impulsors en la majoria de maquinària industrial: bombes, ventiladors, compressors, mescladors, transportadors, esmoladores, serres, extrusores, centrifugadores, premses, laminadores, etc.

Els motors elèctrics són una de les principals fonts de consum d'energia a Europa. Segons les estimacions, els motors representen aproximadament el 65 % de l'electricitat consumida a la indústria, i un 33 % de l'electricitat consumida al sector terciari.

En l'anàlisi de costos del cicle de vida d'un motor IE3 a 25 anys, el cost imputable a l'energia consumida pel mateix motor (pèrdues) és del 92 % del total. Al gràfic següent es pot observar aquesta proporció.

Figura 39. Costos durant el cicle de vida d'un motor elèctric amb el seu corresponent controlador (Font: elaboració pròpia)



Un subsistema accionat per un motor elèctric. Es tracta d'un subsistema o tren de components, que inclou:

- instal·lació d'alimentació;
- controlador;
- motor elèctric;
- transmissió mecànica;
- màquina accionada.

A continuació es fa una descripció de cadascun dels components del subsistema accionat per un motor elèctric.

Controlador

En la seva forma més simple, és un interruptor o un contactor per connectar i desconectar el motor a la xarxa elèctrica. Pot ser accionat manualment o de forma remota utilitzant un voltatge de control. Es poden haver incorporat algunes funcions de protecció del motor, com en el cas dels arrencadors, que són uns interruptors amb les funcions de seguretat integrades.

Un mètode més sofisticat per a la connexió d'un motor a la xarxa és mitjançant un dispositiu d'"arrencada progressiva" (arrencador estrella-triangle). Aquest dispositiu permet una arrencada moderada d'un motor de corrent altern, mitjançant la reducció de corrent durant l'arrencada i protegint d'aquesta manera la mecànica i els fusibles de protecció. Sense un dispositiu d'arrencada suau, un motor de corrent altern arrenca a la velocitat nominal. Tanmateix, un arrencador suau no és un dispositiu d'estalvi d'energia. L'única manera amb què els dispositius anteriors poden contribuir a l'eficiència energètica és mitjançant l'aturada del motor quan no és necessària la seva operació.

Els dispositius de control de motors exclusius poden regular la sortida (velocitat i parell de torsió) dels motors. El principi de funcionament d'un accionament AC és convertir la freqüència de la xarxa elèctrica (50 Hz a Europa) a un altra freqüència per permetre al motor que canviï la seva velocitat de rotació. Els dispositius de control per a motors de corrent altern es poden designar de les maneres següents: convertidor de freqüència, accionament de velocitat variable (VSD), accionament de freqüència ajustable (AFD), una combinació de les anteriors (ASD, VFD) o inversor.

Motor elèctric

Els motors elèctrics es divideixen en dos grups principals, els motors de corrent continu (DC) i motors de corrent altern (AC). Les tendències tecnològiques de les últimes dècades es s'orienten clarament cap als motors de corrent altern.

Els punts forts dels motors de corrent altern (AC) són:

- robustesa, disseny simple, baix manteniment;
- alt rendiment (especialment en motors d'alta potència);
- cost relativament baix.

Els motors elèctrics d'alimentació individual AC són el tipus de motor elèctric industrial més comú. Es componen d'un sol debanat polifàsic que influencia activament en el procés de transformació d'energia. Els motors elèctrics amb alimentació individual poden ser de dos tipus:

Motors d'inducció (asíncrons), que és el convertidor electromecànic més emprat. El fonament físic d'aquest motor és el camp magnètic giratori de l'entreferro del motor. El camp el genera el bobinat trifàsic de l'estator, alimentat pel corrent altern de la xarxa. La velocitat d'aquest camp és proporcional a la freqüència d'alimentació. El motor asíncron té un rotor en el qual hi ha també un bobinat, o simplement unes barres de coure curtcircuitades. Sempre que hi hagi retard (lliscament) entre la velocitat mecànica del rotor i la del camp magnètic de l'estator, s'indueixen unes tensions i unes corrents en el rotor i apareix un parell electro-magnètic que fa girar el rotor.

Proporcionen un bon parell d'arrencada (encara que ineficient) i poden funcionar com a màquines independents. Aquesta tecnologia de motor és adequada per als motors amb potència fins a diversos MW. Dins dels motors asíncrons hi ha dues famílies constructives que, a més, tenen característiques de funcionament diferents. Són els motors anomenats:

a) Motor asíncron de rotor bobinat, o d'anells fregants.

És el primer motor que es va desenvolupar, dins de la categoria dels asíncrons, però avui el seu ús està reservat a casos d'arrencades molt difícils i a motors de potència mitjana i gran en els quals es vol fer una regulació de velocitat parcial. Aquest motor és més car que el de curtcircuit, que s'explica a continuació, i també els seus costos de manteniment són més alts però, no obstant això, les seves prestacions són més flexibles.

b) Motor asíncron de rotor en curtcircuit, o de rotor en gàbia d'esquirol.

Actualment la seva utilització està molt estesa. A més, l'aparició de convertidors de freqüència ha eliminat part de les limitacions que tenia aquest tipus de motor, com el fet que les seves característiques de funcionament no es poguessin modificar. Això, juntament amb la seva robustesa, unides a uns costos d'adquisició i manteniment baixos, han fet que aquest motor sigui el més utilitzat en les conversions electromecàniques.

Motors síncrons, que és un altre tipus de motor, tot i que el seu fonament també és la formació d'un camp magnètic giratori a l'entreferro del motor. Igual que en el motor asíncron, el camp el genera el bobinat trifàsic alimentat pel corrent altern de la xarxa. Però a diferència del motor asíncron, té un rotor amb un nucli magnètic, que fa que la velocitat del camp magnètic de l'estator coincideixi amb la del rotor i que ambdós sistemes girin en sincronisme, de manera que hi haurà interacció mútua, que donarà origen al parell electromagnètic.

Són bàsicament màquines d'una sola velocitat. No produeixen parells d'arrencada útils i requereixen mitjans auxiliars per a l'arrencada i operació com, per exemple, un inversor electrònic. Els motors síncrons són sovint utilitzats per a aplicacions d'alta potència tals com compressors en la indústria petroquímica.

Els motors síncrons, en general s'han utilitzat per a càrregues molt específiques:

- accionaments de potències altes o molt altes;
- accionaments amb gran precisió en la velocitat;
- accionaments amb moltes hores de funcionament en què prevalgui l'estalvi energètic.

Es tracta d'un motor més car que l'asíncron, els seus costos de manteniment són superiors i, a més, al tenir un bobinat aïllat, necessita un sistema d'excitació autònom per donar el corrent d'excitació pel bobinat inductor del rotor.

Actualment s'estan fabricant motors síncrons amb rotor d'imant permanent de potències cada vegada més elevades. Aquests motors són més simples que els motors de rotor bobinat i, per tant, poden ser més barats i amb un manteniment molt més reduït.

Un nou tipus de motor síncron són els de rotor de reluctància magnètica, que es comencen a comercialitzar i podrien arribar a ser una bona solució per accionaments elèctrics eficients en aplicacions amb càrregues i velocitats variables.

Les seves prestacions són més avantatjoses en els aspectes següents:

- té millor rendiment que els motors síncrons;
- pot funcionar amb factor de potència regulable, en avançament o en retard (inductància o condensador);
- permet una regulació fina de la velocitat quan s'alimenta amb un variador de freqüència.

Pel que fa als **motors de corrent continua (DC)**, una de les tecnologies utilitzades és la tecnologia per "imants permanents" (PM) o sense escombretes, adequats per a aplicacions que requereixen velocitats més baixes que les que normalment s'obtenen amb un motor d'inducció. En aquestes aplicacions a velocitats més baixes (220-600 rev/min), sovint es pot eliminar la transmissió mecànica (caixa de canvis), el que millora el rendiment total del sistema.

Els punts forts dels motors DC (corrent continu) són:

- facilitat amb què permeten un control de velocitat;
- el parell d'arrencada és alt, el que és avantatjós en algunes aplicacions.

No obstant això, el ràpid desenvolupament dels components d'electrònica de potència i dels algorismes de control han millorat el comportament de la tecnologia de AC, de manera que ja no hi ha diferència de rendiment real entre ambdues tecnologies. Els motors i els controladors d'AC moderns superen l'operativitat dels seus homòlegs de DC en molts aspectes. Fins i tot a les aplicacions més exigents, en les quals es requereix un control de la velocitat i del parell de torsió acurat, com a les bobinadores de paper, es poden utilitzar motors i accionaments d'AC.

La transmissió mecànica

La transmissió mecànica connecta mecànicament el motor i la màquina accionada. Es pot tractar d'un simple acoblament rígid que connecta els extrems dels eixos de la màquina i del motor, d'una caixa d'engranatges, d'una transmissió per cadena o corretja, o d'un acoblament hidràulic. Tots aquests tipus de transmissió mecànica indueixen pèrdues de potència addicionals en el sistema d'accionament.

Màquina accionada

També coneguda com a càrrega del motor, és la màquina que realitza la tasca que afegeix valor al producte en relació amb l'objectiu final de la planta indus-

trial. Les tasques realitzades per la màquina accionada es poden dividir en dues categories principals, ja que la màquina pot:

- modificar les propietats de diferents maneres: canviant la pressió (comprimir, bombejar), modificar la forma física (mòlta, xapat de metalls, etc.). En sistemes amb bombes majoritàriament es produeix el canvi de pressió (20 %), ventiladors (18 %), compressor d'aire (17 %) i compressors de refrigeració (11 %);
- moure o transportar materials o objectes: cintes transportadores (4 %), grues (30 %), muntacàrregues (30 %), torns (30 %), etc.

Aquests valors es refereixen a l'energia consumida pels motors per a cada tipus de sistema a la UE-15.

Eficiència energètica en sistemes accionats per motors

Els sistemes accionats per motors consumeixen aproximadament el 68 % de l'energia industrial a la Unió Europea. Per tant, qualsevol mesura d'optimització energètica a plantes industrials ha de preveure els equips accionats per motors.

MTD 14. Optimitzar globalment el sistema al qual està integrat el subsistema del motor, per a posteriorment considerar la secció a la qual pertany el motor.

Entre altres, els factors que tenen influència sobre el consum d'energia dels sistemes accionats per un motor elèctric:

- rendiment del motor;
- dimensionament correcte;
- controls del motor: encesa/aturada i control de velocitat;
- la qualitat de l'alimentació elèctrica;
- sistema de transmissió mecànica;
- manteniment;
- eficiència del dispositiu d'ús final.

En l'apartat 3.7.1 de la present Guia es presenta un exemple de substitució dels accionaments elèctrics d'una instal·lació (motor, control de velocitat, transformador, cablejat, etc.).

A continuació es fa una explicació de les mesures més remarcables per maximitzar l'eficiència energètica d'un sistema accionat per motors, des d'un enfocament dels components del sistema.

2.3.6.1. Motors d'alta eficiència

L'energia que es perd en la transformació d'energia elèctrica a mecànica és important. Per tant, l'eficiència dels motors és un paràmetre determinant en la seva utilització i per a la determinació de les pèrdues associades. El rendiment mesura l'eficàcia de la conversió d'energia elèctrica en treball mecànic, en què l'energia perduda en el procés es dissipa en forma de calor.

Els motors elèctrics tenen unes pèrdues per les seves pròpies característiques físiques. La tecnologia dels motors es basa en materials clàssics, que ofereixen una gran eficiència i fan difícil la millora energètica.

L'aparició de nous materials i l'optimització dels components interns, ha permès que una nova gamma de motors estiguin a l'abast dels consumidors, amb unes pèrdues més baixes que les habituals. Aquests factors permeten un estalvi d'electricitat que fan que el sobrecost d'aquests motors sigui rendible amb un nombre d'hores d'operació, que poden ser més o menys elevades en funció de la potència del motor, preu de l'energia i costos associats.

Es poden distingir fins a quatre tipus diferents de pèrdues en els motors d'inducció: elèctriques, magnètiques, mecàniques i addicionals o suplementàries. Les pèrdues també es poden classificar com a pèrdues fixes, que són aquelles que es mantenen constants per a qualsevol càrrega, i pèrdues variables, que són aquelles que augmenten quan s'incrementa el parell.

a) Pèrdues per efecte Joule o elèctriques

Les pèrdues elèctriques apareixen en els debanats de l'estator i del rotor a conseqüència de les resistències que presenten aquests, per tant es dissipa calor degut al corrent que circula a través d'aquests components.

b) Pèrdues magnètiques

El flux magnètic altern és la causa de pèrdues d'energia, les quals responen a pèrdues per histèresi magnètica i pèrdues per corrents paràsits. Aquestes pèrdues es presenten tant al rotor com a l'estator.

c) Pèrdues mecàniques

Són les pèrdues per fricció de coixinets i resistència de l'aire (ventilació inclosa) provocades pel gir del rotor.

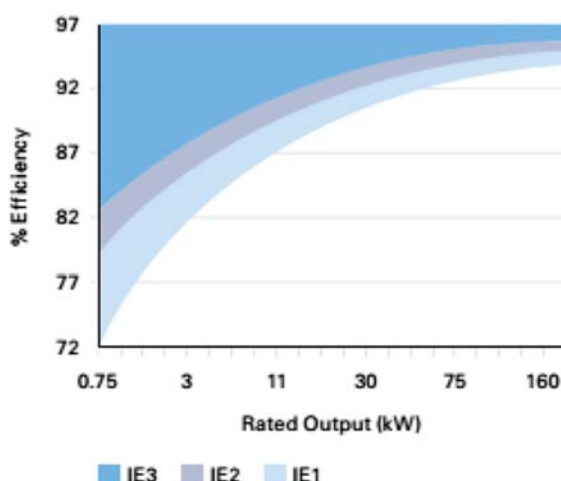
d) Pèrdues addicionals o suplementàries

És el "calaix de sastre" en el qual s'agrupen les pèrdues energètiques de les quals els mecanismes físics no són coneguts en detall. A més, estan influïdes per petites variacions en la fabricació del motor, que resulten difícils de controlar. En els casos d'alimentació amb tensions no sinusoidals, aquestes pèrdues poden adquirir certa importància.

Oportunitats d'estalvi d'energia

Al 2008, la Comissió Electrotècnica Internacional (IEC) va establir una classificació estàndard d'eficiència dels motors. Aquesta classifica l'eficiència del motor d'acord amb les etiquetes IE1, IE2 i IE3, on IE3 és el més eficient. La figura 40 il·lustra les bandes d'eficiència d'acord amb la mida del motor, per a motors de 4 pols, tal com es defineix en la Norma IEC.

Figura 40. Bandes d'eficiència per a un motor de 4 pols, segons la classificació IEC [18]



La Norma IEC substitueix la classificació de l'eficiència dels motors segons l'esquema europeu, havent-hi una coincidència aproximada entre els nivells EFF2 i IE1 i entre els nivells IE2 i el EFF1. Una comparació de les etiquetes de rendiment es presenta en la taula següent:

Figura 41. Comparació de les classes d'eficiència de motors [18]

Efficiency	IEC	European (CEMEP)
Highest	IE3	
	IE2	EFF1
	IE1	EFF2
Lowest		EFF3

El 2009 la Comissió Europea va anunciar nous requisits d'eficiència mínims obligatoris pels motors d'inducció AC que sortissin al mercat, d'acord amb les etapes següent:

- Els motors fabricats a partir de juny de 2011 han de tenir una eficiència equivalent a la categoria IE2.
- Els motors fabricats a partir de gener de 2015 amb potència nominal entre 7,5 i 375 kW, han de tenir una eficiència IE3 o una IE2 i disposar d'un variador de freqüència.
- Els motors fabricats a partir de gener de 2017 amb potència nominal entre 0,75 i 375 kW, han de tenir una eficiència IE3 o una IE2 i disposar d'un variador de freqüència.

Motors d'eficiència superior (IE3)

A continuació es presenten algunes de les millores que s'han introduït en els motors d'alt rendiment, per assolir l'objectiu establert:

Reduir les pèrdues per efecte Joule a l'estator:

- augmentar la conductivitat del coure;
- augmentar la quantitat de coure allotjat a les ranures de l'estator;
- augmentar la mida de les ranures;
- disminuir el cap de la bobina.

Reduir les pèrdues magnètiques:

- millorar la qualitat de la xapa magnètica;
- disminuir el gruix de les xapes que componen l'empilat del motor;
- millorar els processos de fabricació per així evitar rebaves;
- disminuir l'entreferro;
- millorar el factor de bobinat, per exemple el motor de dues capes;
- augmentar la mida de l'empilat, longitud del paquet magnètic.

Reduir les pèrdues per efecte Joule al rotor:

- augmentar la inducció a l'entreferro;
- augmentar la mida de les barres conductores del rotor;
- augmentar la conductivitat de les barres, utilitzar rotors de coure.

Reduir les pèrdues mecàniques:

- optimitzar la ventilació: ús de ventiladors més eficients;
- disminuir les pèrdues per fregament: ús de rodaments amb baix nivell de pèrdues i rodaments més petits.

Reduir les pèrdues addicionals o suplementàries:

Aquest tipus de pèrdues no deixen de ser per efecte Joule i magnètiques que s'originen en el coure de l'estator, en l'alumini o coure del rotor i en la xapa mag-

nètica, segons la càrrega. Tot i que són anàlogues a les indicades anteriorment es tracten separatament ja que per la seva determinació s'utilitzen mètodes diferents als utilitzats en els apartats anteriors. Aquestes pèrdues són d'un valor petit respecte dels totals i es poden reduir mitjançant l'actuació sobre els paràmetres següents:

- modificar el nombre de ranures del rotor N2;
- inclinar les ranures del rotor;
- bobinatge de pas escurçat;
- enrotllament de dues capes;
- connexió en triangle/estrella;
- grups en paral·lel;
- mida de l'espira del rotor;
- resistència transversal del rotor;
- millorar la mecanització;
- canviar la forma de les ranures del rotor;
- actuar sobre l'entreferro.

Totes aquestes millores que s'han introduït en els motors d'alt rendiment, poden atribuir-se en part a la millora en els detalls tècnics que els fabricants han implementat, utilitzant l'experiència i saber dels seus tècnics i a l'optimització de la fabricació basada en CAD.

Els motor d'alta eficiència IE3 poden costar més (entre un 20 % i un 30 % per a motors més grans de 30 kW, i entre un 50 % i un 100 % més per a motors més petits de 15 kW, depenent de la categoria del motor), però utilitzen entre un 2 % i un 8 % menys d'energia, per la qual cosa s'han de tenir en compte a les decisions de compra o substitució.

La eficiència més gran d'un motor IE3 d'11 kW, en ús continu, aportarà gairebé 300 euros/any d'estalvi respecte d'un model amb categoria IE1.

Per aconseguir arribar a la categoria IE3 alguns fabricants estan adaptant tecnologies utilitzades tradicionalment en aplicacions especialitzades com motors d'imants permanents i motors de reluctància als seus productes convencionals. Motors híbrids d'inducció amb imants permanents estan substituint directament motors d'inducció AC d'una sola velocitat. Altres motors d'imants permanents i motors de reluctància requereixen controladors electrònics (variants dels VSD) per poder-se utilitzar a diferents velocitats.

A més d'augmentar l'eficiència energètica, altres avantatges dels motors d'imants permanents i de reluctància són:

- una densitat de potència més gran que resulta en motors més petits;
- un rang de velocitat més ampli;
- augment del parell d'arrencada.

En alguns casos, per exemple, es pot arribar a eliminar la transmissió mecànica abaixant el cost, requerint menys espai i estalviant energia addicionalment.

2.3.6.2. Rebobinar o reemplaçar

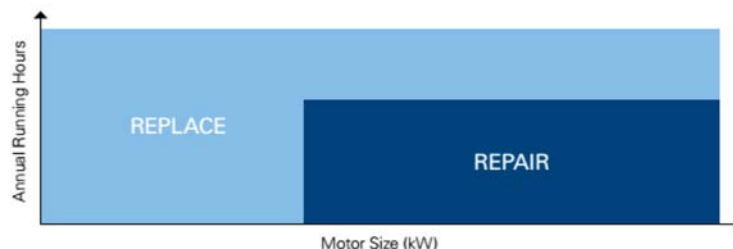
En la majoria dels casos és més rendible reemplaçar un motor que ha fallat per un HEM (motor d'alta eficiència) en comptes de reparar-lo. El cost per rebobinar un motor, especialment els motors més petits és alt, i un motor rebobinat redueix la seva eficiència. La relació cost-benefici d'un reemplaçament d'un motor vell per un HEM variarà d'acord amb la mida del motor, i les seves hores de funcionament.

La pèrdua d'eficiència a causa del rebobinat d'un motor variarà d'acord amb el tipus de motor i els processos utilitzats en la reparació. De manera general,

s'assumeix que en la majoria dels casos, un motor que ha estat rebobinat serà de 0,5 % a un 2 % menys eficient del que era abans. Tot i que el cost d'un rebobinat pot ser més petit que la compra d'un nou motor, especialment per a motors més grans, la reducció en l'eficiència i l'augment dels costos de funcionament podrien superar ràpidament l'estalvi inicial.

La decisió sobre si s'ha de rebobinar o substituir els motors s'ha de basar en els costos del cicle de vida, les hores anuals de funcionament i preus de l'electricitat juntament amb el preu del rebobinat. En general, com més gran sigui el motor, és més probable que sigui més econòmic reparar-lo.

Figura 42. Rebobinar vs. substituir [18]



En termes generals, la diferència de cost entre la reparació i la substitució d'un motor petit (5,5 kW a 11 kW) és tan petita que la substitució ha de ser l'opció escollida, independentment de les hores de funcionament. Per a motors més grans, la reparació és generalment més econòmica, en funció de les hores de funcionament. Al mig hi ha una "zona grisa" que en general requereix d'estudi específic abans de poder fer l'elecció correcta.

No obstant això, es poden aplicar algunes regles generals, tals com:

- si un motor és inferior a 5,5 kW, el motor ha de ser reemplaçat automàticament en lloc de reparar-se;
- el motor nou ha de ser sempre un HEM;
- si es tracta d'un motor d'eficiència superior (HEM), llavors ha de ser reparat;
- un motor no ha de ser rebobinat més de dues vegades;
- si el motor ha estat greument afectat, ha de ser reemplaçat.

2.3.6.3. Variadors de freqüència

Les variacions en la càrrega accionada pel motor són la font d'un considerable consum energètic en cas de no disposar d'un control sobre la pròpia velocitat del motor que la faci adaptar a les necessitats de la càrrega. Quan la càrrega varia, els variadors de freqüència poden reduir el consum energètic del motor, sobretot en bombes centrífugues, ventiladors i compressors, però també a qualsevol aplicació de la indústria de processat.

Amb el motor asíncron, per obtenir una autèntica variació de velocitat és necessari variar la freqüència de les tensions d'alimentació. Si es canvia la freqüència elèctrica aplicada a l'estator d'un motor d'inducció, la velocitat de rotació del camp magnètic induït a l'entreferro tindrà un canvi directament proporcional al canvi de la freqüència elèctrica. Un convertidor de freqüència és un element que cada cop més es va integrant dins dels accionaments elèctrics.

Per aconseguir l'èxit desitjat amb la implantació d'un convertidor de freqüència, primer cal haver fet una bona selecció del motor a controlar. Per aquest motiu, abans de comprar un motor s'han de conèixer els requeriments que es presenten en quant a potència, parell, rang de velocitats i quines funcions ha de realitzar el motor. D'aquesta manera és possible seleccionar i ajustar l'elecció

del convertidor de freqüència més adient, encara que també cal tenir en compte quin es el medi en el que es troba el motor i quins riscos de mal funcionament es poden trobar en aquest medi. Aquests requisits estan tractats en l'apartat 2.3.6.4.

L'ús de variadors de freqüència té els avantatges següents:

- amplien el rang d'utilització del motor;
- proporcionen un aïllament entre el motor i la xarxa;
- proporcionen també una sincronització entre els diferents motors d'un sistema múltiple;
- milloren la velocitat i la fiabilitat de la resposta davant de variacions a les condicions.

El controlador de la freqüència variable d'un motor d'inducció, degudament dissenyat, pot ser molt flexible. Pot controlar la velocitat d'un motor d'inducció dins d'un interval que va des de tan poc com el 5 % de la velocitat base fins al doble de la velocitat base. Tanmateix, és important mantenir certs límits en el voltatge i parell del motor conforme varia la freqüència per assegurar-se de que l'operació és segura.

Els variadors de freqüència es classifiquen típicament per la quantitat de corrent a la sortida que poden proveir de manera contínua per a una temperatura ambient màxima definida. A la seva placa característica s'indica una potència, encara que no vol dir que s'utilitzi només per a les dades de referència. Per exemple, un control que es capaç de proporcionar 7,5 kW a un motor bipolar, no és capaç de donar 7,5 kW per un motor de 24 pols perquè presenta un factor de potència baix i una baixa eficiència a baixes velocitats del motor i li podria correspondre més càrrega màxima.

Hi ha dos tipus bàsics que es distingeixen per la capacitat de sobrecàrrega que poden controlar:

- Parell variable: aquests dispositius de control de parell són capaços de suportar un sobrecorrent de 110-125% durant un minut en relació amb la seva placa de característiques. Aquesta capacitat de sobrecàrrega normalment és suficient per càrregues variables.
- Parell constant: el control del parell constant és capaç de suportar un sobrecorrent del 150 % durant un minut en relació amb la placa de característiques.

Hi ha diferents tècniques de control disponibles en el mercat. Bàsicament, les tècniques de control que s'apliquen als motors d'inducció trifàsics, són els controls vectorials i els controls de tensió/freqüència (V/Hz).

a) Control tensió/freqüència (V/Hz)

Aquest tipus de control manté una ràtio constant de V/Hz sobre el seu rang operatiu. Els motors amb un voltatge de 220V o 400V a 50 Hz tenen una ràtio de 4,4 (220/50) i 8 (400/50). Un cop establert el paràmetre de control, la tensió subministrada al motor per al control a diferents freqüències operatives és estrictament governada per la seva ràtio, llevat que la tensió d'activació o el producte corrent per resistència de compensació ($I \cdot R$) s'activi o la freqüència s'incrementi més enllà d'un cert valor pel qual la tensió del sistema es capaç de mantenir la freqüència.

b) Control vectorial

El control vectorial pot tenir dues variants: control vectorial sense sensors i vector de control per retroalimentació.

El control vectorial separa el flux magnètic produït i els corrents produïts pel parell, subministrant-los al motor i als controls de forma independent. Un convertidor

que utilitza aquesta tècnica de control exhibeix un bon estat estacionari i un bon comportament dinàmic, a més d'un control de la velocitat i del parell molt precís, comparable al comportament que s'obtingria per un motor de corrent contínua.

No obstant això, en alguns processos industrials que exigeixen acceleracions i desacceleracions ràpides de la velocitat dels motors, els sistemes més adequats de control són els servomotors. Vegeu, per exemple l'apartat 3.7.2.

2.3.6.4. Correcte dimensionat del motor

Una part essencial en l'anàlisi de costos energètics d'un sistema motor està en el correcte dimensionament del mateix motor i del seu ajustament a la demanda. Això requereix un estudi exhaustiu, tant de les característiques de funcionament del motor, com dels components bàsics del sistema. Els motors són dispositius bastant simples que es basen en principis bàsics de l'electricitat i del magnetisme. El principi més important és que el pas d'un corrent elèctric a través d'un conductor genera un camp magnètic, i la força del camp magnètic depèn de les propietats magnètiques del material i de la intensitat del corrent. Aquests camps magnètics creen un parell que fa moure l'eix del motor.

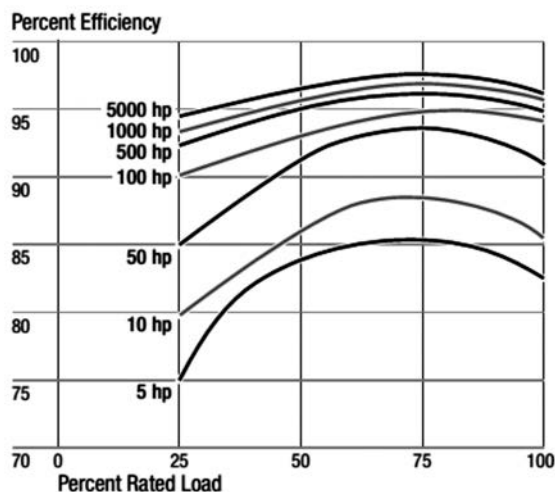
Són diverses les característiques de funcionament bàsiques a l'hora d'especificar correctament les característiques i l'operació d'un motor. Les principals característiques de funcionament són la potència, la velocitat, i parell motor. Altres consideracions importants inclouen eficiència, font d'alimentació, carcassa del motor, lliscament, factor de potència, i la temperatura de funcionament.

Potència

La potència d'un motor és el producte de seu parell i la seva velocitat. Un motor especificat correctament satisfarà els requisits de potència de la càrrega a les condicions de funcionament esperades. No obstant això, per dissenyar correctament un sistema de motor/variador, en general no és suficient només que coincideixi la potència del motor amb la potència de la càrrega. La velocitat i les necessitats de parell de la màquina accionada, així com la capacitat del motor per respondre als canvis de càrrega són factors importants en l'elecció.

La vida del motor es redueix també per problemes de qualitat elèctrica tals com desequilibris de tensió, sobretensions i baixa tensió. A causa de possibles problemes amb la qualitat de l'energia i de les incerteses associades a la determinació de la càrrega, una bona regla és dimensionar el motor perquè operi aproximadament al 75 % de la càrrega nominal. Això generalment proporciona una eficiència màxima.

Figura 43. Eficiència típica per a diferents càrregues i potències [19]



Velocitat

Hi ha diverses maneres de configurar el sistema per proporcionar un control efectiu de la velocitat. Els motors de corrent continu se seleccionen amb freqüència per a aplicacions que requereixen un gran parell a baixes velocitats. Els ajustos al rang de velocitats dels motors de corrent continu poden ser de fins a 20:1. Poden funcionar fins a un 5 %-7 % de la velocitat base del motor, i alguns poden operar fins i tot a 0rpm.

Alguns motors de corrent altern, com motors de rotor bobinat, també ofereixen control efectiu de la velocitat mitjançant el control de la resistència del circuit del rotor. Les relacions de velocitat d'aquests motors també poden ser de fins a 20:1. Per ajustar la resistència dels circuits del rotor, aquests motors acostumen a estar equipats amb anells lliscants que connecten a bancs de resistències externs.

Sistemes més avançats permeten als motors de rotor bobinat regenerar l'energia extreta del circuit del rotor. Aquesta potència regenerada es pot utilitzar per accionar un altre motor o es pot enviar de tornada a la xarxa elèctrica. Aquestes opcions augmenten l'eficiència del procés d'ajust de la velocitat, però també augmenten la complexitat, el cost i el manteniment del sistema.

Parell

El parell és la força de rotació exercida per l'eix del motor. Els motors tenen quatre característiques principals relatives al parell: arrencada o de rotor bloquejat, a plena càrrega, *pull-up* i ruptura. El parell amb rotor bloquejat és el que es desenvolupa a velocitat zero. Parell a plena càrrega és el desenvolupat per un motor a la seva potència nominal. El parell a *pull-up* és generalment al punt més baix de la corba. I el parell de ruptura és el parell més alt que un motor pot generar abans d'aturar-se. Sovint, aquest últim és diverses vegades més gran que el parell a plena càrrega.

Tensió

La tensió nominal d'un motor ha de coincidir amb la de la xarxa d'alimentació. Els motors són relativament sensibles a la tensió d'alimentació, tensió amb la qual sovint no coincideix a causa de caigudes de tensió al sistema de distribució. Els voltatges de línia poden variar depenent de la planta de producció, les càrregues de la planta, els efectes del factor de potència i el rendiment del transformador. És important entendre els efectes d'aquestes variables en el funcionament d'un motor.

La disminució de la tensió de la xarxa en general augmenta el corrent requerit per un motor per satisfer una càrrega determinada. Un corrent més gran genera més calor i pèrdues en els debanats del motor. El funcionament prolongat a baixes tensions escurçaran la vida útil del motor. Alguns motors estan equipats amb un relé de mínima tensió que desactiva el motor en resposta a condicions de baixa tensió.

Segons el disseny del motor, les sobretensions poden provocar saturació magnètica del nucli de ferro que pot conduir a sobreescalfaments del motor. No obstant això, per a tensions de fins a un 110 % de la tensió de la placa de característiques del motor, l'eficiència a plena càrrega del motor pot augmentar fins a un 1 % com a resultat d'una menor intensitat de corrent. Amb una tensió del 110 % de la tensió nominal, el parell d'arrencada i el parell màxim pot augmentar també més del 20 %. El funcionament a una tensió més alta també pot disminuir el factor de potència i augmentar la velocitat de funcionament per càrregues

centrífugues, com bombes i ventiladors, i com a conseqüència el resultat pot ser un augment en el consum d'energia.

Rodaments

Els coixinets són essencials per al funcionament d'un motor. Quan se selecciona un motor, és important assegurar-se que el rodaments són compatibles amb la càrrega, la temperatura, i les condicions ambientals. En aplicacions de motors industrials, els tipus de rodaments més comuns són coixinets llisos i coixinets antifricció. Els coixinets antifricció depenen de l'acció d'elements rodants, com boles o rodets per reduir la fricció, mentre que els coixinets llisos solen utilitzar una pel·lícula de lubricant per separar les superfícies de metall. Tenint en compte que cada tipus de rodaments té diferents requeriments de lubricació, és important seguir les instruccions del fabricant en els procediments de lubricació.

2.3.7. Instal·lacions d'Aire comprimit

L'aire comprimit és aire que s'emmagatzema i s'utilitza a una pressió més gran que l'atmosfèrica. Els sistemes d'aire comprimit agafen una massa d'aire, que ocupa un determinat volum, i la comprimeixen en un volum més petit.

Els sistemes d'aire comprimit són els responsables de fins al 10 % del consum d'electricitat industrial, uns 80 TWh/any a la UE-15.

L'aire comprimit s'utilitza de dues maneres:

- a) Com a part integral dels processos industrials, per exemple:
 - proporcionen nitrogen de baixa puresa per a atmosferes inerts;
 - proporcionen oxigen de baixa puresa per a processos d'oxidació, per exemple, tractament d'aigües residuals, etc.;
 - per a sales netes, com a protecció contra contaminants;
 - barregen processos d'alta temperatura, com l'acer i el vidre;
 - bufen les fibres de vidre i d'envasos de vidre;
 - motlures de plàstic;
 - classifiquen per mitjans pneumàtics.
- b) Com a fluid energètic, per exemple:
 - accionen eines pneumàtiques;
 - accionen actuadors pneumàtics (per exemple, cilindres).

L'ús predominant de l'aire comprimit en activitats sotmeses a la DEI és com a component integral de processos industrials. La pressió, la puresa de l'aire i el perfil de l'aplicació estan predeterminats pel mateix procés.

L'aire comprimit és net i segur a causa del seu baix risc d'inflamació o explosió, per tant, s'utilitza amb freqüència en zones de risc a la indústria química i indústries relacionades. A diferència de l'electricitat, no necessita una canonada o cable de "retorn" i quan s'utilitza per accionar eines proporciona una alta densitat de potència i un parell constant (si la velocitat de rotació és constant), inclús per a velocitats de rotació baixes. Per altra banda, s'adapta fàcilment als canvis en els requisits de producció i es pot utilitzar segons la seva pròpia lògica de control pneumàtica.

Les eines pneumàtiques són més adequades per la seva excel·lent relació pes-potència que fa possible utilitzar-les en períodes de temps llargs sense que hi hagi sobreescalfaments i amb costos de manteniment baixos. A causa del creixent interès en l'eficiència energètica, els fabricants de compressors i equips associats han desenvolupat tecnologies i eines per a l'optimització dels sistemes d'aire comprimit.

Avui en dia, les inversions es regeixen per l'anàlisi del cost durant tota la vida útil del sistema, que en el cas d'un sistema d'aire comprimit gran s'estima entre 15 i 20 anys. Durant aquest període, el perfil de la demanda d'una instal·lació pot variar i ha de ser reavaluat, tenint en compte les noves tecnologies disponibles per millorar l'eficiència dels sistemes existents.

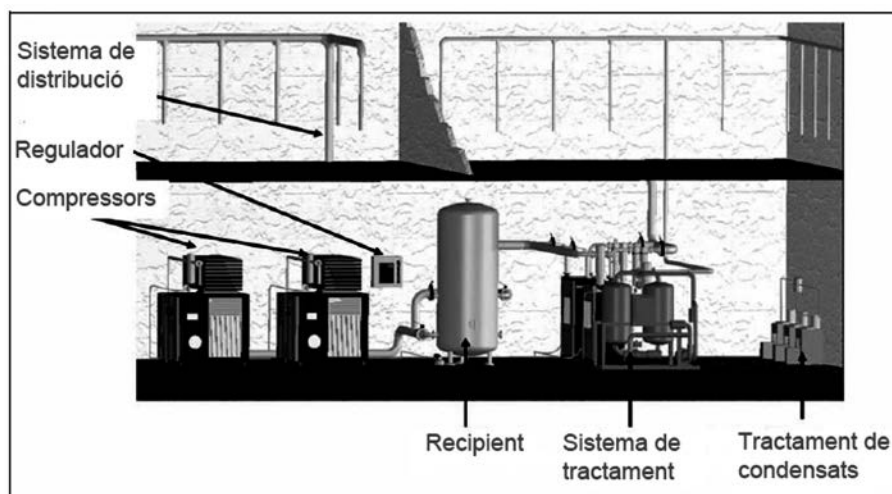
Components d'un sistema d'aire comprimit

Un sistema d'aire comprimit està format per quatre subsistemes:

- generació;
- emmagatzematge;
- tractament;
- distribució.

Hi ha també sistemes auxiliars, tals com el sistema de recollida de condensats i el sistema de recuperació de calor.

Figura 44. Components d'un sistema d'aire comprimit [10]



Normalment, la majoria d'instal·lacions disposen de centrals multicompressors, amb un sistema de tractament centralitzat i una gran xarxa de distribució.

Tipus de compressors

Les tecnologies de producció d'aire comprimit inclouen dos tipus bàsics de compressors: de desplaçament positiu i dinàmics.

Els compressors de desplaçament positiu incrementen la pressió d'una certa quantitat d'aire reduint el volum ocupat per l'aire a la pressió inicial. Hi ha dos tipus diferents de compressors de desplaçament positiu: els alternatius i els rotatius.

Per la seva banda, els compressors dinàmics són màquines rotatives de flux continu en què la ràpida rotació dels elements accelera l'aire mentre que un difusor posterior transforma l'energia associada a la velocitat del fluid en energia de pressió.

L'eficiència energètica dels sistemes d'aire comprimit

L'eficiència energètica de la producció, transformació i distribució d'aire comprimit està predeterminat per la qualitat de la planificació, la fabricació i el mante-

niment del sistema. L'objectiu d'un bon disseny és proporcionar aire comprimit adaptat a les necessitats de l'aplicació. Un bon coneixement de l'aplicació i un estudi acurat de la demanda d'aire comprimit són bàsics per a una posterior aplicació de tècniques d'eficiència energètica. És raonable incorporar aquestes tècniques a un sistema de gestió d'energia, tal i com s'ha explicat anteriorment.

En la taula 17 se'n presenta un resum:

Taula 17. Millores d'eficiència energètica en sistemes d'aire comprimit i aplicabilitat [10]

Mesura d'estalvi energètic	% d'aplicabilitat en sistemes d'aire comprimit	% reducció consum anual
Instal·lació		
Canvi de motors per altres més eficients	25	2
Millores als motors (control de velocitat)	25	15
Actualització del compressor	30	7
Sistema de control sofisticat	20	12
Recuperació de calor per altres funcions	20	20-80
Millora de la refrigeració, assecat i filtratge de l'aire	10	5
Disseny del sistema, incloent sistemes multipressió	50	9
Reducció de pèrdues de pressió	50	3
Optimització dels dispositius finals	5	40
Operació i manteniment		
Reducció de pèrdues d'aire	80	20
Substitució de filtres freqüent	40	2

MTD 15. Optimitzar l'eficiència energètica en sistemes d'aire comprimit.

Per millorar els estalvis energètics en sistemes d'aire comprimit, les MTD són les següents:

- tècniques relatives al mateix disseny dels paràmetres del sistema: pressió, volum d'emmagatzematge i xarxa de distribució;
- implementació d'un sistema de control sofisticat;
- variadors de freqüència;
- recuperació de la calor del compressor;
- reducció de les pèrdues d'aire;
- reducció de les pèrdues de pressió;
- altres tècniques.

A continuació es descriuen amb més detall totes aquestes tècniques, relatives a l'eficiència energètica en sistemes d'aire comprimit.

2.3.7.1. Disseny del sistema

Hi ha tres paràmetres fonamentals a l'hora de dissenyar un sistema d'aire comprimit: el valor de la pressió del sistema, l'elecció del volum d'emmagatzematge i el dimensionament de la xarxa de distribució i la col·locació dels compressors dintre d'aquesta. A continuació es fa una breu explicació de cadascun dels paràmetres:

- **Pressió del sistema.** Pot haver la necessitat de tenir més d'un nivell de pressió. La majoria dels consums necessiten una pressió de 6 bar, però hi ha alguns altres que poden precisar de pressions de fins a 13 bar. Una pràctica habitual és dissenyar el sistema per satisfer els requeriments dels equips que necessiten la pressió més alta, amb la conseqüent pèrdua d'eficiència energètica que això suposa. La millor tècnica disponible en l'elecció de la pressió del sistema tracta de fixar una pressió que satisfaci el 95 % dels consum i utilitzar algun petit dispositiu per augmentar la pressió només per als consum que ho necessiten.
- **Volum d'emmagatzematge.** S'aconsella la instal·lació d'un tanc d'emmagatzematge regulador per ajudar a eliminar les fluctuacions en la demanda i aconseguir un funcionament més estacionari dels compressors. Es pot tenir més d'un tanc d'emmagatzematge, situat al costat dels punts de demanda més fluctuant, la qual cosa afavoreix el manteniment d'una pressió del sistema més baixa pel seu efecte absorbidor dels pics de demanda que produeixen.
- **Dimensionament de la xarxa de distribució.** Les pèrdues acceptables al sistema de distribució no han de superar el 10 % de la pressió de descàrrega del compressor. Això es pot aconseguir mitjançant l'ús dels filtres, assecadors, mànegues adequades i de la monitorització regular de les pèrdues, així com de la minimització de la distància que l'aire ha de recórrer i de, per exemple, l'ús de canonades soldades. Les pèrdues més grans, no obstant això, es produeixen sovint als punts d'utilització; de vegades, l'addició de nous consums, o l'eliminació d'uns altres, sense actualitzar la xarxa de distribució comporta una pèrdua d'eficiència energètica.

2.3.7.2. Sistema de control d'aire comprimit

L'eficiència energètica d'un sistema multicompressor es pot millorar mitjançant la implementació d'un sistema de control mestre que rebí informació dels compressors i actuï en conseqüència sobre cadascun d'ells individualment.

La capacitat d'actuació del sistema de control amb els compressors fluctua des d'un simple relé o actuador fins a una xarxa de comunicació que adquireixi tota la informació possible dels compressors i que treballi per optimitzar l'estalvi energètic.

Un únic compressor:

Quan només hi ha un **únic compressor**, el funcionament òptim és quan el compressor treballa contínuament a la velocitat que dona l'eficiència energètica més alta.

Quan el **compressor no és de velocitat variable**, si la freqüència d'encesa/aturada ha de ser molt gran, és necessari mantenir-lo en estat de repòs (no aturat), per no causar danys al motor elèctric. El consum elèctric en estat de repòs és d'un 20-25 % del consum a un 100 % de càrrega. Algunes pèrdues addicionals deriven de la ventilació del compressor després de l'aturada i de les pèrdues elèctriques durant l'arrencada. L'eficiència energètica en aquest mode de funcionament pot, no obstant això, créixer per sota de la del mode de funcionament continu a màxima velocitat si no es tenen clars alguns paràmetres

com el perfil de càrrega, la capacitat d'emmagatzematge, la banda de pressió admissible, etc. És, per tant en aquests casos que és útil l'ús d'un sistema sofisticat de control que optimitzi tots aquests paràmetres. Els compressors de velocitat fixa poden ser realment eficients si es poden arribar a minimitzar els períodes de repòs.

En **compressors amb control de velocitat**, el mateix funcionament del variador de freqüència juntament amb les pèrdues induïdes als motors asíncrons impliquen una pèrdua d'eficiència entre un 3 i un 4 % respecte dels motors de velocitat fixa. Aquesta pèrdua d'eficiència, no obstant això, queda absorbida pels avantatges en la regulació que aporten els controladors de velocitat variable, eliminant els períodes de repòs. En l'apartat 3.8.1 de la present Guia es presenta un exemple d'implementació d'un compressor de velocitat variable.

Sistemes multicompressor:

En sistemes amb diversos compressors les fluctuacions en l'entrega d'aire seran satisfetes amb un control mestre per mitjà de combinacions dels modes de funcionament de diversos compressors i les transicions entre aquests modes. Això també inclou el control de velocitat d'un compressor de freqüència variable per minimitzar significativament els períodes de repòs i la commutació en compressors de velocitat fixat.

Hi ha, a grans trets, dues maneres de controlar un sistema de diversos compressors i els seus components associats: el control de xarxa i el control mestre.

Control en xarxa. Les xarxes de control menys sofisticades utilitzen esquemes en cascada. Aquests sistemes són capaços d'evitar compressors treballant a càrregues parcials, però no poden evitar completament l'aproximació a punts de baixa pressió als quals no se satisfaci la demanda, atesa l'addició, cada vegada més, de compressors a la xarxa, amb les seves consignes associades i de les operacions de càrrega i descàrrega que es presenten.

Alguns sistemes en cascada més sofisticats utilitzen un punt de referència únic per a les decisions de marxa/aturada, etc. Als sistemes amb compressors de desplaçament positiu (alternatius, rotatius de cargols, etc.) tots els compressors es mantenen a plena càrrega amb l'excepció d'un compressor que opera a càrrega parcial.

La integració d'un compressor de velocitat variable en un sistema amb diversos compressors pot ser bona en sistemes de baixa capacitat d'emmagatzematge, amb una demanda d'aire molt fluctuant, amb pocs compressors i/o compressors no prou esglaonats. A més, per sistemes amb compressors ben esglaonats, el mòdul de control ajusta amb precisió el flux d'aire entregat a la demanda mitjançant l'activació de diferents combinacions de compressors, amb una freqüència de commutació baixa i baixos períodes de repòs.

No obstant això, no hi ha controls d'aquest tipus que puguin governar a la vegada compressors rotatius de cargol, alternatius, i compressors centrífugs com un sol sistema. Per a això, es requereix un sistema de control mestre, particularment si a la vegada s'ha de controlar i operar compressors, sistemes de refrigeració, assecadors, filtres, trampes, emmagatzematge, pressió i cabals, o qualsevol altra part d'un sistema d'aire comprimit.

Control mestre (*master control*). Si la complexitat supera la capacitat del control local i de xarxa, serà necessari un sistema de control mestre per coordinar totes les funcions necessàries. El sistema de control opera diversos compressors amb un punt d'ajust de pressió comú. Això es tradueix en estalvis d'energia

en comparació amb els esquemes de funcionament en cascada. Els sistemes de control sofisticats permeten un rang de pressió més estret sense augmentar les freqüències de commutació o els períodes de repòs. Un rang de pressió més estret contribueix a reduir la contrapressió i, per tant, la demanda d'energia específica en la càrrega dels compressors.

Els sistemes més sofisticats d'aquest tipus, utilitzen lògiques dinàmiques per prendre les decisions sobre com el sistema respon als canvis. Aquests canvis poden produir-se al costat de la demanda, de la producció, o en les condicions ambientals, per exemple. Tots aquests canvis poden afectar al rendiment del sistema i condicionar la forma en què el sistema ha de respondre. Alguns d'aquests canvis requeriran un suport de curta durada, com emmagatzematge addicional, altres demanaran potència addicional i la posada en marxa de més compressors, i alguns requeriran una combinació de totes dues respostes.

Un control mestre ben configurat executa la resposta més eficient energèticament als esdeveniments que es produeixen en un sistema. Un sistema de control mestre té la capacitat de realitzar aquestes funcions:

- Enviar/rebre comunicacions i comunicar-se amb el sistema d'informació de la planta.
- Accedir a les dades operacionals i als modes de funcionament de cada compressor.
- Ajustar la pressió i el flux d'aire.
- Seleccionar una combinació adequada de compressors per optimitzar eficiència.
- Minimitzar les freqüències de commutació i els estats de repòs dels compressors de velocitat fixa.
- Optimitzar el sistema de control per autoaprenentatge.
- Predir la demanda.
- Monitoritzar el punt de rosada dels assecadors, pressions diferencials dels filtres, funcionament de les trampes de condensats i de les condicions climàtiques per ajustar els paràmetres.

Aquests sistemes de control sofisticats es poden considerar com l'estat de l'art en la matèria i, per tant, es tracta d'una millor tècnica disponible per a instal·lacions DEI. L'estalvi d'energia associat a un sistema de control mestre és, aproximadament, un 12 %, segons aporta l'experiència.

2.3.7.3. Variadors de freqüència

Els motors de velocitat variable s'utilitzen principalment quan la necessitat d'aire comprimit fluctua tant horàriament, com diàriament. Els sistemes de control clàssics tals com els de tipus marxa/aturada, tipus modulació, tipus control de capacitat, etc., tracten de seguir aquests canvis en la demanda d'aire comprimit. Si aquestes fluctuacions tenen una freqüència molt alta, es produeix una disminució en l'eficiència energètica. En compressors de velocitat variable, la velocitat del motor elèctric varia depenent de l'aplicació, el que comporta un estalvi d'energia més gran.

En la majoria d'aplicacions d'aire comprimit hi ha fluctuacions de la demanda considerables, per tant, els estalvis d'energia associats a un compressor de velocitat variable són molt importants. No és recomanable l'ús de controladors de velocitat variable en compressors que treballen gran part del temps a plena càrrega, ja que no suposarien cap estalvi d'energia.

A part dels estalvis d'energia associats a la utilització d'un dispositiu de velocitat variable, hi ha altres beneficis com són:

- Nivell de pressió molt estable.
- Factors de potència més alts.
- El corrent d'arrencada no sobrepassa mai el corrent de plena càrrega, amb la conseqüent disminució d'alguns dels dispositius de protecció.
- Arrencada suau del compressor, eliminant els pics de corrent i de parell.
- Reducció del nivell de soroll.

Els controladors de velocitat variable són aplicables a una gran quantitat de sistemes d'aire comprimit, i a compressors existents de velocitat fixa. En l'actualitat, gran part de la indústria ja està utilitzant aquest tipus de dispositiu.

L'anàlisi del cicle de vida d'un compressor indica que un 80 % del seu cost és degut a l'energia per al seu ús. Amb l'ús d'un controlador de velocitat variable es pot reduir en un 15 % el consum d'energia durant la seva vida útil.

2.3.7.4. Recuperació de la calor

Entre un 80 i un 90 % de l'energia elèctrica utilitzada per un compressor industrial es converteix en calor i és evacuada a l'exterior. Una bona part d'aquesta energia tèrmica que es perd, entre un 50 i un 90 %, es pot recuperar mitjançant la utilització d'un sistema de recuperació de calor.

Hi ha dues maneres de recuperar la calor evacuada pel compressor:

- Sistema de recuperació per aire. Consisteix en un flux d'aire que travessa la carcassa del compressor i recull la calor evacuada. Posteriorment, aquest aire es pot utilitzar per a assecatge industrial, com a aire d'aspiració preescalfat per una caldera o qualsevol altra aplicació que requereixi d'aire escalfat. Normalment, els compressors industrials tancats en cabines ja porten incorporat el sistema de recuperació i el ventilador, i només ha de dissenyar-se la xarxa de conductes vers el punt d'aire calent.
- Sistema de recuperació per aigua. La calor recuperada prové de la lubricació del compressor. Aquest sistema és menys eficient si el que es vol es climatitzar un espai, ja que farà falta un altre intercanvi de calor entre l'aigua i l'aire impulsat per climatitzar l'espai i, per tant, la temperatura del flux de calor serà més baixa. L'aigua escalfada es podrà utilitzar posteriorment per a sistemes de calefacció central, sistemes de neteja industrial, bombes de calor, etc.

La recuperació de calor dels sistemes d'aire comprimit és una solució fàcil d'implementar en sistemes existents, tant si la refrigeració del compressor és per aire com per aigua. Les temperatures que es poden aconseguir per sistemes de recuperació d'aire són entre 25 i 40 °C, mentre que per a l'aigua poden oscil·lar entre els 50 i els 75 °C.

En l'apartat 3.8.2 de la present Guia s'exposa un exemple de recuperació de la calor de refrigeració dels compressors per a la producció d'aigua calenta.

2.3.7.5. Reducció de les pèrdues d'aire comprimit

Les fuites poden ser una font important de pèrdues d'energia en un sistema d'aire comprimit industrial, i poden arribar a representar entre un 20 i un 30 % de la producció d'un compressor en una planta que no ha estat ben mantinguda. Contràriament, una detecció proactiva de fuites i la seva reparació pot reduir les fuites a menys d'un 10 % de l'aire de sortida del compressor.

A part de ser una font d'energia desaprofitada, les fuites també poden contribuir a altres pèrdues d'explotació, ja que:

- Provoquen una caiguda de la pressió del sistema, el que pot provocar que les eines pneumàtiques funcionin menys eficientment, afectant negativament a la producció.

- Reverteixen en que l'equip funcioni durant més temps i, per tant, escurcen la vida del sistema.
- Un augment del temps de funcionament també pot conduir a requisits addicionals en les parades de manteniment i per tant a un augment del temps d'inactivitat.
- Poden donar lloc a l'augment innecessari de la capacitat del compressor.

Tot i que les fuites poden venir de qualsevol part del sistema, sovint els punts més problemàtics de la instal·lació són:

- Els acoblaments, mànegues, tubs i accessoris.
- Els reguladors de pressió.
- Les trampes de condensat obertes i les vàlvules de tancament.
- Connexions per a les canonades, desconectors i segelladors de rosques.

Estimació del flux de fuites

Per als compressors que tenen controls de marxa / aturada o càrrega / descàrrega, no hi ha una manera fàcil d'estimar la quantitat de fuites en el sistema. Aquest mètode consisteix a posar en marxa el compressor quan no hi ha demandes sobre el sistema i a aturar tots els consums i equips accionats per aire. S'han d'agafar mesures per determinar el temps mitjà que es triga a carregar i descarregar el compressor. El compressor es carrega i descarrega perquè les fuites d'aire fan caure la pressió. Les fuites totals (percentatge) poden ser calculades de la manera següent:

$$\text{Fuites (\%)} = [(T \times 100) / (T + t)]$$

en què:

T = temps en càrrega (minuts)

t = temps sense càrrega (minuts)

Les fuites s'expressen en termes de percentatge de la capacitat perduda del compressor.

Les fuites es poden estimar també amb d'altres estratègies, com per exemple, amb un manòmetre aigües avall del tanc d'emmagatzematge. Aquest mètode requereix d'una estimació del volum total del sistema, inclòs el dels tancs secundaris situats aigües avall, canonades principals i canonades secundàries. El sistema es posa en marxa i es porta a la pressió de funcionament normal ($P1$). Es mesura el temps (T) que es necessita perquè la pressió baixi més ($P2$), que hauria de ser aproximadament la meitat de la pressió de funcionament.

Les fuites es poden calcular de la manera següent:

$$\text{Fuites (m}^3\text{/min)} = (V \times (P1 - P2) / T) \times 1,25$$

en què:

V és el volum del sistema en m^3

$P1$ i $P2$ en bar

T és en minuts

El multiplicador de 1,25 corregeix les fuites a la pressió normal del sistema, el que permet reduir les fuites amb la caiguda de pressió del sistema. Fuites de més del 10 % indiquen que el manteniment del sistema es pot millorar. Aquestes proves s'han de dur a la pràctica com a part d'un programa regular de detecció de fuites i reparació.

Detecció de fuites

La millor manera de detectar fuites és utilitzar un detector acústic ultrasònic, ja que poden reconèixer sons sibilants d'alta freqüència associats a les fuites

d'aire. Aquestes unitats portàtils consisteixen en uns micròfons direccionals, amplificadors i àudio filtres i tenen indicadors visuals o audiodfons per detectar fuites.

Els detectors ultrasònics poden detectar fuites de mida mitjana a gran. Els avantatges de la detecció de fuites per ultrasons són la seva versatilitat, velocitat, facilitat d'ús, capacitat de realitzar proves mentre l'equip està en funcionament i la capacitat de trobar una àmplia varietat de fuites.

Un mètode més simple que la detecció per ultrasons és aplicar aigua sabonosa amb un pinzell en àrees sospitoses de la superfície de la canonada.

Com corregir fuites:

Les fuites es produeixen amb més freqüència en les unions i connexions. Reparar fuites pot ser tan simple com collar una connexió o tan complex com la substitució d'equips defectuosos, com ara: acoblaments, accessoris, seccions de canonada, mànegues, juntes, drenatges i trampes. En molts casos, les fuites són causades per no netejar les rosques o per un segellament inadequat. Altres vegades els equips fora de servei són també una font important de fuites. Per tant, s'han d'aïllar amb una vàlvula en el sistema de distribució. Una altra forma de reduir les fuites és reduir la pressió del sistema; com més baixa és la pressió diferencial a través d'un orifici o fuita, més petit serà el flux d'aire.

Una vegada les fuites han estat reparades, el sistema de control s'ha de modificar per reavaluar el potencial d'estalvi total.

L'establiment d'un programa de prevenció de fuites

Hi ha dos tipus bàsics de programes de reparació de fuites, el programa de cerca i reparació i el programa d'etiquetatge de fuites. El programa de cerca i reparació és el més senzill; consisteix simplement a trobar la fuita i reparar-la immediatament. Amb el programa d'etiquetatge de fuites, la fuita s'identifica amb una etiqueta i s'emmagatzema la informació al sistema per a la seva reparació en una data posterior.

Hi ha diversos elements clau perquè un programa de prevenció de fuites sigui un èxit.

- Establir bases per a la comparació de l'eficiència del programa de reparació de fuites d'aire.
- Establir el flux de fuites.
- Determinar el cost de les fuites d'aire.
- Identificar fuites.
- Documentar les fuites.
- Donar prioritat a la reparació de fuites.
- Ajustar els controls un cop reparades les fuites.
- Documentar les reparacions, tipus, dimensions i costos que suposen.
- Comparar segons les bases establertes i publicar els resultats.
- El programa ha de ser permanent.

Un bon programa de reparació de fuites d'aire comprimit és molt important per mantenir l'eficiència, la fiabilitat, l'estabilitat i la rendibilitat de qualsevol sistema d'aire comprimit.

Exemple. Cost de detecció de fuites

El cost de la detecció i reparació de fuites depèn de cada cas particular. Per a un sistema d'aire comprimit de 50 kW, amb una taxa de fuites mitjana d'un 20 %:

- Hores de funcionament: 3.000 h/any
- Cost de funcionament: 0,08 €/kWh
- Cost del sistema de reparació i detecció de fuites: 1.000 €/any
- Estalvi mitjà de 2.400 €/any

La reparació de fuites és l'acció més important a l'hora de reduir el consum d'un sistema d'aire comprimit.

2.3.7.6. Reducció de les pèrdues de pressió

Algunes tècniques que ajuden a controlar el consum energètic del sistema mitjançant el control de la pressió són les següents:

- Reduir la pressió de descàrrega. Molts compressors d'aire funcionen amb una pressió de descàrrega a plena potència de 7 bar i una pressió de càrrega de 7,5 bar o superior. La majoria de la maquinària pot funcionar de manera eficient amb una pressió de subministrament de 5,5 bar o inferior. Si la pressió de descàrrega del compressor es redueix al mínim valor admissible, es poden aconseguir importants estalvis.
- Reduir la pressió d'operació. La reducció de la pressió del sistema també té efecte en la millora del rendiment general del sistema, amb una reducció de les taxes de fuites, una reducció de la capacitat, etc. Una pressió més baixa també redueix l'estrès dels components i dels equips. No obstant això, una pressió d'operació més baixa pot requerir de modificacions a d'altres components, com els reguladors, filtres, i la mida i la ubicació dels tancs d'emmagatzematge, etc.
- Dissenyar correctament els components. S'ha d'anar amb compte amb la reducció de la pressió mitjana del sistema ja que els grans canvis en la demanda poden fer que la pressió en els punts finals caigui per sota del mínim admissible i els equips deixin de funcionar correctament. Aquests problemes es poden evitar amb un disseny correcte dels components del sistema, controls, capacitat i ubicació de l'emmagatzematge.
- Treballar a pressions baixes. Per a aplicacions que requereixen quantitats significatives d'aire comprimit, es recomana que l'equip sigui apte per funcionar a nivells de pressió més baixos. Tot i que això suposa un cost més alt dels equips, en general es recupera amb l'estalvi d'energia.
- Considerar les pèrdues de pressió en el circuit. L'especificació pels equips consumidors ha de tenir en compte les pèrdues de pressió de filtres, mànegues, etc., col·locades aigües avall del punt de descàrrega. Això es traduirà en uns costos de funcionament del sistema més grans.
- Dissenyar segons les necessitats de pressió individuals de cada aplicació. Si una aplicació individual requereix més pressió, és recomanable la modificació d'aquesta aplicació (diàmetre del cilindre més gran, es poden canviar les relacions de transmissió, un motor més gran, etc.), en lloc d'eleva la pressió d'operació de tot el sistema. El cost de les millores es probablement insignificant en comparació amb la reducció del consum d'energia aconseguida amb l'operació del sistema a menys pressió.
- Ajustar el control dels compressors. Quan s'ha reduït i controlat correctament la pressió, el proper pas és ajustar el control dels compressors per obtenir un funcionament més eficaç, i fins i tot una possible descàrrega d'alguns dels compressors.
- Per ajustar la franja de pressió amb la qual treballen els compressors es pot optar per tres vies diferents:
 - Utilitzar commutadors de pressió o pressòstats mecànics que engeguin i aturin els compressors.

- Controlar mitjançant l'ús d'un compressor amb convertidor de freqüència que actuï quan s'hagi de cobrir algun pic de la demanda.
- Reducir la pressió dels compressors fins a la mínima admissible mitjançant el sistema de control. Els sistema de control actuals, basat en microprocessadors i compressors de velocitat variable, són més ràpids i precisos i treballen amb rangs de control més estrets, cosa que permet mantenir una pressió mitjana més baixa sense traspasar els requisits mínims del sistema.

2.3.7.7. Altres tècniques per augmentar l'eficiència energètica

A part de les exposades fins ara, hi ha també altres tècniques amb les quals es pot augmentar l'eficiència d'un sistema d'aire comprimit:

- Alimentar el compressor amb aire fred exterior. La termodinàmica explica que la compressió d'aire calent requereix més energia que la compressió d'aire fred. Com normalment l'aire que alimenta els compressors és el mateix aire del voltant del compressor, portar aire de l'exterior de la sala o de la planta és una tècnica molt sensible a augmentar l'eficiència del sistema.
- Mantenir els filtres. Els filtres bruts o mal mantinguts provoquen pèrdues de pressió al sistema.
- Utilitzar motors d'alta eficiència. Els motors d'alta eficiència són motors als quals s'han minimitzat les pèrdues, tant elèctriques com mecàniques, de manera que la seva eficiència energètica és més alta. Aquest tipus de motors són aplicables a qualsevol sistema. Tot i que l'augment de l'eficiència pot semblar petit, entre un 1 i un 2 %, l'estalvi d'energia acumulat al llarg de la seva vida útil és considerable.

2.3.8. Sistemes de Bombeig

Les bombes són dispositius utilitzats àmpliament en la indústria per transportar fluids dels diferents sistemes de la planta: refrigeració, lubricació, processat i per proporcionar la força motriu a sistemes hidràulics.

Els sistemes de bombeig són els responsables d'entre un 25 % i un 50 % del consum energètic d'origen industrial i d'un 20 % del consum elèctric mundial.

Les bombes poden ser de diferents tipus segons la forma amb què es transfeix energia al fluid:

Bombes centrífugues (o rotodinàmiques): basades en un element rotatori impulsor compost per àleps en forma de fulla que impulsen, generalment, el fluid en direcció radial gràcies a la força centrífuga, transferint d'aquesta manera l'energia. L'objectiu d'aquesta impulsió és convertir aquesta energia en energia de pressió del fluid per ser impulsat en un sistema de canonades. Aquest és el tipus més utilitzat de bomba. Es poden dividir en axials, radials i mixtos.

Bombes de desplaçament positiu: que es basen en augmentar la pressió del fluid variant el volum que ocupa i forçar-lo a passar a través d'una canonada de descàrrega. Aquestes bombes es poden dividir en rotatòries i de moviment alternatiu.

MTD 16. Optimitzar l'eficiència energètica en sistemes de bombeig.

Les tècniques següents són considerades MTD en aquest àmbit:

- Fer un inventari i una avaluació inicial del sistema de bombeig, que inclogui una revisió del funcionament del sistema, de les seves condicions operatives i de l'estat de manteniment.

- Escollir la bomba tal que s'ajusti a les necessitats del procés.
- Utilitzar sistemes de múltiples bombes quan sigui possible.
- Ajustar el disseny del sistema de canonades a les necessitats reals.
- Fer el manteniment dels equips regularment.
- Controlar el cabal per mitjans que no impliquin pèrdues d'energia.
- Seleccionar el motor adient per a cada aplicació.

A continuació es comenten més profundament cadascuna d'aquestes tècniques.

2.3.8.1. Inventari i avaluació d'un sistema de bombeig

Un bon enfocament per a l'avaluació i la millora d'un sistema de bombeig és el que preveu tot el sistema, tenint en compte la seva globalitat, des que l'energia elèctrica entra al sistema fins que l'aigua és impulsada. Durant el cicle de vida d'un sistema de bombeig sorgiran diferents oportunitats per millorar el rendiment del sistema. Les principals oportunitats sorgiran quan:

- Un sistema de bombeig existent està en fase de modificació per resoldre un problema del sistema o per dotar-lo de més capacitat.
- Es dissenya un nou sistema de bombeig.

Tots dos són bons moments per implementar mesures de millora de l'eficiència energètica.

Per a sistemes existents, el primer pas cap a la identificació de mesures d'estalvi energètic i l'optimització d'un sistema de bombeig és l'establiment d'un inventari de tot el sistema i de les seves característiques més importants. Aquesta estratègia es pot sintetitzar en les accions següents, de cara a l'avaluació d'un sistema de bombeig existent:

- Revisar el sistema de bombeig existent:
 - Recopilar dades per definir la configuració del sistema de bombeig.
 - Calcular els costos de l'energia consumida per les bombes segons els registres o factures.
 - Recopilar informació de la placa de la bomba i del motor i determinar l'accionament de la bomba, la velocitat d'operació i el nombre d'etapes.
 - Documentar el temps de funcionament i mesurar el cabal real amb el temps per desenvolupar perfils d'accionament de les bombes.
 - Mesurar la pressió d'entrada i sortida de la bomba.
 - Determinar el punt màxim de disseny del sistema i la variació de cabals i de càrregues de pressió.
 - Identificar el fluid bombejat, la seva temperatura, viscositat, concentració de sòlids i la mida de partícules, densitat i altres inputs necessaris per modelitzar el sistema.
 - Obtenir la corba de cabal en relació amb la corba característica de càrrega dels fabricants de bombes per avaluar el disseny del sistema i els seus punts de treball.
- Identificar les condicions operatives associades amb un funcionament ineficient del sistema:
 - Vàlvules d'estrangulament.
 - Els bypass.
 - Bombes sobredimensionades que operen altament estrangulades o grans cabals de bypass.
 - Bombes que funcionen amb grans cabals o grans variacions de pressió.
 - Aplicacions finals amb cabals baixos d'alta pressió. Sistemes complets operats a alta pressió per complir amb els requisits d'un sol punt d'alta pressió.

—Canvis en la configuració de les condicions inicials del sistema de disseny que poden modificar la corba original de resistència.

- Identificar les condicions de manteniment associades amb l'operació ineficient del sistema:
 - Bombes amb grans requisits de manteniment.
 - Bombes amb soroll a causa de cavitacions o recirculacions internes.
 - Desgast dels impulsors de la bomba i de les carcasses que augmenten els jocs entre parts fixes i mòbils.
 - Desgast excessiu dels anells de desgast i coixinets.
 - Ajustaments inadequats que provoquin flexions de l'eix de la bomba.
 - Vàlvules de control que fan soroll a causa de l'excessiu estrangulament.

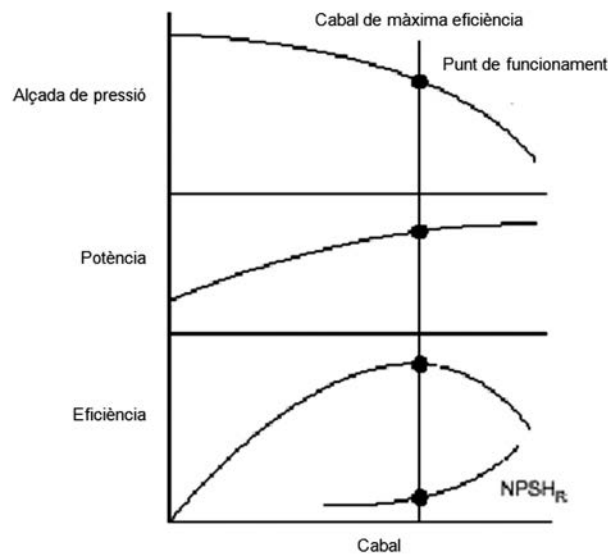
L'enfocament més comú per analitzar el sistema un cop recopilada la informació anterior és l'ús de programes informàtics de disseny de sistemes. Mitjançant el desenvolupament d'un model del sistema, la corba de resistència del sistema i les corbes característiques de la bomba es poden superposar per determinar els punts de funcionament actuals de la bomba segons els diferents requisits del sistema. Això permet comparar el conjunt de punts de treball actuals del sistema amb el punt de màxim rendiment.

2.3.8.2. Elecció de la bomba

Les bombes sempre es defineixen per les seves característiques bàsiques, que es poden veure a la figura següent. Els gràfics mostren la relació entre l'energia de pressió (head), la potència i l'eficiència en relació amb el cabal. És important comprovar que variacions petites des del punt de màxima eficiència, ja sigui en pressions o en cabals, poden comportar un consum energètic molt més alt. Per aquesta raó, moure el punt de funcionament del sistema massa lluny del punt pel qual ha estat dissenyat, comporta disminucions importants de l'eficiència.

A més, treballar amb cabals reduïts o molt per sobre del cabal nominal, pot accelerar el desgast i provocar problemes de funcionament.

Figura 45. Característiques d'una bomba centrífuga [20]

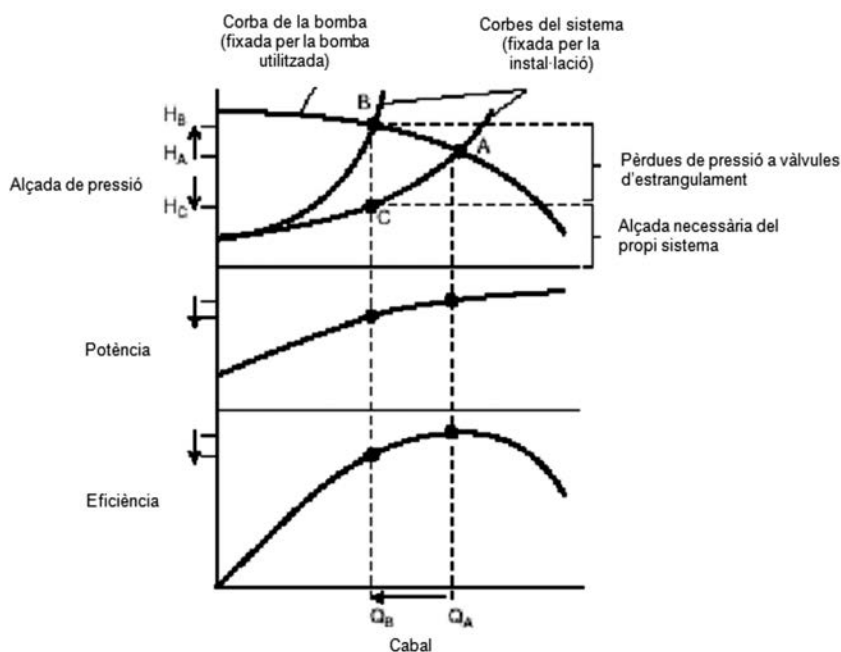


A la pràctica, les bombes sovint estan sobredimensionades, tant per preveure possibles canvis en la demanda o perquè el dissenyador ha estat prudent.

Aquest problema generalment es tracta mitjançant quatre actuacions:

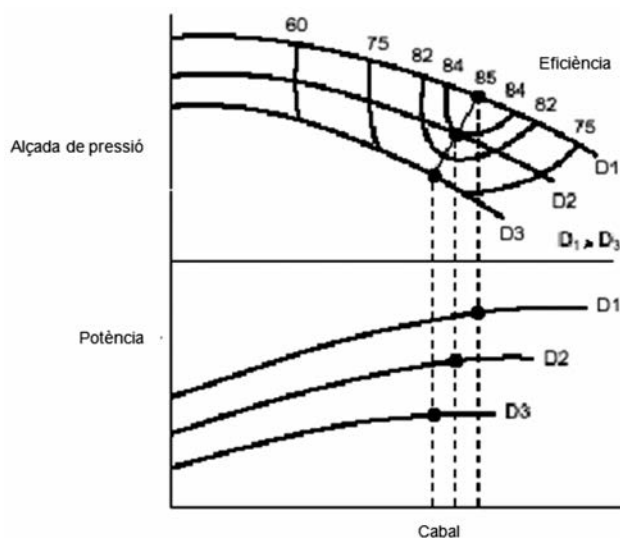
- L'estrangulament del flux amb una vàlvula. Les pèrdues d'eficiència que provoca aquest estrangulament són molt superiors a les que tindria el sistema si s'adaptés exactament als requeriments del sistema actual. Això es deu al desgast addicional que provoca aquesta situació als components mecànics.

Figura 46. Efecte sobre l'eficiència de l'estrangulament d'una bomba [20]



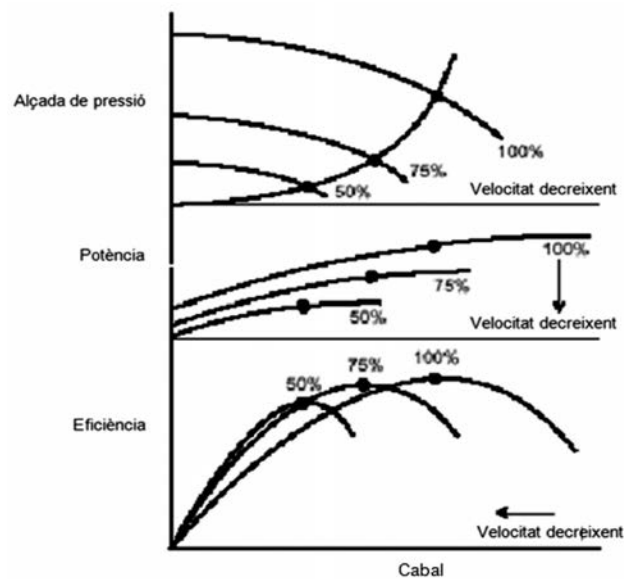
- Reduir el diàmetre de l'element impulsor. Per disminuir el cabal que dona la bomba, en comptes d'estrangular-la amb una vàlvula és més eficient reduir el diàmetre de l'element impulsor. Els fabricants normalment ofereixen la mateixa bomba amb una gamma de diàmetres de l'impulsor per poder ajustar-se a les condicions requerides. En aquest sentit, els fabricants també poden optar per oferir diferents tipus d'elements impulsors que ofereixin diferents comportaments.

Figura 47. Característiques d'una bomba segons diferents diàmetres de l'element impulsor [20]



- Canviar el motor. Una altra opció per satisfer una demanda de cabal sense allunyar-se del punt de màxima eficiència és oferir la mateixa bomba amb diferents opcions de motor, per permetre que una bomba pugui ser utilitzada en una gamma molt més àmplia de funcionaments. Per exemple, el canvi d'un motor de 4 pols per un motor de 2 pols més ràpid, permetrà a la mateixa bomba subministrar el doble de cabal màxim i 4 vegades la pressió.
- Utilitzar unitats de velocitat variable. L'opció més eficient per operar una bomba a diferents velocitats de la forma més eficient és mitjançant unitats de velocitat variable. Això és especialment útil en sistemes en què hi ha una àmplia variació en el cabal.

Figura 48. Efecte de la reducció de velocitat a les característiques de la bomba [20]



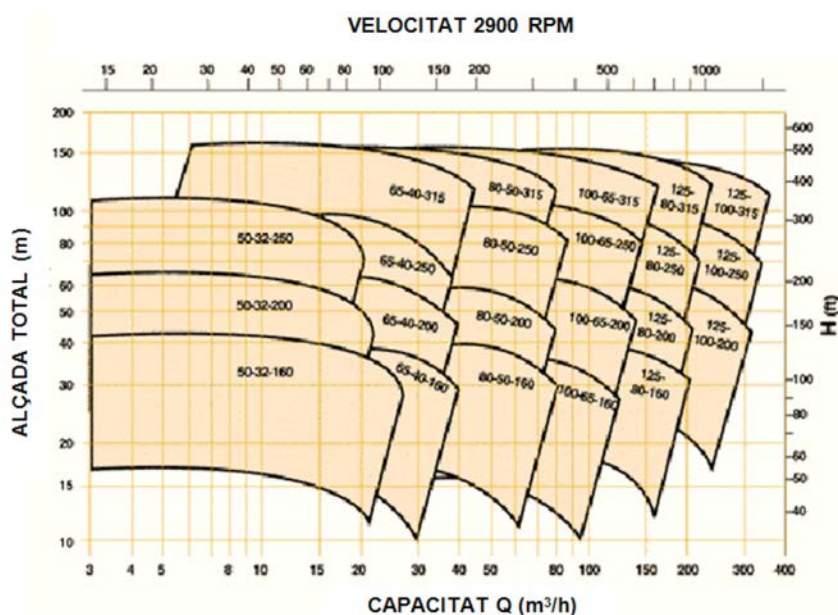
El que tot això significa és que la mateixa bomba serveix per a diferents punts de funcionament depenent tant del diàmetre de l'impulsor com de la velocitat del motor escollit. El consum d'energia variarà amb aquests paràmetres i amb altres factors com ara la viscositat del fluid. Per tant, no és útil caracteritzar les bombes per la seva potència, sinó que aquesta potència s'ha de determinar per a cada aplicació.

Selecció d'una bomba

En seleccionar una bomba s'utilitzaran els gràfics del fabricant, que són corbes que mostren la seva gamma de bombes per cobrir un ampli ventall de requeriments d'alçada i cabal. Idealment, el punt de funcionament requerit hauria d'estar més o menys un 20 % per sota del cabal màxim que es mostra a la corba i que correspon al punt de màxim rendiment de la bomba seleccionada.

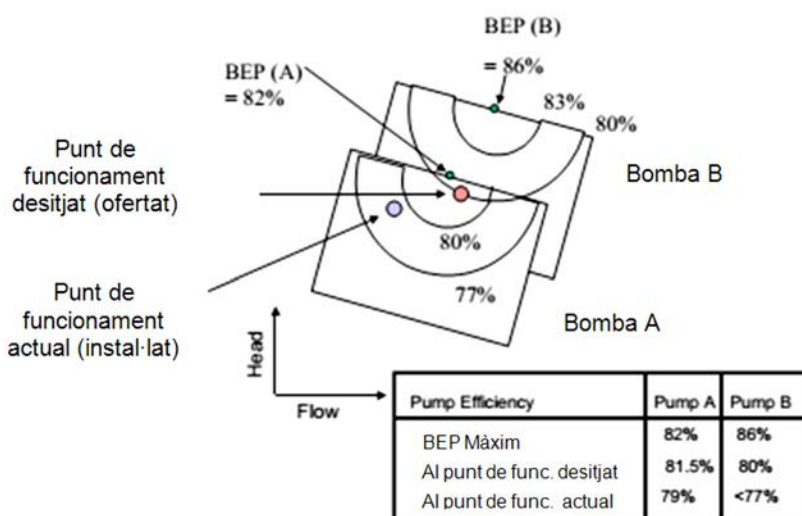
Per raons econòmiques, els fabricants restringeixen el nombre de bombes que ofereixen: per aquest motiu, un fabricant de bombes molt eficients pot sortir perdent, en termes d'eficiència, respecte d'altres fabricants menys eficients si les bombes menys eficients d'aquest segon fabricant es poden ajustar millor als requeriments del sistema i el seu punt de funcionament queda més a prop del seu punt de màxim rendiment.

Figura 49. Corbes per a la selecció de les bombes de servei [20]



Exemple. Selecció d'una bomba

En aquest exemple es mostren les qüestions clau referents a l'eficiència energètica que sorgeixen quan se selecciona una bomba.



S'han de satisfer els requeriments d'un determinat sistema amb alguna de les dues bombes que es presenten en la taula anterior. Hi ha dos punts importants a tenir en compte: mentre la bomba B té un BEP (de l'anglès *Best Efficiency Point*) superior, per a un determinat cabal, la bomba A en realitat té més eficiència que la bomba B. Al punt requerit de cabal, l'eficiència de la bomba A serà considerablement inferior a la bomba B ja que aquest punt quedarà molt lluny del punt de màxima eficiència (en aquest cas seria millor fer servir un impulsor de diàmetre més reduït, o potser una bomba diferent a qualsevol de les que s'esmenten).

Punts clau:

- L'eficiència de la bomba pot disminuir significativament quan la bomba està funcionant fora del seu punt de màxim rendiment.

- Les bombes no estan fetes per a requeriments estàndard, el que fa que comparar l'eficiència de dues bombes sigui més complicat que, per exemple, comparar l'eficiència de dos motors.
- La mateixa bomba en general s'ofereix amb diferents impulsors per oferir un bon rendiment quan els requeriments són més petits.
- La mateixa bomba sovint s'ofereix amb motors de diferents velocitats per permetre cobrir una gamma més àmplia de requeriments.
- El rendiment de la bomba es deteriora amb el temps.
- El consum energètic d'una bomba en particular s'ha de determinar per a cada aplicació en particular.

2.3.8.3. Sistemes amb múltiples bombes

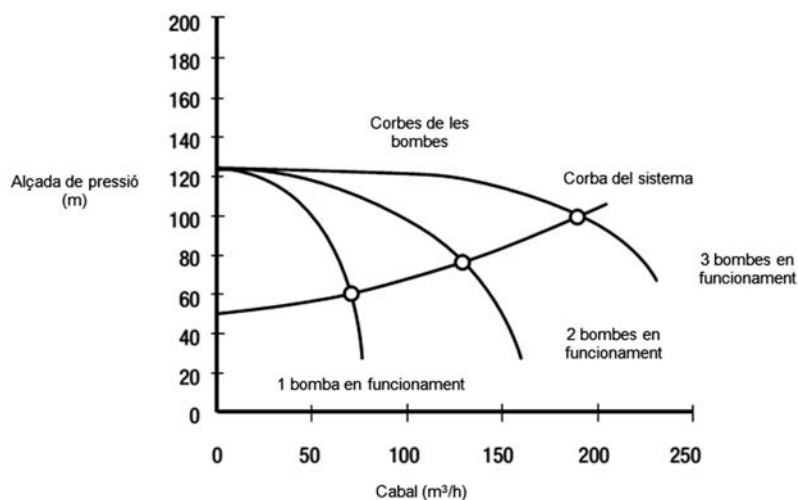
L'alternativa a l'ús d'una única bomba és l'ús d'un sistema amb una combinació de múltiples bombes més petites funcionant en paral·lel.

Quan hi ha grans variacions en la demanda del sistema, una sola bomba no pot operar a prop del seu punt de màxim rendiment (BEP). El funcionament d'una bomba lluny del seu BEP es tradueix en uns costos més elevats tant d'exploració com de manteniment. En alguns sistemes, especialment en aquells amb grans càrregues de pressió estàtica, engegar i aturar múltiples bombes per satisfer els canvis en la demanda permet que cada bomba operi de la manera més eficient i es millori l'eficiència global del sistema. No obstant això, depèn de les corbes de les bombes, de la corba del sistema i del canvi de la demanda.

Alguns dels avantatges dels sistemes amb múltiples bombes són la flexibilitat, la redundància, i la capacitat de satisfer les necessitats canviants de flux de manera eficient en els sistemes amb components d'alta pressió estàtica. En els sistemes amb components d'alta fricció, els motors de velocitat variable tendeixen a ser una solució més eficient als requisits de la demanda variable.

Els sistemes de múltiples bombes són generalment combinacions en paral·lel del mateix model de bomba. La instal·lació d'una bomba addicional augmenta el cabal del sistema, desplaçant-se el punt de treball a la dreta segons la corba del sistema.

Figura 50. Operació amb múltiples bombes [21]



Per un funcionament en paral·lel, les bombes han de ser idèntiques per proporcionar un repartiment equilibrat de la càrrega quan totes les bombes estan operant al mateix temps. La utilització de bombes de diferents mides podria derivar

en situacions en què la més gran dominés el sistema, la qual cosa obligaria a les altres bombes a operar per sota del seu cabal mínim. Si s'han de configurar en paral·lel bombes de diferents mides, les seves corbes de rendiment s'han de revisar acuradament per assegurar que cap bomba opera per sota del seu cabal mínim.

Punt de màxim rendiment

Les característiques de disseny tant en termes de rendiment com de vida útil s'optimitzen pel que fa a la capacitat designada com el punt de màxim rendiment (BEP). Cada bomba centrífuga té un BEP diferent, el punt en què la seva eficiència operativa és més alta i les càrregues radials als rodaments són més baixes. El BEP d'una bomba és una funció de la seva configuració d'entrada, del disseny de l'element impulsor, del disseny de la carcassa i de la velocitat de la bomba. Al BEP, l'eficiència hidràulica està en el seu màxim i el fluid entra als àleps de l'element impulsor suaument. El flux a través de l'element impulsor i dels difusors és uniforme, sense separació, i es manté ben controlat.

El flux segueix estant ben controlat dins d'un rang de capacitats que designen la regió d'operació preferent (POR, de l'anglès *Preferred Operating Region*). Dins d'aquesta regió, la vida útil de la bomba no serà afectada significativament per les càrregues hidràuliques, vibracions o separació del flux. La regió de funcionament admissible (AOR, de l'anglès *Acceptable Operating Region*) defineix els límits exactes de flux mínim i flux màxim d'una bomba.

La majoria de les bombes centrífugues estan equipades amb rodets o coixinets de boles. Atès que la vida útil d'aquests tipus de rodaments és funció inversa de la potència cúbica de la càrrega, la selecció d'una bomba amb un BEP que està a prop del punt de funcionament normal del sistema estén significativament els intervals entre reemplaçaments de rodaments.

Avantatges de múltiples bombes

Hi ha molts avantatges en l'ús de combinacions de bombes més petites en lloc d'una sola gran:

- Operació flexible. L'ús de diverses bombes en paral·lel amplia el rang de cabals amb què es pot fer treballar el sistema. Poder aturar i engegar les bombes a conveniència manté el punt de treball de cada una a prop de la seva BEP (per a sistemes amb corbes planes).
- Redundància. Amb disposicions de bombes múltiples es pot reparar una bomba mentre que les altres continuen funcionant. Per tant, la fallada d'una unitat no atura tot el sistema.
- Manteniment. Redueix el desgast dels coixinets i permet que les bombes funcionin amb menys problemes.
- Altres beneficis inclouen menys dependència del control de dissipació d'energia i control de flux, tals com els bypass de les línies i les vàlvules d'estrangulament. L'ús d'una única bomba gran amb baixes demandes de cabal obliga a estrangular l'excés de cabal o a fer-lo passar per les línies de bypass. L'estrangulament del cabal genera pèrdues d'energia. De la mateixa manera, fer passar el flux per les línies de bypass és altament ineficient, ja que tota l'energia utilitzada per empènyer l'excés de flux es perd a través d'aquestes línies. Els variadors de velocitat poden ser una solució eficaç.
- Eficiència. Un avantatge potencial de l'ús de múltiples bombes és una eficiència global més gran, ja que cada bomba pot funcionar a prop del seu BEP. A una alçada i un cabal concrets, les bombes d'alta velocitat tendeixen a ser més eficients que les bombes de baixa velocitat. Atès que les bombes

més petites requereixen motors més petits, l'ús de múltiples bombes d'alta velocitat fa que el sistema sigui més eficient que amb la utilització d'una sola bomba de baixa velocitat.

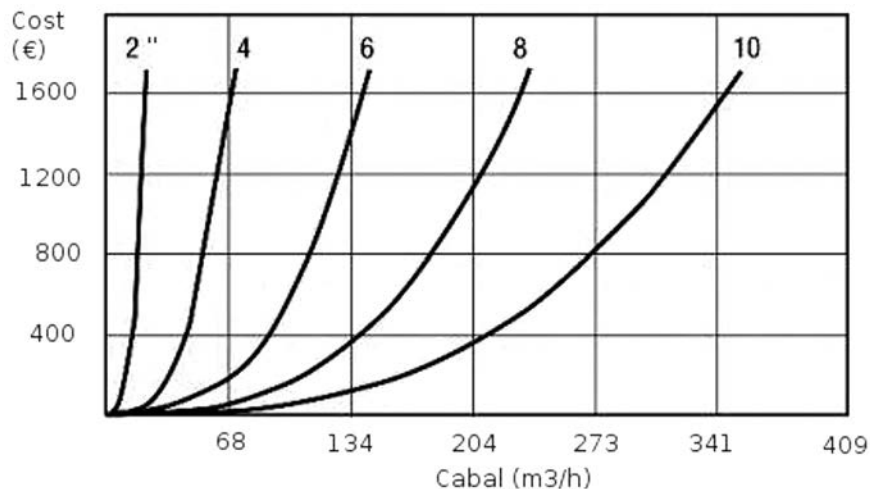
2.3.8.4. Configuració del sistema de canonades

Un component molt important en un sistema de bombeig és la xarxa de canonades que transporta l'aigua o altres fluids.

L'energia consumida per superar la pressió estàtica en un sistema de bombeig varia linealment amb el cabal. Hi ha poques opcions per tal de reduir aquest component de pressió estàtica, ja que aquesta pressió és un requisit de la pròpia planta o establiment industrial. Sí que es compta, però, amb algunes estratègies per a reduir el consum energètic que provoca la fricció del fluid amb les canonades.

Les pèrdues d'energia per la fricció depenen del cabal de fluid, del diàmetre de les canonades, de la longitud de la canonada, de la rugositat de la superfície, del material, etc., i de les propietats del fluid. La figura següent mostra el cost anual aproximat de bombeig d'aigua (només en consum energètic degut al fregament del fluid) per 300 m de longitud de canonada per a diferents diàmetres de canonada i per a diferents cabals.

Figura 51. Costos derivats de pèrdues per fregament al bombar aigua (basat en càlculs per 305 m de canonada de ferro i d'acer per bomba raig a 21 °C. Cost de l'electricitat 0,05 \$/kWh i 8.760 hores de funcionament anuals. Eficiència combinada de la bomba i motor - 70 %) [22]



Accions suggerides

- Calcular els costos anuals i de tot el cicle de vida dels sistemes abans de prendre decisions de disseny.
- Als sistemes en què el component de fricció és dominant, s'han d'avaluar els costos de bombeig per dos o més diàmetres de canonada i dissenyar la xarxa amb la mida de canonada que provoca el cost d'operació durant el cicle de vida més baix.
- Buscar maneres de reduir el factor de fricció. Si la seva aplicació ho permet, les canonades d'acer revestides d'epoxi o canonades de plàstic poden reduir el factor de fricció en més del 40 % i la reducció és proporcional al cost de bombeig.

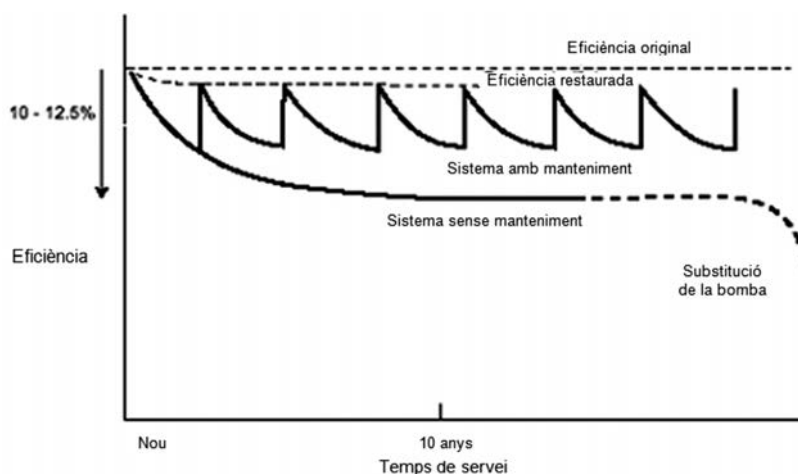
Desafortunadament, els dissenyadors poden passar per altels costos associats a aquestes pèrdues, considerant només el cost inicial. Això també passa amb les vàlvules i accessoris. Per exemple, les vàlvules de globus són utilitzades generalment pel seu baix cost isimplicitat. No obstant això, aquestes vàlvules tenen una pèrdua de càrrega relativament alta causada per la trajectòria del flux a través del cos de la vàlvula.

2.3.8.5. Manteniment

Un manteniment efectiu i regular de la bomba manté les bombes operant de manera eficient i permet la detecció primària de problemes, a temps per programar reparacions i evitar fallades prematures de la bomba. El manteniment regular evita pèrdues d'eficiència i capacitat, i estalvia costos derivats del funcionament de la bomba en aquestes condicions durant llargs períodes.

La causa principal del desgast i la corrosió és l'alta concentració de partícules i els valors baixos de pH. El desgast pot generar una caiguda de l'eficiència general del sistema que pot ser de 10 a un 12,5 %. Gran part del desgast es produeix en els primers anys, fins que els jocs entre els diferents components siguin similars a la magnitud de les partícules abrasives. Com es pot observar en la figura següent, en un sistema sense manteniment l'eficiència tendeix a estabilitzar-se després de 10 anys i cap als 20 anys esdevé la necessitat de substituir la bomba.

Figura 52. Tendències mitjanes al desgast de bombes amb manteniment i sense [20]

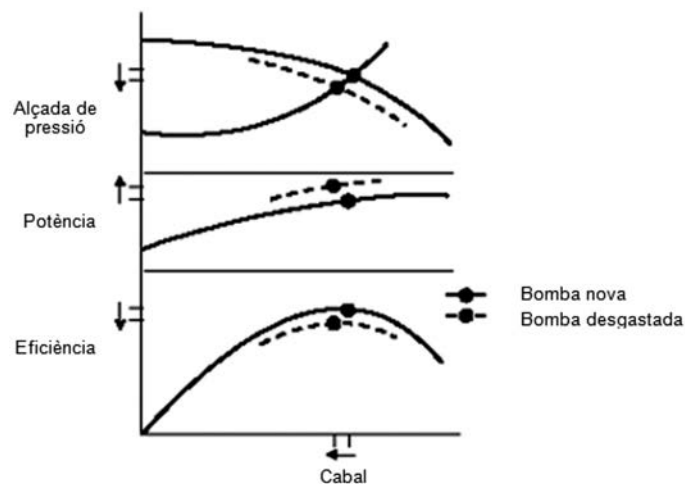


Les principals àrees a tenir en compte quant al desgast de la bomba són:

- Cavitacions o recirculacions internes.
- Impulsors de la bomba i les carcasses, que augmenten els jocs entre les parts fixes i mòbils.
- Anells de desgast i coixinets.
- Ajust de l'eix de la bomba.

Quan el conjunt de la bomba es desgasta, el BEP es tendeix a desplaçar cap a l'esquerra a les corbes característiques.

Figura 53. Efecte del desgast a les característiques de la bomba [20]



2.3.8.6. Control del cabal

Per adaptar-se a les variacions de la demanda, es pot controlar el cabal mitjançant quatre mètodes:

- Línies de bypass.
- Vàlvules de papallona.
- Conjunts de varies bombes.
- Variadors de velocitat i motors d'accionament de velocitat variable.

Els variadors de velocitat són una solució eficient per controlar el cabal, però, s'ha d'utilitzar amb precaució. Quan la corba de rendiment és bastant plana, es poden aconseguir eficiències raonables amb dispositius de control de cabal simples.

Línies de bypass

Les línies de bypass proporcionen un control precís del cabal, mentre que eviten el perill d'ofegament pel tancament quasi complet de les vàlvules d'aigües avall. En termes generals, aquesta és l'opció de control de cabal energèticament menys eficient.

Vàlvules de papallona

Les vàlvules de papallona proporcionen un control de cabal de dues maneres: mitjançant l'augment de la contrapressió aigües amunt de la vàlvula per estrangulament, la qual cosa redueix el cabal de la bomba, i mitjançant la dissipació d'energia del fluid directament. Augmentar la contrapressió en una bomba, disminueix l'eficiència del sistema.

Unitats de velocitat variable

En els sistemes de bombeig amb requeriments de cabal variable, un control de velocitat ajustable (ASD) o de velocitat variable (VSD) són una alternativa més eficient per al control del sistema que els mètodes d'estrangulament o de bypass. Són l'opció preferida quan les bombes funcionen un mínim de 2.000 hores a l'any i el cabal de procés varia en un 30 % o més en el temps.

Els VSD estalvien energia mitjançant la reducció de la velocitat de rotació de la bomba. La reducció de la velocitat de la bomba implica que s'aporta menys energia al fluid i, per tant, no s'ha de perdre energia en un estrangulament pos-

terior. No obstant això, no són recomanables en aplicacions que operen prop de plena càrrega gran part del temps.

Les unitats ajustables o de velocitat variable poden ser de dos tipus diferents:

- Unitats mecàniques: embragatges hidràulics, acoblaments hidràulics i corretges i políges ajustables.
- Unitats elèctriques: embragatges de corrents de Foucault, motors de rotor bobinat, i unitats de freqüència variable (VFD).

Ni els VSD mecànics ni els elèctrics són 100 % eficient. Si els variadors de velocitat mecànics no tenen un manteniment regular, la seva eficiència pot disminuir en un 5 % o menys i les instal·lacions que utilitzen VSD poden perdre eficiència i escurçar la vida dels motors elèctrics.

Motors de múltiples velocitat

Els motors de múltiples velocitats contenen un conjunt de bobines per a cada velocitat del motor i, en conseqüència, són més cars i menys eficients que els d'una sola velocitat. Els motors de múltiples velocitats no tenen la capacitat de canviar suaument de velocitat.

2.3.8.7. Selecció del motor

Un motor sobredimensionat opera ineficientment, cosa que es pot comprovar comparant el consum d'energia real amb el seu valor nominal. El sobredimensionament dels motors pot ser per causa que durant la fase de disseny s'han considerat els aspectes següents:

- Seguretat contra la fallada del motor en processos crítics.
- Possibilitat d'augmentar la capacitat de producció futura.
- Fluctuació de la càrrega.
- Desequilibri de tensió que augmentin les pèrdues del motor.

Quan el motor està sobredimensionat, hi ha un augment dels costos, tant de la compra del motor com dels costos d'energia, degut a una disminució en l'eficiència en operacions a càrrega parcial.

Cal assenyalar, no obstant això, que els motors d'inducció estan només disponibles per a determinades mides i és raonable que un motor operi entre el 75 % i el 100 % de la càrrega i aconseguir bones eficiències. Per exemple, si el requisit de potència per a un motor és de 50 kW, és corrent haver d'utilitzar un de 55 kW, ja que és una potència estàndard. Quan un motor s'utilitza per una aplicació de càrrega constant s'ha d'ajustar tan estretament com sigui possible a una càrrega del 100 % en la seva operació.

Els fabricants han desenvolupat motors per acomodar sobrecàrregues a curt termini i evitar la necessitat de sobredimensionar. Aquests motors estan etiquetats amb un factor de servei més gran que l'1,0. Tenen la capacitat d'operar satisfactòriament dintre de les indicacions d'aquest factor de càrrega amb poca reducció de l'eficiència. Per exemple, un motor marcat amb un factor de servei de l'1,15 pot operar a prop del màxim d'eficiència amb una càrrega del 115 %.

Per a més informació sobre motors es pot consultar l'apartat dedicat a sistemes accionats per motors d'aquesta mateixa Guia.

2.3.9. Sistemes de climatització i ventilació (HVAC)

2.3.9.1. Sistemes de climatització

Un sistema de climatització està compost per diverses parts:

- els equips de generació de fred i calor (bombes de calor, calderes, etc.);
- ventiladors i bombes;
- conductes i canonades;
- bescanviadors de calor.

Les instal·lacions de calefacció i de refrigeració de l'aire a les instal·lacions industrials obeeixen a diverses necessitats. En general, els sistemes de climatització garanteixen el manteniment d'unes condicions ambientals com les que es detallen a continuació:

- permeten unes condicions de treball satisfactòries;
- afavoreixen la conservació de certs productes;
- proporcionen les condicions requerides per al sosteniment de processos industrials.

Per reduir el consum energètic de les instal·lacions de climatització es pot actuar sobre dos aspectes: la reducció de la demanda de calefacció/refrigeració i/o la millora de l'eficiència dels sistemes productors de calor/fred.

MTD 17. Optimitzar l'eficiència energètica en l'àmbit de la calefacció/refrigeració de l'aire industrial.

Per reduir la demanda tèrmica de l'espai a considerar, cal:

- Aïllar degudament l'edifici (vegeu l'exemple de l'apartat 3.9.1).
- Instal·lar tancaments envidrats eficients.
- Reduir les infiltracions.
- Reduir l'estratificació de l'aire.
- Abaixar les temperatures de consigna en èpoques de calefacció i pujar-les en les de refrigeració, sempre i quan sigui compatible amb els requeriments dels espais condicionats.
- Optimitzar les consignes en períodes no productius.
- Sectoritzar les instal·lacions de climatització i ventilació en funció de l'ús que se'n fa (temperatures requerides, horaris de funcionament, etc.), (vegeu l'exemple de l'apartat 3.9.2).
- Utilitzar sistemes de refredament gratuït (*free-cooling*) sempre que sigui possible.

Per millorar l'eficiència dels sistemes productors de fred i calor, cal:

- Utilitzar equips de producció de fred i calor eficients.
- Adequar la consigna de temperatura d'aigua freda de refrigeració a la temperatura més elevada que sigui possible, en funció de les condicions ambientals que es tinguin.
- Adequar la consigna de temperatura d'aigua calenta de calefacció a la temperatura més baixa que sigui possible, en funció de les condicions ambientals que es tinguin.
- Utilitzar sistemes de refredament gratuït (*free-cooling*) sempre que sigui possible.
- Utilitzar sistemes radiants localitzats.

La reducció de la temperatura de consigna en 1 °C en climatització implica l'estalvi d'entre un 5 i un 10 % del seu consum energètic. La limitació de les necessitats durant períodes no productius en una planta amb períodes de treball de 8 hores al dia aporta uns estalvis del 40 % de l'energia consumida. Si aquestes mesures es realitzen juntament amb la utilització de sistemes radiants localitzats, l'estalvi estimat pot arribar a superar el 50 % de l'energia consumida.

2.3.9.1.1. Sistemes de refredament gratuït: *Free-cooling*

El *free-cooling* és una tècnica que permet reduir el consum energètic del procés de producció de fred mitjançant l'aprofitament de la baixa temperatura de l'aire exterior en èpoques, principalment, de tardor i primavera. El refredament gratuït o *free-cooling* té lloc quan l'entalpia de l'aire exterior és més petita que l'entalpia de l'aire interior, fet pel qual resulta més interessant des del punt de vista energètic utilitzar l'aire exterior en comptes del retorn de l'espai climatitzat.

Aquesta contribució es pot transferir al sistema quan aquest necessita refrigeració i es pot realitzar directa o indirectament:

- *Free-cooling* indirecte: el refredament gratuït es duu a terme mitjançant una vàlvula de regulació que obre o tanca el pas a un bescanviador d'aire exterior (fred) / aigua de retorn (més calenta). En general, quan la temperatura de l'aire exterior està 1 °C per sota de la temperatura de l'aigua que retorna a la refredadora, la vàlvula redueix progressivament el cabal d'aigua recirculada i augmenta el cabal que passa pel bescanviador de refredament gratuït.
- *Free-cooling* directe: el refredament gratuït s'aconsegueix fent treballar les unitats de tractament d'aire amb 100 % d'aire exterior, sense recircular aire de l'espai climatitzat, quan es requereix refrigeració i les condicions de l'aire exterior són més properes a les requerides a la impulsió d'aire que no pas les de l'aire climatitzat. Es requereix que la unitat de tractament disposi de comportes motoritzades per regular el cabal d'aire exterior (vegeu la secció de mescla de ventilació o *free-cooling* en la figura 55). La posició de les comportes està disposada pel resultat de la comparació entre les condicions de l'aire exterior i l'interior. Cal distingir, però, que aquesta comparació es pot limitar a la seva temperatura, o bé estendre's a la seva humitat, comparant aleshores les seves entalpies. Són el que s'anomenen *free-cooling* per temperatura i *free-cooling* d'entalpia.

L'efecte immediat del *free-cooling* és la reducció de la càrrega tèrmica que ha de suportar la refredadora i, per tant, també la reducció de l'energia consumida pels equips de generació de fred.

En el nostre clima, el sistema de *free-cooling* més utilitzat és el directe, a diferència de climes més freds on el sistema indirecte és més utilitzat.

Figura 54. Esquema d'implementació d'un refredament gratuït indirecte

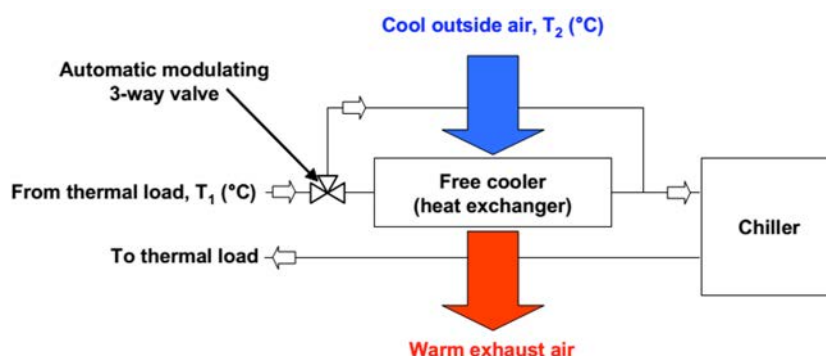
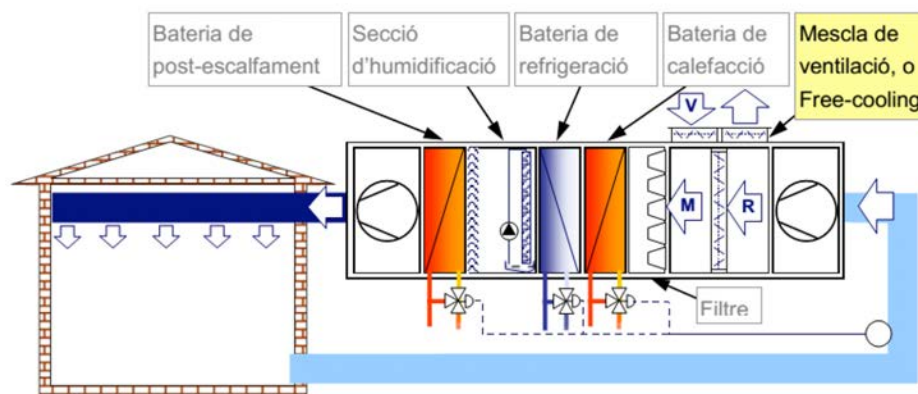


Figura 55. Esquema d'implementació d'un refredament gratuït directe



2.3.9.1.2. Sistemes de calefacció per infrarojos (calefacció IR)

La radiació infraroja o radiació tèrmica és un tipus de radiació electromagnètica de més longitud d'ona que la llum visible. Els processos d'escalfament amb emissors d'infrarojos es caracteritzen per una alta rendibilitat, per causa que l'energia de la calor es transmet a través d'emissions electromagnètiques. El cos irradiat absorbeix l'emissió infraroja i la transforma en calor. Aquesta tecnologia d'escalfament localitzat permet escalfar directament els cossos sòlids, sense necessitat d'escalfar de forma directa volum d'aire innecessari.

2.3.9.2. Sistemes de ventilació

El sistema de ventilació compleix la funció de protegir les persones que es troben dins de l'espai a climatitzar de les emissions contaminants que pugui emetre el procés productiu, mantenint unes condicions ambientals adequades tant per a les persones com per a la qualitat dels productes.

Un sistema de ventilació està integrat per diferents parts que interactuen. Els seus components són els següents:

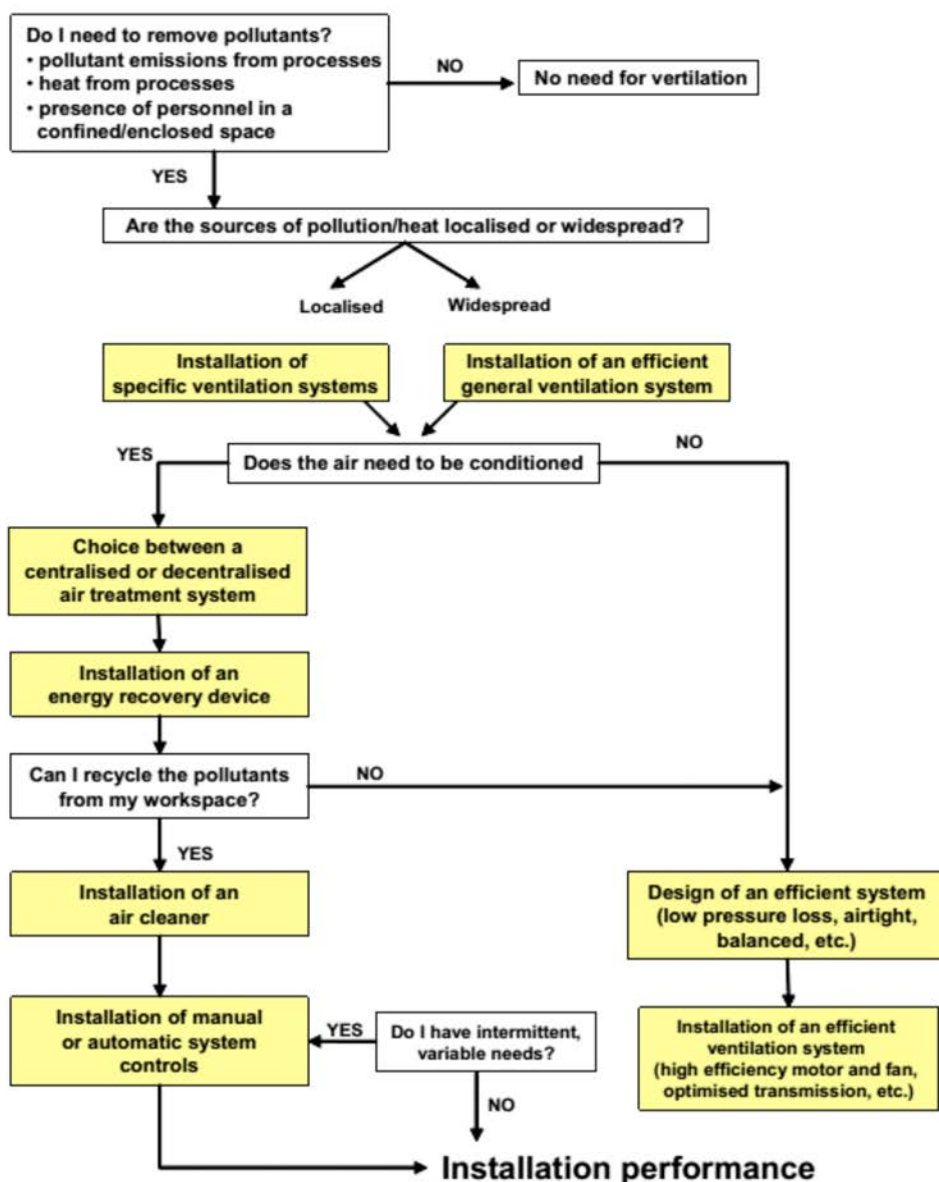
- la xarxa de distribució;
- els ventiladors;
- el sistema de control;
- dispositius de recuperació d'energia;
- dispositius de neteja de l'aire;
- sistema de climatització (si és que se'n disposa).

Els sistemes de ventilació poden obeir a dues situacions, en funció del seu objectiu:

- Ventilació general: utilitzats per condicionar l'aire de sales de treball amb grans volums. El tipus de sistema depèn, entre d'altres, del lloc específic a ventilar, dels contaminants a extreure i de si existeix un sistema de condicionament de l'aire. El cabal d'aire és el paràmetre que més influència té en el consum energètic.
- Ventilació específica: sistemes pensats per eliminar els contaminants tant a prop de la font d'emissió com sigui possible. Són sistemes dedicats a extreure els contaminants generats a parts específiques del procés, abans que aquests es propaguin per la resta de l'espai de treball. Aquests sistemes eviten haver de renovar la totalitat del volum d'aire de la sala.

A continuació, es mostra un diagrama que serveix de guia per escollir les opcions que aporten una eficiència energètica millor a l'hora de dissenyar un sistema de ventilació per extracció de l'aire interior contaminat en funció de la particularitat de cada situació:

Figura 56. Diagrama de flux per optimitzar el consum energètic en un sistema de ventilació [10]



Indubtablement, el millor moment per implementar mesures d'eficiència energètica és durant el procés de disseny i concepció del sistema. És molt important tenir molt clars els requeriments de ventilació del sistema a l'hora de prendre les decisions correctes en punts com les condicions ambientals a mantenir, les entrades d'aire i la recollida i extracció de partícules contaminants.

MTD 18. Optimitzar l'eficiència energètica en l'àmbit de la ventilació.

Les MTD quant a l'optimització de l'eficiència energètica en ventilació industrial són les següents:

- Fer una correcta elecció del tipus de ventilador, la seva mida i del seu sistema de control.
- Dissenyar la xarxa de distribució d'aire per minimitzar les pèrdues de pressió.
- Escollir el motor adient per a cada ventilador.

- Ajustar la velocitat del ventilador d'acord amb les necessitats de producció, els períodes de l'any i l'ocupació de la sala pel que fa al personal.
- Instal·lar recuperadors de calor per l'aprofitament de la calor de l'aire d'extracció (vegeu l'exemple 3.9.3).
- Instal·lar filtres que permetin reutilitzar l'aire de ventilació condicionat.
- Realitzar una diagnosi energètica de la instal·lació.
- Implementar un sistema de manteniment preventiu.
- Implementar accions sobre l'operació del sistema.

2.3.9.2.1. Elecció del ventilador

Els ventiladors són la principal font de consum energètic. Una correcta elecció del tipus de ventilador, la seva mida i del seu sistema de control aportarà estalvis en l'energia utilitzada durant la seva vida útil.

L'eficiència màxima dels ventiladors acostuma a estar entre el 60 i el 85 %. L'elecció de la mida correcta d'un ventilador ha de permetre que l'aparell treballi sempre a prop del seu punt de màxima eficiència.

2.3.9.2.2. Disseny de la xarxa de distribució

La secció de pas dels conductes ha de ser suficientment gran com per minimitzar les pèrdues de pressió en la xarxa, que generen augment de consum en els ventiladors que impulsen l'aire. Algunes regles generals a considerar són les següents:

- un 10 % d'augment en el diàmetre d'un conducte pot suposar un estalvi de més del 50 % en la potència absorbida;
- utilitzar conductes circulars per oferir menys resistència a la circulació de l'aire;
- evitar conductes de grans longituds, així com colzes i estrenyiments de la secció;
- minimitzar l'ús de conductes flexibles per l'elevada pèrdua de càrrega que presenten;
- comprovar l'estanquitat del sistema;
- comprovar que el sistema està equilibrat i que la ventilació es reparteix uniformement, durant l'etapa de disseny, ja que fer-ho posteriorment provocarà pèrdues innecessàries de pressió.

2.3.9.2.3. Elecció del motor

L'eficiència dels motors que accionen els ventiladors ha de ser al més elevada que sigui possible, si pot ser utilitzar motors d'alta eficiència (IE3).

També és important que les pèrdues en l'accionament siguin les mínimes i evitar l'ús de corretges si es pot emprar accionament directe. Consultar l'apartat de sistemes accionats per motors (secció 2.3.6).

2.3.9.2.4. Velocitat del ventilador

La ventilació d'un espai implica introduir aire exterior en l'espai climatitzat que haurà de ser tractat pel sistema de climatització. Per això, és important minimitzar la ventilació als valors requerits, sense ventilar més del necessari. Així doncs és important ajustar el cabal d'aire de ventilació mitjançant l'ajustament de velocitat del ventilador, el que es pot fer de les maneres següents:

- variació de l'angle d'inclinació dels àleps del ventilador;
- instal·lació d'un variador de freqüència al motor del ventilador (manera més habitual).

La regulació de cabal s'ha de fer mitjançant la instal·lació d'un control automàtic amb lectura de diferents paràmetres que afecten la qualitat de l'aire interior i/o la

necessitat de ventilació, com poden ser: sonda CO₂ interior, sensors d'ocupació, programadors horaris, etc.

El control del cabal es pot millorar mitjançant un doble flux: flux d'aire d'entrada a la sala i flux d'aire de sortida (control dual).

2.3.9.2.5. Recuperadors de calor

La instal·lació de recuperadors de calor permet l'aprofitament de la calor de l'aire d'extracció, utilitzant bescanviadors de calor que tinguin:

- una alta eficiència, i ser aptes per recuperar calor tant sensible com latent;
- pèrdues de pressió baixes;
- comportament òptim a mesura que es van embrutant.

En l'apartat 3.9.3 de la present Guia es mostra un exemple d'instal·lació d'un sistema de recuperació de calor de l'aire d'extracció.

2.3.9.2.6. Instal·lació de filtres

És important conèixer els paràmetres del filtre següents:

- eficiència del reciclatge de contaminants;
- pèrdues de pressió;
- comportament amb el filtre brut.

2.3.9.2.7. Diagnosi energètica

En sistemes de ventilació existents es pot realitzar una diagnosi energètica de la instal·lació que inclogui els aspectes següents:

- avaluació del rendiment del sistema de ventilació;
- detecció de funcionaments incorrectes;
- detectar sobredimensionaments a la instal·lació.

2.3.9.2.8. Manteniment preventiu

En sistemes de ventilació existents també es pot implementar un sistema de manteniment preventiu que:

- permeti la detecció de fuites d'aire i les repari;
- substitueixi regularment els filtres, per evitar pèrdues de pressió i d'eficiència;
- comprovi l'acompliment de la normativa en matèria de qualitat de l'aire i d'eliminació de contaminants;
- mesuri i emmagatzemi la informació rellevant, com el consum energètic, els cabals, etc.

2.3.9.2.9. Accions sobre l'operació

En sistemes de ventilació existents també es poden implementar accions de diferent tipus sobre l'operació del sistema que afecten directament al consum energètic:

Accions immediates:

- reduir la ventilació quan sigui possible. El consum energètic del sistema de ventilació és determinat per la presència o no de persones, pel nombre de fonts contaminants i pel seu tipus, i per la taxa de contaminants i de la seva distribució;
- substituir els filtres obturats per la brutícia;
- reparar fuites;
- considerar les consignes de condicionament de l'aire, si hi ha un sistema de condicionament.

Accions simples i efectives:

- assegurar que els sistemes de ventilació específics per a les unitats de procés tenen les sortides d'aire adequades;
- optimitzar les sortides d'aire pel que fa a la quantitat i la superfície de les sortides per aconseguir reduir al mínim les necessitats de ventilació;
- considerar la implementació d'una regulació automàtica del cabal amb les necessitats actuals. Per exemple, tenint en compte que algunes operacions del procés de producció fan que l'emissió de contaminants augmenti, la taxa de ventilació hauria d'augmentar automàticament durant aquestes operacions.

Accions difícils que requereixen d'un estudi detallat:

- implementar control electrònic de velocitat als ventiladors;
- instal·lar ventiladors d'alta eficiència;
- instal·lar ventiladors sense sobredimensionament i que s'ajustin específicament a les necessitats de la instal·lació;
- instal·lar motors d'alta eficiència energètica;
- integrar la gestió del sistema de ventilació al sistema de gestió centralitzat;
- instal·lar instrumentació de mesura de cabal i de mesures elèctriques;
- estudiar la implantació de filtres d'aire i de recuperadors d'energia de l'aire contaminat;
- estudiar la possibilitat de modificar completament la instal·lació per subdividir el sistema en ventilació general, específica i de procés.

2.3.10. Sistemes de Refrigeració industrial

Es considera que la MTD per a un determinat sistema de refrigeració és aquella que satisfà les necessitats del procés industrial al qual s'aplica. La MTD per refrigerar un procés és una tècnica complexa que busca l'equilibri entre les necessitats del procés, les circumstàncies locals concretes i els requisits mediambientals, per tal que pugui aplicar-se en condicions de viabilitat tècnica i econòmica.

El terme "sistemes de refrigeració industrial" s'aplica als sistemes que eliminen l'excés de calor de qualsevol medi a través d'un intercanvi tèrmic amb aire, aigua o algun altre fluid, per tal de reduir la temperatura del medi al nivell que sigui necessari.

Els sistemes de refrigeració es basen en principis termodinàmics i estan dissenyats per promoure l'intercanvi de calor entre el procés i el refrigerant, i per facilitar l'alliberament de la calor residual irrecuperable al medi ambient.

Els sistemes de refrigeració industrial poden classificar-se en funció de diferents factors relatius al seu disseny i al seu principi bàsic de funcionament:

- En funció del medi que s'utilitza per refrigerar, hi ha sistemes de **refrigeració per aire** i de **refrigeració per aigua** (principalment).
- Si el medi refrigerant, es recircula o no. Hi ha els sistemes de **refrigeració sense recirculació** i els sistemes de **refrigeració amb recirculació**. Els sistemes sense recirculació (*once-through systems*) acostumen a utilitzar-se en instal·lacions de gran capacitat que disposen d'un subministrament suficient i segur d'aigua freda per a la refrigeració que actua com medi receptor dels abocaments de calor. Quan no es disposa d'un subministrament d'aigua fiable, s'utilitzen sistemes amb recirculació (com ara les torres de refrigeració o els condensadors). Els sistemes sense recirculació es classifiquen a la seva vegada en sistemes de **refrigeració directa** i sistemes de **refrigeració indirecta**. Als sistemes directes una part del cabal de l'aigua de refredament entra directament a la mateixa instal·lació per refredar-la. En els sistemes indi-

rectes hi ha un circuit intermedi amb un intercanviador de calor entre el medi a refrigerar i l'aigua del riu, embassament, mar, etc.

- Si el medi a refrigerar està en contacte amb l'ambient, cal considerar els **sistemes de refrigeració oberts** i els **sistemes de refrigeració tancats**. En els sistemes tancats el refrigerant i el medi de procés circulen per l'interior de tubs o serpentins.
- Segons es faci servir aigua per refredar per evaporació un corrent d'aire, cal tenir en compte sistemes de **refrigeració de procés humit** i sistemes de **refrigeració de procés sec**. En els sistemes de procés humit, el corrent d'aire refreda per evaporació els tubs o serpentins ruixats amb aigua. Els sistemes de procés sec només utilitzen el corrent d'aire. En tots dos casos, els serpentins poden incorporar aletes, les quals amplien la superfície de refrigeració i, per tant, l'efecte refrigerant.

2.3.10.1. Consum d'energia dels sistemes de refrigeració industrials

El consum d'energia dels sistemes de refrigeració industrials es pot separar en consum directe i consum indirecte. El **consum directe** es refereix a l'ús de l'energia necessària per fer funcionar el sistema de refrigeració, i els principals consumidors directes d'energia són les bombes i els ventiladors. Per tant, com més gran és la resistència que s'ha de compensar per mantenir el cabal d'aire o d'aigua, més grans seran les necessitats energètiques directes d'un sistema de refrigeració. D'altra banda, el consum d'energia del procés de producció a refrigerar si disposi d'una bona refrigeració és el que s'anomena **consum indirecte** d'energia.

Per tal d'avaluar els canvis o modificacions en un sistema de refrigeració, cal considerar el balanç total d'energia del sistema i del procés industrial associat, és a dir, tant el consum directe com l'indirecte.

En els sistemes de refrigeració l'energia és necessària per bombejar l'aigua de refrigeració i per crear un flux d'aire. S'expressa com la ràtio entre l'energia elèctrica consumida kWh_e i la calor dissipada MW_{th}. El consum específic d'energia pot variar en gran mesura d'acord amb la configuració del sistema (disseny de temperatures i pressions de bombeig) i el model de funcionament (anual, d'estiu o d'hivern). Les condicions locals comporten, també, variacions quant al rendiment dels sistemes, de manera que el mateix sistema de refrigeració requereix més consum d'energia en climes càlids que no pas en climes freds.

Els principals consumidors directes d'energia d'un sistema de refrigeració són:

- **Bombes**, utilitzades en tots els sistemes amb refrigeració per aigua, la seva funció rau en el subministrament del cabal d'aigua de refrigeració necessari:
 - el consum d'energia està determinat principalment pel cabal d'aigua que es bombeja, la pèrdua de pressió del circuit (nombre d'intercanviadors de calor, disseny hidràulic) i el fluid que es bombeja;
 - els sistemes indirectes tenen dos circuits i, per tant, calen més bombes i el consum energètic és superior.
- **Ventiladors**, emprats en les torres de refrigeració i en els condensadors mecànics:
 - el consum d'energia es determina pel nombre, la mida i el tipus de ventiladors, i la quantitat i la pressió necessària de l'aire que cal impulsar;
 - en general, els sistemes secs requereixen més aire per la mateixa capacitat de refredament que els sistemes d'evaporació (humits), fet pel qual el seu consum d'energia acostuma a ser superior.

Per tal de realitzar una avaluació general de les necessitats energètiques d'un sistema de refrigeració cal afegir els consums dels equips auxiliars necessaris

per al funcionament del sistema. La producció in situ dels productes químics per a l'aigua de refrigeració com, per exemple, l'ozó, n'és un exemple típic. La producció d'1 kg d'ozó per prevenir l'embrutiment necessita entre 7 i 20 kWh, en funció del generador. Aquest punt s'ha d'avaluar considerant exactament els additius que s'utilitzin, que poden variar depenent de cada instal·lació i de la qualitat de l'aigua que s'utilitzi.

Els canvis al consum total com a conseqüència d'un canvi en el consum indirecte d'energia es poden explicar com l'efecte de l'augment de la temperatura al procés a causa d'una refrigeració insuficient. Sino funciona correctament, un sistema de refrigeració potser indirectament responsable de l'augment del consum energètic o de matèries primeres del procés de producció. Una transferència de calor deficient (p.e. degut a l'embrutiment) pot provocar un augment de la temperatura del procés fent que incrementi el consum d'energia. En altres casos, una refrigeració deficient no afectarà al consum del procés però sí que pot provocar una eventual aturada d'alguna màquina per sobreescalfament. Aquest punt s'haurà d'avaluar doncs en cada cas, depenent del tipus d'equipament que calgui refrigerar.

A una central de producció d'electricitat, per exemple, a causa del baix nivell de refrigeració del condensador, la conversió total d'energia es pot reduir en un 0,25 %, que correspon a una disminució en el seu rendiment d'aproximadament el 0,4 % per cada grau Celsius. Si s'utilitza una torre de refrigeració oberta en lloc d'un sistema d'un sol pas, per exemple, resulta en una temperatura final superior en 5 °C, i com a màxim un 2 % menys d'electricitat produïda. Si es considera l'energia requerida per bombar aigua a la torre de refrigeració (uns 6-8 kW_e per MW_{th} de fred), s'obté un 1 % de pèrdua de rendiment addicional. Per a una central elèctrica convencional de carbó, una disminució d'un 1 % significaria una caiguda de rendiment des del 40 % al 39,6 %.

Les dades de la taula 18 representen el consum d'energia, directe i indirecte, així com les emissions de CO₂ per les diferents configuracions del sistema de refrigeració més habituals. Les tres variables es considera que són funció lineal dels paràmetres de disseny següents:

- el cabal d'aigua de refrigeració;
- la pressió de la bomba;
- l'eficiència de bombeig (inversament proporcional).

Les dades de la taula 18 estan dins dels rangs de consum d'energia que, en general, són quan es comparen diversos sistemes de capacitat de refrigeració similar. Les dades no són precises i no s'han d'utilitzar com a tals. En qualsevol cas, no vol dir que es prefereixi un sistema en particular a un altre. El que la taula mostra clarament és que l'efecte de la pèrdua de rendiment de la refrigeració pot ser significatiu i que les conseqüències en el balanç total d'energia poden ser igualment importants. Aquesta taula mostra la importància de considerar tant el consum d'energia directe com l'indirecte durant l'operació d'un sistema de refrigeració.

Les configuracions de sistema de refrigeració considerades són les següents, ordenades en general de més a menys eficient:

- **Sistema d'un sol pas directe:** ús directe de l'aigua d'un riu, d'un llac o d'alguna altre procedència per refrigerar els equips que ho requereixin.
- **Sistema d'un sol pas indirecte:** ús de l'aigua d'un riu, d'un llac o d'alguna altra procedència, per refrigerar a través d'un intercanviador de calor un circuit tancat intern d'aigua de refrigeració que és el que es bombeja cap als equips que requereixen refrigeració.

- **Torre de refrigeració oberta** (procés humit): en cas que un sistema d'un sol pas no sigui possible, es requereix un circuit interior de refrigeració que circularà pels equips a refrigerar i que serà refredat contra l'ambient mitjançant torres de refrigeració obertes. En aquests tipus d'equips, l'aigua refrigerant es refreda per contacte directe amb un corrent d'aire, de manera que el refredament s'aconsegueix principalment per l'evaporació de part de l'aigua de refrigeració. Aquestes torres estan equipades amb dispositius que augmenten la superfície de contacte d'aire i aigua. El corrent d'aire pot crear-se per tiratge natural o bé per tiratge mecànic, mitjançant ventiladors, sent aquesta segona opció la més comuna.
- **Torre de refrigeració híbrida** (procés humit): cas anàleg a l'anterior, però que disposa d'una torre de refrigeració híbrida. Aquest tipus de torres són poc habituals pel seu elevat cost, i es caracteritzen per poder funcionar com a sistemes de procés sec quan les condicions ambientals ho permeten (temperatures fredes) i com a sistemes de procés humit quan les temperatures són més elevades, disminuint el consum d'aigua però reduint l'eficiència en comparació amb una torre oberta.
- **Torre de refrigeració tancada** (procés humit): cas anàleg a l'anterior, però que disposa d'una torre de refrigeració tancada. El principi de funcionament d'aquests equips és similar a les torres de refrigeració obertes, amb la diferència que l'aigua de refrigeració circula per un serpentí que és ruixat exteriorment amb un feix de gotes d'aigua molt petites que s'evapora i permet el refredament del serpentí en aquest procés. És a dir, l'aigua que s'evapora no és la mateixa que la del circuit de refrigeració que circula fins als equips a refrigerar, que serà en aquest cas un circuit tancat. Això té els avantatges de permetre reduir la quantitat d'aigua a tractar en la torre i millorar la conservació dels equips refrigerats, tot i que presenta un consum energètic superior tant directe com indirecte, ja que per les mateixes condicions ambientals una torre tancada no permet assolir la mateixa temperatura d'aigua a la sortida que una torre oberta.
- **Aerocondensador per refrigeració per aire** (procés sec): cas anàleg a l'anterior, però que disposa d'un aerocondensador encarregat de refredar el circuit tancat intern de refrigeració mitjançant una bateria aletejada per la qual es fa passar un corrent d'aire sec molt elevat. El principal inconvenient d'aquests equips és el gran espai que necessiten (superior a torres de refrigeració de potència equivalent) i el seu elevat consum energètic tant directe com indirecte, ja que per les mateixes condicions ambientals una torre oberta permet assolir una temperatura d'aigua a la sortida clarament inferior.

Taula 18. Consum energètic d'alguns sistemes de refrigeració industrials per aigua i aire [10]

Tipus de sistema de refrigeració	Consum directe específic d'energia (kW _e /MW _{th})			ΔT de bomba (°C)	Consum indirecte específic d'energia (kW _e /MW _{th})	Consum total d'energia (kW _e /MW _{th})	E _{input} /E _{dissipada} (en %)	CO ₂ (tones/any/MW _{th})
	Bombes	Ventiladors	Total		Factor corrector = 1,4 kW _e /MW _{th} °C	Total directe + indirecte		
Sistema d'un sol pas – directe	10 (9-12)	-	10	0	0	10	25 %	50
Sistema d'un sol pas – indirecte	15 (12-18)	-	15	5	7	22	55 %	110
Torre de refrigeració oberta	15 (13-17)	5	20	5	7	27	68 %	136
Torre de refrigeració híbrida	15 (13-17)	8	23	5	7	30	75 %	150
Torre de refrigeració tancada	>15 (13-17)	8	>23	8	11	>34	>85 %	>170
Refrigeració per aire	-	20	20	20	28	48	120 %	240

2.3.10.2. Reducció del consum energètic als sistemes de refrigeració per aigua i aire

MTD 19. Optimitzar l'eficiència energètica en l'àmbit dels sistemes de refrigeració.

Aquest objectiu es pot aconseguir mitjançant l'aplicació de les tècniques següents:

- Prestar atenció a l'eficiència energètica general del procés industrial, abans de prendre mesures per optimitzar el sistema de refrigeració.
- Escollir el disseny del sistema adequat.
- Quan sigui possible, situar la instal·lació en un emplaçament on es pugui aprofitar un corrent d'aigua proper per refrigerar (sistemes d'un sol pas o *once-through systems*).
- Reduir la resistència al flux de l'aigua i l'aire.
- Utilitzar equips eficients i de baix consum energètic.
- Dotar el sistema amb la possibilitat de variar el flux d'aire i d'aigua de refrigeració, si les condicions del procés són variables.
- Evitar recirculacions de l'aigua calenta expulsada en sistemes d'un sol pas.
- Reduir el nombre d'equips consumidors d'energia.
- Realitzar un tractament òptim de l'aigua de refrigeració per a sistemes d'un sol pas i per a torres de refrigeració obertes, amb l'objectiu d'evitar la formació de cal, brutícia i corrosió que pugui disminuir el seu rendiment.
- Manteniment.

Per cada cas particular, la combinació dels factors anteriors hauria de conduir al mínim consum energètic en el disseny i l'operació del sistema de refrigeració.

Les mesures implementades al procés industrial per a la reutilització de la calor residual redueixen la necessitat de dissipar calor al medi ambient. Per tant, en general, si es requereix menys capacitat de refredament, es requerirà menys energia per operar el sistema de refrigeració. Un equip més eficient i un bon funcionament del sistema de refrigeració evitaran l'augment de temperatura en el procés, que proporcionarà reduccions de consum addicionals.

L'elecció de l'equip adequat i el **disseny adequat** contribuirà a la reducció del consum d'energia requerit pels sistemes de refrigeració. Es tracta d'un problema particularment complex que implica molts factors i és de difícil generalització. Les pràctiques següents són àmpliament utilitzades:

- disseny adequat del sistema de distribució del fluid refrigerant, tal com superfícies llises i pocs canvis de direcció del flux, que permetin evitar la turbulència i reduir la resistència al flux del fluid de refrigeració;
- en torres de refrigeració mecàniques, l'elecció del tipus i la posició dels ventiladors, així com la possibilitat d'ajustar el flux d'aire mitjançant un variador de velocitat en el ventilador, poden reduir el consum d'energia;
- elecció del material del reblliment intern de la torre més adient (segons les condicions de funcionament) per permetre el màxim intercanvi calor en tot moment;
- selecció dels separadors de gotes, amb una resistència mínima al flux d'aire.

En termes de l'eficiència energètica global d'una instal·lació, els sistemes d'un sol pas són en sí mateixos una millor tècnica disponible, en particular per a processos amb una gran capacitat instal·lada de refredament ($>10 \text{ MW}_{\text{th}}$, per exemple). A les plantes de generació d'energia elèctrica, si el sistema d'un sol pas no és implementable, les torres de refrigeració de tiratge natural són el sistema de refrigeració energèticament més eficient, tot i que el seu ús és limitat a causa de l'impacte visual que provoca una altura total més gran de la instal·lació.

En l'apartat 3.10.1 de la present Guia es mostra un exemple d'incorporació d'un equip refrigerador basat en un intercanviador aire-aigua.

Torres de refrigeració

Un primer aspecte que incideix en el rendiment d'un sistema de torres de refrigeració és el tipus d'equips dels quals es disposa. Així, cal dir que les torres obertes són més eficients que les de circuit tancat, tot i que aquestes torres presenten l'avantatge de limitar la quantitat d'aigua en contacte amb la torre, la qual ha de ser tractada contra la legionel·la per preservar d'aquesta manera els condensadors dels equips de fred i altres equips que consumeixin aigua de refrigeració en funcionar en circuit tancat.

Pel que fa a la seva operativa, encara és relativament habitual trobar torres de refrigeració instal·lades en entorns industrials que funcionen sense cap tipus de sistema de control, de manera que refreden el circuit d'aigua de refrigeració tot el que permeten les seves característiques i les condicions ambientals. També, en certes ocasions, se'n regula la seva operació manualment, intentant disminuir la seva velocitat (en el cas de torres amb motor del ventilador amb dues velocitats), o bé apagant algun equip (en sistemes amb més d'una torre), en períodes de menys consum (generalment durant l'hivern).

Val a dir que un funcionament eficient d'un sistema de torres de refrigeració ha de disposar d'un sistema de control per la seva regulació. En general, els aspectes més importants a considerar són els següents:

- L'ús de variadors de velocitat en l'alimentació dels ventiladors de les torres: l'accionament a velocitat variable permet reduir el consum del motor elèctric que acciona el ventilador de la torre adequant-lo al que calgui per aconseguir la temperatura de sortida requerida per a l'aplicació, la qual cosa permet estalvis de més del 50 % en determinats moments de l'any, especialment quan les condicions exteriors són fredes.
- Determinació de la consigna de temperatura de sortida de l'aigua en funció de les condicions exteriors: cal recordar que les torres de refrigeració són capaces d'aconseguir, en general, una aproximació d'entre 3 i 5 °C a la temperatura de bulb humit de l'aire exterior. Si es disposa d'un sistema de control automàtic capaç de determinar aquesta temperatura, es pot establir una consigna automàtica de mínim consum, ja que per sota d'aquesta temperatura el rendiment de la torre cau en picat. Tot i que implementar aquest sistema de control és factible, cal dir que és molt poc habitual.

Per als sistemes existents, els canvis als materials i en el disseny no són opcions gaire rendibles per reduir les necessitats energètiques, sobretot en el cas de sistemes de grans dimensions. En canvi, la substitució dels elements interns de la torre de refrigeració (ventiladors, el cos d'intercanvi i separadors de gotes) és la millor opció en molts casos. Per a sistemes més petits, com ara sistemes humits (oberts i tancats) amb recirculació, pels quals hi ha al mercat una àmplia gamma de productes preensablats, un canvi de disseny en el sistema de refrigeració sí que és tècnicament assumible.

Quant a l'efecte dels separadors de gotes en el rendiment del ventilador a causa de la pèrdua de càrrega, es pot concloure que hi ha diferències entre els dissenys dels diferents separadors, i que el seu efecte en el funcionament dels ventiladors demana una atenció especial, tenint en compte els sistemes en la seva globalitat. Això implica que cal estudiar i avaluar la distribució dels fluxos a través dels ventiladors i del separador de gotes.

Molts exemples de canvis al rebliment de la torre de refrigeració han mostrat augments considerables en l'eficiència de l'intercanvi de calor, el que permet aconseguir una disminució de la temperatura de l'aigua de refrigeració a la sortida de la torre i, al seu torn, una millor refrigeració del sistema.

La millora de la capacitat d'intercanvi de calor del rebliment de la torre millora el refredament del procés. Per tant, el ventilador podrà reduir el seu funcionament sense que el nivell de refrigeració en quedi afectat. L'ús d'un rebliment inadequat pot crear una resistència innecessària al flux aire, però la geometria de la mateixa torre també és un factor important a tenir en compte. Un rebliment amb una estructura densa, provoca més pèrdua de càrrega i, per tant, un major consum d'energia. Per contra, un rebliment menys dens provoca una pèrdua de càrrega menor, però la seva eficiència és més baixa i implica unes majors dimensions de la torre necessària, donat que l'efecte no es pot compensar per una aportació extra de potència dels ventiladors.

Manteniment

Cal destacar que experiments pràctics mostren clarament l'efecte beneficiós d'un bon manteniment en la reducció del consum de l'energia exigida per operar el sistema de refrigeració. En general, per als sistemes refredats per aigua, això es tradueix en un tractament adequat del sistema que condueix a la reducció de la resistència deguda a incrustacions, dipòsits, corrosió, etc. El sistema de tractament mantindrà la superfície dels intercanviadors de calor, canonades i

torres de refrigeració en bones condicions i, així, evitarà la resistència al flux d'aigua, reduirà la potència de bombament necessària i optimitzarà l'intercanvi de calor. Un tractament adequat de l'aigua de refrigeració comportarà una solució de compromís entre el control dels additius necessaris i l'augment de la temperatura del procés que implica la seva utilització, amb l'objectiu de reduir el consum directe i indirecte d'energia.

2.3.11. Sistemes d'Enllumenat

La il·luminació artificial representa un percentatge important del consum d'energia en els edificis. En el cas d'oficines, per exemple, el consum usual en il·luminació se situa entre el 25 % i el 30 % de l'energia total consumida i pot arribar, en alguns casos, fins al 50 %. El cas més extrem succeeix en edificis destinats a escoles, on el consum de l'enllumenat pot assolir el 90 % del total.

Taula 19. Contribució del consum de l'enllumenat sobre el consum total d'edificis

Ús	Pes s/consum total
Oficines	25-30 %
Residencial	10-15 %
Hotels	15-20 %
Hospitals	20-30 %
Escoles	20-90 %

Avui dia, les alternatives existents i un bon disseny dels sistemes d'enllumenat permeten obtenir estalvis molt importants, sense comprometre els requisits normatius d'il·luminació, atès que sovint les instal·lacions s'executen amb nivells d'il·luminació superiors als necessaris i/o normatius. Prenent com a prioritats la salut de les persones i la seguretat en el treball, cal optimitzar els sistemes d'enllumenat segons els requisits específics de l'ús al qual estan destinats, seguint les MTD. Addicionalment, la majoria de làmpades contenen productes químics tòxics (p.e. Hg i Pb), de manera que al final de la seva vida útil requereixen un procés de reciclatge específic. Per tant, un disseny acurat de les instal·lacions també contribueix a una reducció dels residus i, per tant, a beneficiar el medi ambient.

L'eficiència energètica d'una instal·lació d'il·luminació d'interior es determina obtenint el valor d'eficiència energètica de la instal·lació (VEEI), que determina la potència instal·lada per unitat de superfície i per cada 100 lux (W/m²/100 lux).

$$VEEI = \frac{P \cdot 100}{S \cdot E_m}$$

en què:

P: potència total instal·lada (làmpades + equips auxiliars) (W)

S: superfície il·luminada (m²)

E_m: Il·luminació mitjana horitzontal mantinguda al pla útil (lux)

L'eficiència energètica d'una instal·lació d'il·luminació exterior s'ha de determinar tal i com estableix l'RD 1890/2008 pel que s'aprova el Reglament d'eficiència

energètica en instal·lacions d'il·luminació exterior i les seves instruccions tècniques EA-01 a EA-07.

A continuació es descriuen breument les diverses tecnologies emprades actualment en el sistema d'enllumenat:

Làmpades halògenes: representen una variant de les làmpades d'incandescència, amb coberta de quars, filament de wolframi i gas halogen en el seu interior, que permeten arribar a temperatures superiors. Es caracteritzen per un elevat, IRC = 100, i més eficiència i vida útil que les anteriors, però tenen com a inconvenients la seva baixa eficàcia (16-23 lm/W) i una vida útil d'entre 2.000 h i 6.000 h.

Làmpades de descàrrega: aquesta tecnologia aconsegueix la producció de llum mitjançant l'excitació d'un gas amb una descàrrega elèctrica entre dos elèctrodes. Els gasos emprats habitualment són gasos nobles (argó, neó, criptó o xenó, o la seva barreja). És una tecnologia de fabricació complexa ja que exigeixen elements auxiliars per garantir les condicions de funcionament adequades, que es caracteritza per ser una font de llum molt eficient i amb una vida útil elevada però d'encesa lenta segons la tecnologia. Els tipus de làmpades de descàrrega més comuns són els següents:

- Tubs fluorescents, vida útil d'unes 10.000 h;
- Vapor de mercuri d'alta pressió, vida útil d'unes 8.000 h;
- Halogenurs metàl·lics, vida útil d'entre 8.000-20.000 h;
- Vapor de sodi d'alta pressió, vida útil inferior a 20.000 h;
- Vapor de sodi de baixa pressió, vida útil d'entre 18.000-20.000 h.

Figura 57. Diferents models de làmpades de descàrrega



Díodes emissors de llum (LED), o bé díodes orgànics emissors de llum (OLED): tecnologia basada en semiconductors que emeten llum d'espectre reduït quan se'n polaritza de forma directa la unió PN i és travessat per un corrent elèctric. Un dels principals avantatges de la tecnologia LED és la seva alta eficiència. En el cas que la capa d'emissió d'un LED estigui fabricada amb un material de compost orgànic, el dispositiu es coneix com a OLED. En comparació amb els LED convencionals, els OLED són més lleugers. La tecnologia s'ha començant a desenvolupar en els darrers anys i, tot i que inicialment les aplicacions n'eren molt limitades i el seu cost era elevat, actualment està evolucionant de forma molt ràpida, de manera que el volum d'inversió requerit és raonable i comencen a aparèixer dispositius per a aplicacions industrials.

Figura 58. Làmpades LED dissenyades per a la substitució d'halògenes (GU5,3, GU10)



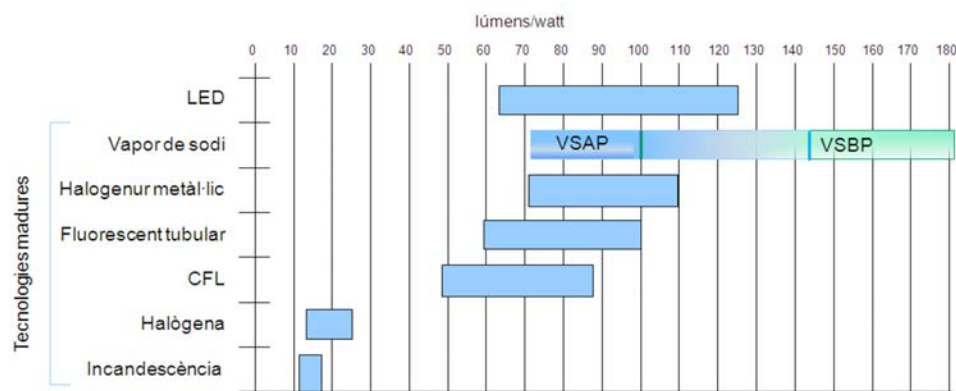
En la taula següent es mostra un resum de les característiques més rellevants de les diverses tecnologies esmentades.

Taula 20. Característiques i eficàcia lluminosa dels diferents tipus de làmpades [23]

Tecnologia	Eficàcia lluminosa o Rendiment lluminós (lm/W)	IRC	Vida útil (h)
Incandescència	12-17	100	1.000-2.500
Halògena	16-23	100	2.000-6.000
Fluorescent compacte*	49-88	80	7.000-15.000
Fluorescent*	60-100	15-85	10.000
Halogenurs metàl·lics*	70-110	65-93	8.000-20.000
Sodi d'alta pressió*	73-143	21-70	<20.000
Sodi baixa pressió*	100-200	0	18.000-20.000
LEDs*	64-125	60-90	50.000

*Dades extretes de l'estudi "Treball valoratiu de les millors tecnologies disponible en enllumenat exterior" Elaborat pel Col·legi d'Enginyers Industrials de Catalunya i la Generalitat de Catalunya.

Figura 59. Comparativa gràfica d'eficiència de les diferents tecnologies emprades en enllumenat [elaboració pròpia segons les dades de fabricants i diferents tecnologies]



Tal i com es pot observar, la llum de sodi de baixa pressió és la més eficient, però a causa de la distorsió en la percepció del color (IRC baix) s'empra, generalment, en usos per a l'enllumenat públic exterior en què l'índex d'IRC no és una exigència.

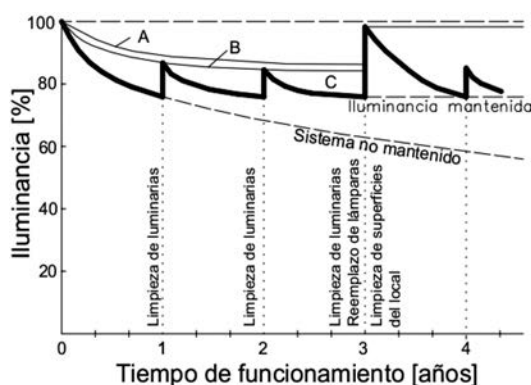
Per a activitats industrials, en enllumenat exterior es recomana LED en cas de necessitat d'un IRC elevat o sodi d'alta pressió si no és necessari un IRC elevat.

MTD 20. Minimitzar el consum d'energia dels sistemes d'enllumenat artificial en qualsevol tipologia d'edifici.

Les MTD en l'àmbit de l'enllumenat són les següents:

- **Identificar els requeriments d'il·luminació suficients**, en funció de les necessitats a cobrir: cal dissenyar les instal·lacions en funció dels usos als quals es destinaran els espais (il·luminació general, espai de pas, espais de treball, treballs de precisió, il·luminació decorativa, etc.). En algunes ocasions, un canvi en la posició i distribució de les lluminàries pot contribuir a mantenir els nivells d'il·luminació en un rang adequat millorant l'eficiència de la instal·lació. Cal, doncs, adequar la potència a les necessitats reals. És evident que els requeriments d'il·luminació no són els mateixos en un quiròfan que en una oficina tècnica, en un magatzem o bé en un passadís. Per al disseny d'instal·lacions d'il·luminació en els llocs de treball en interiors, cal atendre els requeriments mínims exigits en la Norma UNE-EN 12464-1:2012, l'RD 486/1997 i el document DB-HE3: "Eficiència energètica de les instal·lacions d'il·luminació del CTE".
En el cas d'il·luminació en el exterior s'ha de donar compliment a la Llei 6/2001 i a l'RD 1890/2008.
- **Planificar i integrar els espais amb l'objectiu d'optimitzar la utilització de llum natural**, incloent el disseny dels seus acabats interiors. Aquest aprofitament de la llum natural no només permet una reducció del consum elèctric, sinó que també contribueix a aportar beneficis en la salut humana i en el rendiment dels ocupants. Cal tenir en compte, però, que en cas que els espais se sotmetin a posteriors modificacions o bé es modifiquin els seus usos, serà necessària una adaptació de les instal·lacions a les noves condicions.
- **Selecció de sistemes d'enllumenat** (tipus de làmpades, llumeneres i equips electrònics auxiliars) d'acord amb els requisits adequats segons els usos específics, i que integrin les MTD per l'estalvi energètic.
- **Gestió, operació, control i manteniment dels sistemes d'enllumenat:**
 - Ús de sistemes de gestió i control de l'enllumenat (senyors de presència, temporitzadors, regulació del nivell d'il·luminació, etc.) que permeten la reducció del consum energètic. Aquesta acció té un període de retorn baix, amortitzant ràpidament la inversió.
 - Formació dels ocupants dels edificis per aconseguir un ús eficient dels equips.
 - Establir un pla de manteniment preventiu adequat dels sistemes per aconseguir el màxim de flux lluminós i allargar la vida útil de les instal·lacions.

Figura 60. Impacte del manteniment en sistemes d'enllumenat



L'ús de les diverses tècniques disponibles aquí descrites, com ara l'ajustament dels requeriments d'il·luminació, l'ús de làmpades i equips auxiliars energèticament eficients (equips electrònics), l'atenció a les funcionalitats requerides, així com la instal·lació de dispositius de gestió i control, permeten una reducció del consum d'energia de l'enllumenat entre el 20 % i el 80 % sobre el consum d'electricitat total destinat a la il·luminació dels edificis, sempre segons les particularitats de la situació inicial, com ara la tecnologia a substituir i les hores de funcionament de les instal·lacions.

Finalment, cal destacar que en la implantació de mesures d'eficiència energètica amb estalvis garantits, és recomanable la utilització dels protocols EVO de mesura per a l'avaluació d'aquests estalvis energètics amb el màxim rigor.

Exemple. Disseny de sistema d'enllumenat per ús d'oficina.

Taula 21. Resum de l'impacte de la mesura d'eficiència energètica en ús d'oficina

Exemple d'il·luminació Oficines	MTD disseny instal·lacions i selecció de sistemes		
Paràmetres	Inicial	Final	Diferència (%)
Tipologia d'equips d'enllumenat	FL tubulars 58W amb equip convencional	FL tubulars 28W amb equip electrònic	
Potència, P (W)	6.916	2.604	-62 %
Il·luminància mitjana, Em (lux)	720	505	-30 %
Potència mitjana, Ps (W/m²)	24,40	9,19	-62 %
VEEI (W/m²·100 lux)	3,39	1,82	-46 %
Hores funcionament (h/any)	2.760		
Consum (kWh/any)	19.088	7.187	-62 %
Emissions (Tm eq. CO ₂)	4,58	1,72	-62 %

Adicionalment, en aquest cas, la incorporació d'equips de regulació per llum natural aporta un estalvi de consum de 958 kWh/any (un 5 % sobre el consum total inicial), de manera que l'aplicació d'ambdues MTD permet assolir un estalvi en el consum de la instal·lació del 67 %.

Exemple. Substitució de làmpades halògenes per LED en establiments d'hostaleria.

Taula 22. Resum de l'impacte de la mesura d'eficiència energètica en ús d'hostaleria

Exemple d'il·luminació establiment	MTD selecció de sistemes d'enllumenat		
Paràmetres	Inicial	Final	Diferència (%)
Tipologia equips enllumenat	làmpades halògenes, 35W	làmpades LED, 8W	
Potència, P (W)	5.950	1.360	-77 %
Il·luminància mitjana, Em (lux)	400	400	0 %
Potència mitjana, Ps (W/m²)	11,90	2,72	-77 %
VEEI (W/m²·100 lux)	-	-	-
Hores funcionament (h/any)	5.475		
Consum (kWh/any)	32.576	7.446	-77 %
Emissions (Tm eq. CO ₂)	7,82	1,79	-77 %

2.3.12. Processos d'assecatge, separació i concentració

L'assecatge és un procés industrial intensiu en consum energètic, que pot tenir sentit com a procés independent, tot i que moltes vegades forma part de processos de concentració i/o separació. En aquest document l'assecatge es tracta juntament amb els processos de separació i concentració quant a tècniques d'estalvi i eficiència energètica.

En els processos d'assecatge, la calor es pot transmetre per convecció (assecadors directes), per conducció (assecadors de contacte o indirectes) i per radiació, com en el cas d'infraroigs, microones o fonts d'alta freqüència electromagnètica (assecadors de radiació), o bé per la combinació de tots els casos anteriors. La majoria d'assecadors industrials són del tipus convectiu que utilitzen aire calent o gasos de combustió directa com a medi d'assecatge.

Per la seva banda, la separació és un procés que transforma una barreja en dos components, com a mínim, els quals són diferents quant a la composició (poden ser dos productes, o bé un producte i un subproducte o residu). Així doncs, la tecnologia de separació consisteix en l'extracció i aïllament dels productes desitjats d'una barreja de diferents substàncies o d'una substància pura en diferents fases o diferents quantitats.

El procés de separació té lloc en un dispositiu de separació amb un grau de separació que depèn de l'agent separador. En aquest apartat, els mètodes de separació s'han classificat segons els diferents principis de separació i l'agent separador utilitzats.

Els mètodes de separació es poden classificar segons:

- Entrada d'energia al sistema
 - calor (vaporització, sublimació, assecatge);
 - radiació;
 - pressió (recompressió mecànica de vapor);

- electricitat (electrofiltració de gasos, electrodiàlisis);
- magnetisme (ús d'imans);
- energia cinètica (separació centrífuga) o energia potencial (decantació).
- Extracció d'energia del sistema
 - Refrigeració o congelació (condensació, precipitació, cristallització, etc.).
- Existència de barreres mecàniques
 - Filtres o membranes (nano, ultra o microfiltració, permeabilització al gas, tamisat).
- Altres criteris
 - Interaccions fisicoquímiques (solució/precipitació, adsorció, flotació, reaccions químiques).
 - diferències en altres propietats físiques o químiques de les substàncies com la densitat, la polaritat, etc.

La combinació dels principis de separació o agents separadors indicats anteriorment es poden utilitzar donant lloc a tècniques de separació híbrides com, per exemple:

- destil·lació (vaporització i condensació);
- pervaporació (vaporització i membrana);
- electrodiàlisis (camp elèctric i membrana d'intercanvi d'ions);
- separació ciclònica (energia cinètica i energia potencial).

MTD 21. Optimitzar de l'eficiència energètica dels sistemes d'assecatge, concentració i separació.

Les MTD per optimitzar aquest processos són les següents:

- Selecció de la tecnologia de separació òptima o combinació de tecnologies, adequada a les necessitats del procés.
- Utilització de fluxos de calor residuals d'altres processos quan sigui possible.
- Utilització de combinacions de diverses tècniques.
- Prioritzar els processos d'assecatge mecànics en lloc dels tèrmics.
- Utilització de les tècniques d'assecatge directe o radiant o vapor sobreescalfat en lloc de les tècniques d'escalfament indirecte.
- Recuperació de l'energia utilitzada als processos d'assecatge, mitjançant recompressió mecànica del vapor, bombes de calor i bescanviadors de calor).
- Optimització de l'aïllament dels sistemes d'assecatge.
- Automatització dels processos.

En l'apartat 3.11.1 de la present Guia es mostra un exemple de substitució d'un assecador per un amb cabal d'aire en funció del flux de producte a tractar i regulat mitjançant un variador de freqüència.

A continuació, es comenten amb més detall cadascuna de les tècniques anteriors.

2.3.12.1. Selecció de la tecnologia òptima o combinació de tecnologies

Normalment, en l'elecció d'una tecnologia de separació i assecatge es disposa de diverses alternatives. L'elecció dependrà de les característiques de l'alimentació, de les sortides, de les restriccions relacionades amb el tipus de planta i del sector, així com de les limitacions pròpies del procés.

Les tecnologies es poden utilitzar en etapes. Per exemple, dos o més etapes d'una mateixa tecnologia o combinacions de diferents tecnologies. Quan això és possible es pot aconseguir minimitzar l'energia consumida.

Abans de seleccionar la tècnica de separació, alguns dels factors que s'han de considerar, relacionats amb el material d'entrada, el producte final o el procés, són:

- Material d'entrada:
 - Tipus, estat, forma: líquid, pasta, pols, granular, amb forma, pla, etc.
 - Fragilitat mecànica.
 - Termosensibilitat.
 - Contingut d'humitat.
 - Flux/quantitat a ser tractat.
 - Si escau: dimensions, mida de les gotes, viscositat.
- Especificacions del producte final:
 - Contingut d'humitat.
 - Forma i mida.
 - Qualitat: color, oxidació.
- Procés:
 - Lot/continu
 - Fonts de calor:
 - Combustibles fòssils (gas natural, petroli, carbó, etc.).
 - Electricitat.
 - Energia renovable (solar, biomassa, etc.).
 - Transferència de calor per:
 - Convecció (aire calent, vapor rescalfat);
 - Conducció;
 - Radiació tèrmica (energies radiants: infrarojos, microones, alta freqüència).
 - Temperatura màxima
 - Capacitat
 - Temps de residència
 - Accions mecàniques al producte

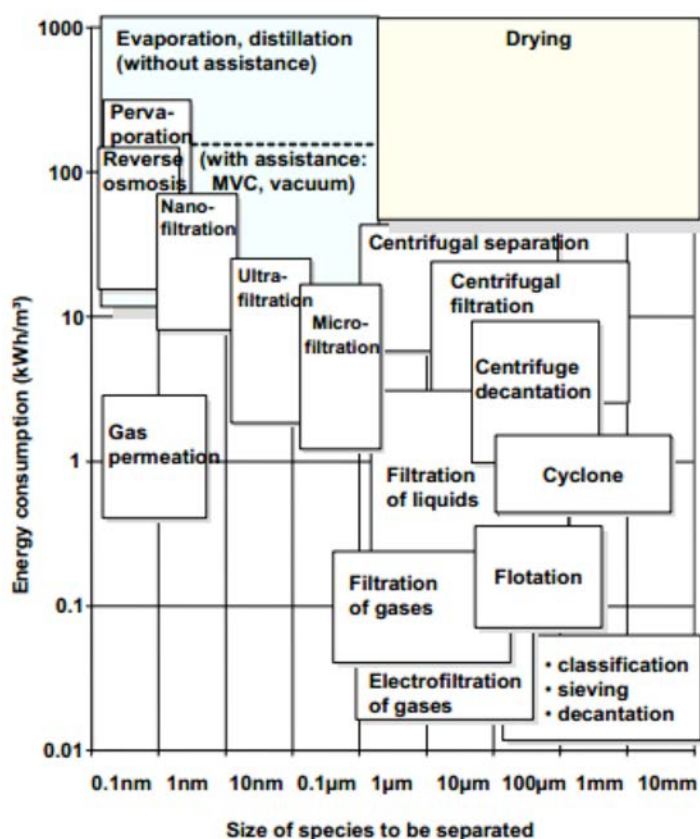
Cal realitzar un estudi de viabilitat per tal de definir la millor solució des del punt de vista tècnic, econòmic, energètic i mediambiental. Els requisits s'han de definir amb precisió:

- Paràmetres d'entrada i producte (massa i característiques de flux), especialment el contingut d'humitat ja que a partir d'un cert percentatge d'humitat cada cop és més complicat assecar el producte i, a més, es consumeix més energia per la reducció d'humitat obtinguda.
- Fer la llista de tots els serveis disponibles (electricitat, refrigeració, aire comprimit, vapor, altres fonts de calor i fred) i les seves característiques.
- Espai disponible.
- Possibles pretractaments.
- Potencial de recuperació de la calor residual del procés.
- Equips i fonts d'alta eficiència energètica (motors d'alta eficiència energètica, ús de la calor residual, etc.).

En la figura 61 es mostra el consum d'energia d'alguns processos de separació en funció de la mida dels elements a separar.

En tots els casos caldrà identificar la tecnologia adequada. La instal·lació d'equips nous es portarà a terme en base a un anàlisi del binomi cost-benefici i/o per motius de qualitat o rendiment de la producció.

Figura 61. Consum d'energia d'alguns processos de separació [10]



2.3.12.2. Processos mecànics

En la figura 61 es pot observar com el consum d'energia dels processos mecànics té una magnitud inferior a la dels processos tèrmics d'assecatge.

Si el material a assecar ho permet, es recomana utilitzar principalment processos de separació i/o concentració mecànica per tal de reduir el consum d'energia del procés complet.

En general, **la majoria de productes es poden pretractar mecànicament quan es tenen uns continguts d'humitat mitjana** (proporció entre la massa líquida que s'ha d'extreure i la massa de la substància seca) **entre el 40% i 70%**. A la pràctica, l'ús de processos mecànics es limita per les càrregues admissibles del material i/o el temps econòmic de drenatge.

En determinades ocasions també es recomanen els processos mecànics abans de realitzar un tractament tèrmic. En l'assecatge de solucions o suspensions (per exemple, assecat per pulverització), el pretractament pot ser amb filtració per membrana (osmosi inversa, nanofiltració, ultrafiltració o microfiltració). Per exemple, en la indústria làctia, la llet es pot concentrar amb un contingut d'humitat del 76 % abans de l'assecat per pulverització.

2.3.12.3. Processos tèrmics

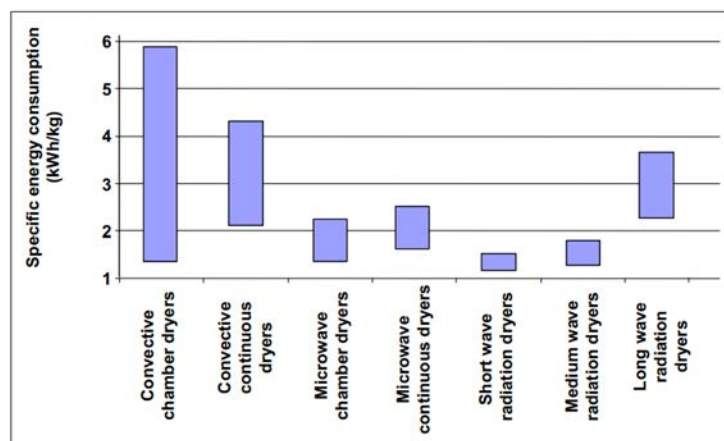
2.3.12.3.1. Requisits energètics i d'eficiència

L'assecatge és un mètode generalitzat en molts sectors industrials. En un sistema d'assecatge, el material humit s'escalfa a la temperatura de vaporització de l'aigua. El volum d'aigua vaporitzada normalment s'extreu utilitzant aire de la cambra d'assecatge. A l'hora de calcular les necessitats energètiques de la

instal·lació també cal tenir en compte les pèrdues de calor de la planta, així com el rendiment de l'equip.

En els assecadors industrials la forma de transmissió de calor dominant és la convecció. En la figura 62 es mostra el rang de valors del consum específic d'energia secundària per quilogram d'aigua evaporada de diferents tipologies d'assecadors, a càrrega màxima i a la màxima evaporació possible. A fi de poder comparar, s'assumeix que els assecadors per convecció utilitzen una resistència elèctrica per l'escalfament.

Figura 62. Consum específic de diferents tipus d'assecador [10]



Com ja s'ha indicat en l'apartat anterior, en molts casos l'ús de processos mecànics de separació com a pretractament, previ a l'assecatge, permet reduir-ne significativament el consum d'energia associat. **En general, es pot afirmar que l'optimització de l'aire humit en assecadors és de vital importància per tal de reduir al mínim el consum d'energia en processos d'assecat.**

2.3.12.3.2. Escalfament directe

L'escalfament directe s'aconsegueix bàsicament per convecció. Un gas calent, normalment aire (que pot ser barrejat amb els gasos de combustió) o vapor, es fa circular a través/per sobre o al voltant del material que es vol assecar, el qual pot estar situat en un tambor rotatiu, una safata o bé una cinta.

Els sistemes típics d'assecatge directe són:

- Amb un cabal de gas: tambors rotatius, forn d'assecatge, túnel d'assecatge, assecador de cinta en espiral, assecador de safata.
- Amb sòlid airejat: a través d'un circulador, assecatge per lots, assecador de bastidor fix.
- Agitador de sòlids a gran escala: llit fluïditzat, assecador rotatori instantani.

L'escalfament directe i, en particular, l'escalfament amb aire calent escalfat per combustió directa, evita la majoria de pèrdues de calor dels sistemes indirectes, calderes i les línies de canonades de vapor.

És important que els materials a assecar i els líquids a extreure siguin compatibles amb el sistema. En aquest sentit, evidentment, no s'utilitzaran productes inflamables si l'escalfament directe es fa cremant gas natural.

2.3.12.3.3. Escalfament indirecte

L'escalfament indirecte s'aconsegueix per conducció: la calor es transfereix al material escalfant la seva superfície per contacte amb una altra superfície calenta, la qual pot ser estàtica o mòbil.

Els sistemes típics d'assecatge indirecte són:

- Assecador de tambor per a materials plans i tires (tèxtils, paper o taulells). El material humit s'embolica al voltant de cilindres horitzontals rotatius calefactats internament, normalment amb vapor.
- Assecador de rodets per a materials amb baixa viscositat, com les solucions de material orgànic o inorgànic. El material flueix entre els rodets escalfats com una làmina fina i el sòlid assecat s'extreu amb un rascador, com un film, escates o pols.
- Els materials pastosos s'assequen mitjançant:
 - Assecador de corró ranurat, que produeix segments curts per a l'assecat addicional.
 - Assecador de cargol buit, que conté un o dos cargols d'Arquímedes a l'interior. Els cargols s'escalfen amb aigua calenta, vapor saturat o olis calents, etc.
 - Assecador multifase, que és un assecador de contacte amb agitador i amassador. La carcassa, la tapa, el corró principal buit i els seus elements de disc s'escalfen amb vapor, aigua calenta o oli calent.
- Els materials granulars s'assequen mitjançant:
 - Assecadors rotatius, amb tubs calefactats dins del tambor, o es posa el material a assecar dins dels tubs amb el tambor calefactat. Aquest tambor té una velocitat d'aire baixa, que el fa útil per als materials en pols.
 - Cargol assecador de cinta transportadora amb paletes que giren en un recipient calefactat.
 - Assecador cònic agitat amb un agitador en forma de con que gira en una camisa calenta en forma d'embut.
 - Assecador de safata, amb safates climatitzades.
 - Assecador de tub en espiral, en què el material es posa en contacte amb la superfície calefactada del tub durant un breu espai de temps i es transporta pneumàticament. Es pot segellar i es pot utilitzar per l'eliminació de dissolvents orgànics, amb recuperació de solvent.

Tenint en compte que el procés es divideix en dues etapes —la de l'escalfament de la superfície i l'escalfament del material—, es tendeix a utilitzar més energia que en els processos d'escalfament directe, perquè hi ha més pèrdues en la transferència de calor.

En general, els assecadors d'escalfament indirecte són una alternativa a implantar quan no es puguin aplicar assecadors d'escalfament directe o existeixin altres restriccions.

2.3.12.3.4. Vapor reescalfat

El vapor reescalfat es vapor escalfat a una temperatura superior a la temperatura d'ebullició de l'aigua a una pressió determinada. No pot existir en contacte amb l'aigua, no conté aigua i s'assembla a un gas perfecte, també s'anomena vapor sobreescalfat, vapor anhidre i vapor de gas. El vapor reescalfat es pot utilitzar en qualsevol dels assecadors directes com a fluid d'escalfament en lloc d'aire calent (on el fluid d'escalfament és en contacte directe amb el producte), per exemple, en l'assecat per pulverització, en el llit fluiditzat, en el llit en sortidor, en tambors, etc.

L'avantatge d'aquests sistemes és que estan limitats per la transferència de calor, i no la transferència de massa (aigua) i, per tant, la cinètica d'assecatge és millor. Per altra banda, els assecadors són més petits així com les pèrdues de calor. A més, l'energia (calor latent) de l'aigua provinent del producte, pot ser fàcilment reciclada a l'assecador mitjançant una recompressió mecànica del vapor (MVR) o pot ser utilitzada en un altre procés incrementant l'estalvi energètic.

Per altra banda, el tractament dels components orgànics volàtils (COVs) és més senzill perquè el volum dels gasos d'escapament està limitat. Aquests components poden recuperar-se fàcilment.

En general, el consum d'energia és de 670 kWh/t aigua evaporada sense recuperació de calor i 170-340 kWh/t amb recuperació de calor.

El control del procés és més senzill ja que la humitat final del producte i la cinètica d'assecat poden ser controlats mitjançant la temperatura del vapor i l'eliminació d'aire redueix el risc de foc i explosió.

L'inconvenient d'aquests sistemes és que els productes termosensibles poden malmetre's perquè assoleixen altes temperatures i la inversió generalment és més elevada, especialment quan s'utilitza MVR. Així doncs, s'ha de tenir en compte que abans de la seva implementació, s'han de dur a terme assaigs per tal de garantir la qualitat del producte així com una anàlisi de viabilitat econòmica.

Qualsevol sistema d'assecat directe pot ser reconvertit a un sistema de vapor reescalfat. La implementació d'aquests sistemes permet l'estalvi energètic.

Altres arguments que impulsen la seva implementació és l'obtenció de productes amb millor qualitat, especialment en la indústria agroalimentària (millor color, absència d'oxidació, etc.).

2.3.12.3.5. Energies radiants

En les energies radiants, com per exemple la infraroja (IR), d'alta freqüència (HF) i les microones (MW), l'energia és transferida per radiació tèrmica. S'ha de tenir en compte que hi ha diferències entre assecat i curar: L'assecat necessita portar les molècules del solvent fins a, o per sobre de, la calor latent d'evaporació, mentre que les tècniques de curat incorporen l'energia necessària per a la reticulació (polimerització) o altres reaccions.

Aquestes tecnologies s'apliquen en processos de producció industrial per escalfar productes i, per tant, poden aplicar-se en processos d'assecat. Les energies radiants es poden utilitzar individualment o en combinació amb les de conducció o convecció.

Les particularitats de les energies radiants que permeten estalvis en els processos són:

- Transferència directa d'energia. Les energies radiants permeten una transferència directa d'energia des de la font al producte, sense utilitzar materials intermedis. La transferència de calor és, per tant, òptima, i evita especialment la pèrdua d'energia a través dels sistemes de ventilació. Aquest sistema permet obtenir estalvis energètics significatius. Per exemple, en processos d'assecat de pintura, aproximadament el 80% de l'energia s'extreu dels gasos d'escapament.
- Alta densitat de potència. La densitat de potència de la superfície (IR) o volum (HF, MW) és superior en les energies radiants en comparació amb les tecnologies convencionals com l'aire calent de convecció. Aquesta tecnologia permet una velocitat més elevada de producció i facilita el tractament de productes d'alta energia específica com, per exemple, algunes pintures.
- Concentració d'energia. L'energia es pot concentrar fàcilment en una part específica del producte.
- Flexibilitat de control. L'inèrcia tèrmica és baixa, amb energies radiants i variacions de potència més grans. Es pot utilitzar un control flexible, que condueix a estalvis energètics i productes fabricats de bona qualitat.
- Generalment, el flux d'aire d'escapament és molt petit perquè l'aire no és el medi intermedi per a la transferència de calor però s'utilitza per extreure vapor d'aigua o altres dissolvents. El tractament dels gasos d'escapament, si aplica, és, per tant més senzill i menys car.

Les energies radiants, en particular l'IR, poden ser utilitzades en la retroalimentació de les instal·lacions o per impulsar la línia de producció juntament amb les energies de convecció i conducció.

Beneficis específics de l'IR:

- Transferència directa: reducció de l'aire d'escapament calent i, per tant, estalvi d'energia, pocs o sense fluids calents transportables.
- Reducció de la mida de l'equip.
- Regulació més senzilla.
- Retroalimentació de les plantes.

Beneficis específics de HF i MW:

- Transferència directa: reducció de l'aire d'escapament calent i, per tant, estalvi d'energia, pocs o sense fluids calents transportables.
- El volum d'escalfament permet un assecat ràpid i menys pèrdues.
- Escalfament selectiu, preferentment s'escalfa aigua.
- Escalfament homogeni si la mida dels productes és compatible amb la longitud d'ona.
- Transferència de calor eficient.

Algunes desavantatges de l'IR:

- Inversió elevada (20-30 %).
- Bàsicament per a productes plans o amb formes simples.
- Normalment no és l'opció prioritària dels constructors.

Algunes desavantatges d'HF i MW:

- Inversió elevada (20-30 %).
- Normalment no és l'opció prioritària dels constructors.

Els productes heterogenis poden presentar escalfament diferencials obtenint una qualitat pobre dels productes.

IR pot ser utilitzat en:

- Curat de pintures, tinta o vernissos.
- Assecat de paper, cartró, preassecat de teixits.
- Assecat de pols en la indústria química i de plàstics.

HF pot ser utilitzat per l'assecat de:

- Productes massius (monolític): tèxtils (rodets de fil), ceràmics.
- Pols en la indústria química.

MW pot ser utilitzat per l'assecat de:

- Productes massius (monolític) (fusta, indústria agroalimentària) o productes plans.
- Productes químics i farmacèutics (al buit).

Normalment es requereix una inversió més elevada que en altres tècniques convencionals (20-30 %).

En aplicacions industrials, no és comú l'ús d'energies radiants com a potencial d'estalvi energètic malgrat es coneguin els seus avantatges (velocitat d'acció, qualitat dels productes finals, estalvis energètics, sistemes compactes). La manca d'espai disponible pot ser determinant en l'elecció d'aquests sistemes a part de que es poden utilitzar per impulsar les línies de producció existents, especialment amb l'IR.

2.3.12.4. Recuperació de calor en processos d'assecatge, concentració i separació

L'assecatge és un procés que normalment es fa a alta temperatura i en què la calor residual es pot recuperar de manera:

- Directa, quan s'utilitza aire calent com a fluid d'escalfament, barrejant gas d'escapament amb aire fresc directament abans del cremador. En cas que el gas d'escapament sigui massa contaminat (pols, humitat, etc.) la calor recuperada dels gasos d'escapament es fa a través d'un intercanviador de calor, preescalfant el producte que es vol assecat o escalfant l'aire d'assecatment.

- Indirecta, utilitzant la recompressió mecànica del vapor (MVR) per comprimir els gasos d'escapament, especialment quan el fluid d'escalfament és vapor reescalfat (vegeu l'apartat 2.3.3.2 i l'exemple de l'apartat 3.4.1).

A partir d'ara només es parlarà de la recuperació directa.

Preescalfar l'aire abans del cremador mitjançant la recuperació de calor pot pertorbar el procés de reescalfament degut a la seva influència en la temperatura i contingut d'humitat. Poden aparèixer alguns contaminants quan no hi ha intercanviador de calor i es necessitarà calibrar correctament el control de la temperatura d'assecat.

La recuperació de calor es pot utilitzar en gairebé qualsevol assecador d'aire de calor convectiu (túnel, forn, tambor, etc.). Els estalvis energètics seran més grans quan l'aire de l'ambient sigui fred (per exemple, a l'hivern). Com a mínim, s'estimen uns estalvis del 5 % d'energia.

S'ha de posar especial atenció als ajustaments del cremador i a les dimensions dels diferents elements: ventilador, diàmetre de la canonada, vàlvules de regulació i intercanviador de calor si aplica. L'intercanviador de calor ha de ser d'acer inoxidable ja que quan el cremador d'assecat treballa amb combustible, el gas d'escapament conté sulfur i SO_2 i pot malmetre l'intercanviador de calor si es produeix condensació.

El temps de retorn de la inversió pot ser variable, segons el cost de l'energia, la capacitat d'evaporació de l'assecador i el número d'hores en funcionament. Sempre s'ha de fer una simulació considerant la hipòtesi de la pujada del preu de l'energia.

En processos de concentració amb evaporació les tècniques de recuperació de calor aconseguir reduir el consum energètic de manera notable. La concentració amb evaporació és una tècnica molt eficaç per al tractament d'aigua residual. Es pot associar a la recompressió mecànica del vapor o a una bomba de calor. En particular, aquesta tècnica permet reduir significativament el volum d'aigua residual que s'envia a tractament amb un baix cost, així com permet reciclar l'aigua.

Per evaporar una tona d'aigua, es necessiten de 700 a 800 kWh/t. És possible reduir les necessitats energètiques utilitzant solucions de recuperació de calor, com, per exemple, una bomba de calor, o incloure una recompressió mecànica del vapor o evaporadors de múltiple efecte amb termocompressió.

En la taula 23 es mostren diferents tipologies d'evaporadors i els seus consums específics.

Taula 23. Tipus d'evaporadors i consums específics

Tipologia d'evaporador	Consums específics ^{1,2,3}	
	kg vapor/twe ¹ (kWh)	kWh d'electricitat/twe ¹
1 etapa 1200	960	10
2 etapes 650	520	5
1 etapa amb termocompressió	450-550 (400)	5
3 etapes	350-450 (320)	5
6 etapes amb termocompressió	115-140 (100)	5
1 etapa amb MVR	0-20 (8)	15-30
2 etapes amb MVR	0-20 (8)	10-20

Notes: 1. twe: tona d'aigua evaporada
2. valors mitjans per diferents concentracions del producte
3. L'última columna correspon a consums auxiliars (bomba, torre de refrigeració, etc.)

L'elecció de la tecnologia depèn de la naturalesa del producte i concentrat. Pot ser necessari realitzar assaigs de viabilitat així com una anàlisi dels estalvis econòmics i increment en el rendiment de la producció i qualitat del producte. En cada cas s'haurà de determinar la seva viabilitat econòmica.

2.3.12.5. Optimització de l'aïllament del sistema d'assecatge

Com en tots els equips d'escalfament, les pèrdues de calor es poden reduir mitjançant l'aïllament del sistema d'assecatge, com en els forns i les canonades de vapor i condensats. El tipus d'aïllament a utilitzar i el seu gruix dependrà de la temperatura d'operació del sistema, els materials que s'han d'assecar, si s'han d'extreure fluids diferents a l'aigua o si el vapor d'aigua pot estar contaminat.

L'aïllament necessita manteniment ja que pot deteriorar-se amb el temps a causa de la seva fragilització, danys mecànics, acció de la humitat (per exemple, degut a la condensació del vapor d'aigua, filtració de vapor) o per contacte amb substàncies químiques. Els aïllaments malmesos es poden identificar per inspecció visual o exploració infraroja. Per altra banda, tenint en compte que l'aïllament pot cobrir fugues i/o corrosions, és necessari fer inspeccions periòdiques per tal de poder-ho identificar.

L'aïllament s'aplicarà quan s'aïlli un sistema d'assecatge gran o es renovi una planta. Es recomana que la temperatura màxima de la superfície en contacte amb el personal sigui de 50 °C.

2.3.12.6. Control de processos assistit per ordinador/procés d'automatització en processos tèrmics d'assecatge

En la majoria d'aplicacions amb processos d'assecatge tèrmic, els assecadors normalment es controlen utilitzant especificacions dels valors previstos i/o principalment valors empírics (experiència de l'usuari). El temps de retenció, velocitat de processament, contingut inicial d'humitat, temperatura i qualitat del producte s'utilitzen com a paràmetres de control. Es necessiten sensors d'humitat amb característiques lineals i baixes interferències per determinar el contingut d'humitat. Un ordinador pot calcular aquests paràmetres a temps real i comparar-ho amb els valors previstos calculats mitjançant un model matemàtic del procés d'assecat i canviar les variables de control comparant el valor previst i el valor real; tot això, però, exigeix un coneixement exacte del procés d'assecat i un programari adequat.

L'ús de sistemes de control de processos assistits per ordinador a les diferents plantes mostren uns estalvis d'entre el 5 i el 10 % respecte de les plantes amb un control empíric tradicional.



3. EXEMPLES D'IMPLEMENTACIÓ

En els exemples mostrats a continuació, malgrat ser casos concrets, els valors dels estalvis econòmics i les emissions associats a la reducció dels consums s'han obtingut de forma generalista i comuna, aplicant els factors indicats en la taula 6 del present document. Per tant, els resultats relacionats s'han de prendre com un valor de referència o ordre de magnitud que, finalment, caldria ajustar a les emissions concretes associades al procés en qüestió i al preu de l'energia pactats per a cada indústria. També cal tenir en compte que els exemples corresponen a diferents períodes en el temps i, per tant, el cost de la inversió tingut en compte i càlculs dels estalvis a preus d'energia actuals poden desvirtuar algun dels resultats obtinguts.

3.1. SISTEMES DE GESTIÓ DE L'EFICIÈNCIA ENERGÈTICA (SGE)

3.1.1. Actuació. Implementació d'un sistema de gestió energètica (MTD 1)

Situació partida

Una planta de producció disposa d'un sistema de producció complet, del qual es pot treure una llista diària de totes les màquines, en què es desglossa la seva producció numèrica de peces, les peces bones, les dolentes o defectuoses i total injectades per màquina i dia. Igualment, també es pot detectar les màquines que estan consumint sense produir, si la producció està per sota del límit establert i d'altres paràmetres.

Acció de millora

S'han instal·lat comptadors-analitzadors a les màquines del procés productiu i equips relacionats amb consum important o en aquells que es considera necessari realitzar un seguiment del seu consum.

Per a la correcta gestió de les dades s'instal·la una nova xarxa informàtica per al tractament de les dades transmeses pels equips comptadors-analitzadors.

Un cop es disposa dels consums quarts horari de cada màquina o equipament, i la producció diària de cada màquina o equipament, es pot comparar per saber si la ràtio de producció correspon amb el que s'ha establert i s'analitzen possibles desviacions, problemes detectats o qualsevol paràmetre desviat del que seria normal.

Aquestes mesures han permès detectar mancances en el procés productiu; s'han detectat errors de tipus humà, mecànic o maquinària amb un rendiment inferior a l'esperat.

L'estalvi real de la implementació d'un sistema de gestió energètica s'obté de la gestió duta a terme de les dades obtingudes. En aquest cas, entre altres, s'han fet canvis en el procés productiu, s'ha substituït maquinària per altra més eficient i s'han realitzat reparacions.

Resultats

En el quadre següents es resumeixen els estalvis totals aportats per les mesures empreses degut a les dades obtingudes del sistema de gestió d'energia.

Situació	Consum energètic [MWh/any]	Emissions CO ₂ [t anuals]	Estalvi econòmic [€/any]
Estalvi/Reducció	1.300	312	132.800
% Estalvi	6,06 %	-	-

El període de retorn estimat de la inversió és inferior a 1 any.

Precedents i adaptabilitat de la tecnologia implantada

La instal·lació d'un sistema de gestió energètica té una elevada adaptabilitat en qualsevol estament industrial, ja que el seu principi bàsic, la d'enregistrar i controlar el consum energètic no afecta de cap manera el procés productiu.

Per obtenir informació més detallada, es pot consultar l'exemple complet publicat per l'ICAEN.

3.2. MTD PER A PROCESSOS DE COMBUSTIÓ

3.2.1. Actuació. Implementació de sistemes avançats de gestió i control d'un procés (MTD 4)

Situació partida

Un procés productiu està integrat per diferents etapes. L'etapa afectada per l'acció de millora és la de la combustió tèrmica de l'aire residual (TAR: incinerador o oxidador tèrmic en què es tracten les corrents d'aire i aigua residual).

Aquesta etapa es compon de tancs d'emmagatzematge d'aigua residual i de residus orgànics, d'una cambra de combustió seguida d'una instal·lació d'oli tèrmic (WT) per a la recuperació de la calor de combustió.

Els cabals d'aire i aigua residual es cremen a un rang de temperatures que arriba fins als 1.000 °C. La temperatura de consigna de la cambra de combustió s'ajusta regulant l'aportació de gas natural i aire. Els gasos de la combustió abans de recórrer la xemeneia i sortir a l'atmosfera, escalfen l'oli tèrmic WT als bescanviadors de calor situats després de la cambra de combustió, així com l'aire necessari per a la combustió.

Els cabals d'aire i aigua residuals són transportats a la planta TAR mitjançant els seus propis ventiladors o bombes que, d'acord amb la seva inflamabilitat, estan dotats d'apagaflames (asseguraments antidetonants) o no. El cabal de gas no es pot reduir ja que quan combustió del cremador disminueix per sota d'un determinat cabal, s'apaga la flama, quedant la cambra parada.

El gas natural (combustible) es pren de la xarxa de fàbrica; l'oli tèrmic (WT) es calfat per a l'aprofitament de la calor de combustió, s'introdueix al circuit primari de l'oli tèrmic de la planta de producció.

Acció de millora

La mesura de millora consisteix en la regulació i la modificació del sistema integrat de control de processos (SIS) que permet optimitzar la combustió tèrmica de l'aire residual (s'ajusta l'excés de combustible a la cambra de combustió) i un augment dels nivells de regulació i seguretat en el seu procés operatiu, tant en l'operació normal com en els processos no estacionaris (arrencades, parades, etc.), el que repercuteix en l'estalvi en consum de gas natural.

D'altra banda, també es realitzen modificacions mecàniques que simplifiquen i adapten la instal·lació als actuals rangs de producció, de menys demanda energètica, fent-los més competitius per als actuals processos de grans fluctuacions en l'oferta/demanda, reajustaments de produccions, etc.

Resultats

En el quadre següent es resumeix els estalvis totals aportats per l'optimització del procés de tractament d'aire residual i les modificacions mecàniques.

Situació	Producció [t]	Consum gas natural (GN) [MWh/any]	Consum específic [MWh/t]	Emissions anuals			Estalvi econòmic [€/any]
				CO ₂ [t]	NOx [kg]	PST [kg]	
Abans	18.700	24.175	1,29	-	-	-	-
Després	18.056	17.703	0,98	-	-	-	-
Estalvi/ Reducció	644	6.472	0,31	1.307	1.724	18,2	234.300
% Estalvi	-	26,7 %	24,2 %	-	-	-	-

El període de retorn estimat de la inversió és de 0,5 any.

Precedents i adaptabilitat de la tecnologia implantada

La millora de la combustió i la implantació del control de la instal·lació és una actuació específica d'aquest procés; en aquest sentit, es pot portar a terme en altres plantes que disposin d'un tractament d'aire residual igual o similar a l'exposat.

Per obtenir informació més detallada, es pot consultar l'exemple complet publicat per l'ICAEN a la seva pàgina web.

3.2.2. Actuació. Substitució d'un cremador recuperatiu (MTD 9)

Situació de partida

Una planta de producció disposa d'un forn de carro amb flama directa, d'escalfament de lingots de coure i llautó.

El forn està equipat amb cremadors de gasoil i gas natural amb aire preescalfat amb recuperador central, el qual arriba a una temperatura d'uns 108 °C amb una temperatura de cambra d'uns 880 °C.

Acció de millora

Es canvien els cremadors existents per autorrecuperatius de gas de 250 kW, es modifica el sistema de regulació i es reparen i modernitzen els aïllaments de la cambra de combustió.

Gràcies a aquests canvis, s'aconsegueix incrementar la temperatura de l'aire preescalfat fins als 420 °C, el que es tradueix, finalment, en un estalvi del consum de combustible i disminució de pèrdues en fums.

Figura 63. Forn d'escalfament de lingots de coure i llautó [12]



Resultats

En el quadre següent es resumeixen els estalvis totals aportats per la substitució del cremador amb recuperador central per un cremador autorrecuperatiu:

Situació	Temperatura cambra combustió [°C]	Preescalfament de l'aire [°C]	Productivitat [t/h]	Consum de gas natural [m³/h]	Emissions per h			Estalvi econòmic [€/h]
					CO ₂ [kg]	NO _x [g]	PST [g]	
Abans	880	108	5,56	351	-	-	-	-
Després	880	420	9,64	304	-	-	-	-
Millora/ Reducció	-	312	4,08	47	101	115	1,2	18
% dif.	-	288 %	73,38	13,39	-	-	-	-

El període de retorn estimat de la inversió és de 3,5 anys.

Precedents i adaptabilitat de la tecnologia implantada

Els cremadors recuperatius i regeneratius són d'ús generalitzat, tot i que la seva aplicació en sistemes de combustió acostuma a anar lligada a processos tèrmics d'alta temperatura i de cicle continu (365 dies/any i amb una sola parada anual per manteniment).

Aquests cremadors tenen com a desavantatge els costos d'inversió. La reducció dels costos d'energia en pocs casos compensa el cost d'inversió. Per això, l'augment de la productivitat en el forn és un factor important a incloure en l'anàlisi cost/benefici.

3.2.3. Actuació. Substitució d'un cremador amb control electrònic (MTD 9)

Situació de partida

Una planta de producció disposa de 2 calderes d'oli tèrmic, dotades del mateix model de cremador. El cremador instal·lat és de gas amb control mecànic i regulació de potència de tipus modulant.

El control de la combustió en un cremador mecànic es realitza mitjançant un únic servomotor, que mitjançant diferents accionaments mecànics (varetes, lunetes) acciona diferents elements de regulació de cabal, tant d'aire com de combustible (líquid i gasós). És a dir, hi ha un únic senyal elèctric de posicio-

nament del conjunt. En el cas del cremador actual, disposa de 7 punts de funcionament.

Els principals problemes que es deriven d'aquests tipus d'accionament són les folgances, les histèresis mecàniques i la seva falta de memòria.

Acció de millora

L'acció de millora consisteix en la instal·lació d'un cremador de gas natural amb control electrònic i regulació de potència de tipus modulant, amb classe 2 en emissions de NOx (<120 mg/kWh), control de velocitat del ventilador per a l'aportació d'aire a la cambra de combustió mitjançant variador de freqüència i control d'oxigen a la sortida de fums.

Els cremadors amb control electrònic disposen de servomotors independents per cada element de control de cabal (aire i aportació de combustible), fet que permet eliminar les folgances i les histèresis mecàniques i, per tant, realitzar un control més precís.

El control de la velocitat del ventilador que aporta l'aire al cremador permet ajustar la seva velocitat (consum elèctric) a la càrrega de treball del cremador. El control d'oxigen als fums de sortida de la caldera permet millorar el rendiment de la combustió així com el seu manteniment en el temps.

Resultats

En el quadre següent es resumeixen els estalvis totals aportats per la substitució del cremador convencional per un cremador amb control electrònic, regulació de velocitat del ventilador i control d'oxigen a la sortida de fums.

Situació	Producció tèrmica [MWh/any]	Rendiment combustió [%]	Consum de gas natural [MWh/any]	Consum elèctric [MWh/any]	Emissions CO ₂ [t anuals]	Estalvi econòmic [€/any]
Abans	4.385	84,5 %	5.190	26	-	-
Després	4.385	87,9 %	4.989	13	-	-
Estalvi/ Reducció	-	-	201	13	44	8.600
% Estalvi	-	-	3,87 %	50 %	-	-

El període de retorn estimat de la inversió és de 4,9 anys.

Precedents i adaptabilitat de la tecnologia implantada

Els cremadors amb control electrònic, control de velocitat i control d'excés d'oxigen en els fums de sortida són una realitat de mercat des de fa ja alguns anys, i poden ser considerats com una tecnologia madura, provada i eficient. L'adaptabilitat d'aquesta tecnologia eficient, en termes generals pot ser aplicable en tot tipus d'indústria i d'edificis amb cremadors d'alta potència.

3.3. MTD PER A SISTEMES DE VAPOR (MTD 10)

3.3.1. Actuació. Instal·lació d'un economitzador

Situació de partida

En una planta farmacèutica hi ha un generador de vapor de 2.000 kW per al procés productiu. Aquest generador té actualment un consum d'uns 200 Nm³/h de gas natural i un rendiment calculat del 92 %.

Acció de millora

Per reduir el cabal de gas natural consumit pel generador s'ha instal·lat un economitzador que aprofita la calor associada als gasos de combustió per escalfar l'aigua d'alimentació del mateix generador. El rendiment en la generació de vapor, amb la instal·lació de l'economitzador, és del 96 %.

L'economitzador té una potència tèrmica d'uns 90 kW i rep aigua a 80 °C i augmenta la seva temperatura fins als 105 °C. Les hores de treball del conjunt generador-economitzador és de 7.200 hores/any.

Resultats

Situació	Consum de gas natural [Nm ³ /h]	Hores funcio-nament anual [h]	Rendi-ment del genera-dor	Consum gas natural [MWh/any]	Emissions anuals			Estalvi econò-mic [€/any]
					CO ₂ [t]	NO _x [kg]	PST [kg]	
Abans	200	7.200	92 %	16.128	-	-	-	-
Després	191,5	7.200	96 %	15.442	-	-	-	-
Estalvi/ Reducció	8,5	-	-	686	138	182	1,9	24.830
% d'estalvi	4,25 %	-	-	4,25 %	-	-	-	-

El període de retorn estimat de la inversió és de mig any.

Precedents i adaptabilitat de la tecnologia implantada

La instal·lació d'un economitzador a la sortida de fums d'una caldera de vapor és una tècnica àmpliament aplicada a la indústria i que es pot replicar en calderes industrials a partir d'una certa potència, però inclús en les de potència relativament baixa s'aconsegueixen estalvis importants.

3.3.2. Actuació. Estalvis de costos potencials d'una recuperació de condensat

Situació de partida

En una planta industrial amb un consum considerable de vapor, no es recupera el condensat després del pas del vapor pel procés. A la planta hi ha dues calderes de vapor que generen un flux de vapor de 454 kg/h cadascuna (total de 908 kg/h de vapor) [26].

Acció de millora

S'ha plantejat la possibilitat de recuperar aquest condensat per tornar-lo a la caldera. El potencial de recuperació de condensat és, com a mínim, de 400 kg/h.

Els estalvis potencials amb la instal·lació d'equips de recuperació de condensat són en forma d'energia i en forma d'aigua.

Resultats

L'energia estalviada per la reutilització de condensat a 95 °C, substituint a l'aigua d'alimentació freda a 10 °C = $(400 \times 4,186 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \times (95-10)) / 3.600 = 39,53 \text{ kW}$.

Suposant una eficiència de la caldera del 75 %, generar 39,53 kW exigirà un equivalent de gas de 52,71 kW. Les hores d'operació són de 6.600 hores i, per tant, l'energia que s'estalvia en forma de combustible és de 347.900 kWh.

Els estalvis d'aigua es deuen a l'aigua que no s'aboca directament a clavegueram, sinó que es retorna al tanc d'alimentació. En el cas d'aquesta indústria l'estalvi és de 2.640 m³ anuals d'aigua.

Situació	Producció de vapor [kg/h]	Hores funcionament anual [h]	Consum gas natural [kWh/any]	Emissions anuals			Estalvi econòmic [€/any]
				CO ₂ [t]	NOx [kg]	PST [kg]	
Estalvi/ Reducció	908	6.600	347.900	70	92,7	0,97	12.600

El període de retorn estimat de la inversió és entre 1 i 2 anys.

Precedents i adaptabilitat de la tecnologia implantada

La recuperació del condensat és una millor tècnica disponible que està reconeguda com la manera més efectiva de millorar l'eficiència de la planta de vapor. S'ha de considerar en tots els casos, llevat d'aquells en què el condensat a recuperar surti contaminat del procés, i en els casos en què el vapor s'injecta directament al procés.

3.4. MTD PER A PROCESSOS DE RECUPERACIÓ DE CALOR (MTD 11)

3.4.1. Actuació. Instal·lació de termocompressors (recompresió mecànica de vapor)

Situació de partida

En una empresa de productes alimentaris, una línia d'assecatge de productes disposa d'un evaporador de quatre etapes amb les característiques següents:

Evaporador	Característiques existents
Concentració entrada	11 %
Vapor preevaporador (tn/h)	1,9
Concentració sortida	62 %
Vapor al <i>finisher</i> (tn/h)	0,86
Vapor total emprat (tn/h)	2,76

Acció de millora

S'instal·len dos termocompressors en l'evaporador per aprofitar els vapors secundaris de l'última etapa del preevaporador i del *finisher* i, així, reduir el consum

de vapor. La instal·lació d'aquests termocompressors genera una reducció en el consum de vapor igual a la que es produiria en afegir un efecte addicional a l'evaporador.

A continuació es mostren les característiques de l'evaporador amb els 2 termocompressors:

Evaporador	Característiques existents
Concentració entrada	11 %
Vapor preevaporador (tn/h)	1,5
Concentració sortida	62 %
Vapor al finisher (tn/h)	0,43
Vapor total emprat (tn/h)	1,93

Resultats

En el quadre següent es resumeixen els estalvis totals aportats per la instal·lació dels dos termocompressors en l'última etapa del evaporador.

Situació	Consum de vapor [tn/h]	Hores funcio-nament anual [h]	Consum vapor anual [tn/any]	Consum gas natural [MWh/any]	Emissions anuals			Estalvi econò-mic [€/any]
					CO ₂ [t]	NO _x [kg]	PST [kg]	
Abans	2,76	6.000	16.560	-	-	-	-	-
Després	1,93	6.000	11.580	-	-	-	-	-
Estalvi/ Reducció	0,83	0	4.980	3.238	654	862	9,1	117.200

El període de retorn estimat de la inversió és de 1,6 anys.

Precedents i adaptabilitat de la tecnologia implantada

Els sistemes de recompressió mecànica de vapor com aquest es poden implantar en indústries que disposin de fonts de calor amb una temperatura entre els 70 °C i 80 °C i necessitin unes temperatures de sortida de 110 °C fins a 150 °C o una mica superior (fins a 200 °C). El vapor comprimit més comú és el vapor d'aigua, tot i que també es poden utilitzar d'altres vapors de procés, especialment en la indústria petroquímica.

El vapor produït per MVR s'utilitza en operacions individuals com ara la destil·lació, l'evaporació i l'assecat, però també és pot utilitzar en una xarxa de distribució de vapor.

3.5. MTD PER A SISTEMES DE COGENERACIÓ (MTD 12)

3.5.1. Actuació. Instal·lació d'una màquina d'absorció (trigeneració)

Situació de partida

En una indústria del sector alimentari es cobreix part de la demanda energètica amb una planta de cogeneració de 3.500 kW_e. Els grups generadors funcionen

durant el període d'estiu a una potència mitjana de 3.100 kW_e, amb una potència disponible en forma d'aigua del circuit de refrigeració de les camises de 1.222 kW tèrmics per cada motor, i assoleixen un total de 6.110 kW de potència tèrmica disponible en forma d'aigua a 90 °C. Una part d'aquesta energia tèrmica disponible en forma d'aigua a alta temperatura al sistema de cogeneració s'aprofita dins del mateix complex, tant per a ús en el procés productiu com per a la preparació d'ACS.

La demanda d'energia tèrmica al complex durant el període de juny a setembre és inferior a la requerida durant la resta de l'any i, per tant, es disposa d'un excedent d'energia que actualment no s'aprofita. Així, sobre la base de l'històric de consums de la planta, s'estima que durant aquests quatre mesos es disposa aproximadament de 2.600 kW d'energia tèrmica no utilitzada.

Acció de millora

Això anterior, juntament amb l'elevada demanda de fred que hi ha durant l'estiu, tant per al procés productiu com per a la climatització de confort dels espais, planteja la possibilitat d'instal·lar una màquina de fred per cicle d'absorció d'aigua i bromur de liti.

Amb aquesta incorporació serà possible produir part de la demanda de fred existent al complex d'acord amb l'excedent de calor de les cogeneracions i reduir, així, el consum d'energia elèctrica dels diferents compressors de fred que actualment donen el servei.

Resultats

En la taula següent es resumeixen els resultats de l'actuació:

Situació	Potència elèctrica fred [kW]	Hores funcionament anual [h]	Consum elèctric total planta [MWh/any]	Emissions CO ₂ planta [t anuals]	Estalvi econòmic [€/any]
Abans	400	1.872	84.600	-	-
Després	6,6	1.872	83.900	-	-
Estalvi/ Reducció	393,4	-	700	168	71.500
% Estalvi	98,4 %	-	0,83 %	-	-

El període de retorn estimat de la inversió és de 2,7 anys.

Precedents i adaptabilitat de la tecnologia implantada

La instal·lació d'una màquina d'absorció es pot implantar sempre que hi hagi un excedent de calor i, a la vegada, una demanda de fred, ja sigui per condicionament de l'ambient o per necessitats de producció.

3.6. MTD EN SUBMINISTRAMENT D'ENERGIA ELÈCTRICA (MTD 13)

3.6.1. Actuació. Compensació de potència reactiva

Situació de partida

Una planta de producció disposa de diferents línies elèctriques, les quals són alimentades des d'un mateix quadre elèctric mitjançant un sistema blindobar-

ra. El quadre elèctric general disposa d'una bateria automàtica de compensació.

A causa de les càrregues en determinades línies elèctriques, majoritàriament motors elèctrics, es produeix un consum d'energia reactiva amb valors de $\cos\varphi$ inferiors a 0,95.

Acció de millora

L'acció de millora plantejada consisteix en instal·lar una bateria de compensació específica en els quadres elèctrics de les línies de producció amb consums de potència reactiva més significatiu amb l'objectiu d'eliminar-lo. Eliminant en aquest punt part de la potència reactiva, es millora la compensació de reactiva global ja que d'aquesta manera s'assegura que la bateria automàtica existent en el quadre general de distribució sigui capaç de garantir un factor de potència per sobre de 0,95.

Amb aquesta mesura, també s'aconsegueix descarregar la instal·lació elèctrica de distribució interior, des del quadre general de distribució fins als quadres de cada línia, disminuint significativament les pèrdues per efecte Joule en la distribució d'energia elèctrica.

Resultats

En quadre següent es mostra el consum energètic a la blindobarra de distribució abans i després de la instal·lació de bateries de compensació en les línies de producció així com els estalvis que representa.

Situació	Producció [MSU]	Consum elèctric blindobarra [MWh/any]	Consum específic [MWh/MSU]	Consum elèctric total [MWh/any]	Emissions CO ₂ [t anuals]	Estalvi econòmic [€/any]
Abans	2.976	9.520	3,20	16.387	-	-
Després	2.976	9.500	3,19	16.367	-	-
Estalvi/ Reducció	-	20	0,01	20	4,8	6.044*
% Estalvi	-	0,2 %	0,3 %	0,1 %	-	-

*Aquest estalvi també inclou l'estalvi degut a les penalitzacions per consum de potència reactiva.

El període de retorn estimat de la inversió és de 7,4 anys.

Precedents i adaptabilitat de la tecnologia implantada

La compensació de potència reactiva és d'ús generalitzat en la indústria, per la qual cosa no es pot considerar com una tecnologia innovadora. En aquest cas, el que sí mereix especial menció és el fet d'instal·lar bateries de compensació directament en les línies de producció, a prop dels elements que generen la potència reactiva, que minimitzen així les pèrdues energètiques per efecte Joule en els conductors elèctrics i incrementen l'eficiència energètica de la compensació de reactiva.

En termes generals la tecnologia eficient aquí emprada pot ser aplicable en tot tipus d'indústria i d'edificis amb equips consumidors de reactiva.

3.7. MTD PER A SISTEMES ACCIONATS PER MOTORS ELÈCTRICS (MTD 14)

3.7.1. Actuació. Substitució dels accionaments elèctrics d'una línia de producció

Situació de partida

En una planta del sector químic es planteja un projecte de millora de l'eficiència energètica en una de les seves línies d'extrusió encarregada de la fabricació de polipropilè. La línia d'extrusió està accionada per dos motors elèctrics de 1.700 kW i 1.080 kW de potència. Els motors disposen d'un control de velocitat molt antic i són alimentats mitjançant un transformador amb un secundari doble.

Acció de millora

El projecte engloba la substitució de tot l'accionament elèctric existent en la línia d'extrusió; això inclou els dos motors elèctrics de la línia, els seus controls de velocitat, el transformador així com el cablejat i la resta d'equips auxiliars de la línia.

S'incorporen dos motors nous de molt alta eficiència, fruit bàsicament de la millora dels laminats interiors, de l'ús de conductors de més secció i de la utilització de ventiladors de refrigeració més petits. Tot això permet reduir les pèrdues magnètiques en el ferro així com les pèrdues en el coure per efecte Joule degut a la resistència del bobinat. Pel que fa als controls de velocitat, es passarà dels models existents, basats en l'electrònica existent fa 30 anys, als nous equips eficients. L'actual transformador de doble secundari es substituirà per 2 transformadors independents de tipus immers en oli d'elevada eficiència. I, finalment, s'ha augmentat la tensió de treball passant dels 900 V actuals a 1,9 kV a la sortida dels nous transformadors i a 3,3 kV a la sortida dels nous controladors que alimenten els motors. Aquest fet també permet reduir les pèrdues per efecte Joule en el cablejat que uneix els diferents equips.

Resultats

En la taula següent es presenten els resultats de l'actuació, comparant la situació abans i després de la millora.

Situació	Potència instal·lada [kW]	Rendiment motors mix/ ext [%]	Rendiment variadors mix/ ext [%]	Consum total planta [MWh/any]	Emissions CO ₂ [t anuals]	Estalvi econòmic [€/any]
Abans	2.780	89,1 / 87,0 %	95,0 / 95,0 %	76.560	-	-
Després	2.750	97,4 / 96,3 %	98,2 / 98,1 %	75.132	-	-
Estalvi	30	-	-	1.428	343	146.000

El període de retorn estimat de la inversió és de 2,7 anys.

Precedents i adaptabilitat de la tecnologia implantada

Els accionaments elèctrics de mitjana tensió d'alta eficiència són una tecnologia que cada vegada s'està estenent més a la indústria atès l'elevat consum dels motors de gran potència que incorporen determinades aplicacions.

Els equips emprats representen la millor tecnologia disponible en l'actualitat i ofereixen una solució global per a l'accionament de motors d'alta potència amb

un nivell d'eficiència dels millors del mercat, assolit sobre la base d'utilitzar materials d'elevada qualitat i dissenys dels diferents equips que busquen la màxima eficiència i fiabilitat.

Pel que fa a la seva adaptabilitat, en termes generals la tecnologia eficient aquí emprada pot ser aplicable en tot tipus d'indústria amb motors elèctrics d'alta potència, és a dir, les aplicacions possibles són moltes.

3.7.2. Actuació. Instal·lació d'un sistema servomotor

Situació de partida

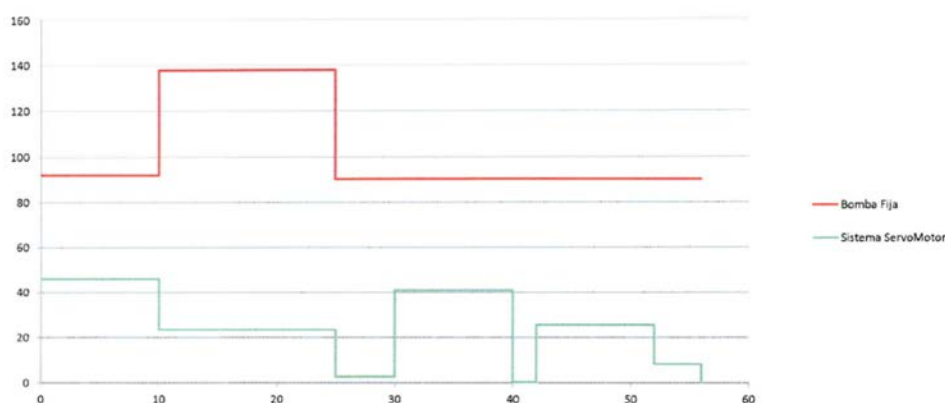
En una planta de transformació de plàstics, la línia d'injecció disposa de dos circuits independents accionats per dos motors de 90 kW. Cada motor alimenta a dues bombes que treballen en règim constant.

Acció de millora

L'acció de millora consisteix en la instal·lació d'un servomotor que permeti ajustar el règim de funcionament de les bombes segons les necessitats del procés d'injecció.

Resultats

Al gràfic següent es pot observar el règim de pressions (línia verda) en cas que la bomba funcioni en règim constant i les velocitats (línia vermella) de la bomba en cas que hi hagi un sistema servomotor d'un cicle de la màquina d'injecció.



Per calcular els estalvis assolits a conseqüència de la instal·lació d'un servomotor en el sistema d'injecció, es considera que es treballa 24 h dia durant 5 dies a la setmana. En la taula següent es mostren els resultats:

Situació	Potència instal·lada [kW]	Consum total procés [kWh/any]	Emissions CO ₂ [t anuals]	Estalvi econòmic [€/any]
Abans	180	642.576	-	-
Després	180	168.944	-	-
Estalvi	-	473.632	113	48.405

Aquesta actuació comporta uns estalvis del 70 %, i el període de retorn de la inversió és inferior a 1 any.

Precedents i adaptabilitat de la tecnologia implantada

En termes generals, la tecnologia eficient aquí emprada pot ser aplicable en tot tipus d'indústria amb motors elèctrics amb càrregues de treball variables. Té especial interès en cas de necessitar canvis ràpids de règim de funcionament del motor.

3.8. MTD PER A INSTAL·LACIONS D'AIRE COMPRIMIT (MTD 15)

3.8.1. Actuació. Instal·lació d'un compressor d'aire variable

Situació de partida

Una planta de producció inicialment disposa d'un parc de 5 compressors d'aire comprimit, 4 fixos i 1 variable però de potència limitada. L'aire comprimit generat pels compressors no variables s'ajunta en un col·lector d'aire humit que es dirigeix als assecadors i acaba en el col·lector d'aire sec del punt de consum.

L'elevat consum d'aire comprimit de la planta, juntament amb un nivell de fluctuació instantània molt gran, provoquen que la instal·lació sigui poc eficient ja que requereix que algun compressor estigui funcionant majoritàriament en buit durant moltes hores només per cobrir els pics de demanda de la instal·lació consumidora.

Acció de millora

Considerant que el consum d'aire comprimit de la planta es mantindrà, l'acció de millora consisteix en la implantació d'un nou compressor variable que permeti ajustar millor la producció d'aire comprimit a les variacions existents en el consum, així com la instal·lació d'un mòdul de control dels compressors variables per possibilitar que el nou compressor variable i el ja existent es controlin de manera conjunta funcionant com un únic compressor de potència la suma dels dos. A més, aquest control decideix en cada moment a quin grau de càrrega ha de treballar cada compressor, de mida i rang diferent, amb l'objectiu d'obtenir dels compressors el més petit consum d'energia possible.

Per altra banda, la instal·lació del nou compressor al col·lector d'aire sec, permet que només hagi de treballar un dels compressor d'aire fix i poder baixar la pressió de consigna del compressor.

Així doncs, amb la instal·lació del nou compressor es passarà d'una instal·lació amb 5 compressors i potència total 451 kW a una amb 3 compressors i 514 kW de potència, amb 3 compressors més aturats a l'espera de ser necessaris davant d'una eventual avaria en algun dels compressors en ús.

Resultats

En el quadre següent es resumeixen els estalvis totals aportats per la implantació d'un sistema de control de sincronisme del motor de compressió.

Situació	Consum elèctric [MWh/any]	Emissions CO ₂ [t anuals]	Estalvi econòmic [€/any]
Abans	2.408,91	-	-
Després	1.994,86	-	-
Estalvi/Reducció	414,05	99,4	42.300
% Estalvi	17,2 %	-	-

El període de retorn estimat de la inversió és de 2,7 anys.

Precedents i adaptabilitat de la tecnologia implantada

En les instal·lacions industrials es produeixen de manera constant canvis, diferents càrregues de treball, pics de demanda o variacions en l'ús dels equips de producció i tot això contribueix a grans fluctuacions en la demanda d'aire comprimit. La regulació mitjançant la tecnologia de compressor variable pot ser considerada com una tecnologia provada i eficient.

La adaptabilitat d'aquesta tecnologia eficient, en termes generals, pot ser aplicable en tot tipus d'indústria i d'edificis amb demanda d'aire comprimit.

3.8.2. Actuació. Instal·lació d'un Intercanviador de calor oli-aigua

Situació de partida

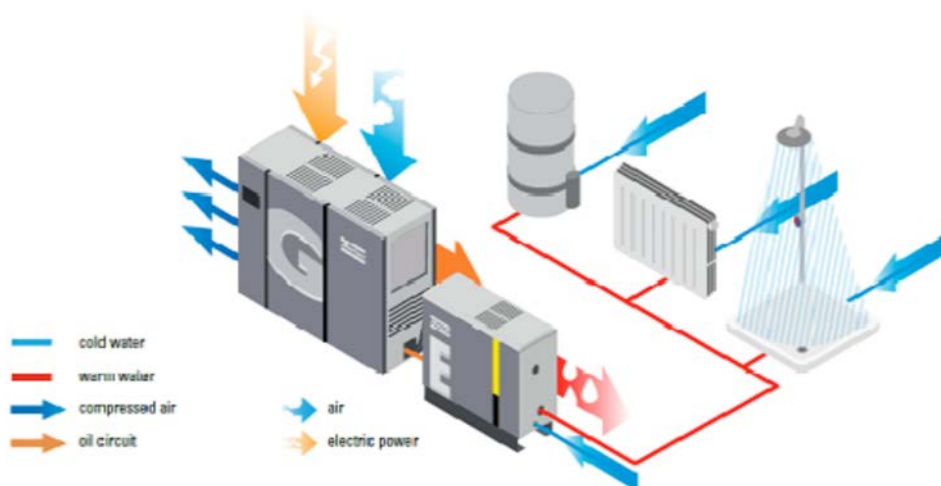
Una planta de fabricació disposa d'uns compressors d'aire que es refrigeren per aire i, per tant, l'energia de refrigeració es llança a l'atmosfera.

El 94 % de l'energia elèctrica consumida per un compressor d'aire industrial es converteix en calor, la qual es perd a través de la radiació durant el procés de compressió. El restant 6 % es transforma en pèrdues d'aire comprimit calenta.

Acció de millora

L'acció de millora consisteix en dotar els compressors d'aire d'uns intercanviadors de calor oli/aigua per aprofitar la calor de refrigeració dels compressors per a la producció d'aigua calenta a 80 °C per alimentar les calderes d'un altre procés productiu de la planta per tal de reduir el consum de gas.

Figura 64. Diagrama esquemàtic d'instal·lació del sistema intercanviador [1]



Resultats

En el quadre següent es resumeixen els estalvis totals aportats per la proposta d'instal·lació intercanviador de calor als compressors d'aire per l'escalfament d'aigua calenta.

Situació	Consum actual gas natural [kWh/t en gas]	Estalvi consum gas natural [MWh/any]	Emissions anuals			Estalvi energètic [€/any]
			CO ₂ [t]	NO _x [kg]	PST [kg]	
Abans	260,9	-	-	-	-	-
Després	245,6	-	-	-	-	-
Estalvi/ Reducció	15,3	1.717	347	457	4,8	62.200

El període de retorn estimat de la inversió és de 2,9 anys.

Precedents i adaptabilitat de la tecnologia implantada

Els refrigeradors de fluid amb intercanviador oli-aigua són una realitat de mercat des de fa ja alguns anys i poden ser considerats com una tecnologia madura, provada i eficient com així ho demostren les múltiples aplicacions realitzades arreu del món en tot tipus d'indústries.

Pel que fa a la seva adaptabilitat, en termes generals aquesta tecnologia pot ser aplicable en tot tipus d'indústria i d'edificis amb necessitats de refrigeració de fluids.

3.9. MTD PER A SISTEMES DE CLIMATITZACIÓ I VENTILACIÓ (HVAC)

3.9.1. Actuació. Instal·lació de proteccions solars (MTD 17)

Situació de partida

En un petit edifici d'oficines, la radiació solar directa que entra a través dels buits de façana sense protecció solar, orientats a sud, representa una aportació calorífica excessiva durant els mesos de calor i provoca, en conseqüència, un consum extraordinari de refrigeració.

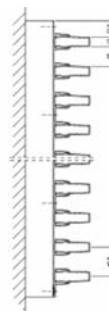
Acció de millora

Es proporciona protecció solar a les obertures col·locant, per l'exterior, elements de protecció horitzontal tipus lames metàl·liques, formant gelosia fixa horitzontal, de color anoditzat natural.

D'acord amb l'orientació de les zones envidrades, es calcula la mida dels elements horitzontals i la seva distància en funció de la incidència solar. Aquest nou element és el que condiciona el factor d'ombra del buit.



Integració lames metàl·liques horitzontals de protecció solar



Detall de la secció façana amb lames metàl·liques horitzontals fixes de protecció solar

Resultats

En el quadre següent es resumeixen els estalvis totals aportats per la instal·lació de proteccions solars.

Situació	Demanda de fred [kWh/anual]	Energia elèctrica [kWh/anual]	Emissions CO ₂ [t anuals]	Estalvi econòmic [€/any]
Abans	340.000	194.285	-	-
Després	284.000	162.285	-	-
Estalvi/ Reducció	56.000	32.000	7,7	3270
% Estalvi	17 %	17 %	-	-

El període de retorn estimat de la inversió és de 24 anys.

Precedents i adaptabilitat de la tecnologia implantada

L'adaptabilitat d'aquesta mesura és adequada en edificis amb grans superfícies envidrades difícils de protegir amb d'altres mètodes com, per exemple, cortines, voladís, làmines de protecció solar, etc.

3.9.2. Actuació. Sectorització zones de climatització (MTD 17)*Situació de partida*

En un centre de treball es disposa d'un equip de climatització comú per a les zones administratives i per les zones de classificació. Ambdues zones disposen de conductes que distribueixen l'aire provinent de la mateixa unitat interior. L'ocupació de les dues zones no és la mateixa: la zona administrativa té una ocupació de 9 hores al dia i la zona de classificació de 3 hores dia.

Acció de millora

Per causa del malbaratament d'energia, atès que s'està mantenint una temperatura de confort en una sala desocupada, es distribueixen per sectors correctament les zones amb diferent ús mitjançant la instal·lació d'un nou sistema de clima exclusiu per a la zona administrativa i la inhabilitació dels conductes que reparteixen l'aire climatitzat cap aquesta zona. Per tant, la zona de classificació queda abastida també per un sistema exclusiu i pot adaptar el seu funcionament a les condicions especials d'aquesta zona.

Resultats

En el quadre següent es resumeixen els estalvis totals aportats per la sectorització de les zones de climatització.

Situació	Consum elèctric [kWh/any]	Energia tèrmica aportada [kWh/any]	Emissions CO ₂ [t anuals]	Estalvi econòmic [€/any]
Abans	21.047	53.874	-	-
Després	15.891	50.593	-	-
Estalvi/ Reducció	5.157	3.281	1,2	527
% Estalvi	25 %	6 %	-	-

El període de retorn estimat de la inversió és de 23,6 anys.

Precedents i adaptabilitat de la tecnologia implantada

Aquesta mesura es pot implantar en qualsevol establiment, industrial o no, on diferents zones tinguin diferents càrregues tèrmiques, ja sigui per la seva orientació diferent, per la seva càrrega interna, ocupació, etc.

3.9.3. Actuació. Instal·lació d'un sistema de recuperació de calor de l'aire de ventilació (MTD 18)

Situació de partida

En un edifici d'oficines amb una càrrega tèrmica considerable deguda a la ventilació es calcula, quan la temperatura exterior és de -4°C (condicions de disseny per calefacció), que la càrrega de ventilació ($5.800\text{ m}^3/\text{h}$) és de $32,9\text{ kW}$, mentre que la càrrega total és de $117,0\text{ kW}$ [25].

En canvi, quan la temperatura exterior és de 40°C (condicions de disseny per refrigeració), la càrrega de ventilació ($5.800\text{ m}^3/\text{h}$) és de $43,7\text{ kW}$, mentre que la càrrega total és de $96,5\text{ kW}$.

En aquestes condicions, recuperar l'energia continguda a l'aire d'extracció aportarà un estalvi significatiu d'energia.

Acció de millora

Per cobrir aquesta demanda, s'instal·la un equip autònom amb un circuit frigorífic de recuperació de calor de l'aire d'extracció, que en aquestes condicions aconseguirà recuperar $29,5\text{ kW}$ a l'hivern i $24,9\text{ kW}$ a l'estiu i cedir-los a l'aire nou de ventilació.

Resultats

Amb les potències anteriors recuperades de l'aire d'extracció, els estalvis totals al llarg de l'any són els següents:

Situació	Consum elèctric [kWh]	Energia tèrmica aportada [kWh]	Emissions CO_2 [t anuals]	Estalvi econòmic [€/any]
Estalvi/Reducció	26.893	64.227	6,45	2.748

El període de retorn estimat de la inversió és d'un any.

Precedents i adaptabilitat de la tecnologia implantada

És interessant remarcar que el circuit frigorífic de recuperació treballa amb un COP molt elevat, atès que les condicions d'evaporació i condensació són invariables durant tot l'any.

Aquesta tecnologia és aplicable a qualsevol escala, i és la millor alternativa per recuperar calor de l'aire d'extracció. No obstant això, no és la tecnologia de més implantada i s'opta, moltes vegades, per opcions més senzilles o conegudes.

3.10. MTD PER A SISTEMES DE REFRIGERACIÓ INDUSTRIAL (MTD 19)

3.10.1. Actuació. Instal·lació d'un intercanviador aire-aigua

Situació de partida

Una planta de producció disposa de diverses premses d'accionament hidràulic i és necessari l'ús d'oli hidràulic per al seu funcionament.

Per al correcte funcionament del sistema hidràulic de les premses cal que l'oli dels cilindres hidràulics estigui dins d'un rang determinat de temperatures per evitar la pèrdua de propietats que impossibiliti l'accionament del cilindres. En concret, la presència de temperatures superiors als 55 °C no permet el correcte accionament de les premses.

El funcionament continu de les premses, però, provoca un augment continuat de la temperatura de l'oli fins a arribar a superar les temperatures màximes de funcionament. Per aquest motiu, es disposa d'un circuit de refrigeració per a les diferents premses de la planta amb l'objectiu de poder refredar l'oli de servei de les mateixes. Aquest circuit es basa actualment en un circuit primari amb una màquina refrigeradora amb un COP de 2,78. Addicionalment, es disposa d'un circuit secundari connectat a les diferents premses de la planta per a la refrigeració de l'oli d'aquestes. L'intercanvi entre els dos circuits es fa mitjançant un intercanviador de plaques. Cal destacar que com a líquid refrigerant s'utilitza una barreja d'aigua i etilenglicol al 30 % i no es disposa d'aïllament tèrmic a les canonades del circuit.

Acció de millora

L'acció de millora consisteix en modificar el circuit de refrigeració amb la incorporació d'un equip refrigerador basat en un intercanviador aire-aigua.

Quan la temperatura ambient estigui per sota de 33 °C el refrigerador d'aigua tindrà potència sobrada com per refrigerar el circuit sol, sense suport de la refredadora. Aquest valor de temperatura exterior se supera en molts pocs moments de l'any en el punt de la instal·lació.

Es preveu que amb temperatures exteriors de l'aire per sobre de 33 °C el refrigerador pugui perdre potència, de manera que requereixi suport de la refredadora. Aquestes condicions tèrmiques es considerarà que només es produiran de manera puntual durant els mesos de juliol i agost i, en tot cas, correspondran al moment de més calor del dia, però no es mantindran durant gaire temps. S'ha considerat que aquest fet no succeirà més d'un 3 % de les hores totals dels mesos anteriors.

Resultats

En el quadre següent es resumeixen els estalvis totals aportats per la proposta d'instal·lació d'un refrigerador d'aigua per al refredament del circuit de refrigeració de l'oli hidràulic de les premses.

Situació	Consum elèctric refrigeració [MWh/any]	Consum elèctric total planta [MWh/any]	Consum energètic total planta [MWh/any]	Emissions CO ₂ [t anuals]	Estalvi econòmic [€/any]
Abans	56,6	2.926,2	7.056,1	-	-
Després	17,8	2.887,4	7.017,3	-	-
Estalvi/ Reducció	38,8	38,8	38,8	9,3	3.970
% Estalvi	68,5	1,3	0,5 %	-	-

El període de retorn estimat de la inversió és de 3,5 anys.

Precedents i adaptabilitat de la tecnologia implantada

Els refrigeradors de fluid amb intercanviador aire-aigua són una realitat de mercat des de fa ja alguns anys. Es poden considerar com una tecnologia madura, provada i eficient com així ho demostren les múltiples aplicacions realitzades arreu del món en tot tipus d'indústries.

Pel que fa a la seva adaptabilitat, en termes generals, aquesta tecnologia pot ser aplicable en tot tipus d'indústria i d'edificis amb necessitats de refrigeració de fluids.

3.10.2. Actuació. Instal·lació d'un variador de freqüència

Situació de partida

Una planta de producció disposa de 3 compressors per generar el fred necessari en el procés industrial i en l'emmagatzematge del producte, tant per motius de producció com per motius higiènics i sanitaris.

En règim de funcionament, els tres compressors no treballen ni alhora ni al 100 % de la seva càrrega. De dilluns a divendres, un dels compressors treballa al 100 % mentre que un altre al 25 %; dissabte i diumenge treballa un sol compressor al 30 %. Els motors s'ajusten a la demanda mitjançant vàlvules.

Acció de millora

L'acció de millora consisteix en instal·lar un variador de freqüència en un dels compressors permetent ajustar el seu funcionament a treballs en càrregues parcials.

Aquesta millora s'aconsegueix substituint un dels motors per un de més eficient de tipus síncron d'imans permanents que permet incorporar un variador de freqüència ja que els anteriors no permeten la variació de la velocitat en el seu règim de treball.

Resultats

En el quadre següent es resumeixen els estalvis totals aportats per la substitució d'un motor per un de síncron amb imants permanents amb variador de freqüència.

Situació	Consum línia refrigeració [MWh/any]	Emissions CO ₂ [t anuals]	Estalvi econòmic [€/any]
Estalvi/ Reducció	264,32	63	27.000
% Estalvi	3,57	-	

El període de retorn estimat de la inversió és de 2,3 anys.

Precedents i adaptabilitat de la tecnologia implantada

La tecnologia dels variadors de velocitat té múltiples aplicacions.

En aquest cas s'ha aplicat en un compressor de fred per ajustar el consum al règim de càrrega necessària, però també es pot aplicar en altres motors que treballin a un règim variable.

Per obtenir informació més detallada, es pot consultar l'exemple complet publicat per l'ICAEN a la seva pàgina web.

3.11. MTD PER A PROCESSOS D'ASSECATGE (MTD 21)

3.11.1. Actuació. Millora dels assecadors

Situació de partida

En un procés de producció d'ampolles de resina de PET, una de les etapes consisteix en un procés d'assecat per arribar a un grau d'humitat molt baix. Aquesta etapa es porta a terme en una tremuja tancada on un flux d'aire anteriorment preparat en l'assecador, circula a contracorrent del producte a assecar. La funció de l'assecador és refrigerar, bombar, deshumidificar per adsorció i escalfar aquest aire.

Actualment es disposa de 4 assecadors, l'aire que surt de la tremuja carregat d'humitat es refreda de forma que faciliti l'absorció de la humitat en una columna d'assecat. Una vegada sec, es torna a escalfar a 180 °C abans de retornar a la tremuja.

Acció de millora

L'acció de millora consisteix en substituir dos dels assecadors existents per uns altres en què el cabal d'aire és funció del flux de producte a tractar i es regula mitjançant un variador de freqüència. Amb aquest nou sistema, l'aire surt més fred ja que el bescanvi de calor és més gran i, per tant, no cal refredar-lo com abans. Per altra banda, les bombes funcionen en règim adequat i s'elimina l'etapa de refredament de l'aire.

Les millores introduïdes consisteixen en la instal·lació de bombes d'aire d'alt rendiment i cabal d'aire ajustat mitjançant variador de freqüència (el necessari per assecar el flux real de producte a tractar), columna d'absorció més eficient que permet assecar l'aire a 70 °C sense necessitat de refredament previ i control de l'eficiència de la columna mitjançant sonda de point que permet allargar el temps entre regeneracions; aquesta sonda mesura el punt de rosada i permet realitzar les regeneracions que realment són necessàries.

Resultats

En el quadre següent es resumeixen els estalvis específics totals aportats per la substitució de dos dels assecadors.

Situació	Consum específic elèctric dels quatre assecadors [kWh/t produïda]	Emissions específiques de CO ₂ [t CO ₂ /t produïda]	Estalvi específic econòmic [€/any · t produïda]
Abans	7.149,4	-	-
Actual	5.483,2	-	-
Estalvi/ Reducció	1.666,2	0,4	170
% Estalvi	23,3 %	-	-

El període de retorn estimat de la inversió és de 2 anys.

No obstant això, la comparació individual d'un assecador dels nous amb un dels antics aporta un estalvi de consum específic del 37,9 %.

Precedents i adaptabilitat de la tecnologia implantada

La tecnologia dels assecadors d'última generació és una tecnologia bastant específica que és aplicable al sector de fabricació de plàstics, en general, plantes d'injecció de plàstics, processos de tractaments de plàstics, etc.

La instal·lació de variadors de freqüència té múltiples aplicacions. En aquest cas, s'ha aplicat en bombes de procés, però també es pot aplicar en altres motors que treballin amb un règim variable, com, per exemple, motors de ventiladors, etc.

Per obtenir informació més detallada, es pot consultar l'exemple complet publicat per l'ICAEN a la seva pàgina.

ANNEX DE REFERÈNCIES

- [1] ICAEN
- [2] “Inventari d'emissionsde GEH d'Espanya 1990-2011” (Emissions per a calderes al sector d'indústries energètiques), http://www20.gencat.cat/docs/canviclimatic/Home/Politiques/Politiques%20catalanes/La%20mitigacio%20del%20canvi%20climatic/Inventaris%20d'emissions%20a%20Espanya/Informe_Inventario_GEI_Espana_1990-2011_Ed_2013.pdf
- [3] “1.A.2 Manufacturing industries and construction (combustion)”
<http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>
- [4] “Guia pràctica per al càlcul d'emissions de gasos amb efecte hivernacle”,
http://www20.gencat.cat/docs/canviclimatic/Home/Redueix%20emissions/Guia%20de%20calcul%20d'emissions%20de%20CO2/140303_Guia%20practica%20calcul%20emissions_sense%20canvis_CA.pdf
- [5] “Observatorio de la electricidad Junio 2013 WWF”, http://awsassets.wwf.es/downloads/observatorio_junio_2013.pdf
- [6] Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/climateleadership/documents/resources/stationarycombustionguidance.pdf>
- [7] “Plan de acción para la eficiencia energética: realizar el potencial. 2007-2012”.
- [8] Informes oficials de l'Agència Danesa d'Energia - www.ens.dk
- [9] “Mesures en eficiència energètica a la indústria”- aplicacions.icaen.cat/mapamesures/
- [10] “Energy Efficiency BREF”, 2009 -http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/ENE_Adopted_02-2009.pdf
- [11] “Guia metodològica per realitzar auditories energètiques”. Col·lecció quadern pràctic número 7. ICAEN - http://www20.gencat.cat/docs/icaen/06_Relacions%20Institucionals%20I%20Comunicacio/04_Publicacions/Quadern%20practic/arxius/07_auditories_energetiques.pdf
- [12] Kromschroeder- www.kromschroeder.com
- [13] Oil Bulletin -http://ec.europa.eu/energy/observatory/oil/doc/prices/bulletin_with_taxes/2013_08_26_with_taxes_1668.pdf
- [14] Europe's Energy Portal - <http://www.energy.eu/>
- [15] “Observatorio de la electricidad Junio 2013 WWF” http://awsassets.wwf.es/downloads/observatorio_junio_2013.pdf
- [16] “Improving steam system performance. A sourcebook for industry.” Best practices activity for the U.S. Department of Energy's (DOE) Industrial Technologies Program. - US DOE http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/steamsourcebook.pdf
- [17] Maes, D., Vrancan, K. (2005). “Energy efficiency in steam systems”.
- [18] “Motors and drives. Introducing energy saving opportunities for business”. Carbon Trust.- http://www.carbontrust.com/media/13059/ctv048_motors_and_drives.pdf
- [19] “Improving motor and drive systems performance sourcebook.” - US DOE http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/motor.pdf
- [20] “Efficiency Characteristics of Centrifugal Pumps”. EU SAVE Pump Study Group.

- [21] "Improving Pumping System Performance Sourcebook." - US_DOE https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/pump.pdf
- [22] "Energy Tips – Pumping Systems." - US_DOE https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/test_pumping_system__pumping_systemts4.pdf
- [23] Iluminación con tecnología LED. Alfonso Gago, Jorge Fraile. Paraninfo.
- [24] SEDICAL – www.sedical.com
- [25] Albarracín Eva M.^a, Sanabria Javier, Maillo Agustín. Recuperación de calor del aire de extracción mediante circuito frigorífico.
- [26] "Recuperación de condensado en sistemas industriales de vapor". Spirax-Sarco.

GLOSSARI D'ACRÒNIMS

AC: corrent altern

ACS: aigua calenta sanitària

AFD: control/accionament de freqüència ajustable

AOR: regió de funcionament admissible

APH: preescalfador d'aire

ASD: control/accionament de velocitat ajustable

AT: alta tensió

BEP: punt de màxim rendiment

BP: baixa pressió

BREF: document de referència de millors tècniques disponibles

BT: baixa tensió

CAD: disseny assistit per ordinador

CFD: dinàmica de fluids computeritzada

CHP: eficiència tèrmica de la producció mitjançant cogeneració

COP: coeficient d'operació

COV: components orgànics volàtils

DC: corrent continu

DEE: disseny energètic eficient

DEI: Directiva d'emissions industrials

EEL: indicador d'eficiència energètica

EIF: factor d'intensitat d'energia

ENEMS: sistema de gestió de l'eficiència energètica

ESEER: rendiment total estacional d'una bomba de calor

EVO: organització per a la valoració de l'eficiència

GLP: gas liquat del petroli

HEM: motor d'alta eficiència energètica

HF: alta freqüència

HiTAC: alta temperatura de l'aire de combustió

ICAEN: Institut Català d'Energia

IEC: Comissió Electrotècnica Internacional

IEEE: Institut d'Enginyers Elèctrics i Electrònics

IPPC: prevenció i control integrat de la contaminació

IR: infraroig

IRC: índex de rendiment del calor

LED: diode emissor de llum

MBPC: models basats en controls predictius

MT: mitjana tensió

MTD: millors tècniques disponibles

MVR: recompressió mecànica de vapor

MW: microones

NE: MTD nivells d'emissió associats a les millors tècniques disponibles

OLED: díodes orgànics emissors de llum

PER: percentatge d'estalvi d'energia elèctrica primària

PET: polietilè tereftalat

PID: control proporcional, integral i derivatiu

PLC: controlador lògic programable

PM10: partícules de diàmetre inferior a 10 micres

Ppm: partícules per milió

POR: regió d'operació preferent

PST: total de partícules en suspensió

REE: rendiment elèctric equivalent

RMS: sistema d'arrel quadrada mitjana

SCADA: programari de supervisió, control i adquisició de dades

SEC: consum específic d'energia

SER: cremador radiant amb forma de dit de guant

SGA: sistema de gestió ambiental

SGE: sistemes de gestió de l'eficiència energètica

TAR: incinerador o oxidador tèrmic on es tracten les corrents d'aire i aigua residual

TDD: distorsió de demanda total

TDS: materials sòlids suspesos i dissolts totals

Tep: tones equivalents de petroli

THD: taxa de distorsió d'harmònics total

UE: Unió Europea

UPS: sistema d'alimentació ininterrompuda

VEEI: valor d'eficiència energètica de la instal·lació d'il·luminació

VSD: control/accionament de velocitat variable

