



UNIVERSITA' DELLA CALABRIA

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica e Gestionale

Dottorato di Ricerca in

Ingegneria Meccanica
Scuola "Pitagora" in Scienze Ingegneristiche

CICLO

XXVIII

**EFFICIENZA ENERGETICA E SOSTENIBILITÀ INDUSTRIALE:
UN PROTOTIPO DI ESSICCATORE A COCLEA INDIRECTO**

Settore Scientifico Disciplinare ING-IND/10 Fisica Tecnica Industriale

Direttore:

Ch.mo Prof. Leonardo Pagnotta

Firma

Supervisore:

Ch.mo Prof. Dimitrios Kaliakatsos

Firma

Dottorando: Dott. Francesco Crea

Firma

INDICE

<i>Introduzione</i>	1
Capitolo 1	
Industria e ambiente	3
1.1 Industria e sostenibilità ambientale	3
1.2 Politiche energetiche e politiche sostenibili	8
1.3 Dal protocollo di Kyoto alla conferenza di Parigi	15
1.3.1 Aspetti generali	15
1.3.2 Strumenti, obiettivi e primi risultati	17
Capitolo 2	
Produzione di energia ed efficienza energetica	25
2.1 Produzione e fonti energetiche	25
2.2 Azioni di risparmio e di efficienza energetica	31
2.3 Titoli di efficienza energetica	39
2.4 Energia da fonti rinnovabili	47
2.4.1 Energia e Termodinamica	49
2.4.2 Scambio termico	52
2.4.3 Energia termica da fonti rinnovabili	70
Capitolo 3	
L'industria e l'essiccazione	75
3.1 Storia e industria dell'essiccazione	75
3.2 Generalità del processo di essiccazione	77
3.3 Classificazione dei materiali in base al comportamento all'essiccazione	89
3.4 Calcolo del tempo di essiccamento	93
3.5 Classificazione dei processi di essiccazione	94
3.5.1 Sistemi diretti e sistemi indiretti	96
3.5.2 Le variabili di processo	97
3.5.3 Tipologie comuni di essiccatori	99
3.6 Bilanci di materia ed energia in un processo di essiccazione	106

Capitolo 4

Prototipo di essiccatore a coclea (SCD) della Personal Factory	110
4.1 L'azienda Personal Factory e la sua mission ecologica	110
4.2 Essiccamento di aggregati per premiscelati in polvere	112
4.3 Nozioni di base sui sistemi di essiccamento a coclea (SCD)	115
4.4 Stato dell'arte dei sistemi SCD	118
4.5 Caratteristiche degli SCD nella movimentazione dei materiali	124
4.6 Proprietà termodinamiche degli SCD indiretti	127
4.7 Caratteristiche del progetto Personal Factory	131
4.8 Progettazione e prototipazione parti meccaniche dell'essiccatore	133
4.9 Fase test del prototipo di essiccatore	138
4.10 Analisi termodinamica	144

<i>Conclusioni</i>	148
---------------------------	-----

<i>Riferimenti Bibliografici</i>	151
---	-----

Allegati

A. Il protocollo di Kyoto	155
B. Elenco delle principali Direttive emanate dall'Unione Europea in termini energetico-ambientali, a partire dal 2001	176
C. Normativa nazionale essenziale in termini di efficienza energetica	179

*Un grazie al Prof. Dimitrios Kaliakatsos
per la disponibilità mai mancata in
questi anni di dottorato.*

*Un grazie al Prof. Vittorio Ferraro per
l'attenzione ed i consigli a me dedicati.*

*Un grazie a Francesco, Antonio ed a
tutta la Personal Factory per il lavoro
svolto e l'opportunità a me concessa.*

*Un grazie alla mia compagna di vita
Marta per il supporto in questi anni.*

*Ai miei genitori, che mi hanno insegnato
che nella vita non bisogna smettere mai
di studiare e di imparare.*

Introduzione

La sostenibilità ambientale ha assunto una grande rilevanza a livello mondiale. Il concetto di sostenibilità non può non risultare legato al concetto di sviluppo, ben coniugandosi con il concetto di *sviluppo sostenibile*. La crescita e l'utilizzo della tecnologia, accanto agli innegabili benefici, portano ad una serie di problemi dovuti allo sfruttamento delle risorse del pianeta ed ai relativi effetti prodotti sull'ambiente e sull'uomo. Negli ultimi decenni si è sviluppata una notevole sensibilità verso le tematiche di salvaguardia ambientale. Uno sviluppo sostenibile potrà provenire dalla innovazione e ricerca dei sistemi industriali. Le nuove tecnologie dovranno poter coniugare la crescita economica con la responsabilità ambientale e sociale. Crescita e sviluppo passano necessariamente attraverso il recupero del nostro modello industriale innovando prodotti e processi produttivi, ma dovranno garantire la sostenibilità sociale ed ambientale del cosiddetto "*industrial business model*". Lo sfruttamento delle risorse non può non prescindere da un loro riutilizzo e riciclo, da una ricerca di sostituti rinnovabili, da una progettazione di sistemi creati per il bene comune. Spesso si è associato e si associa, non a torto, il termine "industria" a quello di "degrado ambientale". Negli ultimi decenni si assiste alla nascita di accesi dibattiti, ma anche ad una presa di coscienza su un nuovo tipo di sviluppo economico ed industriale. Si parla di sviluppo sostenibile perché esso indica la necessità della tutela delle risorse comuni. L'ambiente non deve essere solo inteso soltanto come "luogo" per identificare i vari aspetti del rapporto tra l'uomo e ciò che lo circonda, ma deve rappresentare un "valore" da rispettare e preservare con la consapevolezza che, essendo le risorse del nostro pianeta tendenzialmente esauribili, debbano essere rivisti e riequilibrati i modelli di sviluppo ed i mezzi di produzione.

Il presente lavoro, dopo una disamina su industria, sostenibilità ambientale ed efficienza energetica, è stato focalizzato sugli strumenti che le aziende possono sfruttare per dare il loro contributo verso un'industria sostenibile e, al tempo stesso, incrementare la propria competitività. Questo si è concretizzato attraverso la mia esperienza presso la Personal Factory di Vibo Valentia, azienda leader nella fornitura di sistemi integrati nel settore della chimica in polvere per l'edilizia.

La produzione a corto raggio di premiscelati in polvere, attraverso lo sfruttamento di inerti locali ed aggregati da riciclo ha fatto emergere la necessità di un efficiente sistema di essiccazione. La sperimentazione ha evidenziato che il processo ordinario di preparazione degli inerti, in particolare nella fase di essiccazione antecedente alla loro selezione, risultasse assolutamente inadeguato per la produzione di materiale. I classici processi di essiccamento possono essere dannosi nel caso in cui nella componente da essiccare vi siano tracce di componenti organici non eliminate dai precedenti processi. Allo stesso tempo gli impianti classici sono pensati per l'essiccazione in larga scala e non sono idonei ad una produzione localizzata e flessibile alle differenti condizioni di esercizio. Questo ha portato alla progettazione di un sistema di essiccazione di tipo indiretto che coniuga efficienza, economicità, impatto ambientale e possibilità di utilizzo di differenti fonti energetiche. L'obiettivo consiste, quindi, nel favorire e stimolare la crescita economica ed aziendale, l'utilizzo ed il riciclo delle risorse locali, evitando al tempo stesso il degrado dell'ambiente. Tale procedura favorisce il cosiddetto *decoupling*, ovvero il "disaccoppiamento" tra la crescita economica e l'uso delle risorse, tra la creazione di ricchezza e gli impatti ambientali.

Capitolo 1

Industria e ambiente

1.1 Industria e sostenibilità ambientale

Le società industriali, caratterizzate da grandi progressi della scienza e della tecnica, hanno compiuto scoperte e realizzato sistemi che hanno prodotto anche forti impatti ambientali. La disponibilità e l'utilizzo di fonti di energia non rinnovabili, l'esigenza di nuovi mercati, la diffusione di mezzi di trasporto affidabili e veloci, hanno permesso il movimento di materiali, prodotti, risorse e persone su lunghe distanze. Questo contesto, assieme all'aumento della popolazione a livello mondiale ed alla concentrazione di grandi numeri di persone in territori circoscritti, ha portato cambiamenti significativi dell'ambiente in aree sempre più vaste che interessano l'intero pianeta. Questa crescita, sebbene da una parte abbia portato ad un grande aumento della ricchezza e della prosperità delle popolazioni, in particolare nel cosiddetto occidente, dall'altra ha prodotto grandi alterazioni nell'ambiente e un forte divario economico tra le popolazioni. La consapevolezza delle modificazioni che le attività umane e produttive comportano all'ambiente, in particolare le attività che producono inquinamento dell'aria, del suolo e delle acque e quelle basate sull'utilizzo di risorse non rinnovabili, si è fortemente diffusa nell'opinione pubblica negli ultimi decenni del secolo scorso, grazie anche all'acquisizione di dati scientifici. Immissioni inquinanti, di diversa portata, con conseguenze che vanno dal cambiamento climatico al riscaldamento globale, dalla riduzione della fascia d'ozono all'inquinamento della catena alimentare sono spesso riconducibili all'industria.

I danni ambientali provenienti dall'attività industriale possono essere suddivisi in due grandi categorie:

- inquinamento derivante da scorie, residui di lavorazione, criticità operativa dei sistemi e dei processi di produzione;
- inquinamento derivante dall'impiego e dalla produzione energetica per il funzionamento dell'industria: di tipo termoelettrico (riscaldamento delle

acque, scorie inquinanti immesse nelle acque); di tipo idroelettrico (impianti, bacini artificiali, etc.); di tipo nucleare (impianti, smaltimento e rischio di fughe radioattive, etc.).

Gli effetti della produzione industriale non sono riferiti soltanto al processo di produzione (scorie e immissioni di diverso tipo nell'aria, nelle acque e nel suolo), ma prolungano la loro portata anche oltre, essendo, a volte, il prodotto stesso dannoso all'ambiente. La produzione industriale provoca danno non solo attraverso l'emissione di sostanze inquinanti, ma come conseguenza di alterazioni dello stato fisico dell'ambiente. È il caso, ad esempio, della immissione di acqua calda nei corsi d'acqua dopo la sua utilizzazione nei processi di raffreddamento (calore di rifiuto).

La rilevanza sempre più estesa del tema ambientale e la sua incidenza a livello globale chiamano in causa il concetto di *sostenibilità*. E' consuetudine, in generale, adottare come concetto di "*sostenibilità*" o "*sviluppo sostenibile*", la definizione data all'interno del Rapporto "*Our common future*", meglio conosciuto come Rapporto Brundtland (dal nome della Presidente della Commissione Mondiale per l'Ambiente e Sviluppo) del 1987, pubblicato in Italia nel 1988, ovvero come la capacità delle attuali generazioni di soddisfare i propri bisogni senza impedire alle generazioni future di soddisfare i loro [1]. La peculiarità consiste nel fatto che, per la prima volta, il concetto di sostenibilità adotta anche la concezione temporale: "*L'umanità ha la possibilità di rendere sostenibile lo sviluppo, cioè di far sì che esso soddisfi i bisogni dell'attuale generazione senza compromettere la capacità di quelle future di rispondere ai loro*".

Nel 1991, Herman Daly [2], ha configurato lo sviluppo sostenibile intorno a tre condizioni generali concernenti l'uso delle risorse naturali da parte dell'uomo:

- ✓ il tasso di utilizzazione delle risorse rinnovabili non deve essere superiore al loro tasso di rigenerazione;
- ✓ l'immissione di sostanze inquinanti e di scorie nell'ambiente non deve superare la capacità di carico dell'ambiente stesso;
- ✓ lo stock di risorse non rinnovabili deve restare costante nel tempo.

In seguito, la Worldbank, ha definito lo sviluppo sostenibile con una rappresentazione "triangolare" su quelli che sono denominati i tre pilastri della sostenibilità: economia,

ambiente e società [3]. Il concetto di sostenibilità, pertanto, chiama in causa la necessità di realizzare un processo di sviluppo che sia attento a preservare nel tempo le risorse naturali esistenti. Nasce così la necessità di un processo di riconversione anche e soprattutto industriale verso pratiche che tengano conto delle problematiche ambientali. L'industria sostenibile rappresenta il momento più alto, dal punto di vista tecnologico, di questo processo. Possiamo individuare quale "*industria sostenibile*" quella che compie una riprogettazione completa del ciclo produttivo (innovazione di processo) e/o del prodotto che possa portare ad un uso razionale delle risorse, ma anche ad una maggiore efficienza dei cicli produttivi. Si tratta di una industria che usa materie prime riciclate o ricicla le scorie e i rifiuti reimmettendoli nel ciclo produttivo. Questo processo conduce ad un abbassamento delle immissioni inquinanti, alla produzione di beni che hanno essi stessi una compatibilità ambientale (possibilità di riciclaggio, biodegradabilità, etc.), ma anche al risparmio energetico.

Non vi è dubbio, tuttavia, che la complessità e l'articolazione del settore industriale e produttivo rendono particolarmente arduo il compito di valutare la qualità ecologica dei processi e dei prodotti, nonché la stesura di corretti "eco-bilanci": Il sempre più diffuso riconoscimento del valore economico del "capitale ambientale" fa sì che questo strumento di analisi venga sempre più di frequente applicato nella parte economicamente più avanzata d'Europa, ancora poco in Italia, per indirizzare nel senso della sostenibilità le scelte produttive e di sviluppo. Spesso si è in presenza, più semplicemente, di un'industria "compatibile" con l'ambiente. L'industria "compatibile" rappresenta il momento di passaggio dall'industria "tradizionale" a quella "sostenibile". L'industria compatibile adegua gli impianti al solo scopo di mettersi in linea con gli standard ambientali prefissati dalla normativa vigente. L'adeguamento avviene attraverso l'installazione di impianti di depurazione all'interno del ciclo produttivo (add-on) o alla fine del ciclo produttivo (end-of-pipe). Questo permette un abbattimento delle immissioni, attraverso il trattamento degli inquinanti e lo smaltimento dei rifiuti, ma spesso il livello tecnologico di tale adeguamenti non è elevato come nel caso di un'industria "sostenibile". Accade spesso che l'industria "compatibile" trasferisca i carichi inquinanti da un corpo recettore all'altro (come nel caso dei fanghi derivanti da processi di depurazione) senza risolvere il problema all'origine. La Figura 1.1 mostra lo schema delle azioni di un'industria "compatibile" con l'ambiente.

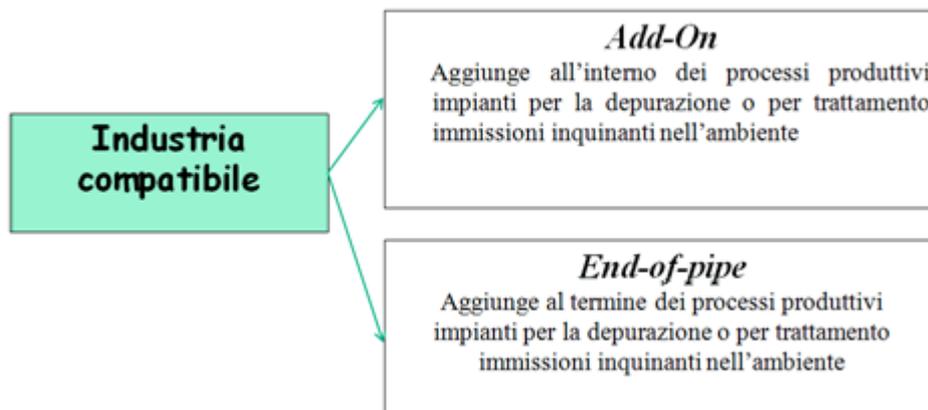


Figura 1.1. Esempio schematico di azioni condotte da un'industria "compatibile" con l'ambiente.

Dobbiamo, altresì, evidenziare che il passaggio da una industrializzazione incompatibile con l'ambiente verso forme compatibili non avviene quasi mai spontaneamente, ma è reso necessario da un intervento esterno (autorità statale o governativa). Il problema ambientale non viene quindi affrontato agendo sul processo produttivo, bensì alla fine del processo stesso attraverso "appositi accessori" che abbattano le immissioni fino ai limiti consentiti dalla legge e, per quanto concerne le scorie, si procede allo stoccaggio negli appositi contenitori, lasciando insoluto il problema dello smaltimento finale o trasportandole in determinati luoghi con i rischi ad essi connessi. L'industria sostenibile è attuata attraverso modifiche sostanziali dei processi produttivi e una attenzione maggiore per i materiali usati e per i prodotti, tale da permettere un contenimento o un abbattimento totale delle scorie e delle immissioni in genere. Quello che cambia maggiormente rispetto all'industria tradizionale è il passaggio da una politica di attenuazione del danno ambientale ad una di annullamento e prevenzione del danno stesso: un intervento non in "coda" ma all'origine del processo produttivo. La Figura 1.2 mostra uno schema delle azioni di un'industria "sostenibile".

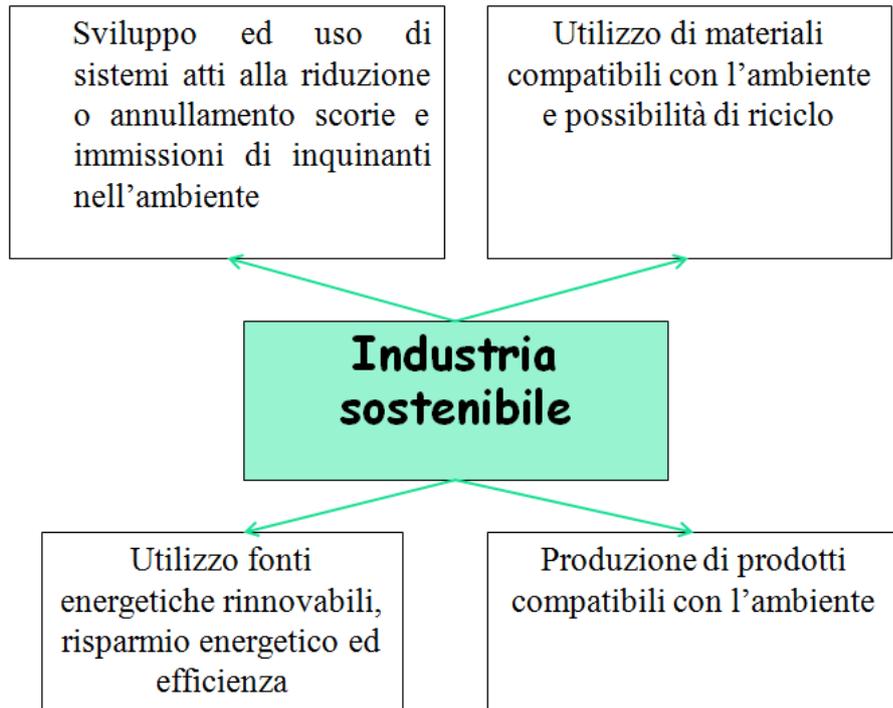


Figura 1.2. Esempio schematico di azioni condotte da un'industria "sostenibile" con l'ambiente.

La tendenza degli imprenditori, supportata dalle normative, è stata spesso quella di utilizzare processi cosiddetti "in coda" piuttosto che modificare l'intero processo produttivo. Le motivazioni sono da ricercare sostanzialmente nella maggiore semplicità di intervento, ma anche nella maggiore ed immediata visibilità nei confronti della collettività.

Sebbene l'emergenza attuale e le politiche di rinnovamento tecnologico richiedano progetti e assunzioni di responsabilità per una corretta gestione ambientale, il Rapporto Istat, pubblicato il 22 dicembre 2015, indica che nel 2013 gli investimenti per la protezione dell'ambiente delle imprese industriali sono diminuiti del 16.9% rispetto all'anno precedente, in un contesto di riduzione sia degli investimenti fissi lordi complessivi (-10.1%) sia del valore della produzione (-6.8%). La spesa è stimata aumentare dell'8.6% rispetto all'anno precedente nelle piccole e medie imprese mentre si riduce del 25.4% in quelle con 250 addetti e oltre [4].

1.2 Politiche energetiche e politiche sostenibili

Il rapporto “I limiti dello sviluppo” del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) [5], possiamo dire che è stato uno dei primi contributi a favorire la presa di coscienza che l'utilizzo umano delle risorse naturali stesse raggiungendo il limite. Questa consapevolezza si è rafforzata anche per effetto delle crisi economiche ed energetiche che si sono avute nel 1973 e nel 1979. Esse hanno mostrato quanto il nostro sistema occidentale fosse dipendente dalle forniture di petrolio e gas proveniente in massima parte da nazioni politicamente instabili. Questo, sebbene abbia portato alla ricerca di nuovi giacimenti petroliferi ed alla nascita di centrali nucleari, ha favorito anche la necessità di poter adottare politiche energetiche da fonti rinnovabili e sviluppare pratiche di risparmio energetico. Trattandosi di un problema mondiale, le Nazioni Unite (UN) nel 1983 hanno istituito la Commissione Mondiale su Ambiente e Sviluppo (WCED: World Commission on Environment and Development), ossia quella che nel 1987 ha prodotto il Rapporto Brundtland, citato nel precedente paragrafo. Ed è proprio sulla base di questo rapporto che le Nazioni Unite hanno convocato, nel 1992, la “Conferenza su ambiente e sviluppo”, meglio nota come “Conferenza di Rio” o “Primo Vertice della Terra”. Tra i risultati più importanti della Conferenza di Rio annoveriamo: la Convenzione quadro sui cambiamenti climatici e la Convenzione sulla biodiversità, l’Agenda 21 (trattasi di un piano d’azione globale per la realizzazione dello sviluppo sostenibile nel XXI secolo: questo spiega l'utilizzo del numero 21), la Dichiarazione di Rio sull’ambiente e lo sviluppo (codifica in 27 "Principi" lo sviluppo sostenibile), la Dichiarazione dei principi delle foreste (volta a rafforzare la gestione sostenibile delle foreste). Tutto questo nasce anche dalla necessità di fornire una serie di indicatori che possano andare oltre la semplice misura del PIL per individuare il grado di sviluppo e di benessere. E se, inizialmente, i tratti salienti del problema riguardassero l'esauribilità delle risorse non rinnovabili, con la presa di coscienza dei cambiamenti climatici, l'attenzione viene rivolta anche al controllo delle emissioni di gas serra. Nel 1994 è entrata in vigore la “Convenzione quadro delle Nazioni Unite sul cambiamento climatico” (UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change) che riconosce il clima come una risorsa condivisa e stabilisce un quadro generale di riferimento per collaborazioni tra governi, mirato alla riduzione del riscaldamento globale ed alla gestione delle emissioni, industriali e non, di CO₂ e di altri gas serra. Nel 1997, nell’ambito della Convenzione sul cambiamento climatico, è stato

adottato il cosiddetto Protocollo di Kyoto (Allegato A), entrato in vigore nel 2005, che comprende misure obbligatorie per i firmatari. Si stabiliscono degli obiettivi legalmente impegnativi per 37 paesi industrializzati e l'unione europea, sulla base del principio delle "responsabilità comuni, ma differenziate". Il Protocollo aveva come obiettivo la riduzione, nel periodo 2008-2012, delle emissioni di gas serra nel mondo di una quantità pari a circa il 5% delle emissioni del 1990. L'Italia ha ratificato il Protocollo di Kyoto nel 2002 adottando un Piano nazionale per la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra. Anche l'Unione Europea ha dato l'avvio, per effetto delle crisi economiche ed energetiche, a politiche energetiche sostenibili. Risale al 1974 la prima risoluzione adottata dal Consiglio delle Comunità europee su "*Una nuova strategia per la politica energetica della Comunità*". Essa definisce i primi obiettivi comunitari per il decennio 1975-1985, atti a ridurre la dipendenza dall'energia importata ed a garantire un approvvigionamento sicuro e durevole, nel rispetto dell'ambiente, ma a condizioni economiche favorevoli. La risoluzione era basata sui seguenti principi [6]:

- Gli obiettivi energetici comunitari costituivano dei punti di riferimento per la politica energetica a lungo termine, per i Governi, per le imprese e per i cittadini della Comunità.
- Essi non avevano carattere vincolante.
- Prevedevano la cooperazione a livello internazionale tra Paesi consumatori e Paesi produttori al fine di risolvere i problemi energetici operando all'interno dell'International Energy Agency (IEA).

Essa si articolava nei seguenti quattro punti:

- sviluppo accelerato dell'energia elettronucleare;
- sviluppo delle risorse energetiche interne della Comunità;
- approvvigionamento estero diversificato e sicuro;
- investimenti in ricerca tecnologica per valorizzare le energie alternative.

Il piano è stato principalmente imperniato sull'intento di ridurre le importazioni globali di energia della Comunità dal 61% del 1973 al 50% del 1985.

Gli obiettivi vennero sostanzialmente raggiunti, anche grazie ad una serie di circostanze favorevoli quali lo sviluppo di giacimenti di idrocarburi situati nella piattaforma continentale inglese e olandese e la realizzazione del programma di installazione delle centrali elettronucleari in Francia. L'efficienza energetica, misurata in base all'intensità energetica, cioè alla quantità di energia impiegata per la quantità del PIL, migliorò del 20%; le importazioni di energia della Comunità diminuirono del 18%; la quota di energia elettrica prodotta utilizzando idrocarburi passò dal 23% al 16%.

Nel 1985 il Consiglio Europeo predispose un altro piano energetico decennale, noto come "*Linee direttrici per le politiche energetiche degli stati membri*", che si basava sugli stessi principi della risoluzione precedente e prefiggeva come obiettivi quantitativi [6]:

- Uso del petrolio limitato al 40% del consumo energetico complessivo rispetto alla quota allora riscontrabile che si aggirava sul 50%.
- Miglioramento dell'efficienza energetica del 20%; bilancio energetico comunitario caratterizzato dal mantenimento della quota di gas naturale allora utilizzata intorno al 18%, in un quadro di approvvigionamenti stabili e diversificati.
- Potenziamento della quota di combustibili solidi, rispetto alla quota allora utilizzata che si aggirava attorno al 24%, attraverso sforzi diretti ad interessare sia il versante della promozione della domanda, sia quello del miglioramento della economicità della capacità produttiva; congelamento della quota di energia elettrica prodotta utilizzando idrocarburi ad un livello inferiore al 15%, con l'evidente intento di promuovere l'uso del carbone e dell'elettronucleare.
- Aumento significativo dell'energia prodotta da fonti rinnovabili.
- Promozione e ulteriore sviluppo della ricerca scientifica e tecnologica.
- Integrazione del mercato interno dell'energia, inteso come l'eliminazione degli ostacoli che si frappongono alla liberalizzazione dell'energia all'interno della Comunità.
- Integrazione del binomio energia-ambiente, fondato sul principio di interdipendenza tra economia industriale e protezione ambientale.

Questo piano, a differenza del primo, è fallito clamorosamente. L'efficienza energetica migliora appena del 5% invece che del 20% previsto. L'uso del petrolio resta praticamente invariato. Le importazioni di energia aumentarono anziché diminuire a causa della caduta della produzione di carbone della Francia e del Regno Unito, della flessione di produzione di petrolio del Mare del Nord e dell'incremento delle importazioni di gas naturale. La quota del gas naturale non restò stabile, ma aumentò, mentre quella della produzione di carbone diminuì sensibilmente. La quota di energia prodotta da idrocarburi non si ridusse del 15%, ma restò invariata. Le fonti rinnovabili avrebbero dovuto fornire un contributo significativo ma, se si fa un'eccezione per l'idroelettrico, l'apporto restò molto basso. Il fallimento di questo secondo piano energetico decennale comunitario fu determinato da diversi fattori tra i quali quello dell'inadeguatezza dello strumento stesso che fu preposto per la sua realizzazione. La Risoluzione, manifestazione di volontà politica comune agli stati membri, era atto non vincolante e quindi non poteva imporre obblighi ai destinatari, per cui le politiche energetiche dei singoli stati avrebbero dovuto convergere "spontaneamente" verso un risultato comune. In sostanza, la politica energetica comunitaria veniva ad essere la somma delle singole politiche energetiche nazionali, le quali hanno avuto un limitato grado di convergenza verso gli obiettivi indicati dalla Risoluzione, a causa del mantenimento di un mix energetico e di un uso dell'energia molto diverso fra Stato e Stato. Profonde ed oggettive erano le differenze fra gli Stati membri in materia di energia e ambiente, causa l'eterogeneità delle condizioni geologiche, l'autosufficienza energetica o la dipendenza energetica [7]. In questo scenario si riscontrava che Regno Unito e Danimarca non solo avevano raggiunto l'autosufficienza energetica, ma divenivano paesi esportatori di energia. La Francia aveva puntato con grande determinazione sul nucleare che le consentiva anche una capacità di esportazione di energia elettrica verso gli Stati limitrofi, sospendendo la produzione, ridimensionando il proprio consumo di carbone ed incrementando il consumo di gas naturale.

La Germania rimaneva legata al consumo e alla produzione di carbone, pur utilizzando in modo principale il petrolio, ma presentava anche una buona produzione di energia elettrica di derivazione nucleare ed un consumo di gas naturale superiore a quello francese. L'Italia, con un consumo di 196,5 milioni di tep nel 2004, di cui 88 milioni di tonnellate rappresentate da consumi petroliferi, 66,5 milioni di tep di gas naturale e 17,1 milioni di tep da carbone, importava l'85% del proprio fabbisogno energetico. I Paesi

Bassi e la Spagna mantenevano un equilibrato mix energetico, seppur presentando una buona fetta di importazioni di petrolio. Belgio e Lussemburgo presentavano una situazione simile a quella della Germania, ma con un ricorso molto contenuto al carbone. Grecia e Portogallo dipendevano prevalentemente dal petrolio, sebbene se la Grecia presentasse un consistente consumo di carbone pari ad un quarto del suo fabbisogno. Il fallimento del piano portò alla fine delle strategie decennali, in favore dell'adozione di risoluzioni vincolanti e più efficaci.

Tra le tappe fondamentali che contrassegnano il progressivo sviluppo del mercato comunitario dell'energia, si colloca il *Libro Verde Per una politica energetica dell'Unione Europea* [8], adottato nel 1995 che si propone, oltre lo scopo di realizzare il mercato interno dell'energia e di garantire la libera circolazione del bene in questione, anche di approfondire il problema chiave della sicurezza energetica dell'Unione. A questo seguiva, nello stesso anno, il *Libro bianco Una politica energetica per l'Unione Europea* [9] che contiene le linee guida dell'azione comunitaria in materia energetica e che si prefigge i seguenti fini:

- raggiungere una rapida integrazione del mercato interno dell'energia;
- gestire le situazioni di dipendenza energetica;
- garantire la sicurezza degli approvvigionamenti;
- promuovere lo sviluppo sostenibile;
- predisporre una strategia di tutela ambientale.

L'idea era di integrare due fattori essenziali quali la protezione dell'ambiente e la competitività. Del resto, il trattato di Maastricht, in vigore da novembre 1993, indicava, come obiettivi dell'Unione Europea, la promozione di una crescita economica durevole e non troppo dipendente dai prezzi dell'energia, nel rispetto dell'ambiente. Si auspicava che le tecnologie avanzate, applicate alla risoluzione di problemi legati all'energia, potessero apportare un contributo significativo ad uno sviluppo durevole, alla diversificazione delle fonti di energia ed alla produzione di energia nella prospettiva di un programma specifico, riguardante la ricerca e lo sviluppo tecnologico nell'ambito dell'energia non nucleare. Nel maggio del 1997 fallisce la proposta della Commissione per introdurre un capitolo "energia" nel Trattato di Amsterdam, ma viene recepita

l'importanza di una politica per uno sviluppo sostenibile. Si intende raggiungere, entro il 2010, l'obiettivo di un contributo netto di almeno il 12% per le energie rinnovabili. Il "*Libro Verde sulla Sicurezza dell'Approvvigionamento Energetico*", adottato il 29 novembre 2000, rappresenta l'atto più importante di politica energetica dell'Unione Europea. Esso suggerisce di intervenire sulla domanda di energia per orientarla e contenerla, evitando di rispondere alla domanda con un'offerta sempre maggiore. Auspica la necessità di riequilibrare la domanda verso consumi meglio gestiti e maggiormente rispettosi dell'ambiente nonché assegna la priorità allo sviluppo delle energie rinnovabili, per fronteggiare la sfida del riscaldamento del pianeta causato dall'effetto serra. A tale scopo, per accelerare l'integrazione del mercato interno dell'elettricità e del gas, oltre alla realizzazione di reti trans-europee dell'energia, vengono adottate due ulteriori direttive: la *2003/54/CE del 26 giugno 2003* per completare la liberalizzazione del mercato interno dell'elettricità in tutti i comparti (generazione, trasmissione, distribuzione e fornitura dell'energia elettrica), e la *2003/55/CE del 26 giugno 2003*, per completare la liberalizzazione del mercato interno del gas naturale in tutti i comparti (trasporto, distribuzione, fornitura e stoccaggio del gas naturale). Entrambe le direttive annullano le precedenti del 1996 e del 1998. La realizzazione di un mercato interno dell'energia risulta sicuramente vantaggiosa per l'ambiente, grazie ai miglioramenti introdotti negli impianti di generazione ed all'uso di energia più pulita, ma siamo molto lontani dall'integrazione dei mercati nazionali dell'elettricità per l'uso inadeguato delle infrastrutture e per l'insufficiente interconnessione delle reti elettriche tra molti Stati membri [7]. Si è così arrivati a produrre il *Libro Verde, Una strategia europea per un'energia sostenibile, competitiva e sicura*, del 2006, che ha stabilito i tre obiettivi fondamentali da perseguire:

- *security of supply*: garantire la sicurezza degli approvvigionamenti energetici;
- *competitiveness*: limitare la dipendenza dalle importazioni di idrocarburi;
- *sustainability*: coniugare le politiche energetiche con il contrasto al cambiamento climatico.

Da questo documento sono derivate le direttive *2009/72/CE*, *2009/73/CE* e *2008/92/CE*, che rinforzano il processo di apertura delle reti.

Nel marzo 2010 la Commissione Europea ha presentato la sua strategia "Europa 2020" [10], strategia decennale che mira alla trasformazione strutturale dell'economia europea e presenta i tre assi principali:

- crescita intelligente (promozione di conoscenza, innovazione, istruzione e società digitale);
- crescita sostenibile (produzione più efficiente sotto il profilo delle risorse e maggiore competitività);
- crescita inclusiva (maggiore occupazione e competenze e lotta alla povertà).

Tra gli obiettivi vi è anche quello in materia di clima/energia per cui è stato creato il pacchetto integrato di misure, più noto come **strategia del 20-20-20** che stabilisce come obiettivi al 2020:

- La riduzione delle emissioni di anidride carbonica del 20% rispetto ai livelli del 1990
- Aumento dell'efficienza energetica del 20% del consumo totale di energia primaria
- Incremento della quota delle energie rinnovabili al 20% del consumo totale

La Strategia Europa 2020 individua le eco-industrie (o industrie ambientali o imprese a tecnologia ambientale) come gli artefici in grado di far crescere la ricchezza e l'occupazione senza recare gravi danni all'ambiente. Sono le industrie che producono le cosiddette "tecnologie abilitanti" (*enabling technologies*) che consentono di aumentare molto le prestazioni e le capacità dell'utente senza aumentare il consumo di risorse (come nel caso delle tecnologie informatiche). In questo modo possono consentire di raggiungere il "disaccoppiamento" (*decoupling*) tra la crescita economica e l'uso delle risorse, tra la creazione di ricchezza e gli impatti ambientali.

La Strategia Europa 2020 mette in evidenza come l'utilizzo efficiente delle risorse comporta, nel rispetto della gerarchia "prevenzione", "riutilizzo", "riciclo" e "smaltimento", l'utilizzo dei prodotti a fine vita come risorsa, con la conseguenza di poter creare nuove opportunità di lavoro nel settore del recupero e riciclo.

1.3 Dal protocollo di Kyoto alla conferenza di Parigi

1.3.1 Aspetti generali

Il Protocollo di Kyoto è un trattato internazionale sottoscritto nel dicembre 1997 da più di 160 paesi in occasione della Terza Conferenza delle Parti (COP3) della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC) e il riscaldamento globale. Esso è entrato in vigore il 16 febbraio 2005, dopo la ratifica da parte della Russia. Il trattato prevedeva l'obbligo dei paesi industrializzati di ridurre, nel periodo 2008-2012, le emissioni di elementi inquinanti, quali CO₂ (Anidride Carbonica), CH₄ (Metano), N₂O (Protossido di Azoto), HFC (Idrofluorocarburi), PFC (Perfluorocarburi), SF₆ (Esafluoro di Zolfo), del 5,2% rispetto a quelle registrate nel 1990, considerato come anno base "base year". L'aumento di concentrazione di questi gas, infatti, è causa di un maggiore *Effetto Serra* con una serie di conseguenze che ne derivano per l'ambiente. Tra questi gas ad effetto serra (GHG: Green House Gases), quello che contribuisce maggiormente, per abbondanza, è l'anidride carbonica che viene rilasciata dalla combustione di elementi fossili, dal disboscamento e in maggior parte dalla generazione di energia elettrica come mostrato in Figura 1.3 [11].

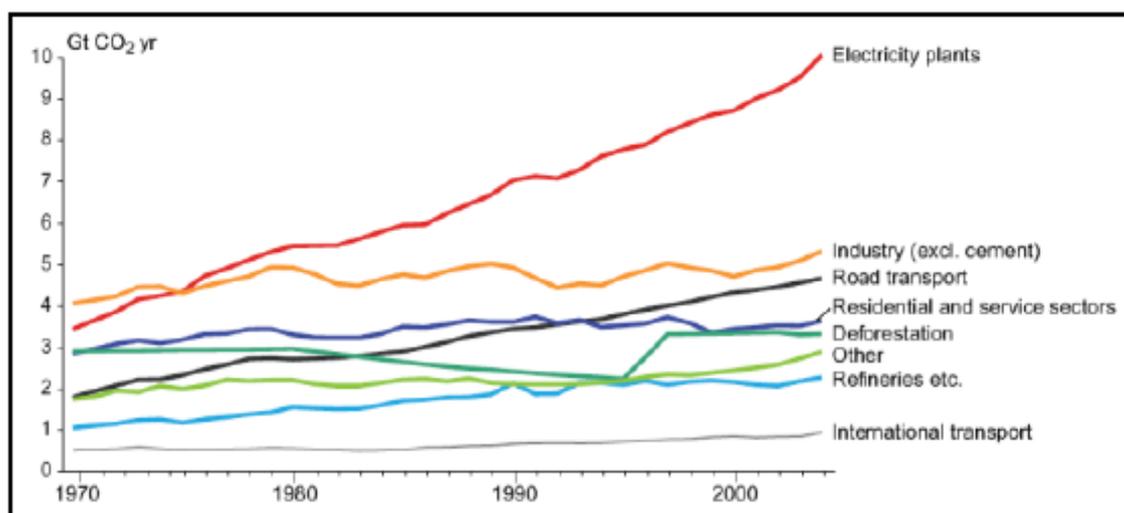


Figura 1.3. Emissioni di CO₂ dal 1970 al 2004 per differenti settori produttivi.

Per valutare gli effetti di questi gas serra sono stati sviluppati due indici: il *RIRF*, *Relative Instantaneous Radiative Forcing*, un indice che misura l'aumento dell'assorbimento della radiazione infrarossa di un gas per incrementi unitari di concentrazione, e il *GWP*, *Global Warming Potential*, potenziale di riscaldamento globale, che è definito come:

$$\int_0^t \frac{a_i(t)C_i}{a_c(t)C_c} dt \quad (1.1)$$

dove:

- a_i è l'assorbimento istantaneo per incremento unitario di concentrazione del gas i -esimo;
- C_i è la sua concentrazione al tempo t ;
- a_c è l'assorbimento analogo di CO_2 ;
- C_c è la concentrazione del biossido di carbonio al tempo t .

Il rapporto $\frac{a_i}{a_0}$, con a_0 assorbimento istantaneo al tempo $t = 0$, è equivalente al *RIRF*,

In questo modo il *GWP* fornisce la misura di quanto un dato gas serra contribuisce all'effetto serra. Questo indice è basato su una scala relativa che confronta il gas considerato con una uguale massa di biossido di carbonio, il cui *GWP* è per definizione pari a 1. Ogni valore di *GWP* è calcolato per uno specifico intervallo di tempo [12].

La quantità di emissioni annue, rispetto all'anno base, viene detta "*baseline*" e definisce la quantità annua che deve essere immessa al 2012. Questa quantità si chiama "*assignment amount*", cioè il limite superiore di emissione che non deve essere superato alla data di scadenza del protocollo di Kyoto. Per ciascuno dei sei gas serra è stato introdotto il concetto di "*anidride carbonica equivalente*" in modo che tutti i sei gas, ciascuno dei quali opportunamente pesato ai fini degli effetti del riscaldamento climatico, potesse far parte di un unico "paniere" che ciascun Paese è libero di gestire. Il concetto di *anidride carbonica equivalente* si basa quindi sul *Global Warming Potential*, ossia sull'effetto di riscaldamento cumulativo su un certo periodo di tempo che un gas serra è in grado di produrre. Si assumono l'anidride carbonica come gas serra di riferimento e come periodo di riferimento cumulativo 100 anni, che rappresenta il periodo di tempo sul

quale sono stati elaborati gli scenari di cambiamento climatico. In questo modo si ha che il metano ha un potere di riscaldamento climatico pari a 21 volte quello dell'anidride carbonica, il protossido di azoto 310, gli idrofluorocarburi 1300, il perfluoretano 9200, l'esafluoruro di zolfo 23900 [13].

Va tuttavia evidenziato che sebbene tutti gli altri gas abbiano un "potere climalterante" molto più alto di quello della CO₂, essa resta il principale e più rilevante gas ad effetto serra contribuendo per oltre il 55%.

Un altro indice di riferimento è il *Global temperature Change Potential* (GTP) che, rispetto al GWP, includendo effetti fisici come lo scambio di calore tra l'atmosfera e l'oceano, ossia il cambiamento climatico, che il GWP non comprende. A tal proposito riportiamo la nota contenuta nel *First assessment report* dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), l'ente intergovernativo che produce rapporti per l'UNFCCC:

"It must be stressed that there is no universally accepted methodology for combining all the relevant factors into a single metric." ("Si deve sottolineare che non ci sono metodologie riconosciute universalmente che combinino tutti i fattori rilevanti in un singolo metodo di misura").

Nello specifico, il Protocollo di Kyoto è costituito da **28 articoli**, con Allegato A (categorie e settori delle fonti di emissioni di gas ad effetto serra), Allegato B (quantificazione degli impegni di limitazione o di riduzione delle emissioni delle Parti) ed Annessi I e II, che devono essere rispettati dai Paesi firmatari, al fine di ridurre, ognuno in percentuale relativamente diversa, le proprie emissioni.

1.3.2 Strumenti, obiettivi e primi risultati

Durante i vari incontri internazionali per la ratifica del Protocollo sono stati stabiliti anche i principali strumenti per conseguire le riduzioni proposte, tra cui i *meccanismi flessibili*:

- ✓ *Clean Development Mechanism (CDM)*: è un meccanismo di collaborazione attraverso il quale le aziende o gli stati che realizzano progetti a tecnologia pulita nei paesi in via di sviluppo ricevono crediti di emissione pari alla riduzione ottenuta rispetto ai livelli che si sarebbero avuti senza progetto.

- ✓ *Joint Implementation (JI)*: è un meccanismo di collaborazione tra paesi industrializzati e quelli ad economia in transizione per il raggiungimento dei rispettivi obiettivi di riduzione delle emissioni. Analogamente al CDM, anche il JI, permette di ottenere crediti di emissione attraverso investimenti in tecnologie pulite in altri paesi.
- ✓ *International Emission Trading (IET)*: consiste nella possibilità che uno stato, ed eventualmente un'azienda, possa comperare o vendere ad altri stati o aziende permessi di emissione in modo da allineare le proprie emissioni con la quota assegnata.

Per contabilizzare lo scambio di quote di emissione, che si viene a generare dal sistema di transazione, è risultato necessario istituire dei registri nazionali in grado di inventariare tutti i movimenti generati dalle quote emissioni sia relative alle cessioni, sia relative alle acquisizioni [14]. Tali quote acquisiscono diversi titoli a seconda della loro destinazione e natura:

- AAU: Unità di quote assegnate ad ogni Paese
- CER: Unità di riduzione certificate, provenienti dai “Clean Development Mechanism”
- ERU: Unità di riduzione certificate, provenienti dai “Joint Implementation”
- RMU: Unità di riduzione certificate, provenienti dai “Sinks” (qualsiasi processo, attività o meccanismo per rimuovere gas ad effetto serra).

Sebbene i nomi siano differenti si tratta di "Certificati di emissioni" quantizzati in CO₂ equivalente. Con gli obblighi imposti dal Protocollo, il mercato di tali Certificati è diventato molto attivo per cui è risultato necessario istituire un Comitato per la gestione delle attività di scambio: il “Compliance Committee”. Esso è suddiviso in due sezioni: la "facilitive branch" con le mansioni di monitoraggio, controllo ed assistenza per i Paesi, ed "enforcement branch" con le mansioni di contestazione delle attività e l'applicazione delle relative sanzioni. In caso di inadempienza è previsto che entro 100 giorni il Paese inadempiente regolarizzi la sua posizione. Scaduto tale termine si procede all'applicazione della sanzione prevista che può essere, a seconda dei casi:

- *Penalizzazione sui diritti di emissione*: le quote non ridotte nel primo periodo saranno cumulate a quelle del periodo successivo.
- *Sanzione sulle emissioni*: Riconoscimento pari al 30% del valore delle emissioni in eccesso rispetto a quelle assegnate come risarcimento a fronte dei danni procurati all'ambiente.

Il Protocollo, che ha terminato la sua prima fase nel dicembre 2012, prevedeva una riduzione emissiva per le Parti che mediamente vale il – 5% (rispetto alla *baseline* emissiva del 1990), da conseguire entro il 2012. I risultati non sono stati molto incoraggianti, sebbene bisogna ricordare che a questa fase non hanno partecipato alcuni dei più grandi produttori di gas serra come gli Stati Uniti e la Cina. L'andamento delle emissioni dei Paesi impegnati (Annesso B) e non impegnati alla riduzione nella prima fase è riportato in Figura 1.4.

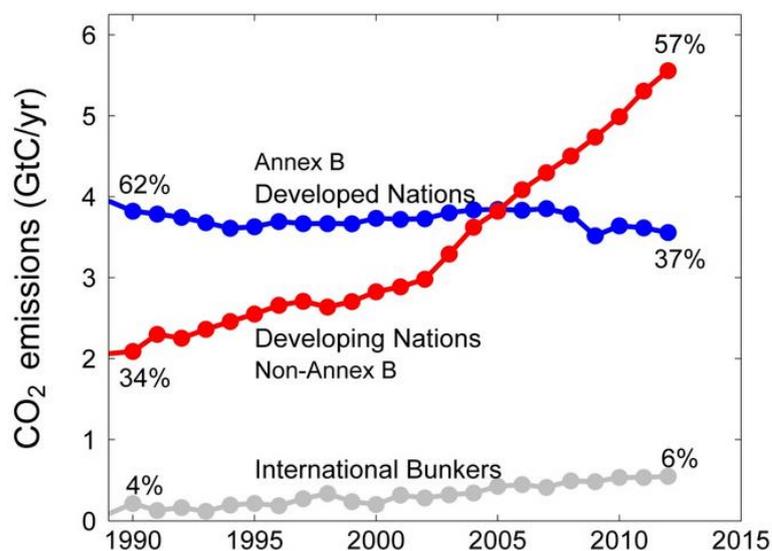


Figura 1.4. Andamento delle emissioni dei Paesi impegnati (Annesso B) e non impegnati alla riduzione nella prima fase del protocollo di Kyoto (fonte: Global Carbon Budget).

Come si evince dalla Figura 1.5, nell'arco temporale, 2000/2012, a livello mondiale, si registra un incremento delle emissioni, passando da 4,600 mila Gigagrammi, a 5,400 mila Gg. Tale incremento pari al 18%, è da imputare, in buona parte, alle emissioni di due continenti, Asia e America le cui emissioni, complessivamente, si aggirano attorno al 69%, rispetto a quelle totali.

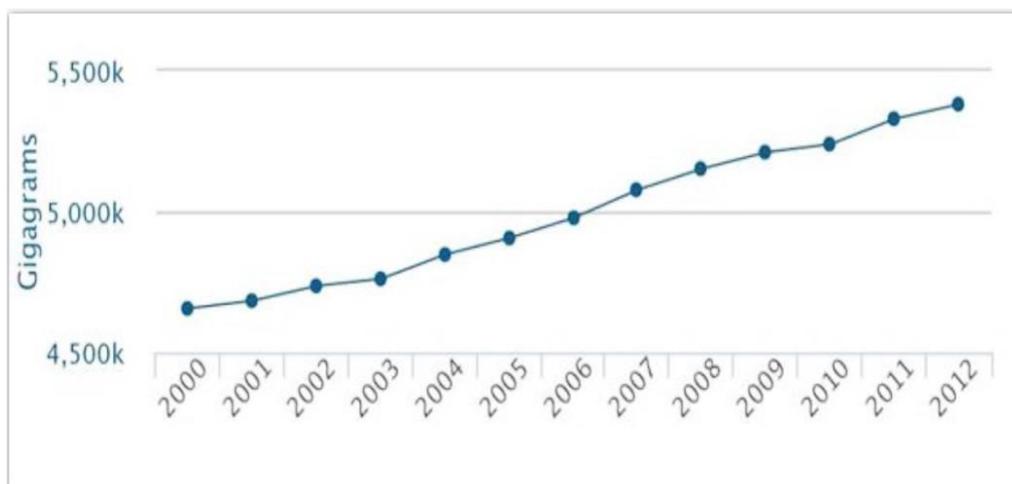


Figura 1.5. Andamento temporale emissione di CO₂ a livello mondiale.

La successiva Figura 1.6 evidenzia i grandi emettitori di CO₂ con la Cina quale maggiore responsabile e dove le emissioni sono cresciute di circa il 290% rispetto al 1990 e di circa il 70% rispetto al 2005.

(fonte: EDGAR 4.2FT2010 (JRC/PBL, 2012); BP, 2013; NBS China, 2013; USGS, 2013; WSA, 2013; NC

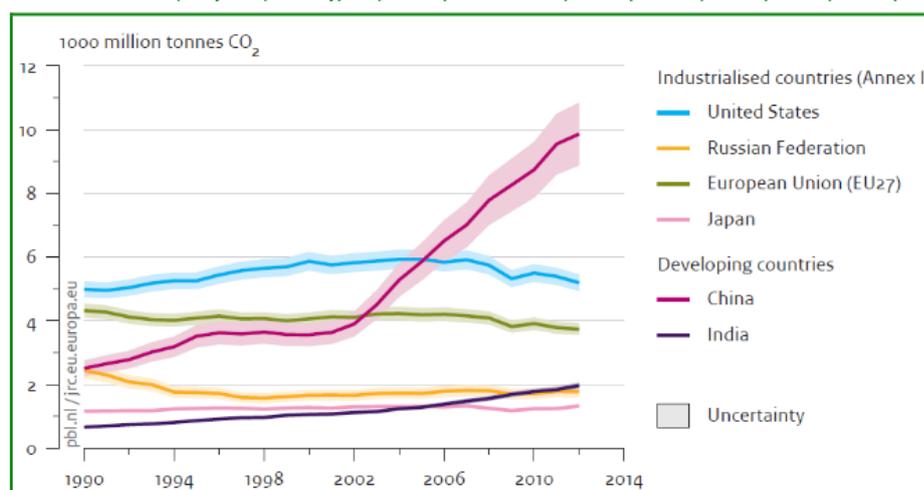


Figura 1.6. Andamento delle emissioni di CO₂ nei differenti Paesi.

L'Italia aveva sottoscritto un obiettivo di riduzione emissiva del 6.5%. Questo valore corrispondeva ad una riduzione assoluta di 33.9 MtCO₂eq, in riferimento ad un livello emissivo (baseline) italiano di 521 MtCO₂eq al 1990 e ad un obiettivo di emissione al 2012 pari a 487.1 MtCO₂eq. I dati contenuti nel Rapporto "Italian Greenhouse Gas

Inventory, ISPRA 2014, evidenziano che le emissioni nazionali di CO₂eq (cioè le emissioni cumulative ponderate dei sei gas serra) sono diminuite dell'11.4%, arrivando ad un risultato ancora migliore (-14.3%) se si considerano gli assorbimenti di carbonio da parte di boschi e delle foreste (settore LULUCF – "Land Use, Land Use Change and Forestry"). Se invece si considerano gli specifici obiettivi del Protocollo di Kyoto, la media di riduzione delle emissioni nel periodo di impegno (2008-2012), rispetto all'anno base (1990), è stata del 4.6%, a fronte di un impegno nazionale di riduzione del -6.5%: le emissioni nel periodo 1990-2012 sono passate da 519 a 460 MtCO₂eq. In Figura 1.7 sono evidenziate come tali emissioni fossero strutturate.

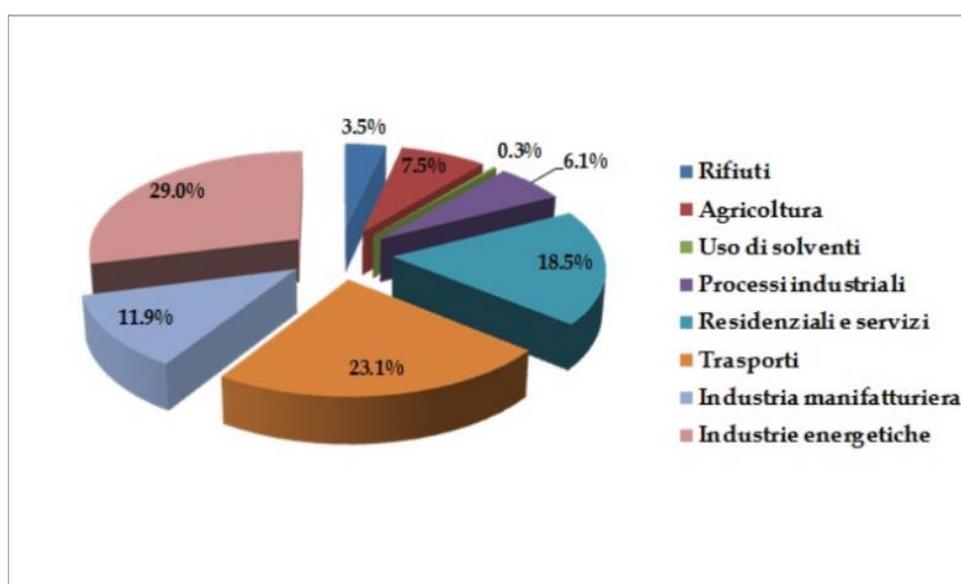


Figura 1.7. Produzione delle emissioni nei differenti settori in Italia.

I dati evidenziano come la generazione dell'energia giochi un ruolo notevole nell'ambito delle problematiche ambientali, sebbene anche altri settori contribuiscano in maniera rilevante. Il Protocollo ha rappresentato quindi un primo passo importante, ma insufficiente, per contenere le immissioni. In molti hanno criticato questo accordo ed i meccanismi di azione ad esso collegati. Particolari critiche sono state rivolte al *carbon offset internazionale*, ossia la compensazione di carbonio realizzata attraverso progetti energetici internazionale o mediante nuova forestazione e gestione forestale in Paesi tropicali. Questa azione è stata vista quale attività di *neocolonialismo emissivo* o comunque strumento per la deresponsabilizzazione nel contenimento emissivo da parte dei Paesi industrializzati. Il "meccanismo di sviluppo pulito" è un sistema previsto dal

Protocollo di Kyoto che permette di trattare le emissioni come un bene che può essere scambiato. Un'azienda attiva in un paese industrializzato con vincoli sui gas serra può farsi carico della realizzazione di progetti per la riduzione delle emissioni in paesi in via di sviluppo, dove non sono applicate limitazioni. In questo modo i paesi in via di sviluppo possono avere da subito tecnologie più moderne e meno inquinanti, mentre le aziende dei paesi sviluppati possono ottenere crediti sulle emissioni per bilanciare le loro produzioni inquinanti, se non riescono a ridurle efficacemente. Il sistema è stato criticato perché indicherebbe strade alternative alle aziende che inquinano, permettendo loro di continuare a inquinare. Inoltre, l'Unione Europea ha un proprio sistema di scambio dei crediti legati alle emissioni.

Il **secondo periodo di adempimento del Protocollo** è iniziato il 1° gennaio 2013 e si concluderà nel 2020. Vi aderiscono 38 paesi sviluppati, compresa l'UE e i suoi 28 Stati membri. Tale periodo rientra nell'**emendamento di Doha** (dal nome della capitale del Qatar, dove è stato discusso), nell'ambito del quale i paesi partecipanti si sono impegnati a **ridurre le emissioni di almeno il 18% rispetto ai livelli del 1990**. L'unione Europea si è impegnata a diminuire le emissioni in tale periodo del 20% rispetto ai livelli del 1990. La principale lacuna del Protocollo è che richiede unicamente ai paesi sviluppati di intervenire. Va poi considerato che gli Stati Uniti non hanno mai aderito al protocollo, che il Canada si è ritirato prima della fine del primo periodo di adempimento e che Russia, Giappone e Nuova Zelanda non presero parte al secondo periodo, per cui tale strumento viene applicato solo a circa il 14% delle emissioni mondiali. Oltre 70 paesi in via di sviluppo e sviluppati hanno tuttavia assunto vari **impegni non vincolanti** intesi a ridurre o limitare le rispettive emissioni di gas a effetto serra. Il Consiglio europeo ha svolto un ruolo centrale nella messa a punto del quadro di politica climatica ed energetica dell'Unione Europea. Con l'accordo quadro *orizzonte 2030*, raggiunto il 23 ottobre 2014, il Consiglio europeo ha approvato l'obiettivo di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra con un quadro per le politiche dell'energia e del clima dell'UE per il periodo dal 2020 al 2030, [15]. Il quadro è inteso ad **avviare discussioni** su come proseguire queste politiche al termine dell'attuale quadro per il 2020. Il quadro all'orizzonte 2030 si prefigge l'obiettivo di aiutare l'UE ad affrontare diverse questioni, ad esempio:

- il passo successivo da compiere in vista dell'obiettivo di ridurre le emissioni di gas a effetto serra dell'80-95% rispetto ai livelli del 1990 entro il 2050;
- gli elevati prezzi dell'energia e la vulnerabilità dell'economia dell'UE ai futuri aumenti di prezzo, specialmente per petrolio e gas;
- la dipendenza dell'UE dalle importazioni di energia, spesso da regioni politicamente instabili;
- la necessità di sostituire e aggiornare le **infrastrutture energetiche** e fornire un quadro normativo stabile per i potenziali investitori;
- la necessità, per l'UE, di concordare un obiettivo di riduzione dei gas a effetto serra per il 2030 nel quadro del suo contributo agli imminenti negoziati per un **nuovo accordo globale sui cambiamenti climatici**.

Esso propone **nuovi obiettivi e misure** per rendere l'economia e il sistema energetico dell'UE più competitivi, sicuri e sostenibili. Comprende obiettivi di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra e di aumento dell'utilizzo delle energie rinnovabili e propone un nuovo sistema di *governance* e indicatori di rendimento.

In particolare, propone le seguenti azioni:

- l'impegno a continuare a **ridurre le emissioni di gas a effetto serra**, fissando un obiettivo di riduzione del 40% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990;
- un **obiettivo per le energie rinnovabili di almeno il 27%** del consumo energetico, lasciando la flessibilità agli Stati membri di definire obiettivi nazionali;
- una **maggiore efficienza energetica** attraverso possibili modifiche della direttiva sull'efficienza energetica;
- la **ristrutturazione del sistema di scambio di quote di emissione dell'UE** nell'ottica di includere una riserva stabilizzatrice del mercato;
- **indicatori chiave** relativi a prezzi dell'energia, diversificazione dell'approvvigionamento energetico, interconnessioni tra gli Stati membri

e sviluppi tecnologici oltre che **per misurare i progressi** compiuti in vista di un sistema energetico più competitivo, sicuro e sostenibile;

- un nuovo quadro di governance per la rendicontazione da parte degli Stati membri, sulla base di piani nazionali coordinati e valutati a livello dell'UE.

I ministri dell'ambiente, riuniti in sede di Consiglio il 6 marzo 2015, hanno discusso i preparativi per la **Conferenza di Parigi**. Il 13 luglio 2015 il Consiglio ha adottato una decisione che consente all'UE di ratificare l'emendamento di Doha, che istituisce il secondo periodo di adempimento del Protocollo di Kyoto. Il 12 dicembre 2015 è stato raggiunto nella Conferenza di Parigi un nuovo accordo sul clima nell'ambito dei negoziati della Convenzione Quadro della Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC). Alla conferenza sul clima che si era tenuta a Copenaghen nel 2009, i circa 200 paesi partecipanti si diedero l'obiettivo di limitare l'aumento della temperatura globale rispetto ai valori dell'era preindustriale. L'accordo di Parigi stabilisce che questo rialzo va contenuto "ben al di sotto dei 2 °C. A differenza di sei anni fa, in occasione della Conferenza tenuta a Copenaghen, quando l'accordo si era arenato, ora hanno aderito anche i principali Paesi inquinatori: oltre all'Europa, anche la Cina, l'India e gli Stati Uniti si sono impegnati a diminuire le emissioni. Nonostante gli entusiasmi per il raggiungimento dell'accordo, dobbiamo ricordare che non è stato fissato un calendario che porti alla progressiva sostituzione delle fonti energetiche fossili. La richiesta dei maggiori fronti ambientalisti era quella di arrivare a una riduzione del 70% rispetto ai livelli attuali intorno al 2050, e raggiungere le emissioni zero nel decennio successivo.

Capitolo 2

Produzione di energia ed efficienza energetica

2.1 Produzione e fonti energetiche

L'energia è indispensabile alla vita quotidiana, ma è necessario affrontare la grande sfida energetica rappresentata dai cambiamenti climatici, dallo sfruttamento delle risorse fossili e dalla dipendenza crescente dalle importazioni. La politica europea, come evidenziato nel precedente capitolo con i nuovi accordi ed impegni presi, intende dare avvio ad una nuova rivoluzione industriale finalizzata ad un'economia a basso consumo di energia più sicura, più competitiva e, soprattutto, più sostenibile. Le energie rinnovabili quali eolica, solare (termica e fotovoltaica), idraulica, geotermica e da biomassa, sono un'alternativa fondamentale ai combustibili fossili. Il loro impiego permette di ridurre non soltanto le emissioni di gas a effetto serra provenienti dalla produzione e dal consumo di energia, ma anche la dipendenza dell'Unione europea dalle importazioni di combustibili fossili, in particolare gas e petrolio. L'energia elettrica viene prodotta partendo da due tipologie di fonti principali:

- Non rinnovabili: ovvero quelle fonti destinate ad esaurirsi nel tempo diventando troppo costose o dannose per l'ambiente. Le fonti non rinnovabili sono: petrolio carbone gas naturale e uranio per le centrali nucleari.
- Rinnovabili: sono quelle fonti che per la loro natura non si esauriscono o si rigenerano nell'istante in cui vengono utilizzate, utilizzabili per un periodo di tempo indeterminato. Le fonti rinnovabili più vantaggiose e che non sono strettamente correlate con la conformazione del territorio sono quella solare, eolica, idroelettrica e biomassa. Le fonti rinnovabili inoltre non producono gas serra o, semmai, ne producono in piccole quantità.

Attualmente il sistema energetico mondiale è basato su grandi centrali che producono energia elettrica ad alta tensione, da distribuire poi ai vari utenti. Le grandi centrali in questione sono di tipo termoelettrico. Il loro funzionamento è basato sulla combustione

di idrocarburi (o carbone) che scaldando grandi masse d'acqua, producono vapore che alimenta delle turbine. Nonostante questo sistema centralizzato si sia consolidato nel tempo, attualmente non è certamente molto conveniente. Le centrali di questo tipo sprecano enormi quantità di energia poiché non tutto il calore prodotto dalla combustione viene tradotto in energia elettrica. Indipendentemente dal combustibile che viene usato, sia esso carbone, gas naturale o derivati del petrolio, meno della metà del calore prodotto viene tramutato in energia elettrica, intorno al 30-40%. Durante la distribuzione, dalla centrale agli utenti, viene perso un ulteriore 3.5% di energia. Gli sprechi possono essere ridotti se si accorciano le distanze tra i produttori ed i consumatori, diminuendo le perdite dovute alla rete. Inoltre il calore prodotto dalle centrali può essere utilizzato per il riscaldamento delle abitazioni, aumentando gli indici d'efficienza della centrale oltre 80%.

Attualmente la pluralità di sistemi con i quali è possibile produrre energia elettrica, consente di ridurre notevolmente gli sprechi e le emissioni di gas serra prodotte dalle centrali termoelettriche, soprattutto in uno scenario globale volto alla sostenibilità sia energetica che ambientale.

La produzione costituisce la prima fase della *filiera dell'energia elettrica*. In Italia avviene sfruttando principalmente combustibili fossili quali gas naturale, petrolio e carbone. Nelle centrali di produzione questi combustibili vengono bruciati per produrre vapore ad elevata temperatura e pressione. L'88% del gas naturale e quasi tutto il carbone che utilizziamo viene **importato** dall'estero, i principali paesi da cui provengono sono: Algeria, Libia e Russia per il gas e USA, Sud Africa, Australia, Indonesia e Colombia per quanto riguarda il carbone. Fino alla prima metà degli anni '90 i prodotti petroliferi, ed in particolare l'olio combustibile, rivestivano un ruolo prevalente nella generazione elettrica. Dalla seconda metà degli anni '90, in seguito all'effetto combinato di politiche ambientali mirate alla riduzione delle emissioni inquinanti, l'aumento del prezzo del petrolio e la maggiore efficienza dei cicli combinati rispetto alle caldaie tradizionali, si assiste ad una progressiva diminuzione dell'impiego di prodotti petroliferi nel settore termoelettrico e ad un contestuale incremento della quota di gas naturale. Nel mix di combustibili fossili un ruolo non irrilevante è ricoperto dal carbone con un contributo medio del 15,3% alla produzione termoelettrica nel periodo dal 1990 al 2013. In particolare, negli ultimi anni si osserva un incremento della quota di carbone che nel

periodo 2010-2013 passa dal 17.2% al 23.4% di energia elettrica di origine termica. I dati relativi al sistema elettrico (produzione, potenza installata, consumi, etc.) sono periodicamente pubblicati da TERNA [16]. La produzione lorda di energia elettrica nel periodo 1990-2013 è passata da 216.9 TWh a 289.8 TWh con un incremento del 33.6%. I consumi elettrici totali sono passati da 218.7 TWh a 297.3 TWh nello stesso periodo con un incremento del 35.9%. La potenza complessiva installata nel nostro paese è pari a **124'750 MW** ed è più che superiore a quella massima richiesta dal paese (Fonte: Terna 2013). La quota di elettricità importata rispetto ai consumi elettrici, come mostrato in Figura 2.1, presenta un andamento oscillante intorno alla media del 15.4 % con valori inferiori negli ultimi anni.

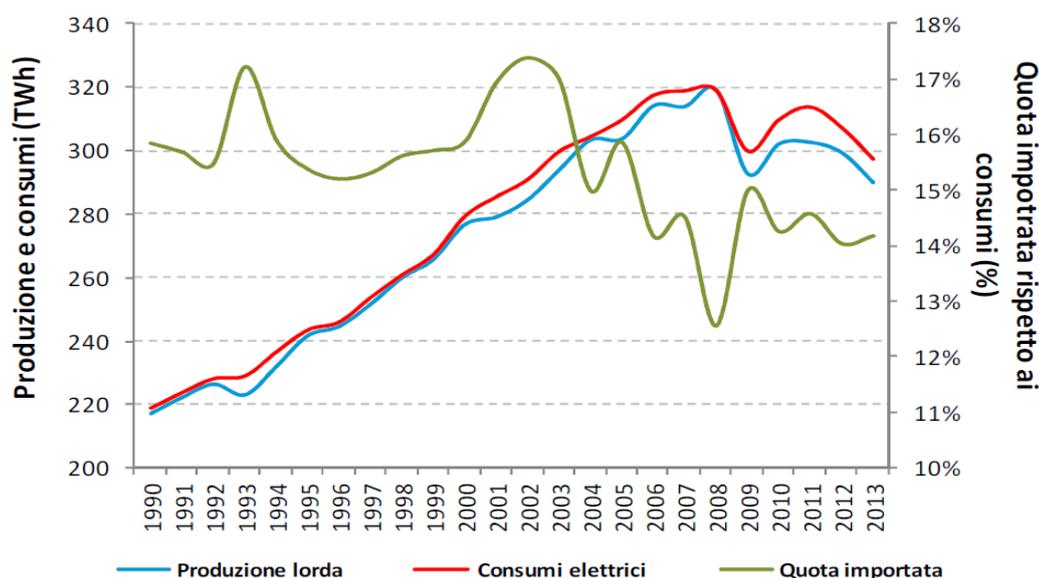


Figura 2.1. Andamento produzione, consumi e quota di elettricità importata in Italia dal 1990 al 2013.

I dati indicano che, dal 1990, l'energia elettrica di origine termica rappresenta la quota prevalente della produzione elettrica nazionale. Negli ultimi anni, a partire dal 2007, si osserva un costante declino dell'apporto di energia termoelettrica. La percentuale media della produzione lorda dal 1990 al 2013 è pari al 79.1% con un andamento piuttosto variabile. Il contributo della fonte idroelettrica presenta fluttuazioni legate al regime pluviometrico, con un valore medio pari al 17.4% dal 1990 al 2013. Le fonti non tradizionali quali eolico, solare, rifiuti, biocombustibili e biogas presentano una rapida crescita nell'ultimo decennio, come si evince dalla Figura 2.2. La produzione di origine

geotermica mostra un andamento in lieve crescita con una quota media pari a 1.7% della produzione elettrica lorda nazionale.

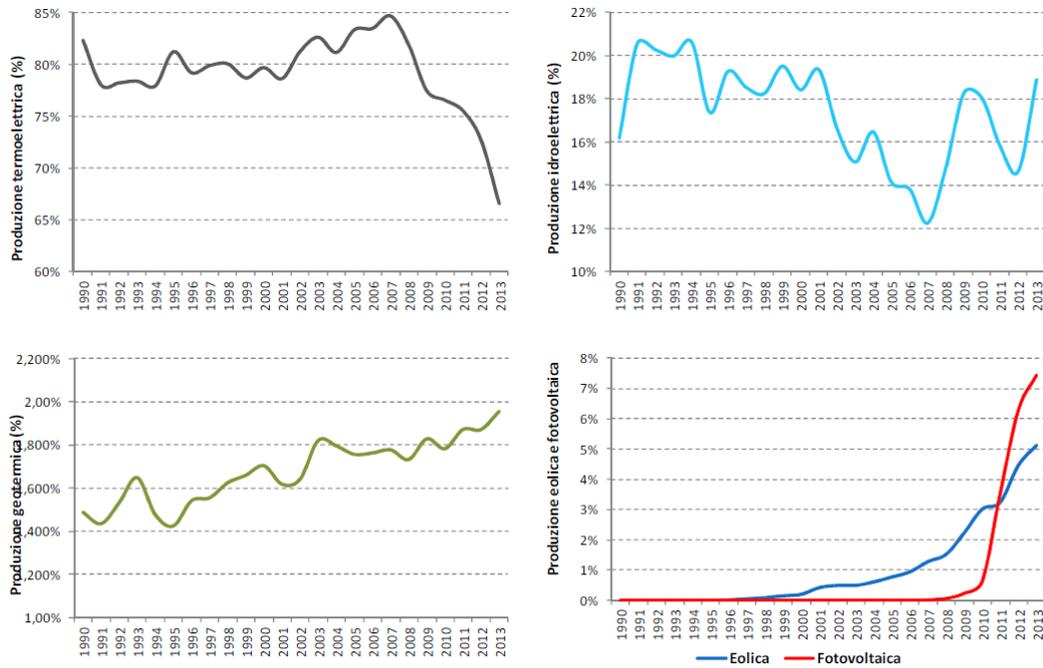


Figura 2.2. Quota della produzione elettrica lorda nazionale da differenti fonti.

Appare anche interessante l'andamento del contributo della produzione termoelettrica da biomasse (biomasse e rifiuti), come mostrato in Figura 2.3.

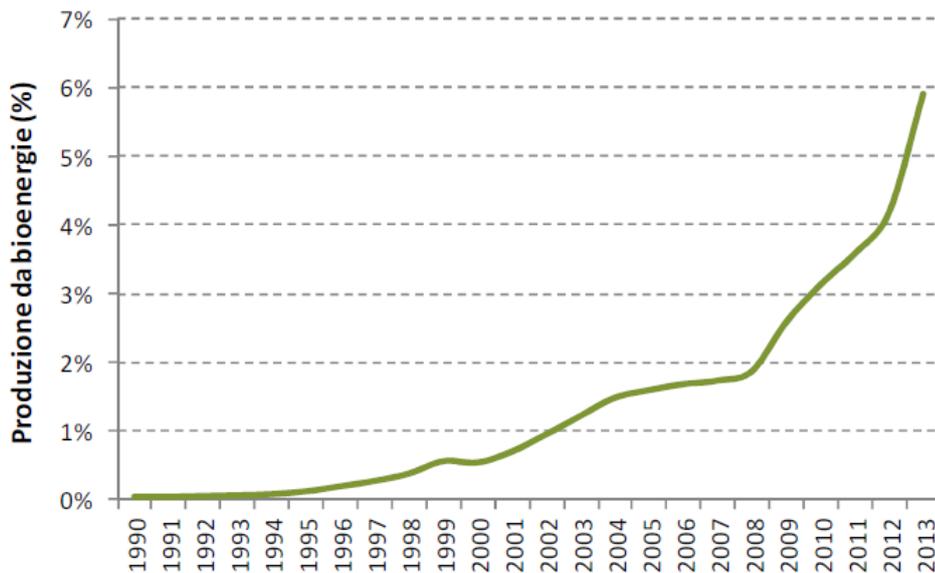


Figura 2.3. Andamento della quota di energia elettrica prodotta da biomasse.

La produzione totale di energia elettrica da fonti fossili rappresenta il 60.4% della generazione elettrica nazionale nel 2013 dopo aver toccato un picco del 82.6% nel 2007. Gli ‘altri combustibili’ rappresentano un gruppo estremamente eterogeneo di combustibili (Tabella 3.1) il cui contenuto energetico è rappresentato nel 2013 dal 65.8% da biogas e bioliquidi di diversa origine, biomasse, CDR e rifiuti biodegradabili, dal 22.3% da combustibili gassosi di sintesi o residui da processi chimici e per il restante 11.9% da rifiuti di diversa natura e da altri combustibili solidi. La produzione elettrica da fonti rinnovabili, al netto della produzione idroelettrica da pompaggi, è stata pari al 38.6% della produzione nazionale nel 2013. In Figura 2.4 sono riportate le quote della produzione elettrica lorda dalle rispettive fonti dal 1990 al 2013. Dal 1990 risulta evidente un costante incremento del gas naturale a scapito dei prodotti petroliferi. Inoltre a partire dal 2000 si nota la crescente quota degli altri combustibili non rinnovabili, costituiti in maniera sempre più rilevante dai rifiuti.

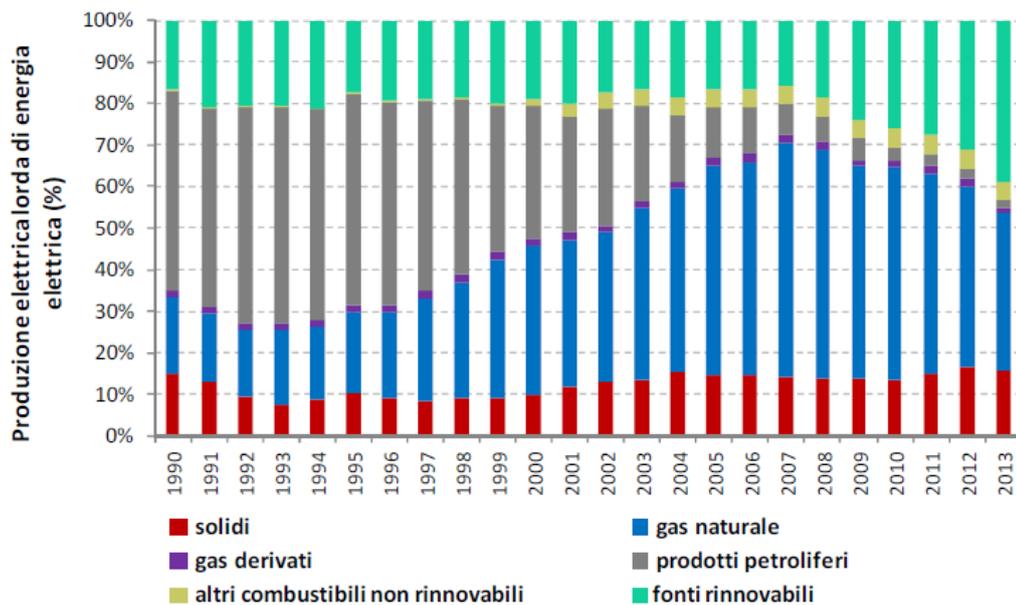


Figura 2.4. Andamento quota di produzione di energia elettrica per fonte.

I dati forniti a dicembre 2015 dal rapporto mensile di Terna sul sistema elettrico italiano fanno emergere una diminuzione del 51.1% della produzione idroelettrica, che passa dai 4'157 GWh registrati a dicembre del 2014 a 2'033 GWh. Anche la produzione eolica è passata dai 1'484 GWh registrati a dicembre 2014 a 676 GWh pari a un calo del 54.4%.

Il fotovoltaico registra invece una crescita della produzione del 16.9%. A dicembre 2015 l'energia fotovoltaica prodotta in Italia si è attestata sui 900 GWh a fronte dei 770 GWh registrati nell'anno precedente. La diminuzione della generazione da fonti rinnovabili è strettamente legata alla diminuzione della produzione da idroelettrico: 14.8 TWh in meno rispetto al 2014, cioè il 25%. Un dato che testimonia del forte peso dell'energia idraulica nel mix italiano e ovviamente anche tra le rinnovabili che, nel 2015, ha contribuito per il 14.2% al fabbisogno elettrico (era del 19.2% nel 2014) e per il 40.7% su tutta la produzione da rinnovabili mentre era del 49.3% nel 2014. Tra le rinnovabili cresce il **fotovoltaico**, che con una produzione di 24.67 TWh aumenta del 13% sul 2014 (+2.8 TWh). In Figura 2.5 è riportata l'evoluzione della produzione da fonti rinnovabili.

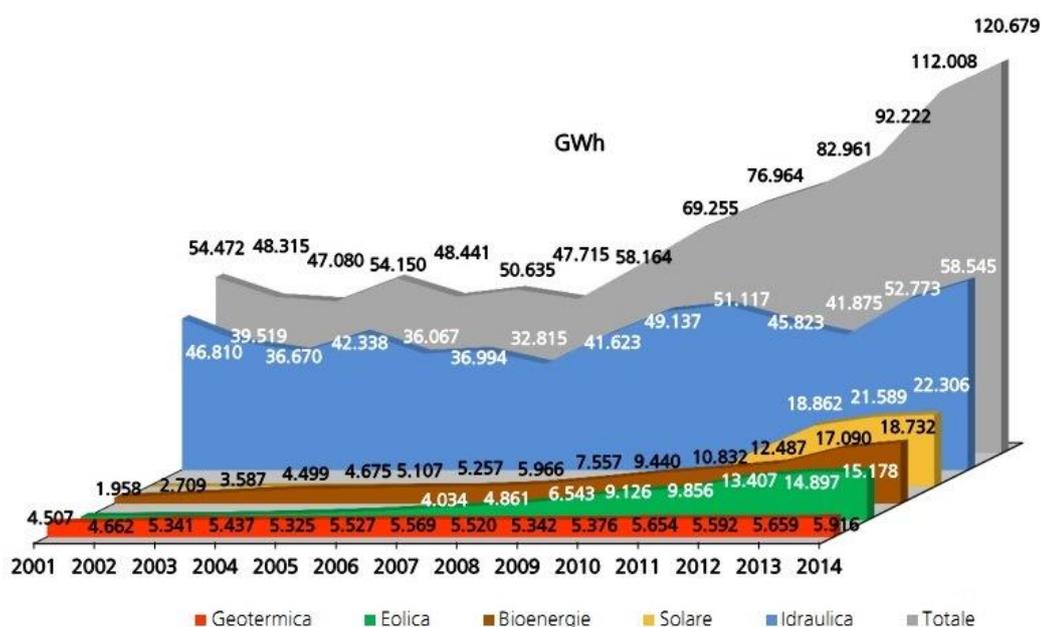


Figura 2.5. Evoluzione della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili.

La Figura 2.6 evidenzia il contributo delle singole fonti e relativo settore ai consumi totali di energia da fonti rinnovabili con riferimento agli anni 2013 e 2014. Questi ultimi dati sono forniti dal rapporto statistico del GSE, che è membro del sistema statistico nazionale (SISTAN). In particolare, il GSE partecipa con Terna alla produzione delle statistiche sull'energia elettrica in Italia ed è responsabile di rilevazioni sugli impieghi delle fonti rinnovabili per la produzione di calore e per i trasporti (immissione in consumo di biocarburanti) [17].

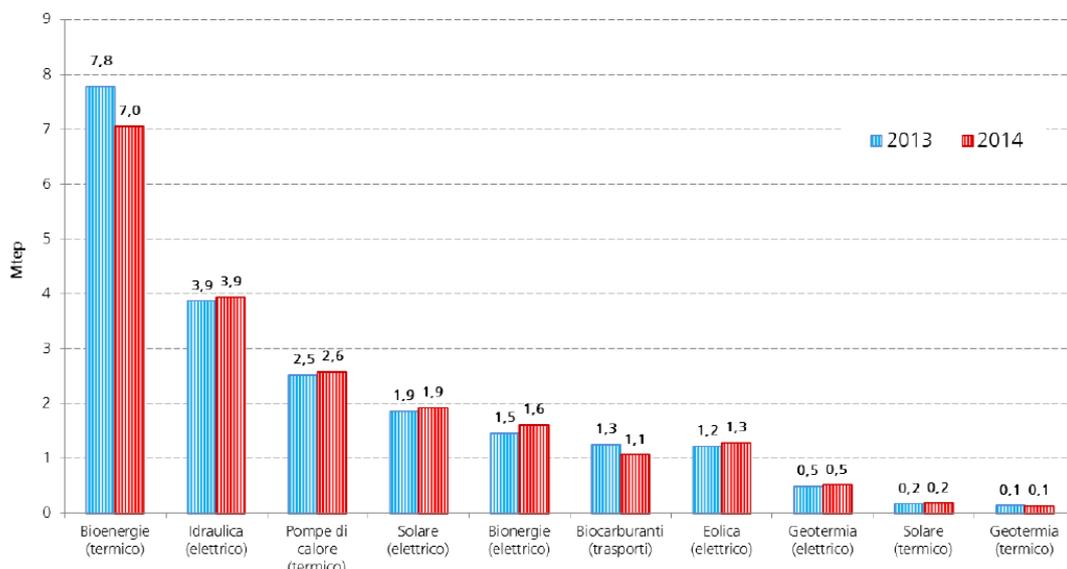


Figura 2.6. Contributi singoli settori ai consumi totali di energia da fonti rinnovabili (anni 2013-2014).

I dati rappresentati sono ricostruiti applicando i criteri di contabilizzazione fissati dalla Direttiva 2009/28/CE (normalizzazione produzioni idroelettrica ed eolica, conteggio dei soli bioliquidi e biocarburanti sostenibili).

2.2 Azioni di risparmio e di efficienza energetica

L'efficienza energetica rappresenta uno strumento chiave per affrontare politiche di carattere ambientale finalizzate alla razionalizzazione dei consumi e diversificazione delle fonti energetiche. A livello europeo, dal 2001, sotto l'impulso del Protocollo di Kyoto, l'Unione europea emana le Direttive che hanno lo scopo di armonizzare le legislazioni dei Paesi membri. Ne sono state prodotte diverse (Allegato B), atte a migliorare gli standard di efficienza energetica degli Stati membri dell'Unione Europea, incentivando l'utilizzo di fonti rinnovabili e scoraggiando anche economicamente, qualora ritenuto necessario, le attività energeticamente inefficienti e/o fonte di inquinamento. Tali direttive introducono un obbligo in termini di risultati finali, ma lasciano piena libertà agli Stati per quanto attiene i mezzi e le metodologie usate per il raggiungimento di tali obiettivi. Esse devono essere recepite entro un lasso di tempo che va da sei mesi a due anni [18].

Quanto al concetto di "efficienza energetica" è stata la Direttiva 2006/32/CE, relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici, a fornire un'esauritiva definizione. L'articolo 3, Definizioni, della Direttiva, nella sua versione originale, riporta «**energy efficiency**» come: "*a ratio between an output of performance, service, goods or energy, and an input of energy*". La versione in italiano della direttiva riporta per la stessa voce come «efficienza energetica»: "*il rapporto tra i risultati in termini di rendimento, servizi, merci o energia, da intendersi come prestazione fornita, e l'immissione di energia*".

Il concetto operativo di 'miglioramento dell'efficienza energetica' che si va consolidando presso gli operatori si riferisce alla possibilità di ottenere un livello di servizio finale uguale o superiore mediante l'impiego di una quantità di energia in ingresso inferiore.

Possiamo sintetizzare lo spirito delle direttive e delle indicazioni in merito all'efficienza energetica con l'adozione di tecnologie all'avanguardia tramite le seguenti azioni:

- miglioramento dell'efficienza energetica negli usi finali;
- contenimento delle perdite di energia;
- adozione di fonti rinnovabili.

Entro il 5 giugno 2014 tutti gli Stati membri dell'Unione Europea avrebbero dovuto recepire la direttiva 27 del 2012 sull'**efficienza energetica**. La direttiva impone anche l'obbligo da parte di tutti gli Stati Membri di **abbattere del 20% i consumi energetici** e fissa il dato atteso al 2020 in un "meno 368 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio", corrispondenti a 4279 terawatt/ora.

Per quanto concerne il nostro Paese la principale normativa che esplicita le maggiori misure da introdurre in tema di efficienza e risparmio energetico negli anni sono riportate nell'Allegato C [19].

Il Piano di Azione Nazionale per l'efficienza energetica (PAEE), rappresenta il documento programmatico per la definizione delle azioni da porre in atto per il raggiungimento degli obiettivi previsti dalla direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili entro il 2020. Come anticipato anche dalla direttiva, l'obiettivo per l'Italia è di coprire con l'energia prodotta da fonti rinnovabili il 17% dei consumi lordi nazionali. L'obiettivo deve essere raggiunto mediante l'utilizzo di energia prodotta da fonti rinnovabili nei settori: Elettricità, Riscaldamento-

Raffreddamento e Trasporti. Nell'elaborazione dei Piani di Azione Nazionale, gli Stati membri erano tenuti a seguire il modello stabilito, a norma dell'articolo 4 della direttiva 2009/28/CE, nella decisione della Commissione Europea del 30/06/2009. Questo ha garantito la completezza e la comparabilità delle informazioni contenute nei Piani dei diversi Stati Membri. La direttiva 2009/28/CE prevede inoltre che ogni 2 anni tutti gli Stati Membri trasmettano delle relazioni biennali redatte secondo uno schema definito pubblicato dalla Commissione Europea.

La direttiva 2012/27/CE è recepita attraverso il Decreto legislativo del 4 luglio 2014 n. 102 e rappresenta la guida nazionale per l'efficienza energetica. Questi i punti salienti:

- Stabilisce un quadro di misure per la promozione e il miglioramento dell'efficienza energetica, che concorrono al conseguimento dell'obiettivo nazionale di risparmio energetico, e si propone inoltre di rimuovere gli ostacoli all'efficienza negli usi finali dell'energia sul mercato.
- Viene quantificato l'obiettivo nazionale di riduzione dei consumi energetici, fissato a 20 Mtep sui consumi di energia primaria, ovvero 15.5 Mtep di energia per usi finali entro il 2020, conteggiati a partire dal 2010.
- Viene ribadito il ruolo fondamentale della Pubblica Amministrazione nella riduzione dei consumi, sia per il notevole potenziale di risparmio degli edifici di proprietà della stessa, sia per l'attività esemplare che svolge per la comunità civile; viene stabilito l'obbligo di conseguire la riqualificazione energetica degli immobili della Pubblica Amministrazione, dal 2014 al 2020, pari almeno al 3 % annuo della "superficie coperta utile climatizzata" o che realizzi un risparmio nello stesso periodo di almeno 0,040 Mtep.
- Viene stabilito che, mediante il meccanismo dei certificati bianchi, venga garantito un risparmio energetico di almeno il 60% dell'obiettivo di risparmio nazionale.
- Viene introdotto l'obbligo di eseguire diagnosi energetiche entro il 5 dicembre 2015 e successivamente ogni 4 anni, per le grandi imprese, definite come quelle imprese che occupano "più di 250 persone, il cui fatturato annuo supera i 50 milioni di euro o il cui totale di bilancio annuo

supera i 43 milioni di euro”; in caso di inottemperanza è prevista una sanzione amministrativa.

- Viene ribadita l'importanza della contabilizzazione individuale per aumentare il più possibile la quantità e la qualità delle informazioni disponibili per il consumatore, al fine di accrescere la sua consapevolezza e senso civico nei confronti del risparmio energetico.
- Viene istituito il "Fondo nazionale per l'efficienza energetica".

Anche il PAEE 2014 descrive gli obiettivi di efficienza energetica fissati dall'Italia al 2020, le misure attivate per il loro raggiungimento e i risultati raggiunti al 2012. In particolare tale Piano, come indicato nelle linee guida per la compilazione della Commissione Europea e in accordo con quanto espresso nella Strategia Energetica Nazionale (SEN), riporta gli obiettivi nazionali di riduzione dei consumi di energia primaria e finale, e specifica i risparmi negli usi finali di energia attesi al 2020 per singolo settore economico e per principale strumento di promozione dell'efficienza energetica. Nel marzo 2015, la Commissione europea ha aperto due procedure di infrazione contro l'Italia per il mancato recepimento di alcune norme contenute nelle direttive 2009/72/CE, 2009/73/CE e 2012/27/UE. Tra i 35 punti problematici si evidenzia la presenza di lacune nel decreto 102/2014, che aveva l'obiettivo proprio di recepire la suddetta direttiva europea del 2012. Questo denota qualche falla nel Piano di Azione Nazionale per l'efficienza energetica.

Per dare concretezza alle politiche di efficienza energetica e promuovere effettivi investimenti nel miglioramento dell'uso delle risorse nelle diverse attività di produzione e consumo, è necessario che gli obiettivi per il 2020 siano strettamente collegati ad obiettivi settoriali di miglioramento dell'efficienza energetica nei principali comparti di consumo dell'energia: industriale, terziario, agricoltura, trasporti e residenziale.

La diffusione dei miglioramenti di efficienza energetica, così come la promozione delle fonti rinnovabili, non dipende essenzialmente dall'incentivazione economica di tecnologie non competitive come è accaduto per il recente sviluppo delle rinnovabili elettriche ma richiede soprattutto:

- diffusione di tecnologie più competitive;

- un'informazione mirata per settore di intervento;
- misure di regolazione (standard, obbligatori, etc.);
- sviluppo di valutazioni statistiche sui miglioramenti dell'efficienza.

Bisogna pertanto escludere che si possano incentivare:

- repliche di impianti giunti al termine della vita utile;
- correzioni di gravi errori di progettazione;
- l'adeguamento alla normativa.

I fattori più significativi che determinano il fabbisogno energetico sono l'aumento della popolazione da un lato e l'incremento economico dall'altro, nonché la crescente industrializzazione e urbanizzazione nei Paesi emergenti e in quelli in via di sviluppo.

Il Rapporto della International Energy Agency World Outlook Energy 2015 [20], indica che l'urbanizzazione tende ad aumentare la domanda di moderne forme di energia, mentre le popolazioni si concentrano sempre di più in città e paesi, spingendo il tasso di urbanizzazione dal 53% del 2013 al 63% nel 2040. Tra il 2010 e il 2040 la popolazione mondiale passerà dagli attuali 7 a 9 miliardi di individui. Questo incremento avrà luogo esclusivamente nei Paesi emergenti e in quelli in via di sviluppo. Nello stesso lasso di tempo l'economia nei Paesi non OCSE aumenterà del 4.4% mentre nei Paesi OCSE solo del 2%. Nei Paesi non OCSE vi è l'enorme esigenza di recuperare terreno nello sviluppo economico e nello standard vitale con conseguente, inevitabile incremento del fabbisogno di energia. Nei Paesi non OCSE il fabbisogno energetico pro capite è considerevolmente inferiore rispetto ai Paesi OCSE. Se un americano consuma 7 tonnellate di energia l'anno, un indiano ne consuma solo 0.6. Sarebbe auspicabile trovare forme di energia più facilmente disponibili, ma il quadro che si prospetta, a livello mondiale, sulle forme di energia è mostrato in Figura 2.7.

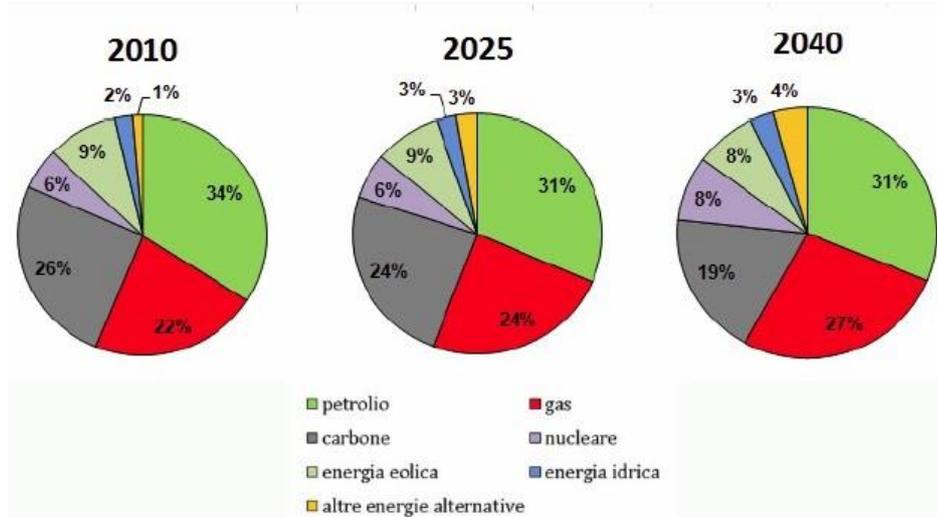


Figura 2.7. Quadro energetico a livello mondiale (Energy Outlook, su fabbisogno energetico primario).

Possiamo evidenziare che l'impiego di petrolio, gas naturale e carbone (ossia combustibili fossili) passerà dall'82% nell'anno 2010 al 79% nel 2025 e al 77% nel 2040 anche se tali combustibili continueranno a coprire più di un terzo del fabbisogno mondiale. Se nel 2010 la quota di gas metano si attestava al 22%, nel 2025 si attesterà al 24% e nel 2040 al 27%; la quota del carbone che nel 2010 era del 26%, nel 2040 sarà al 19%; la quota percentuale del petrolio che nel 2010 era del 34, nel 2025 e nel 2040 sarà del 31. Il petrolio continuerà, comunque, a essere la fonte energetica principale in tutto il mondo. L'aumento di gas metano da una parte e la diminuzione dei carboni dall'altra sono da considerarsi un fatto positivo poiché la combustione di gas sprigiona quantità minori di biossido di carbonio e di altre sostanze nocive e rappresenta, quindi, alternativa più pulita a carboni e petroli. Le energie alternative aumenteranno ma, ciò nonostante, nel 2040 rappresenteranno solo un modesto 4% del quadro energetico mondiale. Per quanto riguarda i singoli settori economici, il quadro che ne viene fatto è molto differenziato. Dal 2010 al 2040 il fabbisogno energetico aumenterà del 28% nel settore privato e commerciale, del 35% nel settore industriale, mentre nel settore dei trasporti vi sarà un incremento del 42%. In quest'ultimo settore il petrolio continuerà a svolgere un ruolo fondamentale. Nel 2010 la quota percentuale del petrolio era di 95, nel 2040 continuerà a essere di un considerevole 87. Quanto all'efficienza, se il 27% di efficienza energetica al 2030 che l'Europa si è data come obiettivo, viene da più parti considerato deludente, bisogna aggiungere che esso è calcolato sulla base del consumo di energia: un indicatore che confonde crisi ed efficienza

energetica. In Italia, per esempio, i consumi di energia sono diminuiti, probabilmente non perché siamo stati particolarmente bravi a rendere più competitive le nostre industrie, e più efficienti le nostre case e i trasporti, bensì per effetto della crisi economica: molte industrie hanno chiuso e quelle rimaste lavorano a ritmi ridotti, per cui si consuma meno energia. Va tuttavia ricordato che il secondo Rapporto 2014, International Energy Efficiency Scorecard dell' ACEEE (American Council for an Energy Efficient Economy), che ha analizzato 16 delle più grandi economie del mondo e che rappresentano oltre l'81% del prodotto interno lordo mondiale e il 71% del consumo globale di energia, pone l'Italia al secondo posto dopo la Germania nel ranking delle economie mondiali più avanzate in tema di efficienza energetica, guadagnando una posizione rispetto a due anni prima quando il nostro Paese si collocava al terzo posto dopo Germania e Regno Unito. Il sistema di classificazione ACEEE si basa sia sulla misura delle politiche messe in atto dai singoli Paesi come, ad esempio, la presenza di obiettivi di risparmio energetico nazionale o di standard di efficienza energetica per gli elettrodomestici, sia delle performance nazionali come il consumo di energia ed i risultati quantificabili. Per l'analisi sono stati utilizzati 31 parametri che fanno riferimento ai tre settori principali responsabili del consumo di energia in un Paese economicamente sviluppato quali edifici, industria e trasporti ed agli aspetti trasversali di utilizzo di energia a livello nazionale. Annoveriamo, altresì, i Decreti del Presidente della Repubblica 74/2013 sugli impianti termici e 75/2013 sulla certificazione energetica degli edifici. essi oltre una serie di obblighi e criteri da applicare, affidano alle Autorità competenti delle Regioni, in collaborazione con gli Enti locali, i controlli dell'efficienza energetica degli impianti termici, gli accertamenti e le ispezioni su tali impianti, con le indicazioni sui criteri da adottare per le verifiche delle operazioni. A titolo di esempio, la seguente Tabella 2.1 riporta la cadenza prescritta per i controlli di efficienza sugli impianti di climatizzazione ed in base alla tipologia.

Tipologia Impianto	Alimentazione	Potenza termica* (kW)	Cadenza controllo (anni)
Con generatore di calore a fiamma	Generatori alimentati a combustibile liquido o solido	10<P<100	2
		P≥100	1
	Generatori alimentati a gas, metano o GPL	10<P<100	4
		P≥100	2
Con macchine frigorifere/pompe di calore	Macchine frigorifere e/o pompe di calore ad azionamento elettrico e macchine frigorifere e/o pompe di calore ad assorbimento a fiamma diretta	12<P<100	4
	Pompe di calore a compressione di vapore azionate da motore endotermico	P≥100	2
		P≥12	4
Teleriscaldamento	Pompe di calore ad assorbimento alimentate con energia termica	P≥12	2
	Sottostazione di scambio termico da rete ad utenza	P>10	4
Cogenerazione	Microcogenerazione	Pel<50	4
	Unità cogenerative	Pel≥50	2

* P = Potenza termica utile nominale; Pel = Potenza elettrica nominale. I limiti degli intervalli sono riferiti alla potenza utile nominale complessiva dei generatori e delle macchine frigorifere che servono lo stesso impianto.

Tabella 2.1. Periodicità dei controlli di efficienza energetica per tipologia di impianto DPR 74/2013
(Fonte rapporto ENEA 2015).

In macroeconomia si usa da sempre un parametro: l'intensità energetica (il cui uso in Europa è su base volontaria), cioè il consumo di energia per unità di ricchezza prodotta. Essa viene quindi calcolata come unità di energia per unità di prodotto interno lordo (PIL). Il reciproco dell'intensità energetica è un indicatore dell'efficienza energetica ed economica del sistema produttivo nazionale in termini di ricchezza prodotta per unità di energia. La struttura economica di un Paese gioca, quindi, un ruolo importante nel determinarne la relativa intensità energetica. L'intensità energetica è un indicatore fortemente collegato allo sviluppo economico di un paese e l'efficienza energetica non è l'unica variabile che influenza l'intensità. Altri fattori, quali i cambiamenti nella struttura economica ed industriale, gli stili di vita e le condizioni climatiche, hanno un impatto sull'andamento di questo indicatore. Quindi una riduzione dell'intensità energetica non sempre e non solo indica un miglioramento dell'efficienza energetica. Il passaggio, ad esempio, da una struttura produttiva ad alto consumo di energia verso una a basso consumo di energia, a parità di condizioni, determina una riduzione dell'intensità energetica che non è associata ad un incremento dell'efficienza energetica.

2.3 Titoli di efficienza energetica

Il miglioramento dell'efficienza energetica viene certificato tramite l'emanazione da parte del GME (Gestore dei Mercati Energetici) di Titoli di Efficienza Energetica (TEE), detti anche "certificati bianchi". Si tratta di titoli negoziabili che certificano il conseguimento di **risparmi energetici negli usi finali di energia** attraverso interventi e progetti di incremento di efficienza energetica.

Il meccanismo dei certificati bianchi ha trovato applicazione in diversi Paesi membri dell'Unione Europea come una delle alternative più diffuse per l'incentivazione dell'efficienza energetica, sostenuta dalla Commissione europea nella vasta legislazione prodotta negli ultimi anni. In Gran Bretagna è stato adottato il primo esempio di tale schema già nel 2002, sebbene non imponesse obblighi vincolanti, seguito dalle esperienze di altri paesi europei, tra cui Italia e Francia.

Tale sistema è stato introdotto nella legislazione italiana dai decreti ministeriali del 20 luglio 2004. I certificati bianchi quantificano l'energia risparmiata in unità di misura "tep", mentre la legge 10/91 quantificava l'energia primaria risparmiata in termini di gigajoule (GJ). Tale quota di energia costituisce il "risparmio energetico" dell'operazione. Questo si configura come il risultato dell'intervento di miglioramento dell'efficienza energetica. Riportiamo la definizione che fornisce l'AEEG (Autorità per l'energia elettrica e il gas) nella delibera EEN 09/11: "*Risparmio lordo è la differenza nei consumi di energia primaria prima e dopo la realizzazione di un intervento o di un progetto, misurata in tonnellate equivalenti di petrolio*", intendendosi che il risparmio è da valutarsi a parità di condizioni, ossia a parità di prestazione del sistema oggetto dell'intervento rispetto alla condizione precedente l'intervento stesso. Il sistema dei certificati è un sistema complesso, come evidenzia lo schema riportato in Figura 2.8 [21].

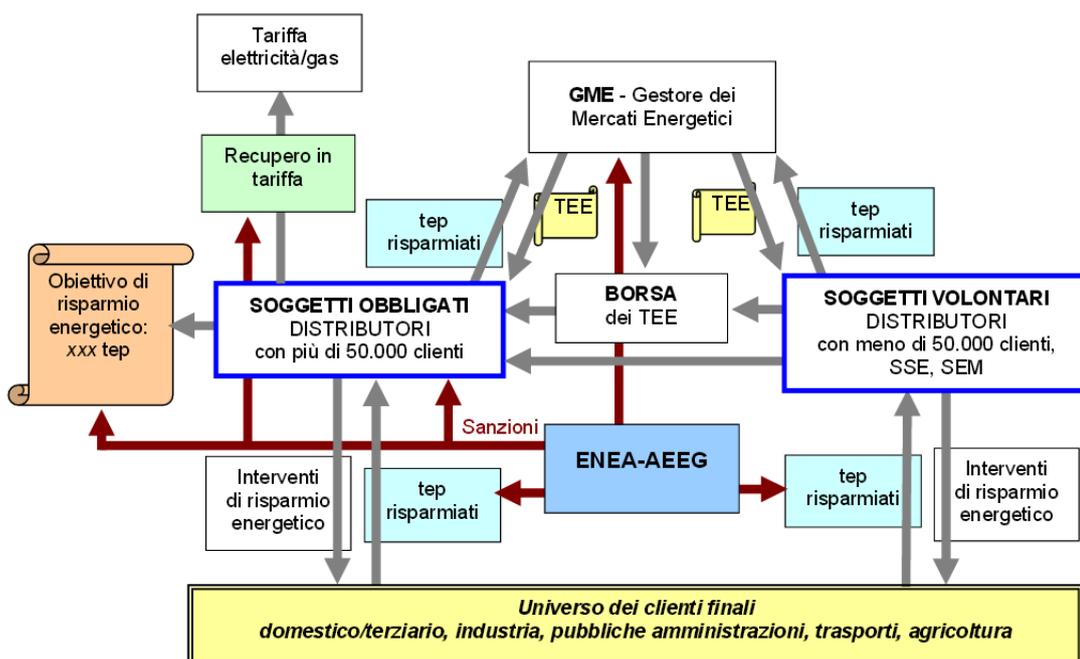


Figura 2.8. Processo di produzione e riconoscimento dei certificati bianchi (Fonte ENEA).

Riportiamo di seguito le principali caratteristiche di tale sistema (come indicato nella guida operativa redatta da ENEA):

- ✓ il Gestore dei Servizi Energetici (GSE) ha in carico l'attività di gestione, valutazione e certificazione dei risparmi correlati a progetti di efficienza energetica condotti nell'ambito del meccanismo dei certificati bianchi;
- ✓ il miglioramento dell'efficienza energetica va realizzato presso gli utenti finali;
- ✓ sono stabiliti obiettivi nazionali di incremento dell'efficienza energetica a carico di soggetti obbligati;
- ✓ le proposte per l'ottenimento dei titoli sono sottoposte ad un'istruttoria tecnico-amministrativa condotta da ENEA;
- ✓ è attivo un mercato dei suddetti titoli in base a contrattazioni bilaterali e accesso alla borsa dei TEE;
- ✓ è previsto un contributo tariffario a favore delle aziende di distribuzione obbligate a parziale copertura degli oneri sostenuti per il raggiungimento degli obiettivi;

- ✓ sono date sanzioni a carico dei soggetti obbligati nei casi di inadempienza.

I soggetti obbligati sono i grandi distributori di gas ed energia elettrica, intendendo quelle aziende con un numero di utenti serviti superiore a 50'000; essi devono ogni anno raggiungere un obiettivo in termini di numero minimo di TEE, stabilito da Decreto del Ministero dello Sviluppo. La quota parte di risparmio che devono conseguire le suddette imprese nell'anno x viene calcolata in base al rapporto tra l'energia elettrica o il gas erogato e il totale del rispettivo vettore energetico erogato a livello nazionale nell'anno $x-1$. Oltre ai soggetti obbligati, sono ammessi anche dei soggetti volontari alla partecipazione del meccanismo, che possono essere: distributori con meno di 50'000 utenti, società di servizi energetici (SSE), soggetti con energy manager (SEM), soggetti con energy manager volontario (EMV), soggetti che hanno implementato un sistema di gestione dell'energia conforme alla norma ISO 50001 (SSGE). Soggetti obbligati e volontari possono realizzare interventi di miglioramento dell'efficienza energetica, tali da realizzare dei risparmi che possano essere esibiti mediante opportune procedure al GSE, che valuterà se riconoscere o meno una quota di TEE conforme alla tipologia di intervento eseguito sulla base dei requisiti.

Il raggiungimento dei risparmi è verificato da parte del GSE, dopodiché si ha l'emissione di TEE da parte del GME, che consente ai soggetti obbligati di ottenere un rimborso in tariffa per gli interventi realizzati ed ai soggetti volontari di vendere tali titoli in borsa. I soggetti obbligati possono soddisfare gli obiettivi procurandosi TEE dalla borsa mediante acquisto o stipulazione di contratti bilaterali. Si è sanzionati in caso di mancato raggiungimento.

Per quanto concerne le società con obbligo di nomina dell'energy manager (art. 19 legge 10/91), la partecipazione al meccanismo dei certificati bianchi e l'erogazione degli stessi possono avvenire solo se è nominata questa figura per gli anni in cui si verifica l'obbligo (10'000 tep/anno per il settore industriale e 1'000 tep/anno per gli altri settori), pena la decadenza al diritto di emissione.

Esistono tre metodi di valutazione delle proposte di miglioramento dell'efficienza: standardizzato, analitico ed a consuntivo. Per descrivere tali metodi, è indispensabile introdurre taluni parametri:

- *Vita utile*: è introdotta dai due decreti 20/7/2004 per il gas e l'energia elettrica, corrisponde a:
 - 8 anni per gli interventi per l'isolamento termico degli edifici, il controllo della radiazione entrante attraverso le superfici vetrate durante i mesi estivi, le applicazioni delle tecniche dell'architettura bioclimatica, del solare passivo e del raffreddamento passivo;
 - 5 anni negli altri casi.
- *Vita tecnica*: definita nella Linea Guida (Art. 1 "Definizioni") come "il numero di anni successivi alla realizzazione dell'intervento durante i quali si assume che gli apparecchi o dispositivi installati funzionino e inducano effetti misurabili sui consumi di energia". Per interventi a consuntivo è possibile ricavarla da valori tabulati predisposti dalla Linea Guida; varia dai 5 ai 30 anni. L'importanza della vita tecnica sta nel fatto che i TEE vengono riconosciuti per i risparmi stimati o misurati che si conseguono per la sua intera durata, mentre vengono erogati nell'arco della vita utile.
- *Coefficiente di addizionalità "a"*: tiene conto di eventuali variabili di mercato che potrebbero far diminuire i risparmi conseguibili a causa dell'evoluzione tecnologica, normativa e di mercato. Esso è minore o uguale al 100 %, è già incluso nelle schede personalizzate e va stimato per le proposte a consuntivo.
- *coefficiente di durabilità "τ"*: è un parametro funzione di vita utile, vita tecnica e di un tasso di decadimento annuo dei risparmi δ pari al 2 %, per tenere conto della progressiva diminuzione dell'efficienza dell'intervento. Esso è così determinato:

$$\tau = \frac{RNI}{RNC} = 1 + \frac{\sum_{i=0}^{T-1} (1 - \delta_i)^i}{U} = 1 + \frac{RNA}{RNC} = 1 + \frac{\sum_{i=U}^{T-1} (1 - \delta_i)^i}{U} \quad (2.1)$$

dove:

- T rappresenta la *vita tecnica* espressa in anni;
- U rappresenta la *vita utile* espressa in anni;

- δ_i rappresenta il tasso di decadimento annuo dei risparmi e vale:
 - 0% per $0 \leq i \leq U-1$,
 - 2% per $U \leq i \leq T-1$;
- *RNI* è definito "risparmio netto integrale" e rappresenta il risparmio ottenibile nell'intera vita tecnica dell'intervento;
- *RNC* è definito "risparmio netto contestuale" ed è pari agli anni di vita utile dell'intervento;
- *RNA* è definito "risparmio netto anticipato" e costituisce il risparmio ottenibile negli anni in cui il decadimento annuo è diverso da zero, cioè da U a $T-1$.

Per gli interventi standardizzati o analitici i valori di τ sono tabulati. Per quanto riguarda gli interventi a consuntivo il proponente deve individuare nella Tabella 2 dell'EEN 9/11 il valore di τ della categoria in cui potrebbe rientrare il progetto che si vuole realizzare. Riportiamo i diversi casi che si possono presentare con proposte a consuntivo:

- a. il progetto comprende un solo intervento, facilmente associabile ad una categoria;
- b. Sono proposti più interventi facenti capo allo stesso progetto ma facilmente scorporabili e associabili alla categoria appropriata: in questo caso il calcolo avviene separatamente per ciascun intervento;
- c. Il progetto si può comporre di più interventi non scorporabili. Se uno risultasse avere un peso maggiore si potrebbe eseguire un unico calcolo del risparmio, tenendo conto dei rispettivi τ ma introducendo una media ponderata, valorizzando così l'intervento che porta un risparmio più elevato. Sarà però necessario introdurre un algoritmo che tenga conto dei differenti parametri che possono influenzare i due interventi, quali vita tecnica, utile e decadimento annuo.
- d. Qualora l'intervento non possa venire associato esattamente ad una categoria, bisogna individuare quella a cui più si avvicina correggendo eventualmente il τ , sempre al ribasso secondo una logica cautelativa.

Di seguito sono elencate le caratteristiche dei tre metodi di valutazione:

➤ ***Metodi di valutazione standardizzata***

Sono caratterizzati da schede tecniche specifiche, una per ogni intervento standardizzato e costituiscono la modalità di valutazione più semplice dal momento che il risparmio è funzione unicamente delle unità fisiche di riferimento (UFR). Ogni scheda prevede per lo specifico intervento un risparmio lordo annuo (RSL) che moltiplicato per le UFR restituisce il risparmio lordo definitivo. Moltiplicando quest'ultimo per i coefficienti τ e a si ottiene il risparmio netto che sarà tradotto in TEE. Tale valore rappresenta il risparmio attualizzato annuo che sarà assegnato per ogni anno della vita utile (5 anni o 8 anni per interventi su involucro edilizio).

➤ ***Metodo di valutazione analitica***

Sono caratterizzate da un algoritmo specifico che utilizza alcuni parametri legati al funzionamento e al consumo dell'apparecchiatura oggetto dell'intervento. Pertanto il proponente ha l'onere di trasmettere tali dati al GSE almeno una volta all'anno nell'arco della vita utile per poter giovare dei TEE corrispondenti. Oltre al τ , anche in questo caso viene utilizzato il coefficiente di addizionalità per calcolare il risparmio netto.

➤ ***Metodi di valutazione a consuntivo***

Una proposta valutata secondo tale modalità viene detta "proposta di progetto e programma di misura" (PPPM). La valutazione a consuntivo viene adottata necessariamente in mancanza di scheda tecnica standardizzata o analitica per l'intervento, ma anche su scelta del soggetto proponente soluzioni qualora vi sia l'opportunità di attestare risparmi maggiori rispetto alle altre schede, mediante programma di misura ad hoc. I metodi a consuntivo sono molto più complessi di quelli standard e analitici. Il D.M. 28/12/2012 ha introdotto la novità dei "grandi progetti" alternativa alla procedura PPPM, per interventi di particolare complessità e rilevanza che comportino ad un anno dalla loro implementazione risparmi anche potenziali, di almeno 35000 tep. Tale categoria di interventi richiede una valutazione diversa dalle modalità precedentemente elencate, che tiene conto anche di emissioni in atmosfera e grado di innovazione tecnologica. Tali parametri consentono di ottenere un incremento dei titoli

fino al 30 % per le emissioni e fino al 50 % per l'entità dei tep. Vi è la possibilità di accorpate più interventi sotto un unico progetto, semplificando le pratiche amministrative del meccanismo incentivante, in tutti i casi, tranne qualora si voglia accorpate interventi corrispondenti a metodi di valutazione eterogenei, da realizzare presso un numero di clienti superiore ad uno.

Le proposte presentate al GSE devono garantire dei risparmi minimi, pena il mancato diritto alla riscossione dei TEE, per cui vengono definite delle dimensioni minime per ogni tipologia di progetto. Queste soglie afferiscono al risparmio netto integrale, pertanto si deve tenere conto che il numero minimo di tep da conseguire potrebbe risultare molto minore come evidenziato nella Tabella 2.2.

Tipologia di progetto	Dimensione minima del progetto	
	TEE/anno - Con tau (2,65)	tep/anno - Senza tau
Standardizzato	20	7,5
Analitico	40	15
A consuntivo	60	23

Tabella 2.2. Dimensione minima di un progetto (Guida Operativa ENEA).

A seconda del tipo di energia risparmiata, i certificati bianchi si suddividono in differenti tipologie [22]:

- Titoli di tipo I, attestanti il conseguimento di risparmi di energia primaria attraverso interventi per la riduzione dei consumi finali di energia elettrica.
- Titoli di tipo II, attestanti il conseguimento di risparmi di energia primaria attraverso interventi per la riduzione dei consumi di gas naturale.
- Titoli di tipo III, attestanti il conseguimento di risparmi di forme di energia diverse dall'elettricità e dal gas naturale non destinate all'impiego per autotrazione.
- Titoli di tipo IV, attestanti il conseguimento di risparmi di forme di energia diverse dall'elettricità e dal gas naturale, realizzati nel settore dei trasporti e valutati con le modalità previste dall'articolo 30 del D.Lgs n. 28/11.

- Titoli di tipo V, attestanti il conseguimento di risparmi di forme di energia diverse dall'elettricità e dal gas naturale, realizzati nel settore dei trasporti e valutati con modalità diverse da quelle previste dall'articolo 30 del D.Lgs n. 28/11.
- Titoli di tipo II-CAR, attestanti il conseguimento di risparmi di energia primaria, la cui entità è stata certificata sulla base di quanto disposto dal decreto ministeriale 5 settembre 2011.
- Titoli di tipo IN emessi a seguito dell'applicazione di quanto disposto dall'articolo 8, comma 3, del decreto ministeriale 28 dicembre 2012 in materia di premialità per l'innovazione tecnologica.
- Titoli di tipo E emessi a seguito dell'applicazione di quanto disposto dall'articolo 8, comma 3, del decreto ministeriale 28 dicembre 2012 in materia di premialità per la riduzione delle emissioni in atmosfera.

Il valore dei certificati viene comunque influenzato dal fattore di conversione kWh/tep, che esprime la quantità di energia primaria necessaria a livello di sistema elettrico per produrre 1 kWh. La Delibera AEEG 03/08 ha fissato tale coefficiente pari a $0.187 \cdot 10^{-3}$ [tep/kWh] per l'energia elettrica, mentre per l'energia termica si assume il fattore $0.086 \cdot 10^{-3}$ [tep/kWh].

Il sistema dei certificati, sebbene complesso, ha favorito l'efficienza energetica, ma dai dati del rapporto annuale 2015 del GSE sul funzionamento del meccanismo emerge un andamento decrescente dei risparmi annuali certificati. Tale meccanismo ha premiato principalmente progetti che hanno richiesto un apporto iniziale di capitale ridotto, tempi di *payback* limitati e che hanno generato risparmi energetici unitari ridotti. In alcuni casi, il valore economico dei Titoli di Efficienza Energetica è stato in grado di coprire solo una parte dell'investimento richiesto, cosicché il contributo riconosciuto è risultato nettamente inferiore rispetto a quello garantito da meccanismi alternativi di incentivazione. Il ritorno economico generato dal meccanismo dei TEE non sembra risultare una variabile determinante per alcune decisioni di investimento. Tra le criticità del sistema dei TEE si annovera il criterio di addizionalità. L'incertezza della normativa derivante da una non sempre chiara definizione della soglia di addizionalità ha ridotto la propensione ad intraprendere investimenti di cui non si conosceva né l'ammontare di Tep

evitate e riconosciute, né i relativi tempi procedurali per l'approvazione dei progetti a consuntivo. Tra le barriere che impediscono lo sviluppo degli investimenti in efficienza energetica, l'AIE (Agenzia Internazionale per l'Energia) ha individuato ostacoli di natura finanziaria e la difficoltà di accesso al credito. Per quanto riguarda le barriere economico-finanziarie, è noto che il miglioramento dell'efficienza energetica implica quasi sempre un *trade-off* tra investimenti e spese correnti. Le imprese hanno bisogno di ricorrere al credito per eseguire gli interventi di risparmio energetico ma l'accesso al credito per questo tipo di investimenti spesso può risultare difficile. In particolare, il mercato industriale è attualmente in grande sofferenza ed incapace di fare investimenti. Nel complesso, per determinati interventi strutturati, i TEE hanno permesso di ridurre i tempi di ritorno dell'investimento, consentendo un miglior controllo del rischio di investimenti in tecnologie innovative. Le modifiche apportate al sistema negli ultimi anni e l'ampio spazio dedicatogli dalla nuova Strategia Energetica Nazionale testimoniano il ruolo da protagonista attribuito ai TEE, come meccanismo di incentivazione degli interventi di efficienza energetica.

2.4 Energia da fonti rinnovabili

Un primo passo per coniugare il crescente fabbisogno energetico con le sempre più pressanti istanze ambientali consiste nello **sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili (FER)** e nella **riduzione dei consumi**, possibile grazie all'utilizzo di materiali e tecnologie avanzate. Negli ultimi trent'anni, l'utilizzo e sviluppo delle fonti rinnovabili, ha visto concentrare l'attenzione maggiormente sulle fonti elettriche rispetto a quelle termiche, sia come attività di ricerca che come attività di sviluppo imprenditoriale. La motivazione principale è che in passato, in Italia, vi era una carenza strutturale di produzione elettrica. L'elettricità è stata intesa come forma più versatile e più nobile dell'energia e quindi era la forma più visibile e più vendibile alla collettività, infine, la mancanza di vincoli naturali di disponibilità della forma fotovoltaica ne ha dato maggiore valore liberatorio. L'Italia ha iniziato a sviluppare politiche da fonti rinnovabili negli anni '80, sia sul fotovoltaico che sull'eolico, curando anche gli aspetti imprenditoriali che però si sono fermati nella fase di abbondanza del petrolio degli anni '90. A metà degli anni 2000, si è ritenuto opportuno mettere degli stimoli più rilevanti. La combinazione di

incentivi generosi e della mancanza di sviluppo industriale ha favorito la realizzazione di nuovi impianti. Essi sono stati localizzati su tutto il territorio nazionale per un totale di 16.5 GW a fine 2012 (fonte Terna, 2012), mentre l'eolico si localizzava sull'Appennino meridionale per un totale di 8 GW a fine 2012 (fonte Terna, 2012). Gli incentivi erano previsti a carico dei consumatori, per cui il potere politico è stato molto lento nel reagire ai costi che venivano scaricati sulle tariffe. Questa incapacità di monitorare le dinamiche degli investitori internazionali è finita col portare ad una caduta nelle incentivazioni e vari tentativi di introdurre, retroattivamente, penalizzazioni economiche. Nel contesto italiano, le fonti rinnovabili hanno generato, sempre secondo i dati pubblicati da Terna nel 2012, 92 TWh pari a circa 1/3 del totale, producendo una caduta del costo dell'elettricità nelle ore di picco insieme ad una situazione di sovra capacità produttiva, dovuta sia a un eccesso di realizzazioni di impianti termoelettrici, anche dopo che si era reso evidente una stagnazione dei consumi globali, sia alla crisi economica, con delocalizzazione di alcune industrie pesanti. Su queste basi, l'evoluzione si affida alla capacità di promuovere gli usi efficienti dell'elettricità (pompe di calore), di integrare nel territorio le varie fonti, con due opzioni possibili: una, di tipo locale, puntando all'autoconsumo nei limiti del possibile, nella logica delle *smart grid* con accumuli distribuiti; l'altra, invece, attraverso la proposta europea di una super rete che trasferisca sulle lunghe distanze l'elettricità prodotta, in momenti diversi, da fonti diverse, diversamente localizzate, con accumuli concentrati di lungo periodo. Per capire l'importanza delle fonti rinnovabili termiche ai fini del raggiungimento degli obiettivi europei al 2020, occorre dire che esse incidono sulla parte più rilevante dei consumi finali di energia, quella dei consumi termici. L'importanza per il futuro della produzione di **energia termica** da fonti rinnovabili sta nel fatto che la maggior parte dell'energia viene consumata per produrre sistemi di raffreddamento e riscaldamento. In Italia il 45% dei consumi finali complessivi è legato ai consumi di **energia termica** (riscaldamento e raffreddamento) che superano il consumo di energia per i trasporti (34%) e rappresentano circa il doppio dei consumi tipicamente elettrici. Inoltre, il mercato dei consumi di energia termica, radicalmente diverso da quello del settore elettrico, presenta caratteristiche che rendono particolarmente efficaci, o addirittura convenienti, le misure di promozione delle rinnovabili in questo settore. Infatti, le rinnovabili termiche, in larga parte, sono già competitive e sono penetrate nel mercato senza incentivi, al contrario di quello che accade

per le rinnovabili elettriche. I dati forniti da Terna indicano che la fonte prevalente di energia termica è il gas naturale (63%) seguita dai prodotti petroliferi (gasolio, gpl, olii combustibili...) con il 17%, dai combustibili solidi (carbone) al 6% e da un 6% di consumo di calore derivato (cogenerazione). I consumi di energia rinnovabile per usi termici pesano poco più del 7% ma potrebbero essere in aumento. Un primo aspetto importante dell'**energia termica** è che i consumi finali avvengono tramite dispositivi o impianti per la produzione di calore installati presso gli utenti e non direttamente tramite una distribuzione di rete, come avviene per l'elettricità. Questo avrà un impatto positivo sull'indotto (produzione, vendita e manutenzione di tecnologie) che, nel caso delle termiche rinnovabili, avvantaggerà l'economia nazionale, visto che i dispositivi di cui sopra sono spesso prodotti dell'industria italiana articolata su diverse filiere (termoidraulica, termomeccanica, agroindustriale), che potrebbe così beneficiare delle ricadute degli incentivi, a differenza di quanto accade con le rinnovabili elettriche, basate per la maggior parte su componenti provenienti dai mercati esteri. La diffusione dei consumi termici, alimentati da fonti rinnovabili, è determinata dalle scelte dei consumatori, famiglie e imprese, e non dalle imprese di produzione di energia come nel settore elettrico. Nonostante questi elementi, le potenzialità di penetrazione delle rinnovabili nei consumi termici sono state costantemente sottostimate dalle previsioni governative, mentre le relative politiche di promozione sono state sempre ritardate o subordinate rispetto a quelle per le rinnovabili elettriche. Anche nell'ambito della Strategia Energetica Nazionale (SEN), pur riconoscendo taluni errori di valutazione compiuti dal Piano di azione nazionale per le energie rinnovabili, non si muta indirizzo e si confermano le previsioni dei consumi di FER termiche per il 2020 ad un valore di 11 Mtep, con una scelta rinunciataria rispetto alle potenzialità effettive del settore.

2.4.1 Energia e Termodinamica

Perché esiste il problema energetico e perché è connesso ai problemi ambientali? In base al primo principio della termodinamica il problema energetico non dovrebbe esistere: l'energia può essere convertita da una forma all'altra, ma si conserva.

Esiste però il secondo principio! La perdita di qualità energetica connessa ad ogni trasformazione reale è rappresentata dall'**aumento di entropia** del sistema che compie la

trasformazione. Il secondo principio introduce il concetto di qualità dell'energia. Una misura della qualità dell'energia termica, la più immediata, è data dalla sua **temperatura**. Gli **usi finali** dell'energia e le **fonti** energetiche vengono normalmente classificati come:

- **a bassa** temperatura (sotto i 100°C), quali il riscaldamento di acqua sanitaria ed ambienti;
- **a media** temperatura ($150 - 250^{\circ}\text{C}$), richiesta da processi produttivi, sterilizzazioni, cottura di cibi, etc.;
- **ad alta** temperatura ($1500 - 2000^{\circ}\text{C}$ ed oltre) utilizzabile per produrre lavoro meccanico, dove il lavoro meccanico stesso e l'energia elettrica sono ascritti a questa ultima categoria.

Nel bilancio energetico nazionale italiano, gli usi finali a bassa temperatura, all'inizio degli anni '80, costituivano circa il 32% del totale. I soli usi finali cosiddetti "domestici", per la quasi totalità a bassa temperatura, costituivano un quarto della domanda totale di energia primaria. Ad essi vanno aggiunti gli usi terziari ed industriali sempre a bassa temperatura. Si evince, pertanto, che gli usi finali a bassa temperatura non sono affatto trascurabili da un punto di vista quantitativo. Tanto maggiore poi è la temperatura, tanto maggiore è la convertibilità in lavoro dell'energia disponibile a quella temperatura. Ma non esiste solo il ciclo di Carnot: anche una differenza di pressione, di volume specifico o di energia potenziale o cinetica tra ingresso ed uscita in un sistema aperto, possono produrre lavoro.

È necessario generare energia senza grosse dispersioni in termini di entropia, o meglio, è necessario reimmettere l'energia nuovamente nel sistema invece che dissiparla sotto forma di calore. Bisogna quindi istituire processi che consentano di recuperare il calore prodotto dai cicli termodinamici (attualmente esistono i dispositivi cosiddetti *energy harvester*).

Un indicatore più completo della qualità dell'energia è dato dalla grandezza **exergia**. Essa è definita come la frazione di una data quantità di energia utilizzabile in forma di lavoro. L'exergia quantifica il potenziale di energia e materia da disperdere nel corso della loro diffusione nell'ambiente, mentre l'entropia è il concetto che quantifica lo stato di dispersione e fino a che punto l'energia e la materia in questione vengono disperse. Il metodo dell'analisi exergetica, basato sulla combinazione della prima e della seconda

legge della termodinamica, si presenta come l'anello mancante che serviva per raggiungere la comprensione e la visualizzazione dei flussi energetici. L'exergia di un sistema è il massimo lavoro meccanico che può essere estratto da tale sistema, quando lo si porta in equilibrio con l'ambiente di riferimento (che si ipotizza mantenga temperatura, pressione, composizione chimica costante durante il processo). Per il primo principio della termodinamica l'energia dell'universo rimane costante, pur passando da una forma all'altra. Tuttavia non tutte le forme di energia possono essere ugualmente sfruttate per produrre lavoro utile: il concetto di exergia è stato formulato proprio per fornire una valutazione qualitativa dell'energia. Al contrario dell'energia, l'exergia dell'universo non si conserva, bensì si riduce in ogni trasformazione irreversibile, in maniera direttamente proporzionale all'incremento di entropia dell'universo.

L'exergia di un sistema può essere così espressa:

$$E_x = E - T_a S \quad (2.2)$$

dove: E_x è l'exergia, E l'energia, T_a la temperatura ambiente ed S l'entropia.

Per fare un esempio consideriamo una caldaia a metano: l'energia chimica contenuta nel metano potrebbe essere impiegata per produrre energia meccanica attraverso un motore, mentre la stessa quantità di energia chimica, una volta avvenuta la combustione e che si è trasformata in calore per scaldare l'acqua, potrà essere impiegata per produrre una minore quantità di energia meccanica. Evidentemente nella caldaia è avvenuta una "degradazione" dell'energia, ossia una riduzione di exergia ed un aumento di entropia. Nel valutare l'efficienza con cui avvengono le conversioni energetiche, è importante valutare l'exergia, e gli sprechi da evitare sono quei fenomeni di degrado rappresentati da riduzioni del valore di tale grandezza. Un criterio per valutare questa efficienza, o appropriatezza dell'uso delle risorse, è il calcolo del rendimento termodinamico del secondo ordine (rendimento isoentropico), definito come rapporto fra il lavoro ottenuto nella trasformazione reale in esame e lavoro ottenibile se la trasformazione in questione fosse ideale (priva di effetti dissipativi) o, ancora meglio, il **rendimento exergetico** del processo. Esso è definito come il rapporto tra l'exergia ottenuta alla fine del processo e l'exergia spesa/utilizzata/disponibile all'inizio dello stesso. È evidente che quando si impiega una fonte energetica ad alta temperatura, per un utilizzo che richiede una bassa temperatura, il rendimento exergetico è basso. A parità di energia termica fornita, una

sorgente più calda fornisce una maggiore quantità di exergia, come si evince dall'espressione:

$$E_x = Q \left(1 - \frac{T_a}{T_{sorgente}} \right) \quad (2.3)$$

La domanda di energia è costituita dagli usi finali della stessa (calore, energia meccanica, luminosa) mentre l'offerta è costituita dalle fonti. Entrambe possono essere classificate in base alla qualità dell'energia.

Adeguare qualitativamente l'offerta alla domanda significa eseguire interventi di razionalizzazione energetica, dove per razionalizzazione si intende l'adeguamento delle forme di energia disponibili agli utilizzi finali più idonei, ed il suo scopo è la conservazione della qualità dell'energia. Questo si traduce generalmente in una minor domanda di energia primaria, in particolare di quella fornita da fonti non rinnovabili.

2.4.2 Scambio termico

Con l'analisi termodinamica si può determinare la quantità di calore trasferito da un sistema all'altro, senza alcuna informazione sul tempo impiegato dal processo. Nei problemi pratici, però, risulta necessario conoscere la rapidità del processo di scambio termico, a volte più della stessa quantità di calore trasferito. Nel dimensionamento di una caldaia, ad esempio, si deve conoscere in quanto tempo una determinata quantità di calore deve essere fornita, e non il valore numerico della stessa: infatti parliamo di potenza della caldaia. Tuttavia, una volta nota la potenza termica scambiata, con una semplice operazione di integrazione possiamo determinare la quantità totale di calore trasferito in un dato intervallo di tempo. Nella tecnologia moderna i processi di scambio termico hanno assunto un'importanza sempre maggiore. Tutti i componenti dei sistemi di generazione di potenza, dalle centrali termoelettriche ai motori delle automobili, implicano un trasferimento di calore da un mezzo all'altro. In campo ambientale i meccanismi di scambio termico hanno risvolti altrettanto rilevanti: basti pensare a quelli che regolano il clima, o a quelli che governano la trasmissione del calore di un edificio con l'ambiente circostante, di cui è fondamentale tenere conto durante la fase di progettazione dell'edificio stesso. I processi di scambio termico sono generalmente classificati secondo tre modalità, anche se in pratica non si presenta mai una sola

modalità, ma solitamente si ha la combinazione di almeno due di esse. Si tende però di solito ad individuare il tipo di scambio predominante, trascurando, a seconda dei vari fattori (dei quali sicuramente molto rilevante è la temperatura), le altre modalità di trasmissione del calore presenti. Prima di occuparci di tali modalità dobbiamo evidenziare che, in generale, lo scambio termico è un **fenomeno non lineare**, non esiste cioè una semplice relazione di linearità fra energia scambiata dai corpi coinvolti nel processo e temperature dei corpi, tant'è che, ad esempio, in un fenomeno di irraggiamento il calore scambiato è proporzionale alla quarta potenza delle temperature dei corpi. Per studiare il trasferimento di calore si tende, sotto a sufficienti ipotesi, ad esprimersi in termini di linearità del fenomeno, con relazioni dedotte dalla generalizzazione dei risultati sperimentali. Tale semplificazione si applica a tutte e tre le modalità di scambio termico, per ognuna delle quali esiste uno specifico coefficiente di proporzionalità fra energia scambiata e temperatura. I fenomeni fisici, connessi con la trasmissione del calore, presentano una certa complessità e la formulazione del modello analitico-matematico richiede il ricorso ad ipotesi e schematizzazioni semplificative, con equazioni empiriche che derivano dalla correlazione di dati sperimentali. come si è già detto, nei processi di trasmissione, piuttosto che la quantità di calore trasmessa, interessa la quantità di calore trasmessa nell'unità di tempo e la distribuzione delle temperature in funzione del tempo. Il riferimento alla variabile tempo consente una classificazione generale di suddetti processi secondo tre gruppi diversi [23]. Nel primo gruppo sono classificati i processi di trasmissione nei quali il flusso del calore non varia nel tempo: si tratta di processi stazionari o a regime permanente. Sono i processi più comuni, come quello rappresentato dal passaggio di calore dai prodotti della combustione ai tubi di una caldaia a vapore o quello da un fluido all'altro in uno scambiatore di calore. In questi esempi le condizioni del fluido evolvente non variano nel tempo ed il flusso termico rimane costante. Nel secondo gruppo sono classificati i processi di trasmissione del calore per i quali la temperatura non solo varia da punto a punto del sistema, ma varia con il tempo anche in uno stesso punto: il flusso di calore non è costante ma è funzione del tempo. Questi processi sono detti in regime transitorio o variabile come, ad esempio, il periodo di avviamento di motori, turbine, caldaie o il periodo di variazione del carico negli impianti di riscaldamento e condizionamento dell'aria. Il periodo di funzionamento in condizioni transitorie è tuttavia limitato a brevi intervalli, con un'importante eccezione rappresentata

dal raffreddamento delle derrate alimentari in un ambiente di conservazione a temperatura controllata. Il terzo gruppo di processi di trasmissione del calore è quello detto a regime periodico. Esso si ha in sistemi le cui condizioni, in un dato punto, variano secondo un ciclo determinato ritornando periodicamente alle condizioni iniziali, come, ad esempio, negli impianti di condizionamento il cui carico varia in funzione dei cambiamenti quotidiani ed annuali della temperatura. Le modalità di trasmissione del calore sono: conduzione, convezione e irraggiamento. La **conduzione termica** è il processo che si attua in un mezzo solido, liquido o aeriforme nel momento in cui, posti a contatto, a causa di una differenza di temperatura, si ha un trasferimento di energia cinetica da una molecola a quella adiacente che possiede una velocità di vibrazione minore, essendo la velocità di vibrazione delle particelle indice della temperatura del corpo. Si ha in questo modo un trasferimento di energia, sotto l'influenza del gradiente di temperatura (variazione della temperatura lungo una direzione), senza uno spostamento di particelle: il mezzo in cui avviene conduzione rimane nella condizione di quiete. L'interazione che provoca conduzione termica in sostanze liquide o gassose è identificata da collisioni tra molecole durante il loro moto casuale; quella che provoca conduzione termica in solidi è invece identificata da vibrazioni delle molecole all'interno del reticolo e al trasporto di energia da parte degli elettroni liberi. La quantità di calore che si propaga per conduzione tra due regioni di un corpo è funzione della geometria, delle caratteristiche del corpo (buon conduttore o cattivo conduttore) e della differenza di temperatura tra le due regioni interessate da conduzione. In termini molto esemplificati possiamo dire che la potenza termica trasmessa per conduzione attraverso uno strato di spessore costante l , tra due corpi a temperature differenti t_1 e t_2 è espressa da:

$$Q = \lambda A \frac{t_2 - t_1}{l} \quad (2.4)$$

dove λ rappresenta la **conduttività (o conducibilità) termica specifica** del materiale espresso in $W/[m \text{ K}]$ (oppure $W/[m \text{ }^\circ\text{C}]$) ed A l'area della superficie normale alla direzione di trasmissione del calore. La conduttività dipende in generale dalla temperatura, dalla pressione e dalla natura del materiale. Essa si determina di solito sperimentalmente ed i metodi usati sono basati sulla misura del flusso termico, dell'area attraversata da suddetto flusso e del gradiente di temperatura. Mentre nella maggior parte dei casi, l'effetto della pressione è trascurabile, λ è sempre funzione della temperatura, e

varia linearmente con essa. Per quanto riguarda la dipendenza della conduttività dalla temperatura, è stato dimostrato sperimentalmente che essa può essere espressa con sufficiente approssimazione dalla seguente relazione lineare:

$$\lambda = \lambda_0[1 + b(t - t_0)] \quad (2.5)$$

dove λ_0 è la conduttività alla temperatura t_0 , b una costante determinata sperimentalmente, cioè la variazione di λ_0 per grado centigrado. Tramite i valori della conduttività termica è possibile classificare i materiali tra *isolanti termici*, che hanno solitamente $\lambda < 1$, e *conduttori termici*. Sono detti isolanti quei materiali che ostacolano il passaggio del flusso termico. L'isolante migliore è l'aria, che ha $\lambda_{\text{aria}} = 0.024 \text{ W/m K}$. La lana di vetro, pur avendo un λ non troppo piccolo è utilizzato come isolante. Questo materiale ha la proprietà di trattenere nel suo interno aria, che funge da isolante. I conduttori migliori sono i metalli e le loro leghe, ad esempio il rame ha $\lambda_{\text{Cu}} = 395 \text{ W/m K}$ e l'alluminio $\lambda_{\text{Al}} = 210 \text{ W/[m K]}$.

Come già detto, quando si parla di scambio termico ciò che conta non è la quantità di calore scambiato, ma la rapidità con cui avviene tale processo. In questo senso si introduce una grandezza vettoriale, detta flusso termico specifico (oppure densità di flusso termico indicata con \vec{q} W/m^2). Essa rappresenta l'energia che attraversa la superficie nell'unità di tempo. Per illustrare come tale vettore \vec{q} si orienta nello spazio durante il processo della conduzione possiamo considerare un solido caratterizzato da una distribuzione di temperatura T (campo termico) così espressa:

$$T = T(x, y, z, \tau) \quad (2.6)$$

ed al suo interno una superficie che, all'istante τ , abbia in ogni suo punto una temperatura costante. Una tale superficie è detta superficie isoterma e può essere considerata come la superficie di separazione tra i punti del corpo ad una temperatura maggiore e i punti del corpo a una temperatura minore. Tra i punti appartenenti ad una stessa superficie isoterma non vi è trasferimento di calore e, poiché, nessun punto del solido può avere contemporaneamente due diverse temperature, due diverse linee isoterme non possono intersecarsi. Le traiettorie secondo le quali il calore si trasmette per conduzione all'interno del solido sono dette linee di flusso. Tali linee sono normali alle superfici isoterme in ogni loro punto, poiché nel caso una linea risultasse obliqua ad una superficie isoterma anche

in un solo punto, si avrebbe una componente parallela al piano tangente in quel punto alla superficie isoterma, in contrasto con l'evidenza sperimentale che il calore si trasmette solo tra punti a temperatura diversa. Il vettore \vec{q} si mantiene sempre tangente alle linee di flusso, ossia in ogni punto del corpo esso possiede una direzione normale alla superficie isoterma passante per quel punto, ed è diretto da zone a temperatura maggiore a zone a temperatura minore, in accordo con il II Principio della Termodinamica, per cui calore fluisce da regioni più calde a regioni più fredde. Questo è sintetizzato dalla legge di *Fourier* che è alla base dello studio della trasmissione di calore per conduzione. Essa permette di linearizzare il fenomeno della conduzione per cui, per unità di superficie, possiamo affermare che il flusso termico specifico è proporzionale al gradiente termico della temperatura, ossia alla variazione di temperatura per unità di lunghezza secondo la relazione:

$$\vec{q} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}(T)} \quad (2.7)$$

Essa esprime la proporzionalità tra la densità di flusso di calore e il gradiente di temperatura, dove, come già detto:

- $T(x, y, z, \tau)$ rappresenta il campo scalare delle temperature all'interno di un volume \mathbf{V} di un corpo dove avviene conduzione; questo campo è variabile sia nello spazio che nel tempo. La sua derivata spaziale rappresenta un vettore che in ogni punto è diretto verso le temperature crescenti. Il vettore gradiente è così perpendicolare alle superfici isoterme, orientato nel verso dell'isoterma maggiore. Il suo modulo è proporzionale alla velocità di variazione della temperatura nello spazio: quanto più le isoterme sono fra loro vicine, tanto più alto sarà il gradiente e quindi, per la legge di *Fourier*, tanto più grande sarà lo scambio termico.
- $\text{grad}(\quad)$, indicato anche con ∇ (nabla), è un operatore vettoriale che trasforma una funzione delle coordinate di un punto in un vettore, le cui componenti cartesiane sono le derivate parziali della funzione in quel punto.

Più precisamente, il vettore gradiente di temperatura, in relazione ad un sistema di riferimento cartesiano tridimensionale (assumendo i, j, k , quali versori), è dato da:

$$\overrightarrow{\text{grad}(T)} = \frac{\delta T}{\delta x} \vec{i} + \frac{\delta T}{\delta y} \vec{j} + \frac{\delta T}{\delta z} \vec{k} \quad (2.8)$$

Tale vettore, che ha come componenti le derivate spaziali del campo termico scalare $T(x,y,z,\tau)$, è in ogni punto del corpo diretto verso le temperature crescenti. Questo giustifica la presenza del segno meno nella legge di *Fourier*, in quanto il vettore flusso termico specifico deve avere una direzione concorde al verso in cui fluisce il calore, ossia verso le temperature decrescenti. Se consideriamo ad esempio un corpo avente inizialmente una temperatura maggiore nella zona più interna rispetto alla superficie, visto che per conduzione abbiamo un flusso di calore diretto dall'interno verso l'esterno, in ogni punto del corpo il vettore risulta essere diretto verso la superficie esterna del corpo, con una direzione normale in ogni punto alla rispettiva superficie isoterma. Il suo modulo è tanto maggiore quanto maggiore è la rapidità con cui il calore fluisce nel corpo, ossia quanto più velocemente varia la temperatura.

Il termine λ (nella 2.7) rappresenta, come detto in precedenza, le proprietà fisiche del materiale e ne caratterizza il comportamento. La legge (2.7) viene utilizzata nei problemi di trasmissione del calore quale descrizione del campo termico di un corpo, sebbene tale legge sia sufficiente solo nel caso in cui si operi in regime stazionario, ossia se si elimina la dipendenza dal tempo del campo termico del corpo. Qualora dovesse essere determinata la distribuzione delle temperature in funzione del tempo, allora la (2.7) non sarebbe sufficiente. La dinamica della conduzione, in tal caso, viene descritta da una equazione differenziale del secondo ordine, detta **equazione di Fourier**, che deriva dalla stessa legge (2.7) [24]. Per determinare la quantità di calore dQ che, nel tempo $d\tau$, attraversa una superficie dS , comunque orientata rispetto al campo di temperatura dT , si calcola il flusso \vec{q} attraverso tale superficie nel tempo considerato, ossia:

$$dQ = (\vec{q} \cdot \vec{n})dSd\tau = -\lambda(\text{grad}T \cdot \vec{n})dSd\tau \quad (2.9)$$

dove \vec{n} è il versore normale a dS con verso uscente dalla stessa superficie. Considerato un volume di materia di densità ρ , nell'ipotesi in cui λ possa essere considerato costante, omettendo i termini di energia cinetica, potenziale e di lavoro, in quanto non si compie lavoro di deformazione nei fenomeni di conduzione, il principio di conservazione dell'energia può essere espresso nella forma:

$$dU = dQ_e + dQ_g \quad (2.10)$$

dove dQ_e è la quantità di calore che attraversa la superficie nel tempo $d\tau$, mentre dQ_g è la quantità di calore prodotta all'interno del sistema, per cui la variazione di energia del sistema è data dalla somma dell'energia scambiata attraverso la superficie con l'energia prodotta all'interno del sistema stesso. La quantità di calore dQ_e che attraversa la superficie dS nel tempo $d\tau$, dal teorema di Gauss, è data da:

$$dQ_e = -d\tau \iint (\vec{q} \cdot \vec{n}) dS = -d\tau \iiint \text{div}(\vec{q}) dV \quad (2.11)$$

dove il primo è un integrale di superficie ed il secondo di volume. Si può esplicitare l'espressione del flusso di calore, ossia:

$$\text{div}(\vec{q}) = \text{div}(-\lambda \text{grad}T) = -\nabla^2 T \quad (2.12)$$

dove ∇^2 è l'operatore di Laplace.

Con la sostituzione nella (2.11), si ha:

$$dQ_e = d\tau \iiint \lambda \nabla^2 T dV \quad (2.13)$$

La quantità di calore dQ_g , prodotta all'interno del sistema, a prescindere dalle modalità con cui avviene la produzione stessa di energia, può essere stimata definendo la quantità di calore q_g prodotta per unità di tempo e di volume:

$$dQ_g = d\tau \iiint q_g dV \quad (2.14)$$

La variazione di energia interna si ottiene dalla relazione nota in termodinamica come $dU = c_p \Delta T$, dove c_p è il calore specifico a pressione costante e, riportando la (2.13) e la (2.14) nell'equazione relativa alla conservazione dell'energia (2.10), avremo:

$$d\tau \iiint \lambda \nabla^2 T dV + d\tau \iiint q_g dV = d\tau \iiint \rho c_p \frac{\delta T}{\delta \tau} dV \quad (2.15)$$

Dividendo per $d\tau$ e raggruppando si ha:

$$\iiint \left[\lambda \nabla^2 T + q_g - \rho c_p \frac{\delta T}{\delta \tau} \right] dV = 0 \quad (2.16)$$

Essendo l'elemento dV piccolo, ma non nullo, allora deve essere nulla la funzione integranda, per cui si ha:

$$\lambda \nabla^2 T + q_g - \rho c_p \frac{\delta T}{\delta \tau} = 0 \quad (2.17)$$

Essa è nota come **equazione di Fourier**; trattasi di un'equazione differenziale del secondo ordine la cui complessità è legata alla geometria del sistema stesso ed all'espressione del termine q_g . Vanno poi distinte le situazioni in cui il tempo non influisce sul valore della temperatura: si tratta dei casi stazionari. Qualora non sia presente anche la generazione interna di calore, l'equazione di *Fourier* assume la forma più semplice detta di *Laplace*:

$$\nabla^2 T = 0 \quad (2.18)$$

L'equazione di Fourier fornisce una descrizione completa dell'evoluzione della temperatura in funzione del tempo. Equivalentemente si hanno in acustica la legge di Eulero, da cui si costruisce l'equazione di D'Alambert, e nel moto dei fluidi la legge di Newton, che sta alla base dell'equazione di Navier. Mentre nei casi citati, il passaggio dalla legge fisica all'equazione non aveva sviluppi pratici, nel caso dello scambio termico passare dalla legge fisica alla relativa equazione di Fourier ha una utilità pratica, perché i problemi di scambio termico per conduzione si risolvono tramite integrazione numerica dell'equazione di Fourier. Come la maggior parte delle equazioni fisiche, l'equazione di Fourier è una equazione differenziale e come tale fornisce una soluzione generica. Essa necessita dell'imposizione delle cosiddette *condizioni al contorno* affinché possa applicarsi al caso che viene trattato. Le condizioni al contorno sono di due tipi: spaziali e temporali.

Quando le condizioni al contorno sono di temperature fissate: in questo caso le condizioni sono dette di *tipo T*. Esiste un'altra categoria di problemi nei quali invece è fissata la quantità di calore scambiata nel tempo: in questo caso le condizioni sono di *tipo Q*.

Il problema più semplice di conduzione che è, allo stesso tempo, un esempio pratico di applicazione e conseguente passaggio dalla legge di Fourier alla relativa equazione, è

quello di una lastra piana. Consideriamo una lastra di spessore costante L ed infinitamente estesa nelle direzioni y e z , (Figura 2.9). In queste condizioni, la lastra rappresenta un sistema monodimensionale dipendente dalla sola variabile x , se questa è inserita in un opportuno sistema di riferimento cartesiano. Supponiamo che le pareti siano rispettivamente alla temperatura T_1 e T_2 con $T_1 > T_2$, per cui si avrà necessariamente un flusso di calore dalla superficie interna a quella esterna e diretto nel verso positivo dell'ascissa. Consideriamo un elemento della lastra di superficie $A = 1 \text{ m}^2$ e spessore dx (nella Figura 2.9 è rappresentato dal rettangolo grigio). Supponiamo che la parete sia costituita da un materiale avente densità volumetrica pari a ρ e assumiamo che λ , la sua conducibilità termica, sia costante.

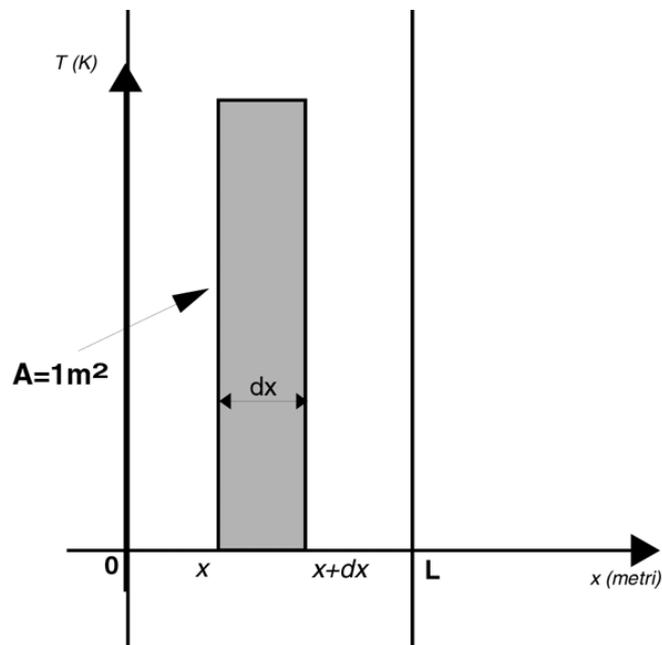


Figura 2.9. Lastra indefinita

Il volume dell'elemento grigio dx evidenziato in Figura 2.9 è:

$$dV = A \cdot dx \quad (2.19)$$

Nota la densità volumetrica, la densità di massa è data da:

$$dm = \rho dV = \rho A dx \quad (2.20)$$

Supponiamo che al tempo $\tau = \tau_0$ il sistema sia alla temperatura $T(x, \tau_0)$; il campo delle temperature è dipendente dal tempo, quindi dopo una frazione di tempo $d\tau$ la temperatura del sistema è data da:

$$T(x, \tau_0 + d\tau) = T(x, \tau_0) + \frac{\delta T}{\delta \tau} d\tau \quad (2.21)$$

Valutiamo la variazione di energia in termini di flusso termico q (in modulo), trascurando il contributo in termini di lavoro interno, quindi eventuali deformazioni dovute alla compressione o dilatazione, cioè volume costante e quindi lavoro nullo, ossia:

$$dU = A(q_x - q_{x+dx})d\tau \quad (2.22)$$

Ed essendo la variazione di energia interna dU direttamente proporzionale alla variazione di temperatura si ha:

$$c_p \cdot dm \cdot dT = A(q_x - q_{x+dx})d\tau \quad (2.23)$$

dove c_p è il calore specifico del materiale.

Tenuto conto della (2.20), si ha:

$$c_p \cdot \rho \cdot A \cdot dx \cdot dT = A(q_x - q_{x+dx})d\tau \quad (2.24)$$

Utilizzando la (2.7), ovvero:

$$\begin{cases} q_x = -\lambda \text{grad}(T_x) \\ q_{x+dx} = -\lambda \text{grad}(T_{x+dx}) = -\lambda \text{grad}T_x - \lambda dx \text{grad}\left(\frac{\delta T}{\delta x}\right) \end{cases} \quad (2.25)$$

si ha:

$$c_p \cdot \rho \cdot A \cdot dx \cdot dT = A \cdot dx \cdot \lambda \text{grad}\left(\frac{\delta T}{\delta x}\right) \quad (2.26)$$

da cui:

$$c_p \cdot \rho \cdot \frac{dT}{d\tau} = \lambda \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \quad (2.27)$$

Essa esprime l'equazione di Fourier che, scritta nella forma più generale, ossia in 3 dimensioni, sarebbe:

$$\frac{\delta T}{\delta \tau} = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \left[\frac{\delta^2 T}{dx^2} + \frac{\delta^2 T}{dy^2} + \frac{\delta^2 T}{dz^2} \right] \quad (2.28)$$

La 2.28 può anche essere espressa tramite l'operatore ∇ e diviene:

$$\frac{\delta T}{\delta \tau} = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \nabla^2 T \quad (2.29)$$

Qualora si dovesse operare in regime stazionario si avrebbe, nella (2.27), $\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} = 0$. L'ipotesi di stazionarietà porta ad affermare che il flusso termico deve essere costante all'interno della sezione della lastra. Infatti, considerato l'elemento dx , da un punto di vista energetico si ha che la differenza fra calore entrante e calore uscente dallo strato deve uguagliare la sua variazione di energia interna. La legge di Fourier, non avendo dipendenza dalle coordinate y e z , in questo caso diventa:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.30)$$

da cui:

$$q \cdot dx = -\lambda \cdot dT \quad (2.31)$$

La condizione iniziale in cui si trova la lastra porta a formulare le condizioni al contorno di carattere temporale e spaziale, ovvero:

$$\begin{cases} x = 0 & ; T(0) = T_1 \\ x = L & ; T(L) = T_2 \end{cases} \quad (2.32)$$

ed integrando la (2.31):

$$q \int_0^L dx = -\lambda \int_{T_1}^{T_2} dT \quad (2.33)$$

avremo:

$$q \cdot L = -\lambda(T_2 - T_1) \quad (2.34)$$

da cui:

$$q = \frac{\lambda}{L}(T_1 - T_2) \quad (2.35)$$

Essa fornisce la densità di flusso termico attraverso la lastra L di Figura 2.9.

Per determinare il profilo della temperatura, integriamo nuovamente la (2.31), ma considerando la generica temperatura $T(x)$ per una generica ascissa x :

$$q \int_0^L dx = -\lambda \int_{T_1}^{T_x} dT \quad (2.36)$$

Sostituendo al termine q l'espressione ricavata in (2.35), si ha:

$$\frac{\lambda}{L}(T_1 - T_2) \cdot x = -\lambda[T(x) - T_1] \quad (2.37)$$

da cui:

$$T(x) = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{L}x \quad (2.38)$$

Questa relazione rappresenta il *profilo di temperatura* entro la parete, ossia la legge di variazione spaziale di suddetta grandezza, dove x è la sola coordinata spaziale che descrive il sistema. Si tratta di una relazione lineare quindi, sul piano cartesiano (x,T) , la $T(x)$ è una retta passante per i punti $(0,T_1)$ e (L,T_2) .

Come altro caso esemplificativo si riportano le espressioni di distribuzioni di temperatura e quantità di calore scambiata nell'unità di tempo attraverso una superficie cilindrica (Figura 2.10), in caso stazionario, senza generazione interna e con il parametro λ indipendente dalla temperatura.

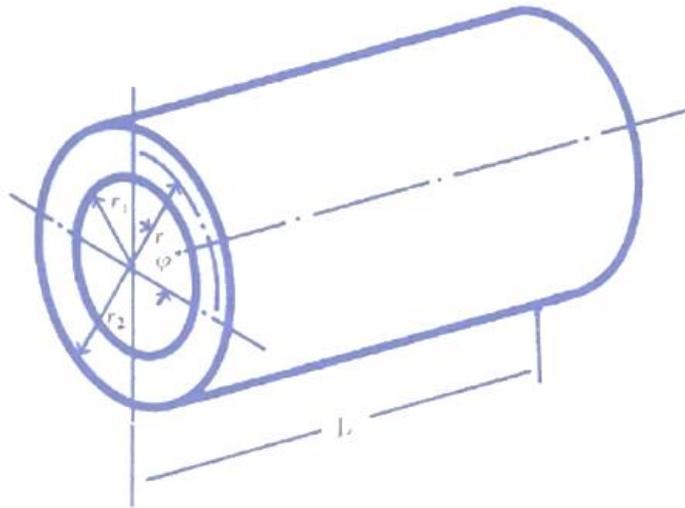


Figura 2.10. Superficie cilindrica.

$$\left\{ \begin{array}{l} T = T_1 + \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) \\ q = -\lambda 2\pi r L \frac{dT}{dr} = 2\pi\lambda L \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \lambda(2\pi r_m L) \frac{T_1 - T_2}{S} \end{array} \right. \quad (2.39)$$

dove si utilizza la definizione di raggio medio logaritmico, ossia:

$$r_m = \frac{r_2 - r_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (2.40)$$

al fine di ottenere una forma della quantità di calore scambiato analoga a quella nel caso di una superficie piana.

La **convezione termica** riguarda lo scambio di calore fra una superficie solida ed un fluido posto a contatto con essa. Tale fluido, a contatto con un corpo la cui temperatura è maggiore di quella dell'ambiente che lo circonda, si riscalda e, per l'aumento di temperatura, si espande (nella maggior parte dei casi). A causa della spinta di Archimede il fluido sale, essendo meno denso del fluido circostante a temperatura più bassa. Contemporaneamente, il fluido più freddo scende e prende il posto di quello più caldo che sale: in questo modo si instaura un moto convettivo. Ad esempio, supponiamo di avere un sistema isolato dall'esterno costituito da due corpi aventi temperature differenti, l'uno al di sopra dell'altro, divisi da uno strato di acqua, che, come vedremo, svolgerà la

funzione del sopraccitato fluido. Supponendo che venga posto in superficie il corpo più freddo, siccome l'acqua calda tende a salire e l'acqua fredda a scendere (per la diversa densità), si sviluppa un moto convettivo per cui nella zona centrale l'acqua riscaldata si muove verso il corpo caldo e verso il corpo freddo, mentre nelle zone più esterne si ha un movimento verso il basso dell'acqua che, raffreddata per il contatto con il corpo freddo, si dirige verso quello caldo. Si avrebbe una situazione molto diversa nel caso in cui i due corpi venissero invertiti, ossia se il corpo a temperatura maggiore fosse posto in superficie ed il corpo a temperatura minore sotto lo strato d'acqua: in questo caso non si avrebbe nessun moto convettivo, ma si avrebbe trasferimento di calore dal corpo più caldo a quello più freddo solo per conduzione. Nella convezione si ha quindi un effetto combinato della conduzione e del trasporto di massa. La presenza del trasporto di massa aumenta generalmente la quantità di calore trasmesso tra la superficie solida e il fluido, rispetto al caso della sola conduzione. La convezione è detta convezione forzata se il fluido è forzato a fluire sulla superficie da dispositivi esterni quali ventilatori, pompe o più semplicemente il vento. Al contrario, si chiama naturale o libera se il movimento del fluido è causato da forze di galleggiamento indotte da differenze di densità, legate alle variazioni di temperatura nel fluido. Vi sono molteplici esempi pratici di convezione forzata, basti pensare alla caldaia di un termosifone che provoca la circolazione di un fluido, di solito acqua o aria, in modo da riscaldare l'ambiente, oppure alla ventola di un computer. Supponiamo di avere una parete di area dS , temperatura T_p ed un fluido a temperatura T_f . La quantità di calore scambiata nel tempo $d\tau$ viene così espressa:

$$|dQ| = h|T_p - T_f|dSd\tau \quad (2.41)$$

dove h è il **coefficiente di trasmissione del calore** espresso in $W/[m^2 \text{ } ^\circ\text{C}]$. Il coefficiente di trasmissione del calore per convezione h non è una proprietà del fluido, ma è un parametro determinato sperimentalmente, il cui valore dipende da tutte le variabili che influenzano la convezione quali la geometria della superficie, la natura del moto, le proprietà e velocità del fluido. Nel caso della convezione naturale, questo dipende, inoltre, in modo molto significativo dalla differenza di temperatura fra corpo e fluido. La (2.41), detta legge di *Newton*, non esprime una legge fisica come l'equazione di *Fourier*, ma stabilisce semplicemente una proporzionalità tra il flusso termico scambiato e la differenza delle temperature, prescindendo dalla possibilità di calcolo del coefficiente h

e dalla definizione della temperatura del fluido. Quest'ultima grandezza, anche in regime stazionario, varia da punto a punto del fluido, per cui si assume per essa un valore medio. La valutazione del parametro h è abbastanza complessa [25]. Essa tiene conto dell'intero meccanismo della convezione, per cui non solo è funzione dei fenomeni puramente termici, ma è anche legata a quelli fluidodinamici, quindi alle proprietà del fluido, alle caratteristiche geometriche del sistema ed al tipo di moto. Per queste ragioni non esistono formule teoriche valide in generale per questo tipo di scambio, ma si hanno solo formule sperimentali applicabili ai casi in cui il tipo di funzionamento del sistema preso in esame sia assimilabile a quello per il quale le formule sono state individuate. Una soluzione soddisfacente per la valutazione di tale parametro è fornita dall'analisi dimensionale. Si tratta di un metodo di grande utilità nei casi in cui, nello studio di un fenomeno fisico, si presentano eccessive difficoltà per un'analisi teorica. Il metodo consente di dedurre informazioni sul fenomeno allorché sia stata individuata un'equazione dimensionalmente omogenea che contenga tutte le grandezze che lo influenzano. Il raggruppamento in gruppi adimensionali delle grandezze che intervengono in un fenomeno fisico rappresenta un risultato di grande utilità pratica, in quanto consente di ridurre il numero delle variabili da cui dipende tale fenomeno al numero delle variabili rappresentate dai gruppi adimensionali da esse dedotte, che è sempre in numero minore. In base al teorema fondamentale dell'analisi dimensionale, infatti, se n è il numero delle grandezze relative al fenomeno ed m il numero delle dimensioni fondamentali che le rappresentano, il numero dei gruppi adimensionali e , quindi, quello delle variabili da considerare è dato dalla differenza $n-m$. In questo tipo di processo le variabili da cui esso dipende sono:

- il coefficiente di convezione h ,
- la densità ρ ,
- il calore specifico c_p ,
- la conduttività termica λ ,
- la viscosità dinamica μ ,
- la viscosità cinematica ν ,
- la dimensione caratteristica D ,

- la velocità w .

Il fenomeno della convezione viene rappresentato da variabili rappresentate da altrettanti gruppi adimensionali. Si hanno i seguenti raggruppamenti:

- di *Reynolds*:

$$Re = \frac{\rho w D}{\mu} \quad (2.42)$$

esprime il rapporto tra le forze di inerzia e quelle viscosi;

- di *Prandtl*:

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} \quad (2.43)$$

esprime il rapporto tra le proprietà di trasporto della quantità di moto e calore;

- di *Grashof*:

$$Gr = \beta g \frac{L^3 \Delta T}{\nu^3} \quad (2.44)$$

esprime il rapporto tra le forze di galleggiamento e quelle viscosi, dove β è il coefficiente di dilatazione termica ed L la lunghezza caratteristica del sistema;

- di *Nusselt*:

$$Nu = \frac{hL}{\lambda} \quad (2.45)$$

esprime il rapporto tra scambio termico per convezione e quello per conduzione in uno strato di fluido di spessore L ;

- di *Rayleigh*:

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (2.46)$$

utilizzato per determinare la condizione di moto turbolento qualora non si possa applicare il numero di Reynolds.

L'irraggiamento è il trasferimento di energia per propagazione di radiazioni elettromagnetiche. Queste, però, pur avendo le stesse caratteristiche generali delle onde elettromagnetiche, differiscono in maniera significativa nei loro effetti. L'emissione termica, ossia dovuta al fatto che ogni corpo a temperatura superiore a °K è una sorgente di onde elettromagnetiche, è il risultato delle modificazioni che avvengono nelle configurazioni elettroniche degli atomi o delle molecole. Se ci poniamo di fronte ad una sorgente termica luminosa avvertiamo una sensazione di caldo. Questa sensazione è dovuta in parte alla convezione (in quanto il calore riscalda l'aria circostante) ed in parte all'irraggiamento. A differenza delle modalità precedenti, l'irraggiamento non prevede contatto diretto e non necessita di un mezzo per propagarsi: è un fenomeno che interessa ogni aggregato materiale, indifferentemente se solido, liquido o gassoso ed avviene anche nel vuoto. Questo è giustificato dal fatto che il trasferimento di calore per irraggiamento avviene sotto forma di onde elettromagnetiche. Gli oggetti emettono radiazioni elettromagnetiche che sono frutto dell'eccitazione termica della superficie del corpo, legata alla condizione energetica degli atomi (l'irraggiamento è tanto più intenso quanto maggiore è la temperatura dell'oggetto stesso). La radiazione viene emessa in tutte le direzioni e, quando il mezzo trasmissivo risulta essere sufficientemente trasparente a tale radiazione, nel momento in cui essa colpisce un altro corpo, in parte viene riflessa ed in parte assorbita. Si tratta di un fenomeno che si presenta ad ogni temperatura, ma solo a temperature abbastanza elevate il contributo allo scambio termico per irraggiamento supera i contributi per conduzione e convezione. La quantità di calore emessa da un corpo per irraggiamento è infatti proporzionale a T^4 , ovvero alla quarta potenza della sua temperatura: perciò a basse temperature l'irraggiamento è responsabile di una frazione trascurabile del flusso di calore rispetto alla convezione e alla conduzione. Quanto a processo fisico, l'irraggiamento consiste nell'emissione di onde elettromagnetiche generate dagli atomi e molecole eccitati dall'agitazione termica che si diseccitano emettendo fotoni di frequenza proporzionale alla loro temperatura. Ad esempio, i corpi a temperatura ambiente emettono in prevalenza fotoni nella gamma degli infrarossi; corpi molto freddi irradiano microonde (quelli vicini allo zero assoluto semplici onde radio), mentre i corpi molto caldi arrivano ad emettere luce visibile, dapprima rossa poi sempre più bianca: man mano che la temperatura aumenta, la frequenza della luce emessa aumenta fino al bianco-azzurro, per poi passare ai raggi ultravioletti ed ai raggi X, nel

caso di plasmi stellari a temperature dell'ordine di milioni di gradi. Il calore scambiato per irraggiamento si trasmette prevalentemente dal corpo a temperatura maggiore a quello a temperatura minore, sebbene, in realtà, l'energia si propaga in entrambe le direzioni, ma con minore intensità da quello freddo a quello caldo. Infatti, se un corpo emanasse soltanto e non assorbisse mai energia elettromagnetica, la sua temperatura raggiungerebbe lo zero assoluto. L'emissione e l'assorbimento dipendono dalla frequenza della radiazione, dalla natura del corpo e da alcune caratteristiche della sua superficie: un corpo avente una superficie scura è un buon assorbitore, mentre un corpo avente una superficie chiara è un buon emettitore. Il potere emissivo di un corpo P, che ha il significato di energia emessa per unità di tempo e, per unità di superficie, è così espresso dalla legge di Stefan-Boltzmann:

$$P = \sigma \epsilon T^4 \quad (2.47)$$

dove σ è la cosiddetta costante di Stefan-Boltzmann pari a $5.67 \cdot 10^{-9} \text{ J}/[\text{m}^2 \text{ K}^4]$ ed ϵ rappresenta il potere emissivo o emissività. La superficie ideale che emette per irraggiamento la massima potenza è detta corpo nero. La radiazione emessa da qualunque superficie reale è minore di quella massima a parità di temperatura, ed è funzione dell'emissività ϵ della superficie, il cui valore $0 \leq \epsilon \leq 1$, è una misura di quanto il comportamento di una superficie si approssima a quella di un corpo nero per il quale ϵ è uguale ad uno. Il corpo nero è la superficie ideale che emette per irraggiamento la massima potenza, ma è anche il massimo adsorbitore, per cui, detto α il coefficiente di adsorbimento avremo, per un corpo nero, $\alpha = \epsilon = 1$. Corpi caratterizzati da α ed ϵ indipendenti dalla lunghezza d'onda si dicono grigi, per i quali $\alpha = \epsilon < 1$. La trasmissione di calore per irraggiamento da o verso una superficie circondata da un gas può avvenire in parallelo alla conduzione o convezione tra la superficie e il gas. La potenza termica complessiva si determina di conseguenza sommando i contributi di entrambe le modalità di scambio termico coinvolte.

2.4.3 Energia termica da fonti rinnovabili

Il fabbisogno di energia viene spesso indicato come fabbisogno di energia elettrica, ma i maggiori consumi di energia non sono quelli elettrici, bensì quelli termici, per cui il ruolo delle rinnovabili negli usi termici è di fondamentale importanza. Il settore delle "rinnovabili termiche" o, più precisamente, delle tecnologie *per il riscaldamento e il raffrescamento alimentate con fonti rinnovabili*, istituito dalla Direttiva 2009/28/CE, recepita in Italia col recente Dlgs n.28/2011, non ha avuto, almeno in passato, un trattamento adeguato. L'opinione pubblica e le istituzioni hanno inteso dare molto peso all'energia elettrica e non ha considerato adeguatamente l'effettivo rilievo delle altre principali tipologie di consumo dell'energia, sia civili che industriali, ossia quella per gli usi termici e quella utilizzata nei trasporti. Quanto poco fossero conosciute le fonti rinnovabili termiche fino a qualche anno fa è testimoniato dalle gravi lacune statistiche esistenti in questo settore di consumi di energia, come si evince dal Dossier di "Amici della Terra" [26]. Basti pensare che il nostro Bilancio Energetico Nazionale (BEN) non riporta dati né su tecnologie tradizionali e consolidate, come il solare termico o come gli usi diretti del calore geotermico, né su forme di energia rinnovabile termica, riconosciute recentemente dalla direttiva 2009/28/CE, quali l'aerotermica, l'idrotermica e la geotermica consumate tramite pompe di calore. Come riportato nel suddetto dossier, la voce principale nei consumi finali di energia, al 2011, è proprio quella dei consumi termici e anche il consumo di energia per trasporti è maggiore di quello elettrico (Figura 2.11).

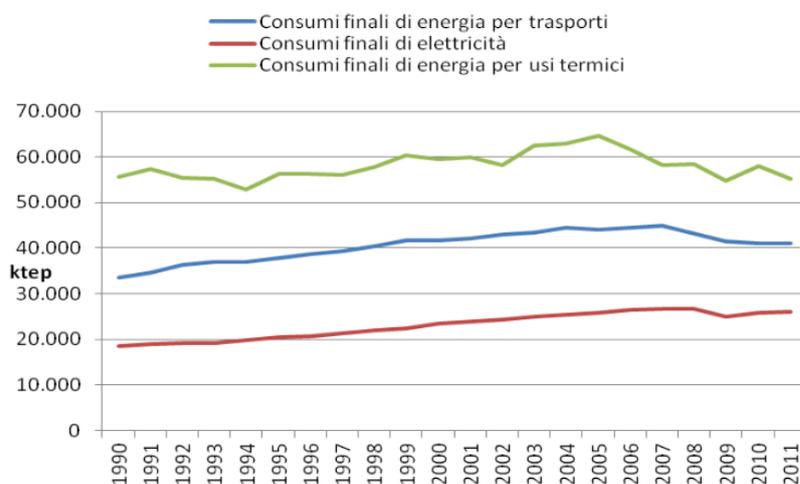


Figura 2.11. Consumi finali di energia dal 1990 al 2011 (Fonte: Amici della Terra su dati Eurostat).

Secondo la prima relazione sulle rinnovabili dell'Italia alla CE, nel 2011 il consumo di rinnovabili da pompe di calore è stato pari a 1'195 ktep, che per il 97% è attribuito alle pompe di calore aerotermiche (aria/aria o aria/acqua) ed il 3% alle pompe di calore geotermiche (acqua/acqua a ciclo aperto o chiuso). Questo contributo al consumo di FER è consentito da circa un milione di impianti di climatizzazione a pompa di calore utilizzati in edifici residenziali e del terziario come sistema principale per il riscaldamento. In Italia, con le installazioni del 2012, la potenza installata cumulata per pompe di calore ha raggiunto circa 20'000 MW suddivisi in circa 70% per pompe di calore aria-aria, circa 21% per pompe di calore aria-acqua e circa 4% per pompe di calore acqua-acqua (geotermiche).

Il BEN considera negli usi finali l'elettricità e i combustibili, sia fossili che rinnovabili, ma non considera il calore che può derivare da recuperi nella cogenerazione o da combustioni di rifiuti e scarti non censiti. Il problema del calore non censito, derivato da fonti termiche autoprodotte o commercializzate informalmente, è emerso in tutti i paesi in occasione del pacchetto 20-20-20 dell'Unione europea. In particolare, in Italia, è stato evidenziato da indagini campionarie telefoniche condotte da ENEA. Tale settore è ancora poco noto all'opinione pubblica ma, secondo i Piani del Governo, dovrà contribuire con 10.5 Mtep di energia finale all'obiettivo nazionale di energia da rinnovabili al 2020 (circa il 44% dell'obiettivo complessivo). In questo campo si sono fatti grandi passi in avanti con le nuove statistiche, recentemente elaborate dal GSE, per i rapporti di monitoraggio sull'attuazione della direttiva che l'Italia, come ogni Paese membro, deve redigere annualmente. Va evidenziato che, in virtù dell'evoluzione delle tecnologie e delle tecniche, alcuni osservatori ritengono che nel medio termine ci sia anche una crescita nell'uso diretto dei fluidi geotermici, tramite lo sfruttamento di acque calde. Secondo le stime dell'Unione Geotermica Italiana, per gli usi diretti in bassa entalpia, si prevede una crescita molto rilevante al 2030 rispetto all'utilizzo attuale. La riduzione dei consumi segnalata dai dati ufficiali degli ultimi anni è dovuta al criterio di contabilizzazione dei consumi molto conservativo, adottato per il settore degli usi termali. Gli impianti a media e bassa entalpia hanno il vantaggio di avere un'ampia diffusione sul territorio nazionale e, in linea di massima, richiedono tecnologie a basso impatto. Nell'ultimo decennio è entrato in esercizio un elevato numero di centrali di teleriscaldamento a biomasse legnose.

Le statistiche indicano che gran parte di esse è localizzata nelle regioni settentrionali, sia per ragioni climatiche, sia per la maggiore disponibilità di materia prima e la maggiore organizzazione ed efficienza dei mercati locali di approvvigionamento del cippato.

La consultazione aperta dalla commissione UE con il "Libro Verde" sullo scenario delle politiche energetiche con orizzonte 2030, ha dato maggiore impulso alle politiche di promozione delle rinnovabili termiche. Anche a livello europeo si è riscontrata una inadeguata considerazione dei consumi termici sia dal punto di vista delle politiche di efficienza energetica che per la promozione delle rinnovabili, come è stato evidenziato dalla "Heat Coalition", di cui si condividono le osservazioni all'approccio e ai contenuti del "Libro Verde". Nel nostro Paese è stato pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n°51 del 2 marzo 2016, il DM 16 febbraio 2016 "Aggiornamento della disciplina per l'incentivazione di interventi di piccole dimensioni per l'incremento dell'efficienza energetica e per la produzione di energia termica da fonti rinnovabili". Esso sostituisce il DM 28 dicembre 2012 ed aggiorna la disciplina per l'incentivazione di interventi di piccole dimensioni per l'incremento dell'efficienza energetica e per la produzione di energia termica da fonti rinnovabili, secondo principi di semplificazione, efficacia, diversificazione e innovazione tecnologica nonché di coerenza con gli obiettivi di riqualificazione energetica degli edifici della pubblica amministrazione. La nuova disciplina concorre al raggiungimento degli obiettivi specifici previsti dai Piani di azione per le energie rinnovabili e per l'efficienza energetica di cui all' art. 3, comma 3, del decreto legislativo n. 28/2011, e dall' art. 7 del decreto legislativo n. 102/2014.

Il nuovo Conto Termico dovrebbe rilanciare gli incentivi al momento sottoutilizzati per interventi di efficienza energetica e rinnovabili termiche. Nella versione attuale, ci sono a disposizione 900 milioni di euro annui, 700 per privati e imprese e 200 per le Amministrazioni Pubbliche (PA), le cooperative di abitanti o sociali e le società di patrimonio pubblico. Il nuovo meccanismo aggiunge, per le sole PA, 3 nuovi interventi:

- trasformazione in “edifici a energia quasi zero” (NZEB);
- sostituzione dei sistemi per l'illuminazione con dispositivi efficienti;
- installazione di tecnologie di gestione e controllo automatico degli impianti termici ed elettrici degli edifici (*building automation*), di sistemi di termoregolazione e contabilizzazione del calore.

Come nel Conto Termico del 2012, attualmente in vigore, restano incentivabili solo per le PA gli interventi di:

- ✓ isolamento termico di superfici opache delimitanti il volume climatizzato;
- ✓ sostituzione di chiusure trasparenti comprensive di infissi delimitanti il volume climatizzato;
- ✓ sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con caldaie a condensazione;
- ✓ installazione di sistemi di schermatura e/o ombreggiamento di chiusure trasparenti con esposizione di Est-sud-est a Ovest, fissi o mobili non trasportabili.

Restano uguali gli interventi di piccole dimensioni incentivabili anche per i privati:

- sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con impianti dotati di pompe di calore, anche combinati per la produzione di acqua calda sanitaria;
- sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti o di riscaldamento delle serre e dei fabbricati rurali con impianti dotati di generatore di calore alimentato da biomassa;
- l'installazione di impianti solari termici per la produzione di acqua calda sanitaria e/o ad integrazione dell'impianto di climatizzazione invernale, anche abbinati a sistemi di *solar cooling*, per la produzione di energia termica per processi produttivi o immissione in reti di teleriscaldamento o teleraffrescamento;
- sostituzione di scaldacqua elettrici con scaldacqua a pompa di calore;
- sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con sistemi ibridi a pompa di calore.

La novità del nuovo Conto è il fatto che per la produzione di energia termica da rinnovabili la taglia massima degli impianti passa da 1 MW a 2 MW.

L'incentivo, che nella maggior parte dei casi va a coprire il 40% dell'investimento, sale al 50% per gli interventi di isolamento termico nelle zone climatiche E/F e se l'isolamento

è accompagnato dall'installazione di un nuovo impianto di climatizzazione invernale sale al 55% per entrambi gli interventi. È del 65% per la trasformazione in "edificio a energia quasi zero" e per la sostituzione dei sistemi di illuminazione con dispositivi efficienti. Le spese per le diagnosi energetiche e la redazione dell'Attestato di prestazione energetica (APE), richiesti per la trasformazione in edificio a energia quasi zero e l'isolamento termico delle superfici opache, sono incentivabili al 100% per le PA e al 50% per i privati. Per importi fino a 5mila euro, sia per i privati che per le PA, l'incentivo viene corrisposto in un'unica rata. L'incentivo in nessun caso può superare il 65% della spesa sostenuta.

Capitolo 3

L'industria e l'essiccazione

3.1 Storia e industria dell'essiccazione

L'essiccazione (o essiccamento) consiste nella rimozione di un liquido da un solido che lo contiene in misura variabile. Di solito il liquido a cui ci si riferisce è l'acqua, ma non mancano esempi di essiccamento in cui il solido contiene un liquido di altra natura. In ogni caso il liquido viene allontanato per evaporazione e occorre quindi fornire il calore necessario al solido da essiccare. L'eliminazione dell'acqua da un prodotto, mediante essiccamento al sole, è una pratica antichissima conosciuta anche dagli uomini primitivi. La primaria necessità di conservare nel tempo gli alimenti e, nello stesso tempo preservarne il valore nutritivo ha rappresentato, nella storia dell'uomo, un fattore di enorme importanza. Per molti secoli e fino a pochi decenni or sono, si disidratavano gli alimenti per poterne disporre durante l'inverno o per i viaggi via mare, usando il sole nelle regioni più calde e soleggiate, oppure il forno a legna che, dopo la cottura del pane, veniva utilizzato per l'essiccazione. Una volta spento il fuoco e terminata la combustione delle braci, all'interno del forno, nel corso del suo lento raffreddamento, si manteneva una temperatura non elevata ma abbastanza costante da permettere l'essiccazione di molti altri prodotti. Il processo di essiccazione al sole era certamente favorito nei paesi con adatte condizioni climatiche: luoghi con clima umido di certo non erano adatti a tale processo. Questo metodo è ancora praticato a livello domestico ed artigianale nei paesi con clima caldo e asciutto.

Il metodo più antico di essiccazione consiste, quindi, nell'esporre le sostanze umide al sole e alle correnti d'aria. Esso è ancora largamente usato nell'agricoltura, nella vita domestica e, in generale, tutte le volte che si tratta di operazioni discontinue, per le quali non si possono sostenere spese d'impianto. Si tratta di un metodo molto economico, ma non adeguato soprattutto quando si debbono essiccare grandi quantità di prodotti. Si usano da tempo immemorabile i forni e le camere di essiccazione a riscaldamento artificiale, che modernamente sono stati sostituiti da apparecchi più razionali, spesso a

funzionamento automatico. I metodi artificiali si sono sviluppati all'inizio del Novecento con la realizzazione dei primi essiccatoi. Si trattava di ambienti riscaldati artificialmente dove tenere i prodotti da essiccare. In Italia, nei primi anni '50, furono introdotti i primi essiccatoi continui nell'industria alimentare che, in concomitanza con un nuovo e crescente benessere, ha indotto maggiori consumi e, quindi, maggiore produzione. Attualmente, grazie alle conoscenze delle trasformazioni indotte dai processi di disidratazione, i moderni impianti di essiccamento consentono di ottenere risultati efficaci con prodotti altamente qualificati. Il metodo di essiccazione industrialmente più diffuso, soprattutto in ambito alimentare, è quello che si ottiene per convezione forzata di aria. Questo tipo di essiccazione è generalmente condotta in essiccatori in cui circola aria calda e secca, per cui scaturiscono due tipi di fenomeno di trasporto: trasporto di calore dall'aria calda verso il prodotto e trasporto di acqua dal prodotto umido verso la fase fluida.

L'essiccazione è un'operazione essenziale in svariati settori: chimico, agricolo, delle biotecnologie, cibo, polimeri, ceramiche, farmaceutico, cellulosa e carta, lavorazione dei minerali e del legno ed industrie di trasformazione. L'eliminazione dell'acqua nei processi produttivi è, comunque, un'operazione ad elevato consumo energetico. Tale consumo diviene particolarmente impegnativo per il procedimento d'essiccazione in corrente d'aria, alla cui diffusione contribuisce significativamente il conseguimento di una migliore qualità del prodotto. Razionalizzare l'uso dell'energia nel processo di essiccazione significa approfondirne tutte le conoscenze, tecniche e pratiche, ma è fondamentale per creare una industria di tipo sostenibile. Uno dei più interessanti criteri di razionalizzazione dell'impiego delle risorse energetiche risiede nei recuperi termici, ovvero nello sfruttamento del contenuto di calore/freddo di fluidi che, per diverse ragioni, vengono espulsi dall'ambiente occupato all'esterno. I fluidi espulsi, nella gran parte dei casi acqua o aria, vengono reintegrati da quantità corrispondenti prelevate dall'ambiente esterno, a condizioni termiche diverse da quelle di utilizzo. Il ripristino delle volute condizioni termiche richiede quindi la somministrazione di calore, che finisce inevitabilmente per pesare sul bilancio energetico del sistema, spesso in misura significativa. Opportuni accorgimenti, quali l'organizzazione dei flussi in controcorrente anziché in equicorrente, l'adozione di superfici estese ed opportunamente corrugate, ed altri sistemi attualmente consentono una maggiore efficienza, in particolare nello scambio termico tra liquidi. La composizione di un sistema di recupero termico statico con un

recupero attivo, basato cioè su un ciclo termodinamico inverso, ovvero su una pompa di calore, consente di ottenere un notevole recupero termico. La realizzazione di nuovi essiccatori con scambi di calore ad alta efficienza e con tecnologia a massa termica, che permette di adattare il consumo energetico al carico di lavoro effettivo, favorisce il risparmio e l'efficienza energetica.

3.2 Generalità del processo di essiccazione

L'essiccazione è una operazione unitaria in cui un liquido viene allontanato da un solido per evaporazione verso un mezzo gassoso opportuno (operazione solido-gas). L'operazione, pertanto, consiste nell'eliminare dalle sostanze solide, per evaporazione, i liquidi che esse trattengono per adesione superficiale, per capillarità oppure come contenuto cellulare. Nella maggior parte dei casi pratici il liquido è l'acqua, ma non mancano esempi di essiccazione in cui il solido contiene un liquido di altra natura. In ogni caso il liquido viene allontanato per evaporazione e occorre quindi fornire il calore necessario al solido da essiccare. Il calore necessario può essere fornito, come già detto, dai raggi solari, oppure da una sorgente artificiale; in certi casi, in particolare quando la sostanza da essiccare è in piccola quantità, anche dall'aria ambiente. Il processo di essiccazione è rapido e completo quando si opera a temperatura superiore a quella di ebollizione del liquido da eliminare, ma va evidenziato che molte sostanze organiche si alterano quando sono portate a temperatura superiore a quella ordinaria. In questi casi l'essiccazione si compie nell'aria a temperature molto inferiori a quella di ebollizione dell'acqua, in qualche caso anche nel vuoto, che permette di operare industrialmente a temperature ancora più basse. I liquidi evaporano anche a temperatura inferiore a quella di ebollizione, fino a tanto che l'aria ambiente, ovvero lo spazio chiuso nel quale l'evaporazione si compie, non ne è satura. Quando si è raggiunto questo limite, la quantità di vapore presente in uno spazio determinato rimane costante e non si può sottrarre altra umidità alla sostanza da essiccare, finché non si asporta da quello spazio un peso eguale di vapore, sia facendolo condensare, sia facendolo assorbire da sostanze igroscopiche, oppure facendolo trasportare meccanicamente dall'aria, cioè sostituendo l'aria satura di vapore con altra non satura. Se si riscalda dell'aria satura di umidità, essa cessa di essere satura e consente l'evaporazione di una nuova quantità di liquido.

L'essiccazione è un'operazione complessa che prevede sempre il trasferimento contemporaneo di calore e di massa con diversi processi, quali trasformazioni fisiche o chimiche, che, a loro volta, possono provocare cambiamenti nella qualità del prodotto. Il trasferimento di calore avviene dal mezzo riscaldante all'acqua presente nel materiale da essiccare per trasformarla in vapore. Il trasferimento di massa è il passaggio dell'acqua attraverso il materiale da essiccare verso la superficie di evaporazione con l'allontanamento del vapore dal materiale.

Nei processi di essiccazione, come in quelli di umidificazione e condizionamento di ambienti e materiali, è importante lo studio del sistema aria-acqua. L'aria contiene sempre una certa quantità di umidità sotto forma di vapore acqueo per cui si parla di *aria umida*. Quando l'aria umida viene a contatto con un *solido secco*, cioè in grado di assorbire acqua, l'aria umida cede una parte della sua acqua al solido: si ha un trasferimento di materia e di energia per il sistema aria-acqua. Si può avere il caso contrario: un solido contenente dell'umidità può cedere acqua a dell'aria con la quale viene posto in contatto ed anche in questo caso si ha un trasferimento di energia e materia. Nel caso quindi di *solido umido* possono verificarsi due diversi fenomeni:

- ✓ Se la pressione parziale del vapore d'acqua p_v supera la pressione di saturazione p_s , cioè $p_v > p_s$, allora si ha un trasferimento di acqua dall'aria al solido, tramite condensazione del vapore, quindi si parla di umidificazione;
- ✓ Se invece $p_v < p_s$, allora si ha un trasferimento dell'acqua dal solido all'aria, in questo caso si parla di essiccazione. Perché questo fenomeno avvenga è necessario che la temperatura dell'aria sia maggiore della temperatura del solido in modo che possa esserci il trasferimento di calore dall'aria all'acqua sotto forma di calore latente di evaporazione e che l'aria abbia un basso contenuto di umidità e sia in grado di assorbire una significativa quantità di vapore d'acqua.

Lo studio degli equilibri di trasferimento di materia ed energia nei sistemi solido-gas e liquido-gas viene detto **psicrometria**. Se il sistema considerato è aria-acqua allora si parla di **igrometria** e, per lo studio degli equilibri suddetti, si utilizzano le grandezze igrometriche indicate di seguito [27]:

- L'**umidità assoluta**, detta anche **umidità specifica** o **titolo**, “ x “, è il rapporto della massa di acqua contenuta nell'aria, m_{H_2O} , rispetto alla massa di aria secca, $m_{a,s}$:

$$x = \frac{m_{H_2O}}{m_{a,s}} \quad (3.1)$$

dove m_{H_2O} è generalmente espressa in grammi, mentre $m_{a,s}$ è generalmente espressa in kilogrammi.

- L'**umidità relativa**, “ ψ “, è il rapporto della pressione parziale dell'acqua, p , rispetto alla pressione del vapore saturo, p_s , generalmente espressa in percentuale:

$$\psi = 100 \frac{p}{p_s} \% \quad (3.2)$$

- Il **grado di saturazione**, “ φ “, è il rapporto tra l'umidità assoluta e l'umidità assoluta di saturazione, x_s :

$$\varphi = \frac{x}{x_s} = \frac{\left(\frac{p}{P-p}\right)}{\left(\frac{p_s}{P-p_s}\right)} = \psi \frac{P-p_s}{P-p} \quad (3.3)$$

dove P è la pressione totale del sistema aria-acqua.

Per determinare invece la capacità di trasporto del vapore di un campione d'aria è necessario conoscere:

1. **temperatura a bulbo secco**, T_{bs} , cioè la temperatura misurata da un comune termometro che è indipendente dall'umidità relativa dell'aria;
2. **temperatura di rugiada**, o **dew point**, (o punto di condensazione, o temperatura di saturazione adiabatica) cioè la temperatura dell'aria, raffreddata a pressione costante, alla quale essa diventa satura di vapore d'acqua;
3. **temperatura a bulbo umido**, T_{bu} , cioè la temperatura dell'aria misurata da un termometro il cui bulbo viene tenuto avvolto in una garza imbevuta d'acqua (bulbo umido, Figura 3.1).

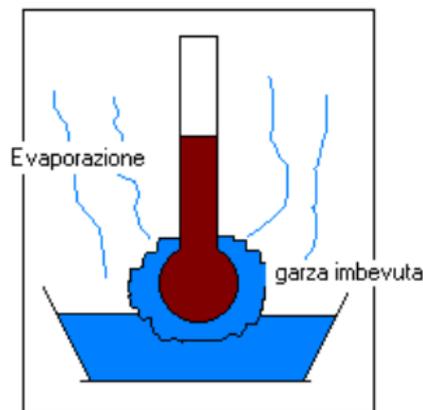


Figura 3.1. Schema di un termometro a bulbo umido.

Quando il bulbo viene investito dalla corrente d'aria, parte dell'acqua contenuta nella garza evapora sottraendo calore al mercurio. L'indicazione sul termometro sarà quindi più bassa rispetto a quella che si avrebbe con lo stesso termometro a bulbo asciutto.

Nel caso di un processo di essiccazione, quando si invia una corrente di gas (aria) non saturo di vapore sulla superficie di un liquido, parte di questo evapora e va ad aumentare l'umidità del gas. considerato che l'evaporazione del liquido si verifica con assorbimento di calore, la temperatura del liquido si abbassa e, quando arriva ad essere inferiore a quella del gas, si ha il passaggio di calore dal gas al liquido. Si stabilisce così un flusso di calore dal gas al liquido ed un flusso di materia e di calore (calore di evaporazione) dal liquido al gas. La temperatura a bulbo umido rappresenta la temperatura di equilibrio raggiunta dalla superficie dove avviene l'evaporazione quando la velocità di trasferimento del calore per convezione è uguale alla velocità di dispersione del calore per evaporazione. La temperatura a bulbo umido è funzione dell'umidità relativa dell'aria in entrata usata per favorire l'essiccazione.

Più sinteticamente, si può dire che l'essiccamento di un solido con un flusso di gas si ha quando la pressione parziale del vapore è inferiore alla pressione di saturazione e l'aria sia sufficientemente calda da fornire all'acqua il calore latente di vaporizzazione. La rimozione dell'acqua dal materiale si attua sia grazie alla rimozione dell'acqua dalla superficie, sia grazie alla diffusione della stessa acqua attraverso i capillari dall'interno del materiale verso la superficie. In un essiccatore, l'aria cede calore al solido umido che viene riscaldato provocando l'evaporazione dell'acqua in esso contenuto. Tale processo avviene senza scambio di calore con l'esterno, quindi l'aria si raffredda e si umidifica

seguendo una delle rette di raffreddamento adiabatico presenti nel *diagramma psicrometrico* che descrive il sistema aria-acqua. Tale diagramma (Figura 3.2) è un apposito strumento che permette di determinare le trasformazioni dell'aria umida con tutte le grandezze termoigrometriche dell'aria da trattare, ovvero:

- temperatura a bulbo secco,
- temperatura a bulbo umido,
- umidità specifica,
- umidità relativa,
- temperatura di rugiada, o dew point
- entalpia,
- volume specifico.

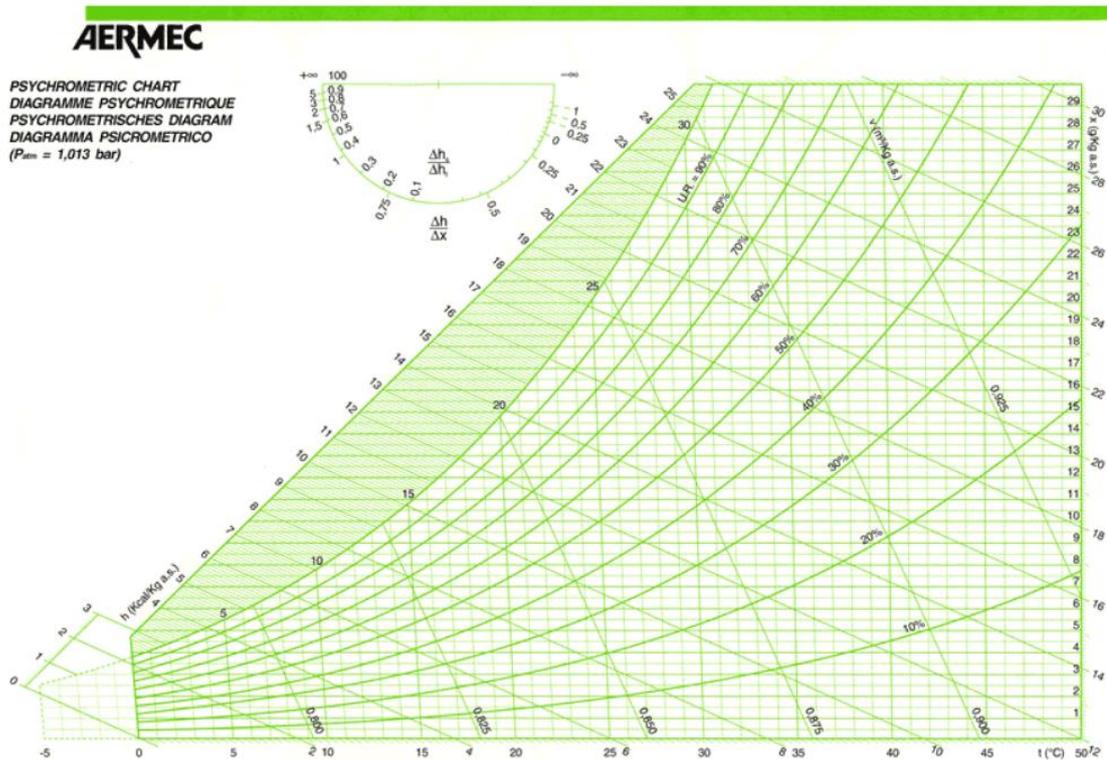


Figura 3.2. Esempio di diagramma psicrometrico.

Su questi diagrammi, infatti, è possibile rappresentare graficamente le trasformazioni che l'aria umida subisce nelle varie fasi di processo, quali l'essiccamento o il

condizionamento dell'aria, e leggere i valori dei parametri in gioco. Nelle più comuni applicazioni l'aria umida subisce trasformazioni a pressione totale costante, pertanto, i diagrammi psicrometrici sono bidimensionali, ossia sono tracciati per un dato valore della pressione totale e riportano famiglie di curve a temperatura, entalpia, umidità relativa e umidità assoluta costanti. Dal diagramma si possono dedurre le relazioni tra i tipi di umidità e temperature.

In condizioni stazionarie, considerato il solo trasferimento di calore dal gas al liquido, si ha:

$$q_{g \rightarrow l} = h_g \cdot A(T_g - T_l) \quad (3.4)$$

dove:

- h_g [W/(m²K)] è il coefficiente di trasmissione del calore dal gas al liquido;
- A [m²] è la superficie di contatto gas-liquido;
- T_g [K] è la temperatura del gas;
- T_l [K] è la temperatura del liquido.

Il calore che si trasmette dal liquido al gas è trasmesso per mezzo del calore di evaporazione ed è dato da:

$$q_{l \rightarrow g} = k_x \cdot A(x_s - x)\lambda_{lat} \quad (3.5)$$

dove

- x_{sup} ed x_g sono i valori di umidità assoluta rispettivamente alla superficie del materiale e nell'aria;
- λ_{lat} [kJ/kg] è il calore latente di vaporizzazione;
- k_x [kg/(m²s)] è il coefficiente del trasferimento di massa.

Quando il liquido ha raggiunto la temperatura a bulbo umido ($T_g = T_{bs}$ e $T_l = T_{bu}$) le due quantità di calore devono essere uguali, ossia:

$$h_g \cdot A(T_{bs} - T_{bu}) = k_x \cdot A(x_s - x)\lambda_{lat} \quad (3.6)$$

da cui:

$$(x_s - x) = \frac{h_g}{k_y \lambda_{lat}} (T_{bs} - T_{bu}) \quad (3.7)$$

quindi

$$(x - x_s) = -\frac{h_g}{k_y \lambda_{lat}} (T_{bs} - T_{bu}) \quad (3.8)$$

La (3.8) rappresenta un fascio di rette di inclinazione $-h_g \div (k_y \cdot \lambda)$

La capacità del gas essiccante di trasportare il vapore determina:

1. la velocità di essiccazione;
2. il grado di essiccazione, ossia il più basso contenuto di umidità ottenibile per un certo materiale.

In un esperimento di essiccamento il contenuto di umidità e , eventualmente, la temperatura del materiale, sono misurati come funzioni del tempo. Sono anche noti i tassi di entrata e di uscita nonché la composizione del gas. Da questi dati, la variazione del tasso di essiccazione con il contenuto di umidità o con il tempo è ottenuta con il calcolo differenziale.

La velocità di evaporazione dell'acqua $\frac{dm}{dt}$ (massa rispetto al tempo), come funzione della quantità di calore trasferito, può essere vista e descritta da:

- a. la velocità di trasferimento del calore:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{q}{\lambda_{lat}} \quad (3.9)$$

- b. l'instaurarsi di zone a diversa umidità assoluta o relativa:

$$\frac{dm}{dt} = k_x A (x_{sup} - x_g) \quad (3.10)$$

dove x_{sup} ed x_g sono i valori di umidità assoluta rispettivamente alla superficie del materiale e nell'aria.

Da (3.9) e (3.10) e ricordando che il calore può essere trasferito nelle tre differenti modalità, si ha l'espressione generale:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{(q_c + q_r + q_k)}{\lambda_{lat}} = k_x A (x_{sup} - x_g) \quad (3.11)$$

dove: q_c è il flusso di calore per convezione, q_r per radiazione, q_k per conduzione.

In sintesi, tra i fattori che influenzano l'essiccamento di un materiale abbiamo:

- l'umidità relativa dell'ambiente e il gradiente di umidità tra la superficie del pezzo e il suo interno: la presenza di una differenza di umidità è condizione necessaria affinché vi sia evaporazione, abbassando l'umidità superficiale si ottiene una maggiore velocità di migrazione dell'acqua; il gradiente che si forma però non deve essere troppo elevato, per non avere un'eccessiva velocità di essiccazione superficiale che potrebbe portare a ritiri eccessivi che potrebbero provocare delle rotture;
- la quantità di acqua contenuta all'interno del corpo e la sua viscosità: la velocità di diffusione dell'acqua aumenta quanto minore è la viscosità che diminuisce con l'aumento della temperatura;
- La permeabilità del materiale;
- l'estensione della superficie di contatto;
- la tipologia di solido da essiccare, principalmente se cristallino o amorfo: le sostanze cristalline sono caratterizzate da un basso contenuto di umidità all'equilibrio, mentre quelle amorfe da un contenuto elevato;
- La forma del pezzo da essiccare: quanto più la forma è complessa tanto più è delicato il processo di essiccazione per la difficoltà che esso proceda in modo omogeneo su tutto il pezzo da essiccare.
- le dimensioni del pezzo;
- la presenza di bolle d'aria;
- l'entità del ricambio d'aria;
- i materiali impiegati per la realizzazione delle apparecchiature che influenzano il trasporto del calore.

Bisogna ricordare che i solidi possono contenere umidità essenzialmente in due forme:

- ❖ umidità libera, ossia che può liberamente trasferirsi da e verso il solido a seconda della temperatura, tensione di vapore del sistema aria-acqua; essa è presente nei pori del solido;
- ❖ umidità legata, ossia che è trattenuta dal solido negli spazi capillari mediante legami deboli. Essa è più difficile da allontanare rispetto all'umidità libera.

L'evaporazione, configurabile nel suo complesso come il reale trasferimento di massa, si articola in:

- diffusione del vapore presente nell'aria sovrastante il liquido alla superficie;
- evaporazione quale passaggio di fase liquido/vapore;
- diffusione del liquido attraverso il materiale sino alla superficie

Il processo di essiccazione può anche essere descritto da una curva di essiccamento che dà informazioni circa il tempo necessario ad essiccare un prodotto, sotto determinate condizioni, ed i meccanismi di trasporto di materia che controllano la velocità di essiccamento. Tali curve possono essere rappresentate in varie forme, ad esempio come umidità in funzione del tempo o come velocità in funzione dell'umidità. I processi di essiccamento pertanto non sono in genere processi lineari e l'eliminazione del contenuto di umidità relativamente basso è caratterizzato da tempi relativamente lunghi. In genere si può affermare che l'essiccazione segue le seguenti fasi:

- Inizialmente il solido umido, a contatto con l'aria calda e secca, si riscalda fino all'equilibrio termico.
- All'equilibrio termico la temperatura della superficie del solido corrisponde alla T_{bu} dell'aria essiccante e si raggiunge quindi una *condizione stazionaria*. Successivamente, l'acqua evapora a velocità costante dalla superficie del solido, quindi l'acqua superficiale evaporata viene costantemente sostituita da acqua presente negli spazi capillari del solido, che giunge in superficie mediante diffusione. In questa fase il

calore latente di evaporazione viene fornito dall'aria, che si raffredda adiabaticamente e si umidifica. Il calore ceduto dall'aria è uguale al calore acquistato dal solido e la temperatura del solido rimane costante.

- Proseguendo nel processo di essiccazione si raggiunge il punto corrispondente ad una *umidità critica*: da questo punto in poi la velocità di evaporazione diminuisce perché sempre più zone del solido sono già secche e la diffusione dell'acqua interna al solido non riesce più a mantenerle umide e quindi diminuisce la superficie di contatto aria-acqua. In questa fase, che, in genere, è più lunga della precedente, la temperatura del solido aumenta perché il calore fornito dall'aria è maggiore del calore latente richiesto per l'evaporazione dell'acqua.
- Successivamente la velocità di evaporazione diminuisce ancora più rapidamente in quanto tutta la superficie del solido è secca e la poca acqua, che arriva con difficoltà dall'interno per diffusione, evapora istantaneamente.
- La *velocità di evaporazione si annulla* nel punto in cui l'umidità residua interna del solido ha raggiunto il punto di equilibrio con l'aria essiccante.

Per poter predire o modellare la velocità di essiccamento è necessario conoscere non solo i meccanismi di trasporto di calore e di materia coinvolti, ma anche la curva dell'acqua di equilibrio del prodotto da essicare. I dati di equilibrio sono comunemente riportati come relazione tra umidità relativa dell'aria e quantità di acqua trattenuta dal prodotto in equilibrio con l'aria. Ad ogni modo, queste curve sono specifiche di ogni prodotto e dipendono dalla temperatura.

Tutti i processi di essiccamento di un solido umido con un gas ad una data temperatura presentano alcune caratteristiche comuni. La temperatura del solido, subito dopo il contatto con il mezzo essiccante, varia sino a raggiungere un valore stazionario [28]. In condizioni stazionarie, qualora si potesse misurare la temperatura della superficie del solido umido, si troverebbe che questa è la temperatura del termometro umido del mezzo essiccante. Le temperature all'interno del solido tendono ad eguagliare la temperatura del termometro umido del gas, tuttavia esiste sempre una differenza a causa della lentezza del trasferimento di materia e calore. Allorquando tali temperature hanno raggiunto il

valore della temperatura del termometro umido del gas, esse rimangono stabili e la velocità di essiccamento rimane costante. Le figure 3.3 e 3.4 sono tipiche curve di essiccamento. Nella Figura 3.3 viene riportato il contenuto di umidità in funzione del tempo, mentre nella Figura 3.4 si riporta la velocità di essiccamento in funzione del contenuto di umidità.

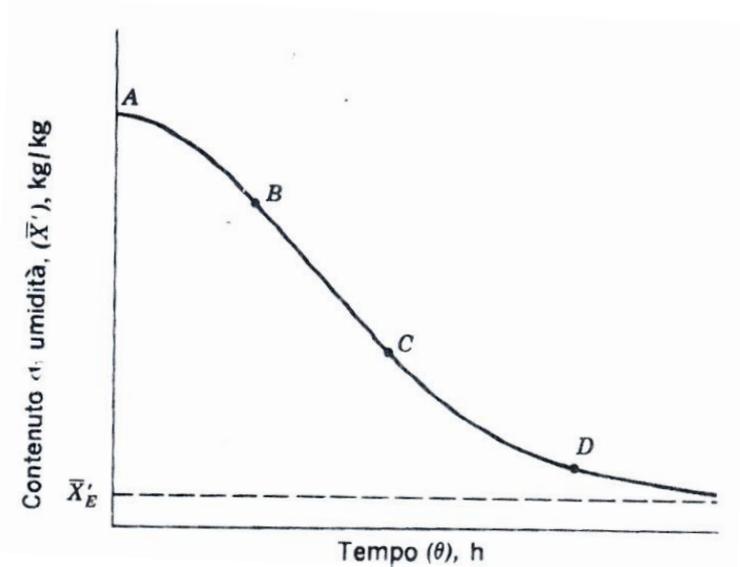


Figura 3.3. Diagramma in condizioni di essiccamento costanti che riporta contenuto di umidità rispetto al tempo.

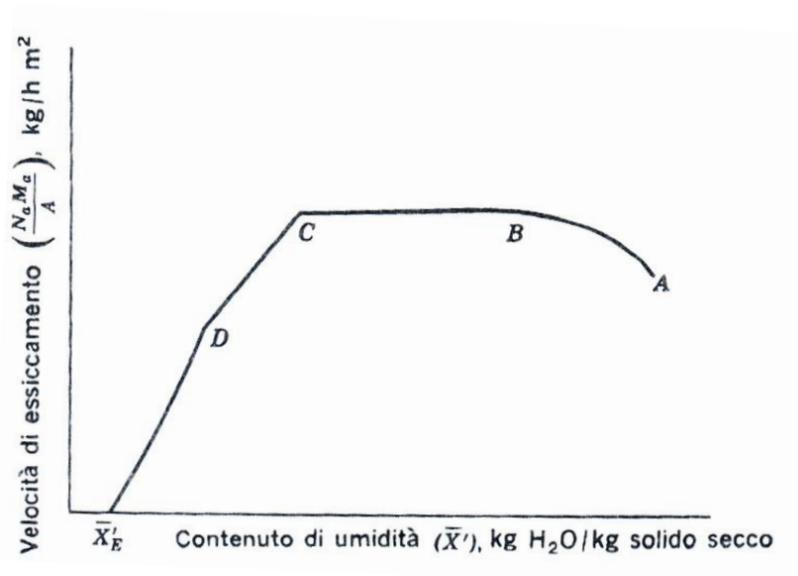


Figura 3.4. Diagramma della velocità di essiccamento in funzione del contenuto di umidità.

La Figura 3.4 è molto più descrittiva del processo di essiccamento, ma si ottiene differenziando i dati della figura 3.3, pertanto è soggetta a notevole dispersione di dati e relativa incertezza. La forma di queste tipiche curve di essiccamento viene determinata dal meccanismo secondo il quale l'essiccamento ha luogo. Il periodo di essiccamento, rappresentato dal tratto A-B delle due curve indica il periodo non stazionario, durante il quale la temperatura del solido si porta al suo valore stazionario. In questo periodo la velocità di essiccamento può diminuire, ma può anche aumentare. Il tratto B-C rappresenta la fase a velocità costante, dove l'intera superficie esposta è satura di acqua. La ruvidità della superficie del solido sulla quale si trova il velo di liquido può aumentare i coefficienti di trasmissione di materia e calore. Il meccanismo di movimento del liquido e la relativa velocità variano notevolmente a seconda della struttura del solido. Nei solidi con spazi vuoti aperti abbastanza grandi, il meccanismo è controllato dalla tensione superficiale e dalle forze di gravità all'interno del solido. Nei solidi a struttura fibrosa e amorfa il liquido si muove per diffusione attraverso il solido. Questo periodo termina quando il soluto ha raggiunto il "*contenuto critico di umidità*". Oltre questo punto la temperatura della superficie aumenta e la velocità di essiccamento diminuisce rapidamente. Il "*periodo di caduta della velocità*" può essere molto più lungo del periodo a velocità costante, sebbene la relativa eliminazione di umidità potrebbe essere molto inferiore. La velocità di essiccamento si approssima a zero in corrispondenza di un certo *contenuto di umidità di equilibrio*, cioè del minimo contenuto di umidità ottenibile nelle particolari condizioni di essiccamento. Nel tratto C-D della Figura 3.4, detto "primo periodo di caduta della velocità", la superficie diventa sempre meno bagnata dal liquido, in quanto la velocità di spostamento del liquido verso la superficie è minore della velocità di trasferimento di materia dalla superficie finché, nel punto D, non vi sono più parti di superficie sature di liquido. La parte della superficie che è satura si essicca per trasferimento convettivo di calore e materia verso il gas essiccante. Il vapore si diffonde dagli strati inferiori del solido verso la parte di superficie che non è satura e continua la sua diffusione nel gas. Questo meccanismo è lento rispetto al trasferimento convettivo dalla superficie satura. Al progredire della diminuzione del contenuto di umidità, il percorso per la diffusione di calore e materia diventa più lungo ed il potenziale di concentrazione raggiunge il valore \bar{X}'_E , ossia il contenuto di umidità di equilibrio, in corrispondenza del quale cessa l'essiccamento. Il contenuto di umidità di equilibrio si

raggiunge quando la tensione di vapore del solido è uguale alla pressione parziale del vapore nel gas di essiccamento entrante, Questo periodo è detto " il secondo periodo di caduta della velocità".

3.3 Classificazione dei materiali in base al comportamento all'essiccazione

I materiali si possono dividere in due categorie principali, sulla base del loro comportamento durante il processo di essiccazione. La prima di queste due categorie è costituita dai solidi granulari o cristallini che trattengono umidità negli interstizi tra le particelle o in pori superficiali aperti. In questi materiali il movimento dell'umidità è abbastanza libero ed è il risultato di un'interazione tra le forze gravitazionali e quelle di tensione superficiale o capillari [28]. Durante il periodo a velocità costante si perviene a bassi contenuti di umidità. Il periodo di caduta di velocità in genere è rappresentato da una retta sul diagramma velocità-contenuto di umidità. Nel caso di materiali idrati, le condizioni di essiccamento hanno effetto sul prodotto variandone l'idratazione, ma negli altri casi i materiali di questa categoria non sono influenzati dalle condizioni di essiccamento entro un largo intervallo di temperatura e di umidità. Tra i materiali che appartengono a questa classe sono da annoverare i minerali macinati, il biossido di titanio, i catalizzatori, i fosfati di sodio. Per questi materiali il contenuto di umidità di equilibrio è molto vicino a zero. La seconda categoria è costituita dalla maggioranza dei solidi organici, amorfi, fibrosi o tipo gel. Questi materiali trattengono umidità come parte integrante della struttura solida o intrappolata entro fibre o minuscoli pori interni. In queste sostanze il movimento dell'umidità è lento e probabilmente ha luogo per diffusione del liquido attraverso la struttura solida. Le curve di essiccazione di queste sostanze presentano periodi a velocità costante molto brevi, al termine dei quali i valori del contenuto critico di umidità sono alti. Per la stessa ragione, anche il primo periodo di caduta della velocità è breve e la maggior parte del processo di essiccazione è controllato dalla diffusione del liquido. Quasi tutto il processo di essiccazione ha luogo durante il secondo periodo di caduta della velocità. In generale il contenuto di umidità di equilibrio è alto e questo indica che buona parte dell'acqua è così intimamente trattenuta nella struttura solida o racchiusa in pori così minuscoli cosicché la tensione di vapore rimane notevolmente bassa [29].

Nei solidi relativamente omogenei, l'umidità si muove verso la superficie principalmente per diffusione molecolare. La velocità di movimento dell'umidità è espressa dalla legge di Fick, opportunamente modificata, ossia:

$$\frac{d\bar{X}'}{dt} = \mathcal{D}_{L^*} \frac{d^2\bar{X}'}{dx^2} \quad (3.12)$$

dove \mathcal{D}_{L^*} , [m²/h], è il coefficiente di diffusione in fase liquida applicabile al movimento attraverso la fase solida. L'integrazione della 3.13 necessita della scelta delle condizioni ai limiti e delle caratteristiche di \mathcal{D}_{L^*} . Quanto alle limitazioni, Sherwood [30] e Newman [31] hanno considerato il caso semplificato con \mathcal{D}_{L^*} costante, con l'essiccamento che si manifestava da una delle facce di una lastra, mentre i lati ed il fondo restavano isolati ed, assumendo che il contenuto iniziale di umidità fosse uniformemente distribuito nella lastra, hanno ottenuto:

$$\frac{\bar{X}' - \bar{X}'_E}{\bar{X}'_C - \bar{X}'_E} = \frac{8}{\pi^2} \left\{ e^{-\mathcal{D}_{L^*} t \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} + \frac{1}{9} e^{-9\mathcal{D}_{L^*} t \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} + \frac{1}{25} e^{-25\mathcal{D}_{L^*} t \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} + \dots \right\} \quad (3.13)$$

dove:

- l è la distanza tra la faccia ed il centro di una lastra che venga essiccata da una sola faccia;
- \bar{X}' è il contenuto di umidità del solido al tempo t (liquido/kg solido secco);
- \bar{X}'_E è il contenuto di umidità di equilibrio;
- \bar{X}'_C è il contenuto di umidità all'inizio del periodo in cui la velocità di essiccamento è controllata dalla diffusione.

Considerato che il movimento per diffusione del liquido è relativamente lento, è possibile che la curva della velocità di essiccamento non mostri alcun periodo a velocità costante. In ogni caso \bar{X}'_C sarà il contenuto di umidità alla fine del periodo a velocità costante e sarà uguale al contenuto critico di umidità. Il meccanismo di diffusione molecolare non si addice nel caso di solidi granulari o di sostanze la cui struttura presenti pori grandi e pareti. Nei materiali di questo tipo il movimento del liquido entro il solido è dato dalla risultante del carico idrostatico e degli effetti di tensione superficiale. A causa della

tensione superficiale la pressione al di sotto di una superficie liquida curva è differente da quella di una superficie piana. Si può dimostrare che, per una sfera di raggio r , si ha [32]:

$$-\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \quad (3.14)$$

dove:

- $-\Delta P$ [kg/(cm²)] è la diminuzione della pressione causata dall'effetto di tensione superficiale;
- γ [kg/cm] è la tensione superficiale al contatto tra le fasi liquida e gassosa;
- r [cm] è il raggio di curvatura della sfera.

A bassi contenuti di umidità, come quelli compresi tra i punti C e D della figura 3.4, l'interfaccia liquida inizia a ritirarsi dalla superficie, sebbene non in modo uniforme, in quanto i raggi di curvatura dei menischi liquidi sulla superficie non sono uniformi. Durante il processo di essiccamento, il liquido dei pori più grandi tende a ritirarsi, fino a quando si restringe in maniera tale da formare nel poro una curvatura che possa bilanciare quella dei pori pieni, o fino a quando arrivi al punto tale che lo sbilanciamento della forza di tensione superficiale sia compensato dallo sbilanciamento della forza gravitazionale. Quando l'umidità diminuisce, un numero sempre maggiore di pori superficiali perde in questo modo il contenuto d'acqua. In Figura 3.5 viene mostrata la fase solida durante questo periodo.

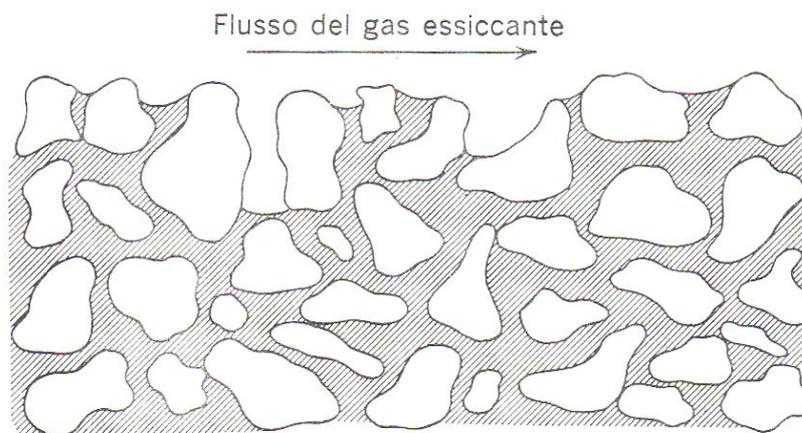


Figura 3.5. Distribuzione dell'umidità in un letto di solidi granulari durante il primo periodo di caduta della velocità.

L'essiccamento della superficie satura procede alla stessa velocità che si ha durante la fase a velocità costante. La velocità complessiva diminuisce, in quanto sia il calore che la massa si diffondono attraverso gli strati superficiali del solido. Nel momento in cui si raggiunge il punto D, detto anche "secondo punto critico", l'umidità si è ritirata dai pori superficiali. In Figura 3.6 è mostrata la distribuzione dell'umidità durante il secondo periodo di caduta della velocità.

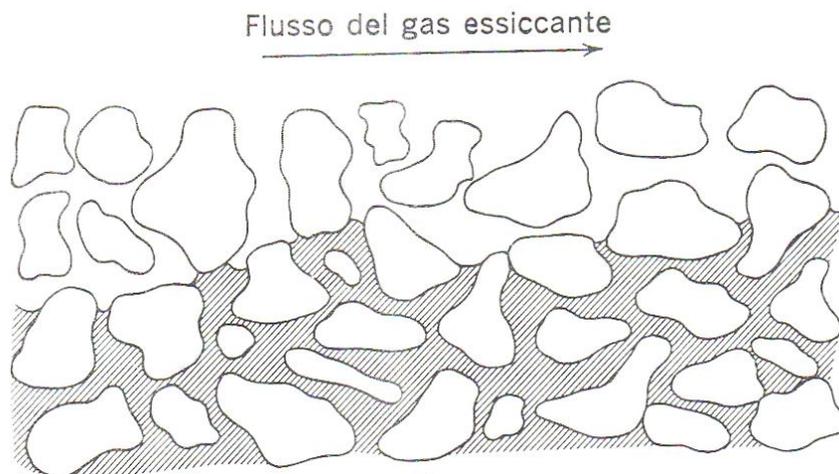


Figura 3.6. Distribuzione dell'umidità in un letto di solidi granulari durante il secondo periodo di caduta della velocità.

Sperimentalmente è difficile trovare il secondo punto critico e le curve variano sia come forma che come pendenza in funzione della struttura del solido e della facilità di movimento dell'umidità al suo interno. Alla fine del processo l'umidità residua è convogliata in piccole tasche distribuite tra i pori del solido come mostrato in Figura 3.7.

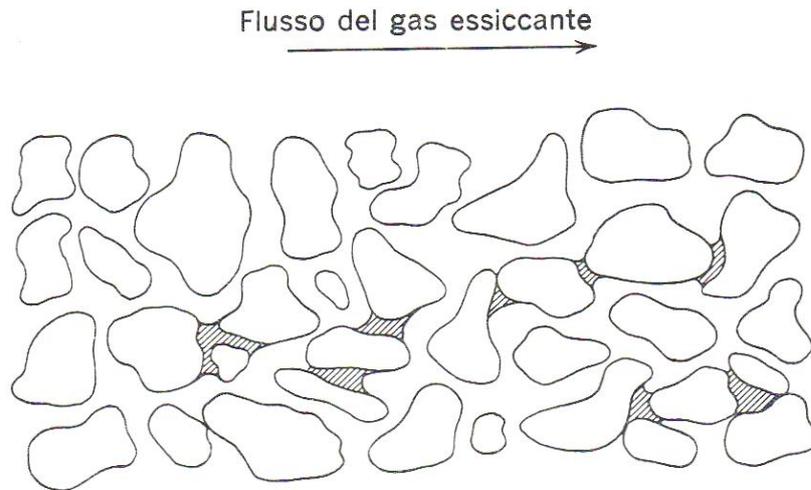


Figura 3.7. Distribuzione dell'umidità in un letto di solidi granulari verso la fine del processo di essiccamento.

3.4 Calcolo del tempo di essiccamento

Al fine di valutare il tempo di essiccamento è necessario analizzare ciascuna fase presente nella curva della velocità di essiccamento, in quanto i fattori di controllo differiscono da una fase all'altra. Definiamo intanto la velocità R di essiccamento [$\text{kg}/(\text{h m}^2)$] [28]:

$$R = - \frac{m_s d\bar{X}'}{A dt} \quad (3.15)$$

dove:

- m_s indica il peso in kg del solido secco,
- A rappresenta l'area esterna,
- \bar{X}' è il contenuto medio di umidità del solido.

Il segno meno serve per bilanciare algebricamente il fatto che \bar{X}' è negativa, visto che durante l'essiccamento diminuisce nel tempo.

Dalla 3.15, integrando, si può ottenere il tempo di essiccamento, ossia:

$$\int_0^t dt = \frac{-m_s}{A} \int_{\bar{X}'_1}^{\bar{X}'_2} \frac{d\bar{X}'}{R} \quad (3.16)$$

dove \bar{X}'_1 indica il contenuto medio di umidità al tempo 0 mentre \bar{X}'_2 indica il contenuto medio di umidità al tempo t . Nella fase a velocità costante, che indichiamo come R_c , la 3.16 può essere facilmente integrata e si avrà:

$$t_c = \frac{m_s}{AR_c} (\bar{X}'_1 - \bar{X}'_c) \quad (3.17)$$

dove:

- t_c indica il tempo di essiccamento a velocità costante;
- \bar{X}'_1 indica il contenuto di umidità all'inizio del processo di essiccamento;
- \bar{X}'_c indica il contenuto di umidità alla fine della fase a velocità costante.

Possiamo osservare che per avere tempi brevi di essiccazione è conveniente essiccare piccoli pezzi di prodotto, infatti, dividendo il prodotto la massa totale rimane la stessa, ma si aumenta l'area esterna A . Il valore di R_c dipenderà dai coefficienti di trasferimento di massa ed energia tra il mezzo essiccante e la superficie solida.

3.5 Classificazione dei processi di essiccazione

Le apparecchiature utilizzate per il processo di essiccazione sono detti essiccatori. In un essiccatore, come detto precedentemente, l'aria cede calore al solido umido e provoca l'evaporazione dell'acqua. Tale processo avviene senza scambio di calore con l'esterno per cui l'aria si raffredda e si umidifica seguendo una delle rette di raffreddamento adiabatico presenti nel diagramma igrometrico che descrive il sistema aria-acqua ad 1 atmosfera. I processi di essiccazione possono essere classificati secondo differenti criteri, in particolare per:

- modalità di trasferimento del calore;
- stato di movimento o riposo in cui viene tenuto il materiale da essiccare.

Durante l'essiccazione notevoli quantità di energia devono essere cedute al materiale da essiccare allo scopo di consentire la vaporizzazione del liquido da rimuovere. Questa energia viene somministrata con trasferimento di calore. L'operazione di trasferimento del calore può essere effettuata in diversi modi:

- mediante riscaldamento per conduzione;
- mediante riscaldamento per convezione;
- mediante riscaldamento per irraggiamento;
- mediante riscaldamento dielettrico.

Tipici essiccatori in cui il calore viene trasmesso per conduzione sono costituiti da una camera di essiccazione dotata di una camicia riscaldante in cui viene fatta circolare acqua calda o vapor d'acqua surriscaldato. In tali essiccatori la velocità di essiccazione diminuisce durante il processo a causa del decremento dell'efficacia della trasmissione del calore dalla parete della camera al solido. Alla fine del processo il fattore limitante deriva dalla rimozione dei vapori dal materiale solido. Negli essiccatori con riscaldamento a convezione un gas caldo è inviato sulla superficie del solido umido, fornendo sia il calore necessario all'evaporazione del liquido, sia il mezzo per rimuovere i vapori che si formano. In questo tipo di essiccatori il coefficiente di trasmissione del calore è solitamente buono, mentre il fattore limitante la velocità di essiccazione è determinato dall'allontanamento dei vapori. Nell'essiccazione mediante radiazioni infrarosse la somministrazione del calore si realizza con radiazioni comprese tra 10.000 e 16.000 Å (Angstrom) che penetrano il materiale e causano l'innalzamento termico. Materiali dotati di scarsa conducibilità elettrica e termica possono essere essiccati mediante riscaldamento dielettrico. Il materiale da essiccare viene posto in un campo elettrico alternato con differenze di potenziale comprese tra 1-30 kV e con frequenze comprese tra 2-100 MHz. Una parte dell'energia elettrica viene trasformata in calore con aumento della temperatura.

La scelta delle condizioni operative per l'essiccazione dipende dalle caratteristiche del materiale da essiccare. L'evaporazione del liquido trattenuto da un solido per adesione superficiale, capillarità o comunque in altro modo è un fenomeno che si manifesta alla superficie del materiale. L'evaporazione è poi alimentata da quote di liquido che dagli strati interni del materiale si diffonde in superficie a sostituire quello che evapora. Per questo motivo è importante che la superficie del materiale da essiccare sia la più ampia possibile. Qualora il solido sia termostabile si opera a temperature superiori a quella di ebollizione del liquido da allontanare, altrimenti l'evaporazione viene condotta sottovuoto al fine di diminuire la temperatura di ebollizione del liquido. Per effettuare l'essiccazione

sottovuoto gli essiccatori devono essere dotati di un dispositivo aspirante per creare il vuoto e di trappole a bassa temperatura per la condensazione dei vapori che potrebbero danneggiare la pompa a vuoto [33].

3.5.1 Sistemi diretti e sistemi indiretti

A seconda delle modalità secondo cui si effettua il trasferimento di calore, l'operazione di essiccazione realizzata industrialmente può essere effettuata in due diversi modi:

- Essiccamento diretto
- Essiccamento indiretto

Nell'essiccamento con riscaldamento diretto il materiale da trattare è riscaldato per convezione per mezzo di una corrente di gas caldi che hanno anche la funzione di asportare il liquido da vaporizzare. Con l'essiccamento diretto generalmente si usa aria calda a basso contenuto di umidità. Essa viene posta a contatto diretto con il solido da essiccare. In alternativa all'aria si può usare anche vapore surriscaldato, fumi di combustione o altri gas inerti. Con il metodo indiretto il calore viene trasmesso al solido da trattare per conduzione attraverso una superficie di separazione. Questa tecnica può essere vantaggiosa quando il vapore del liquido separato deve essere recuperato, o per materiali sotto forma di polveri. Il calore in questo caso può essere fornito da vapore, acqua calda, fumi di combustione o sali fusi, resistenze elettriche, ecc. Durante il processo, il solido viene mantenuto in agitazione in modo da rinnovare continuamente la superficie di contatto tra solido e parete di separazione. Il sistema indiretto è particolarmente impiegato quando si deve operare un'essiccazione sotto vuoto o quando si debba recuperare il solvente vaporizzato [34]. L'essiccamento di tipo indiretto impedisce qualunque miscelazione fra l'aria di essiccazione e i residui di combustione. Il metodo indiretto è necessario quando il prodotto solido richiede particolari condizioni di igiene e sicurezza. Quando la sostanza da essiccare non è un prodotto alimentare e non può danneggiarsi si possono usare anche prodotti di combustione, come fumi derivanti da altri processi con conseguente risparmio energetico. Quando un prodotto non può tollerare alte temperature, come nel caso di prodotti alimentari, si utilizza aria fredda,

preventivamente essiccata per contatto con materiali igroscopici o attraverso un processo di raffreddamento [35].

3.5.2 Le variabili di processo

In genere tutti i materiali igroscopici e non, durante le diverse fasi, di trasporto, di stoccaggio o di sintesi, tendono ad assorbire l'umidità raggiungendo una condizione di equilibrio con l'ambiente. In taluni materiali l'umidità è trattenuta superficialmente, mentre in altri viene assorbita anche all'interno. L'umidità, sia interna che esterna, influisce negativamente sulla qualità del prodotto che deve essere deumidificato. In genere, le schede tecniche di un materiale riportano quando l'essiccazione sia necessaria con le indicazioni di temperatura e tempo di permanenza per una trasformazione ottimale. È inoltre importante conoscere la velocità di assorbimento del materiale, in quanto le sostanze che assorbono velocemente l'umidità, dopo l'essiccazione, devono essere trasportate con aria secca e non entrare in contatto con l'aria ambiente. L'umidità viene eliminata utilizzando aria calda. L'aria ha, infatti, la capacità di trattenere l'umidità, una capacità che aumenta all'aumentare della temperatura. Bisogna però tenere presenti alcuni fattori che possono influenzare il contenuto di umidità:

- il tempo che intercorre tra la produzione e l'impiego;
- il tipo di imballo che viene utilizzato;
- il tipo di materiale e la sua velocità di assorbimento dell'umidità;
- la temperatura;
- le condizioni ambientali.

L'aria ha la possibilità di trattenere l'acqua fino alla sua saturazione. La quantità d'acqua che rende saturo l'aria aumenta con l'aumentare della temperatura. Ad esempio, 1 kg d'aria è reso saturo a 20 °C da 14.7 g di acqua, a 35 °C da 36.6 g, e a 50 °C da 86.2.

Poiché la quantità d'acqua che porta l'aria a saturazione cambia al variare della temperatura, è indispensabile fissare, oltre alla percentuale d'acqua contenuta nell'aria, anche la temperatura alla quale l'umidità relativa si riferisce [36]. Data la corrispondenza fra la temperatura dell'aria e la quantità d'acqua che, a quella temperatura, porta l'aria a

saturatione si potrà fissare la temperatura alla quale l'aria diventa satura, piuttosto che fissare la quantità d'acqua contenuta nell'aria. Questa temperatura, che fornisce indicazione circa la quantità d'acqua contenuta nell'aria, rappresenta il dew point dell'aria. Il dew point è la temperatura alla quale l'aria deve essere raffreddata affinché inizi la condensazione dell'acqua in essa contenuta, ossia affinché diventi satura. Il dew point definisce pertanto la quantità d'acqua contenuta nell'aria, pertanto un basso valore per il dew point è indice di aria più secca. Le variabili principali in un processo di essiccazione sono:

- umidità di partenza del materiale;
- umidità residua richiesta;
- dimensioni del materiale;
- tipo di materiale;
- tipo di contatto fra superficie del materiale umido e mezzo essiccante
- temperatura dell'aria;
- portata del flusso d'aria o del fluido essiccante;
- dew point dell'aria;
- tempo di essiccazione.

A seconda del tipo di processo e delle condizioni operative adottate, una variabile può risultare predominante rispetto alle altre. Se aumenta l'umidità di partenza del materiale, aumenta il tempo necessario per l'essiccazione. Tutto il processo è influenzato dall'umidità residua, il cui valore è funzione del tipo di materiale e delle caratteristiche che si desiderano per il prodotto finito. Se aumenta la temperatura dell'aria di processo diminuisce il tempo di deumidificazione, per cui si dovrà lavorare ad una temperatura più alta possibile, compatibilmente con il tipo di materiale da trattare. Ad un determinato dew point dell'aria di processo, si può raggiungere più velocemente la stessa umidità residua aumentando il flusso dell'aria. Per ogni tipo di materiale è fissato un valore "optimum" di fabbisogno d'aria al di sotto del quale non si opera in condizioni ideali. La forma del materiale influisce sul tempo di essiccazione: al diminuire della superficie, per unità di volume, aumenta il tempo teorico di permanenza. In funzione del tipo di materiale, fissato

il dew point dell'aria, stabilita la temperatura e la portata dell'aria, la buona riuscita dell'essiccazione dipenderà esclusivamente dal tempo che resta uno dei fattori più importanti. bisogna inoltre distinguere tra *essiccazione statica* ed *essiccazione dinamica*. L'essiccazione statica (o batch) è un processo discontinuo e non automatico. L'essiccazione dinamica o continua è, invece, un processo automatico per cui il materiale è prelevato con continuità. Per quanto concerne i materiali igroscopici, bisogna tener presente non solo la quantità di acqua assorbita, ma anche la velocità di assorbimento dell'umidità, in funzione della quale si decide per un processo di tipo statico o dinamico.

3.5.3 Tipologie comuni di essiccatori

L'applicazione dei principi fondamentali al calcolo delle apparecchiature di essiccamento non è immediata. Si hanno difficoltà nel tracciare le curve delle velocità di essiccamento, ma si hanno anche problemi dovuti alla variazione delle condizioni all'interno dell'essiccatore, alla differenza tra l'area di trasferimento di energia e l'area di trasferimento di massa, alla forma del percorso del gas ed all'effetto delle variabili operative. La scelta dell'essiccatore è normalmente basata su prove preliminari, eseguite essiccando il materiale in condizioni che simulino quelle industriali. Esistono quindi differenti tipologie di essiccatori e la loro scelta è legata al tipo di processo, nonché alla tipologia del materiale da essiccare. La forma e la struttura del materiale solido da essiccare hanno una notevole influenza sul processo di essiccazione. Il materiale solido di forma irregolare, con struttura fibrosa, si essicca con maggiore difficoltà rispetto al materiale solido con struttura porosa. Il riscaldamento del materiale può essere sia di tipo diretto che indiretto. Negli essiccatori a riscaldamento diretto il materiale umido entra in contatto con i gas caldi che possono essere costituiti dai prodotti della combustione o da aria riscaldata. Quando è necessario raggiungere temperature elevate, senza che il materiale sia a contatto con i prodotti della combustione, si ricorre al riscaldamento di tipo indiretto. I prodotti organici sono generalmente termodegradabili, per cui è necessario utilizzare processi di essiccamento di tipo indiretto al fine di evitare il contatto con l'aria calda. Gli essiccatori che realizzano il sistema di tipo diretto sono quelli a camera, a canale, a tele continue, a polverizzazione, a tamburo, ecc.. Gli essiccatori che

realizzano il sistema di tipo indiretto sono quelli a tamburo sottovuoto, a cilindro, a piani vibranti. Gli essiccatori sono comunque classificati sulla base dei seguenti fattori:

- somministrazione del calore (processo a temperatura ambiente, mediante riscaldamento o per circolazione di gas caldo);
- natura del materiale (solidi granulari inamovibili, solidi granulari movibili, ossia considerati come fluidi);
- natura del ciclo (a ciclo continuo o discontinuo);
- pressione di esercizio (a pressione atmosferica, a bassa pressione, sottovuoto spinto);
- direzione del fluido riscaldante (in equicorrente o in controcorrente).

Nell'industria farmaceutica e dei coloranti sono particolarmente utilizzati gli essiccatori, discontinui a ripiani. Essi consistono essenzialmente di una camera o più compartimenti in cui si trovano dei ripiani sui quali viene posto il materiale da essiccare. L'essiccazione viene realizzata inviando aria calda sui ripiani mediante ventilazione forzata da una o più ventole. Per essiccare materiali termolabili sono utilizzati essiccatori discontinui a ripiani a pressione ridotta. Il tipo più semplice di essiccatori a pressione ridotta è il classico armadio a vuoto (Figura 3.8). Esso consiste di una camera al cui interno sono disposti ad altezza variabile un certo numero di ripiani o carrelli riscaldabili.

L'aria viene scaldata da resistenze elettriche o da vapore che circola in tubi.

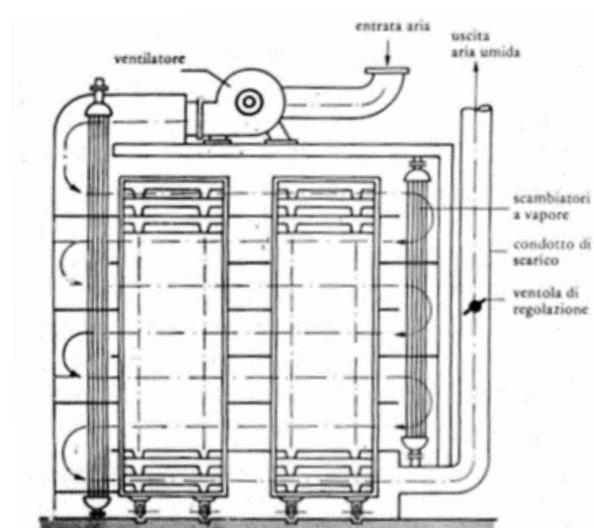


Figura 3.8. Schema di un essiccatore ad armadio.

Negli essiccatori a ripiani le condizioni di essiccamento sono controllate e possono essere cambiate. I ripiani più vicini all'ingresso dell'aria, tuttavia, sono soggetti a condizioni differenti da quelle dei ripiani vicini all'uscita dell'aria, per cui ne consegue che il materiale di alcuni ripiani si essicca più rapidamente rispetto ad altri. Questo non è rilevante per i materiali che non sono sensibili al calore, altrimenti i ripiani devono essere tolti in tempi diversi, oppure si deve ridurre la temperatura. Tale difficoltà può essere superata mediante l'inversione del passaggio dell'aria. Gli essiccatori a ripiani possono essere resi continui muovendo i solidi umidi con continuità attraverso la camera di essiccamento. Questo può essere ottenuto montando i ripiani su rulli, trasportando l'alimentazione attraverso l'essiccatore su un nastro oppure muovendo su rulli, attraverso l'essiccatore, il materiale umido. Il materiale è soggetto ad un mezzo essiccante in condizioni variabili, pertanto la curva caratteristica di essiccamento è sensibilmente alterata. Durante la fase "a velocità costante" non si ha più una velocità di essiccamento costante. Essa diminuisce al diminuire della temperatura dell'aria essiccante, sebbene la temperatura della superficie del materiale rimane costante. Il periodo di caduta della velocità può essere determinato suddividendo in un certo numero di intervalli la variazione totale di umidità ed assumendo che, in ciascun intervallo, la temperatura del mezzo essiccante e l'umidità siano costanti.

Essiccatori discontinui con agitazione (di tipo orizzontale o verticale) sono indicati per essiccare materiale friabili che non passano attraverso uno stadio molto viscoso durante l'essiccazione oppure sostanze tossiche che devono essere completamente isolate durante il processo (Figura 3.9).

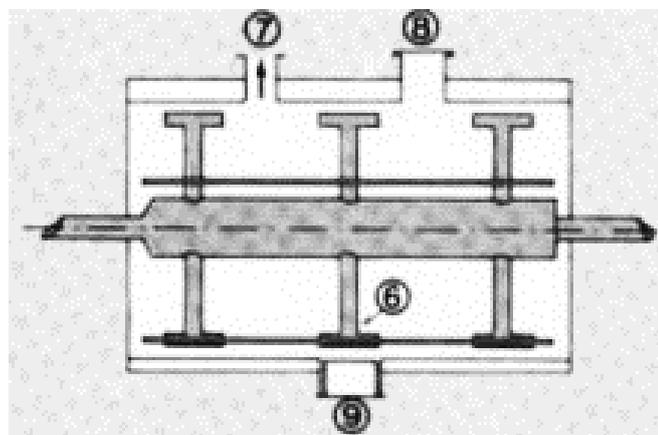


Figura 3.9. Schema di un essiccatore con agitazione di tipo orizzontale (6: agitatore, 7: scarico del gas, 8: caricamento del materiale, 9: scarico del materiale essiccato).

La determinazione della velocità e del tempo di essiccamento negli essiccatori continui necessita di bilanci di massa ed energia che si possono fare mediante soluzione per approssimazioni successive delle equazioni determinate per ciascun piccolo tratto dell'essiccatore. La prima approssimazione è l'assunzione che tutto il calore sia trasmesso dall'aria al materiale per sola convezione, operando in condizioni adiabatiche. La seconda approssimazione consiste nell'assumere che l'area di trasferimento di massa sia uguale a quella di trasferimento di energia. Questa approssimazione è relativamente valida solo negli essiccatori dove l'aria attraversa il solido da essiccare. La terza approssimazione prevede che non vi sia evaporazione durante la fase di riscaldamento iniziale e durante la fase di raffreddamento. Un'altra approssimazione consiste nell'assumere che la separazione dell'umidità avvenga solo alla temperatura di saturazione adiabatica. Questo consiste nell'assumere che il riscaldamento del solido, che avviene durante il periodo di caduta della velocità, avvenga dopo che la separazione dell'umidità sia completata. Questa condizione si verifica nell'essiccamento di materiali granulari sabbiosi, ma può portare a gravi errori nel caso di materiali porosi o fibrosi.

Per materiali termolabili, che possano sopportare temperature elevate per breve tempo, sono anche indicati gli essiccatori a tamburo rotante ad asse orizzontale, sistemi di essiccamento tra i più diffusi. All'interno del tamburo sono montate varie tipologie di palette, di rovesciamento, di avanzamento e di alto rendimento, che favoriscono lo scambio termico, generalmente tra gas caldi ed i materiali da essiccare. In funzione del moto relativo tra il fluido di lavoro ed il prodotto da essiccare si distinguono due tipologie di essiccatori a tamburo:

1. essiccatore a tamburo equicorrente;
2. essiccatore a tamburo controcorrente.

Nel primo caso il fluido è immesso in modo che il suo moto avvenga nello stesso verso del materiale in essiccazione (Figura 3.10).

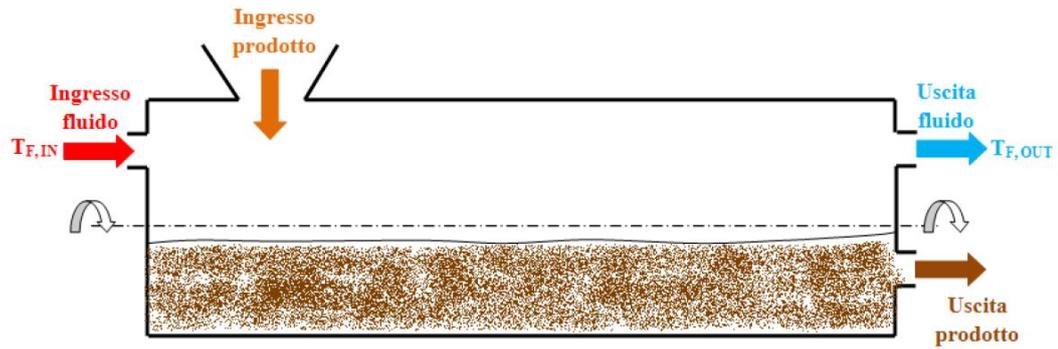


Figura 3.10. Schema di un essiccatore in equicorrente.

Nel secondo caso il fluido di lavoro è immesso in modo che il suo moto avvenga nel verso contrario a quello del materiale in essiccazione (Figura 3.11).

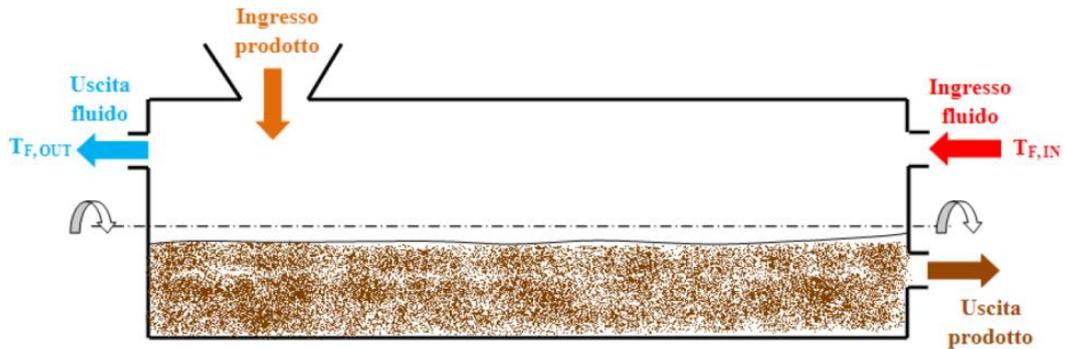


Figura 3.11. Schema di un essiccatore in controcorrente.

Questa seconda tipologia risulta meno conveniente rispetto alla prima, in quanto potrebbe accadere che materiali, i quali non possono sopportare temperature elevate, subiscano all'uscita un essiccamento eccessivo causato dal possibile contatto diretto con l'aria calda in ingresso. Il materiale da essiccare e i gas caldi entrano in un tamburo rotante (Figura 3.12) e rimangono all'interno per il tempo necessario per il riscaldamento della massa e l'evaporazione dell'acqua con continui ribaltamenti che favoriscono l'essiccamento. Le speciali palette provvedono a far avanzare il materiale fino allo scarico, mentre il materiale leggero viene trasportato con il flusso dei gas. Il tamburo ed il bruciatore sono dimensionati in base alla quantità di calore e al tempo di permanenza necessari al materiale per raggiungere il grado di essiccazione desiderato.



Figura 3.12. Esempio di tamburo rotante di un essiccatore rotativo.

Le fonti di calore possono essere molteplici: bruciatori a gas e/o combustibili liquidi, bruciatori per le biomasse ma le condizioni operative ideali di un essiccatoio rotativo sono comunque l'utilizzo tramite un ciclo abbinato con la cogenerazione energetica, in modo da abbattere drasticamente i costi energetici. Qualora esista un gruppo elettrogeno, ad esempio, si possono convogliare i gas di scarico in una camera di miscelazione realizzando in questo modo un notevole risparmio energetico. La resa dello scambio termico è direttamente proporzionale alla differenza delle temperature, pertanto, generalmente, l'essiccatoio viene alimentato con gas alla massima temperatura possibile compatibilmente con le caratteristiche chimiche e fisiche dei materiali da essiccare. Questo tipo di essiccatori è largamente utilizzato nell'industria chimica per essiccare sali fertilizzanti e sali potassici. Esso è anche ideale per l'essiccazione di prodotti granulari che scorrono facilmente e non richiedono tempi lunghi.

L'essiccatoio a letto fluido orizzontale (Figura 3.13) è adatto per essiccare grandi quantità di materiale. Si tratta di un essiccatoio a convezione, continuo o discontinuo, adatto per prodotti granulari ed anche per materiale termosensibile. Esso è costituito da un nastro vibrante perforato che scorre all'interno di una camera.

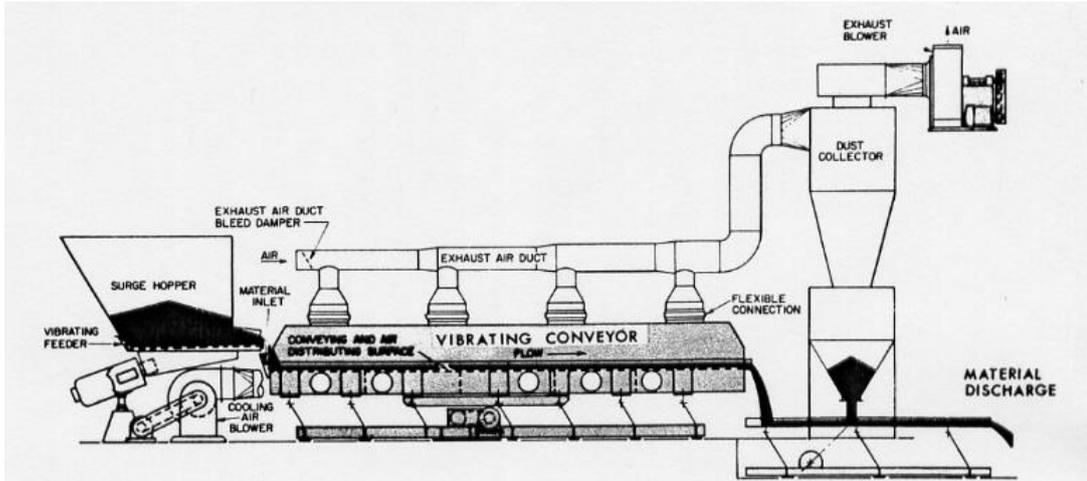


Figura 3.13. Schema di un essiccatore a letto fluido orizzontale.

In Figura 3.14 è mostrato lo schema di un essiccatore a letto fluido verticale. Questa tipologia opera in modo discontinuo, ma con grande efficienza e rapidità ed è particolarmente indicato per materiali termolabili.



Figura 3.14. Schema di un essiccatore a letto fluido verticale.

In questa tipologia di essiccatori a letto fluido un gas caldo viene forzato attraverso uno spesso strato (letto) del materiale da essiccare dalla parte inferiore di un diaframma

poroso, che sostiene il letto e che assicura anche una più completa dispersione del gas caldo nel materiale da essiccare. Il calore ceduto dal gas causa una parziale fluidificazione delle particelle da essiccare, ma senza determinare fenomeni di ebollizione nel letto. Al di sopra del letto vi è uno spazio in cui le particelle più leggere possono sedimentare, per gravità, sul letto fluidificato. La corrente d'aria calda, quindi, investe il materiale dal basso e lo tiene in sospensione. Se la velocità è troppo alta le particelle sono trascinate dal flusso, mentre se è troppo bassa esse ricadono. Le particelle che non riescono a sedimentare sono trascinate dal flusso e sono raccolte in un apposito dispositivo per la cattura delle polveri [37].

Gli essiccatori spray costituiscono il sistema più importante per l'essiccamento dei liquidi. Con il termine spray drying, o essiccamento per atomizzazione, si intende l'essiccamento di una corrente fluida che viene ridotta a particolato solido suddividendola in gocce fini e investendola con una corrente di gas caldo (normalmente aria). L'alimentazione può essere una soluzione, una sospensione o una pasta. La natura del solido prodotto varia da polvere fine, a granelli, ad agglomerati, a seconda del tipo di fluido essiccato e della metodologia di essiccamento. Il prodotto viene nebulizzato in una camera contenente aria calda. Nel sistema a ciclo aperto si utilizza aria che viene riscaldata e quindi scaricata. Il sistema a ciclo chiuso si utilizza invece se i solventi da evaporare sono esplosivi od i prodotti richiedono un gas inerte per l'essiccamento e quindi il fluido essiccante è riciclato.

Gli essiccatori sottovuoto sono utilizzati nelle industrie chimiche, farmaceutiche e cosmetiche, e permettono di asciugare le masse umide e le paste dense provenienti dai processi di filtrazione e centrifugazione. Questi operano a temperature più basse e possono essere sia continui che discontinui. Un essiccatore sottovuoto è sempre abbinato all'utilizzo di una pompa da vuoto, che consente di aspirare i vapori dei solventi e l'acqua presenti nei prodotti da trattare.

3.6. Bilanci di materia ed energia in un processo di essiccazione

Un bilancio è una relazione che intercorre tra i flussi entranti ed uscenti di una certa grandezza fisica in esame. Nella progettazione di un essiccatore, con riferimento al sistema aria-acqua, è necessario valutare i seguenti parametri di esercizio:

- portata del solido entrante/uscente;
- portata dell'aria;
- quantità di calore da fornire al solido per l'evaporazione dell'acqua;
- quantità di calore da fornire all'aria.

La valutazione di questi parametri è importante al fine di determinare al bilancio di materia ed energia relativi al fluido di lavoro ed al prodotto. Il bilancio di materia si basa sul principio di conservazione della massa, per cui tutto quello che si ha in ingresso, in termini massivi, si ha in uscita [38].

Per un bilancio macroscopico di materia, in termini di massa ed in regime stazionario vale la relazione:

$$\sum_{i=1}^{mt} \dot{m}_{i,in} - \sum_{j=1}^{nt} \dot{m}_{j,out} = 0 \quad (3.18)$$

dove con $\dot{m}_{i,in}$ si intende la portata di massa entrante e con $\dot{m}_{j,out}$ la portata uscente.

Un bilancio di energia, nella sua forma più generale per un flusso di processo è espressa da:

$$\Delta \left[\left(H + \frac{1}{2} u^2 + z g \right) \dot{m} \right] = q + \dot{W} \quad (3.19)$$

dove, a sinistra, abbiamo la variazione tra entrata ed uscita delle varie componenti che esprimono le forme di energia entranti/uscenti nel sistema. Più precisamente H esprime l'entalpia, u è la velocità del fluido ed è contenuta nell'espressione dell'energia cinetica, z rappresenta l'altezza rispetto ad un sistema di riferimento che, moltiplicata per la gravità, esprime l'energia potenziale. A destra sono espresse le quantità scambiate dal sistema, ossia la quantità di calore ed il lavoro meccanico.

In un processo di essiccamento il bilancio di materia riferito all'acqua, in condizioni stazionarie, considerato che la quantità uscente è uguale alla quantità entrante, è così espresso:

$$G \cdot x_{in} + \dot{m}_{s,s} \cdot X'_{in} = G \cdot x_{out} + \dot{m}_{s,s} \cdot X'_{out} \quad (3.20)$$

dove:

- G [kg/h] esprime la portata dell'aria secca;
- $\dot{m}_{s,s}$ [kg/h] la portata di solido secco;
- x_{in} ed x_{out} [kg_{acqua}/kg_{gas}] sono rispettivamente il titolo in ingresso ed in uscita dell'aria;
- X'_{in} ed X'_{out} [kg_{acqua}/kg_{solido}] rispettivamente l'umidità in ingresso ed in uscita del solido.

La (3.20) consente di determinare la quantità di aria secca necessaria, dopo aver opportunamente determinato l'umidità in ingresso ed in uscita dell'aria. In virtù del principio di conservazione della massa, la portata oraria di acqua da evaporare P_a , in condizioni stazionarie, è data dalla differenza tra le portate di solido umido in ingresso (F_{in}) e del solido secco in uscita ($\dot{m}_{s,s}$) dall'essiccatore:

$$P_a = F_{in} - \dot{m}_{s,s} \quad (3.21)$$

In relazione al bilancio termico, in regime stazionario, la quantità di calore ceduto dall'aria è pari alla quantità di calore necessario per il processo di essiccazione. Il calore ceduto dall'aria q_a è dato da:

$$q_a = G \cdot c_{p,m} (T_{a,in} - T_{a,out}) \quad (3.22)$$

dove $c_{p,m}$ è il calore specifico mediato tra le temperature dell'aria $T_{a,in}$ e $T_{a,out}$ rispettivamente in ingresso ed in uscita dall'essiccatore.

Il calore netto necessario per l'essiccazione è dato dalla somma di differenti contributi:

1. Calore sensibile q_1 necessario per riscaldare l'acqua dalla temperatura del solido alla temperatura di bulbo umido alla quale avviene l'evaporazione, ossia:

$$q_1 = P_a \cdot c_{p,a} (T_{bu} - T_{s,in}) \quad (3.23)$$

dove:

- P_a è la portata dell'acqua da evaporare;
- $c_{p,a}$ è il calore specifico dell'acqua;
- T_{bu} la temperatura di bulbo umido dell'aria in ingresso;

- $T_{s,in}$ la temperatura del solido in ingresso.
2. Calore latente (q_2) necessario per vaporizzare l'acqua alla temperatura di bulbo umido, ossia:

$$q_2 = P_a \cdot \lambda_{lat, bu} \quad (3.24)$$

dove $\lambda_{lat, bu}$ è il calore latente di evaporazione dell'acqua alla temperatura di bulbo umido.

3. Calore sensibile (q_3) necessario per portare il vapore formato dalla temperatura di bulbo umido alla temperatura di uscita dell'aria dall'essiccatore, ossia:

$$q_3 = P_a \cdot c_{p, vap} (T_{a, out} - T_{bu}) \quad (3.25)$$

dove:

- $c_{p, vap}$ è il calore specifico del vapore mediato tra le due temperature;
 - $T_{a, out}$ è quella dell'aria in uscita.
4. Calore sensibile (q_4) necessario per portare il solido secco dalla temperatura in ingresso a quella in uscita, ossia:

$$q_4 = \dot{m}_{s, s} \cdot c_{p, s} (T_{s, out} - T_{s, in}) \quad (3.26)$$

dove:

- $c_{p, s}$ è il calore specifico del solido;
- $T_{s, out}$ e $T_{s, in}$ rispettivamente le temperature in uscita ed in ingresso del solido stesso.

Il bilancio di potenza è dato, pertanto, dalla somma di tali contributi, ossia:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 \quad (3.27)$$

dove non si è tenuto conto di eventuali perdite di calore.

Capitolo 4

Prototipo di essiccatore a coclea (SCD) della Personal Factory

4.1 L'azienda Personal Factory e la sua mission ecologica

La mia esperienza, come anticipato, si è concretizzata presso la Personal Factory di Vibo Valentia, azienda leader nella fornitura di prodotti e servizi nel mondo dei premiscelati in polvere, che concentra da sempre molte delle sue risorse nella ricerca e studio di composti ecocompatibili e nel riutilizzo dei materiali di scarto.

Il progetto industriale Personal Factory nasce come spin-off dell'azienda della famiglia Tassone, un'impresa con un'esperienza di 40 anni nella chimica dei materiali edili, con un obiettivo ambizioso: diventare la prima azienda al mondo in grado di fornire soluzioni integrate e servizi completi nel mondo dei premiscelati in polvere. Da qui un progetto di ricerca e sviluppo concretizzato nel 2009, che ha portato all'invenzione di un impianto di premiscelati compatto ed universale chiamato **Origami**, l'unico al mondo in grado di produrre qualsiasi tipo di premiscelato, occupando uno spazio di pochi metri quadrati. Dopo aver ottenuto così l'interesse del mercato internazionale è nata la start-up Personal Factory, prima operazione di venture capital nel sud Italia. L'azienda si è così specializzata in tutti i settori del mondo dei premiscelati edili ed attualmente si compone di: uno dei primi cinque laboratori al mondo, tra i più avanzati nella chimica per l'edilizia; un sito produttivo dedicato alla produzione di impianti e macchine; un sito produttivo dedicato alla produzione di additivi chimici; un centro di ricerca e sviluppo per la meccanica, elettronica, informatica ed automazione.

La Personal Factory è la prima ed unica azienda in grado di fornire una **piattaforma tecnologica brevettata** che realizza **in cloud** tutti i processi manifatturieri, dai test di laboratorio al prodotto finito confezionato, e che è in grado di rendere chiunque abbia un mercato potenziale, rivenditori compresi, in produttori diretti di materiali edili. Trattasi di un sistema produttivo delocalizzato, sostenibile ed "a km zero"[39]. I materiali per l'edilizia sono composti per il 98% da materie di base quali leganti (cemento, calce, gesso) ed inerti (sabbia, carbonati di calcio), mentre il 2% è composto da una serie di additivi chimici che forniscono le proprietà qualitative alla miscela. Pertanto, si può ben

dire che la filiera classica dei premiscelati movimentava essenzialmente delle materie prime quali sabbia e cemento, facilmente reperibili in qualsiasi mercato e territorio industriale sviluppato, spostandoli anche per decine di migliaia di chilometri. Il sistema Personal Factory taglia invece completamente la filiera produttiva e distributiva e, come per le stampanti a getto di inchiostro, fornisce e posiziona Origami (l'asset fisso paragonabile alla stampante o alla macchina del caffè) vicino all'utilizzatore finale, fornendo e facendo viaggiare solo quel 2% di additivi chimici sotto forma di kit preconfezionato (il consumabile paragonabile alle cartucce di inchiostro o alle cialde per il caffè). Si tratta della prima soluzione integrata nel settore dei premiscelati per l'edilizia in grado di sviluppare una produzione locale controllata, certificata, efficiente e con una riduzione del 98% del trasporto dei materiali.

L'obiettivo dichiarato di Personal Factory è anche quello di ridurre di 24 volte l'impatto ambientale di malte e prodotti in polvere per l'edilizia. L'utilizzo di materie prime da demolizione lavorate ed essiccate senza utilizzare combustibili fossili ma solo energie rinnovabili, l'utilizzo di leganti provenienti da scarto di processi industriali, una logistica a cortissimo raggio, sono elementi che permettono di realizzare materiali sperimentali ad impatto ambientale prossimo allo zero (Figura 4.1).

	sistema produttivo classico	sistema produttivo Personal Factory	
reazione chimica del cemento 	229,6	0	 scarto produzione acciaio
combustione e macinazione nella produzione 	81,9	10,2	 macinazione scarto riciclato
essiccazione inerte 	12,6	0,6	 essiccazione inerte tramite solare
consumo elettricità 	3,7	0,2	 elettricità da rinnovabile
trasporto 	88,3	5,9	 trasporto
TOTAL	416,1	17	TOTAL

Figura 4.1. Quantità di emissioni di CO₂ (in grammi) per la produzione di 1kg di malta premiscelata.

Tutti i prodotti PF COLORS, anche quelli cementizi e con aggregati classici, realizzati tramite i kit chimici di Personal Factory hanno un impatto ambientale ridotto, poiché il

sistema produttivo inventato dall'azienda permette una produzione delocalizzata, con una distribuzione a corto raggio e vicina all'utilizzatore finale, che garantisce sempre un abbattimento del trasporto (Figura 4.2).

	sistema produttivo classico	sistema produttivo Personal Factory
reazione chimica del cemento 	229,6	229,6
combustione e macinazione nella produzione 	81,9	81,9
essiccazione inerte 	12,6	12,6
consumo elettricità 	3,7	4,1
trasporto 	88,3	5,9
TOTAL	416,1	334,1

Figura 4.2. Quantità di emissioni di CO₂ (espressa in grammi) per la produzione di 1kg di prodotto.

La sede della Personal Factory si trova a Simbario, un comune a circa 800 m sul livello del mare, in provincia di Vibo Valentia. Anche l'ubicazione consiste in una struttura innovativa ed ecologica. L'insieme delle tecnologie adottate per la realizzazione della stessa struttura consente di ottenere un esubero di energia di 14000 kWh/anno. Le principali fonti di energia sono:

- il fotovoltaico per l'elettricità e l'illuminazione;
- il solare termico per il calore;
- il terreno come fonte geotermica abbinato ad una pompa di calore.

4.2 Essiccamento di aggregati per premiscelati in polvere

Gli aggregati utilizzati per la produzione dei premiscelati in polvere per l'edilizia devono necessariamente essere asciutti, come tutti i materiali che compongono il prodotto finito, ed opportunamente vagliati. I sistemi industriali più utilizzati per l'essiccazione di aggregati sono quelli a tamburo rotante, e cioè sistemi diretti. Si tratta di sistemi

economici se utilizzati in grande scala, per alte capacità produttive. Allo stesso tempo tali sistemi riscontrano dei limiti di applicazione:

- gli impianti di piccole dimensioni o utilizzati per basse portate (poche tonnellate per ora di materiale essiccato) sono economicamente poco efficienti;
- necessitano di fonti termiche ad elevata potenza ed elevata temperatura del fluido termoconvettore (aria o fumi della combustione), non sempre reperibili;
- non sono flessibili all'utilizzo di fonti termiche rinnovabili (eccetto nel caso di combustione di alcune biomasse e biocombustibili);
- essendo i fluidi termoconvettori sia ad elevate temperature che a contatto diretto, essi possono alterarne le proprietà organolettiche e morfologiche del materiale da essiccare;
- come tutti i sistemi diretti che lavorano ad alte temperatura hanno un potenziale rischio di sicurezza, soprattutto nel caso si debba essiccare materiali infiammabili.

In determinati campi di applicazione, alcuni di interesse per il sistema Personal Factory, gli essiccatori a tamburo rotante risultano inadeguati. Una produzione localizzata ed a corto raggio necessita generalmente di basse quantità di materiale inerte. Allo stesso tempo, in aree isolate ed in via di sviluppo (generalmente paesi africani ed asiatici), non è possibile approvvigionarsi di materiale opportunamente essiccato e vagliato. Gli essiccatori classici per basse portate risultano antieconomici. La situazione è ancor peggiore nel caso di luoghi in cui le fonti combustibili non sono presenti in loco e pertanto vengono importate. È il caso tipico delle numerose isole oceaniche presenti sul nostro pianeta e con un mercato limitato (paesi mediamente sviluppati e con una popolazione sulle centinaia di migliaia di persone). In questi casi alcun tipo di essiccamento che comporta la combustione fossile è economicamente sostenibile.

Anche gli aggregati provenienti da materiale riciclato o da demolizione presentano generalmente un'umidità residua. La direttiva europea 2008/98/CE relativa ai rifiuti ha stabilito un quadro giuridico chiaro in merito al trattamento dei rifiuti per tutti i paesi

dell'UE. In particolar modo, ha stabilito una serie di obiettivi con tempo limite fissato al 2020, tra cui quello raggiungere una percentuale di riciclaggio e di recupero che per i rifiuti da costruzione e materiale da demolizione si attesta a ben il 70%. Paesi come l'Olanda, il Belgio, la Danimarca e la Germania hanno sposato appieno questo obiettivo e si attestano ad una quota di riciclato superiore all'85%, mentre Regno Unito, Irlanda ed Austria hanno già superato la quota limite del 70%. Nel nostro paese invece risultano ad oggi 2'500 cave di inerti attive e 15'000 abbandonate. Nonostante in Italia vengano prodotti 40 milioni di tonnellate di rifiuti inerti a mala pena il 10% di questi viene recuperato. Se l'Italia raggiungesse l'obiettivo che la comunità europea ha imposto, non avremmo più bisogno ogni anno di almeno 100 cave di inerti [40].

La Personal Factory si è da sempre interessata al riciclo dei materiali da costruzione, in particolare con il progetto congiunto tra Enea ed Università della Calabria denominato Ecofibar e conclusosi con successo nel 2015. Nel progetto è stato dimostrato che, oltre alle innumerevoli applicazioni di materiali da demolizione nel mondo dei premiscelati, essi, opportunamente utilizzati, possono essere utilizzati anche per produrre malte di altissima qualità [41]. Durante il progetto Ecofibar gli aggregati da riciclo sono stati essiccati in un forno rotativo di dimensioni minime, con capacità produttiva di circa 5 m³/h con bruciatore a GPL, per essere poi selezionati e separati con un processo di setacciatura elettromeccanica ed avere così dei granulati in polvere. Tuttavia, questa sperimentazione ha evidenziato il fatto che il processo ordinario di preparazione degli aggregati riciclati, specie nella fase di essiccazione, risultasse assolutamente inadeguato. La combustione a fiamma diretta può essere estremamente dannosa nel caso in cui nella componente da essiccare vi siano tracce di componenti organici non eliminate dai precedenti processi. Tra queste componenti possiamo avere tracce di guaine bituminose, profili in pvc, teli e tubi in polietilene e polipropilene, linoleum etc. Tali componenti, a causa della loro alta infiammabilità, anche a basse temperature, possono generare fumi estremamente dannosi per l'ambiente, quali il monossido di carbonio, ma anche di cianuro di idrogeno e fosgene. Nel fumo possono trovarsi ossidi di zolfo che in contatto con l'umidità formano acido solforico, acido cloridrico ed acido fluoridrico, composti organici, i cui componenti più dannosi sono le diossine, composti organici eterociclici estremamente tossici con effetti cancerogeni. Nel contempo stesso il rischio di incendio comporta un elevato pericolo per la sicurezza dell'ambiente di lavoro.

Quanto evidenziato sopra ha spinto la Personal Factory ad un'attenta ricerca dedita ad individuare un sistema di essiccazione di tipo indiretto che coniugasse efficienza, economicità, impatto ambientale ridotto e possibilità di utilizzo di differenti fonti energetiche.

Dopo un'attenta analisi di mercato sono stati valutati tutti i metodi di essiccazione alternativi disponibili, tra cui “a letto fluido”, “a letto vibrante”, “a camera calda”, “rotativo” ma nessuno di questi si è rivelato adeguato. La Personal Factory ha ritenuto, quindi, opportuno iniziare un'attività di progettazione di un sistema di essiccazione innovativo e alternativo che coniugasse:

- la soluzione a problematiche ambientali e quindi l'assenza di fiamma diretta;
- l'economicità di impianto con un costo di realizzazione in scala competitivo;
- una alta tolleranza alle materie prime in ingresso;
- una buona tolleranza alle umidità in ingresso;
- facile manutenzione e facile installazione;
- possibilità di usare molteplici fonti energetiche;
- una bassa temperatura di esercizio e quindi un essiccatore assolutamente non energivoro (dato anche il bassissimo valore di output che il riciclo di aggregati e l'essiccazione in loco necessitano).

4.3 Nozioni di base sui sistemi di essiccamento a coclea (SCD)

In virtù delle necessità di progetto e caratteristiche richieste, si è pensato di progettare, prototipare ed altresì testare un essiccatore a coclea, dove la fonte termica primaria di essiccazione è un fluido termoconvettore che indirettamente scambia calore con il materiale da essiccare.

I modelli di essiccatore a coclea sono tecnologie emergenti nel mercato industriale ma che stanno trovando un interesse sempre più crescente, in virtù delle loro caratteristiche.

Nei processi industriali bisogna spesso convogliare del materiale ed allo stesso tempo riscaldarlo ovvero essiccarlo. È questo il caso degli inerti (da riciclo e non) per premiscelati nell'edilizia, dove il materiale deve essere essiccato e altresì trasportato fino ad una stazione di vagliatura che opportunamente seleziona i materiali da utilizzare. Nell'industria esistono decine di sistemi per convogliare dei materiali, in particolare quelli granulati. I due sistemi tipicamente utilizzati sono quelli a coclea ed a nastro poiché, rispetto a molti altri, riescono a garantire un maggiore controllo del flusso di materiale, fondamentale se il sistema deve essere ulteriormente movimentato o processato. Rispetto ai sistemi a nastro, le coclee trasportatrici sono più utilizzate poiché presentano maggiori vantaggi, cioè possono:

- essere più versatili;
- risultare di per sé un sistema chiuso;
- occupare spazi contenuti;
- avere un maggiore controllo di portata;
- controllare la contaminazione ambientale;
- avere un maggiore rapporto costi-benefici;
- essere installate con facilità.

In più i sistemi a coclea garantiscono anche un mescolamento, utile sia per l'essiccamento, poiché espone le parti più umide con l'esterno a facilitare l'evaporazione, che per incrementare il coefficiente di trasmissione del calore, poiché rinnova il materiale a contatto con la superficie riscaldante e quindi incrementa il fattore convettivo. Queste caratteristiche rendono i sistemi a coclea la scelta migliore.

Gli essiccatori a coclea vengono denominati in forma breve **SCD**, dall'acronimo **screw conveyor dryer**. Esistono numerosi brevetti per sistemi di trasferimento di calore a coclea, sia per essiccamento che per riscaldamento o raffreddamento, per diversi tipi di applicazione. Al contrario, la letteratura scientifica in merito è molto scarsa e solo recentemente si sono effettuati progetti di studio, sia teorici che sperimentali, dai quali sono state riportate informazioni tecniche e termodinamiche.

Un sistema a coclea si differenzia principalmente per il tipo di scambio termico: se diretto, indiretto o una combinazione di entrambi. I sistemi diretti, a parità di portata essiccata,

sono di dimensioni inferiori, di contro, a seconda del tipo di materiale da essiccare, necessitano un sistema di trattamento dell'aria in uscita. I sistemi indiretti, generalmente di maggiore dimensioni, sono più efficienti dal punto di vista energetico e di per sé non generano una contaminazione dell'aria ambiente. Il trasferimento di calore indiretto, tra fluido termoconvettore e materiale, avviene in genere attraverso la superficie di scambio della camicia della coclea, superficie che in dimensioni dipende principalmente dal diametro esterno della coclea stessa e dal suo profilo, tipicamente chiuso, e di forma cilindrica o ad U. Per massimizzare tale superficie di scambio ed avere un sistema più efficiente, il fluido termoconvettore può transitare anche attraverso l'albero e scambiare calore attraverso la superficie dello stesso. Chiaramente le dimensioni di questa ulteriore superficie di scambio aumentano proporzionalmente alle dimensioni dell'albero stesso. Il fluido termoconvettore è generalmente acqua calda ma vengono utilizzati anche vapore caldo e fluidi ad elevata temperatura quali oli e sali fusi. Un fluido diretto, in forma gassosa, può essere combinato al sistema precedente. Tale gas può apportare calore di evaporazione e simultaneamente trasportare ed allontanare l'acqua evaporata. L'aria ambiente a bassa umidità è il fluido tipicamente utilizzato poiché economico ed in grado di garantire un buon tasso evaporativo, ma si possono utilizzare nei sistemi più complessi anche gas in grado di contenere una maggiore quantità di vapore acqueo, quale l'azoto (N_2). Nella Figura 4.3 è riportata una schematizzazione di quanto sopra descritto.

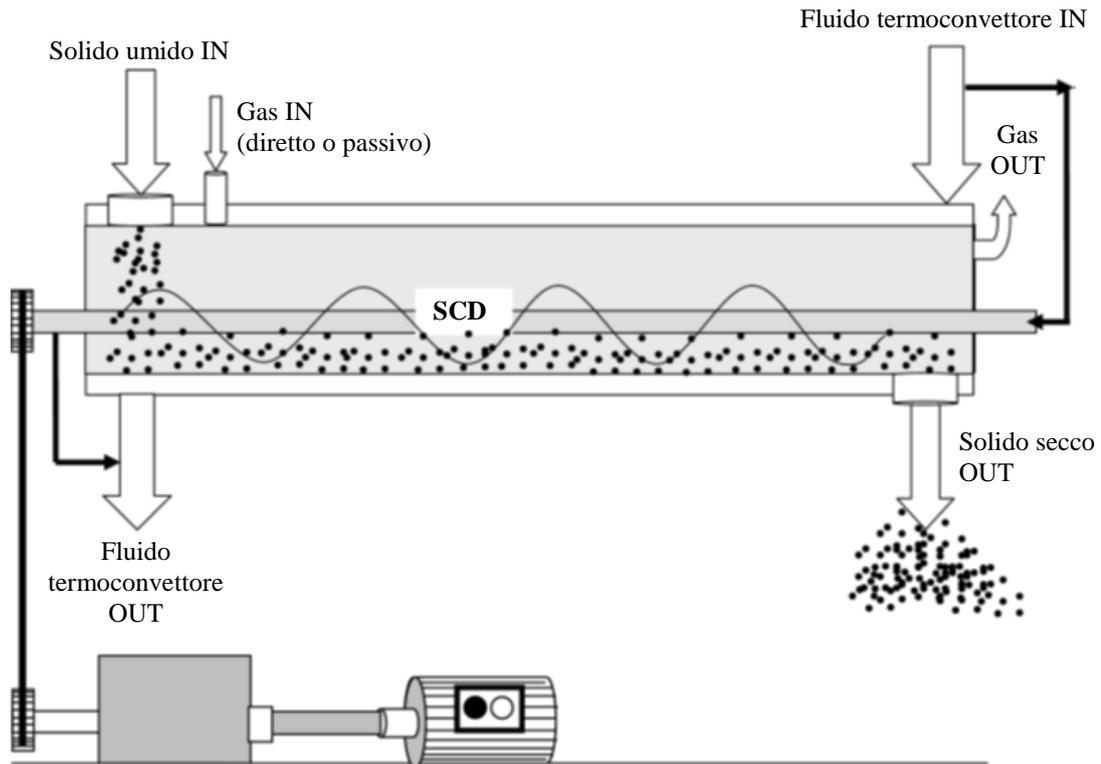


Figura 4.3. Schematizzazione di un sistema di essiccamento a coclea diretto ed indiretto [42].

4.4 Stato dell'arte dei sistemi SCD

Come già accennato precedentemente esistono numerosi brevetti per sistemi di essiccamento a coclea. Alcuni brevetti interessanti risalgono già agli anni '70 [43] [44], e tutt'oggi continuano ad essere pubblicati brevetti di rilievo tecnico [45]. Oltre a macchinari che possono essere generalmente raggruppati in quella che è la definizione classica di un SCD, esistono anche brevetti di sistemi tecnologici meno convenzionali. Molto lontani dal meccanismo di funzionamento standard sono i sistemi che sfruttano l'azione di una coclea disuniforme per comprimere il materiale, spremere per separarne l'acqua contenuta [46], o utilizzando più coclee disomogenee e costituite da materiali porosi in grado di far fuoriuscire l'acqua [47]. Mentz [48] ha invece brevettato un sistema di essiccamento a coclea in cui l'azione termica è data da una serie di anelli termoelettrici posti attorno la camicia della coclea, in grado di portare rapidamente ad alte temperature anche materiali a bassa conduzione e capacità termica, con una coclea costituita inoltre da spire piegate e tagliate che meglio agitano i granulati. Il brevetto di Azuma [49]

riguarda invece un sistema SCD con fluido termoconvettore quali i gas della combustione, di H_2 ed O_2 in rapporto 2:1, e scambio termico attraverso la camicia e l'albero della coclea, dove la stessa camicia a doppio tubo funge da camera di combustione. Sono invece convenzionali i sistemi multistadio o a più coclee, anche recenti [50], in cui diversi passaggi pongono il materiale in condizioni ambientali e di scambio termico differenti, per ottimizzare l'essiccamento. Comolli [51] ha brevettato un sistema completo per l'essiccamento della lignite, in cui il materiale è convogliato in tre diverse coclee chiuse e stadi (Figura 4.4). Nel primo stadio la camicia è posta ad una temperatura di 80-150°C, mentre il materiale, posto a pressione ambiente, perde così l'umidità superficiale. Attraverso una valvola rotativa a pressione, la lignite passa nella seconda coclea. Qui il materiale passa ad una temperatura più elevata tra 90-260 °C e viene posto ad una pressione inferiore, mentre viene insufflato del vapore, il che garantisce una rapida essiccazione ed al contempo una copertura della lignite da idrocarburi basso volatili, che evitano un riassorbimento futuro di umidità. Nel terzo ed ultimo stadio la lignite è raffreddata prima di essere scaricata ed esposta a pressione atmosferica.

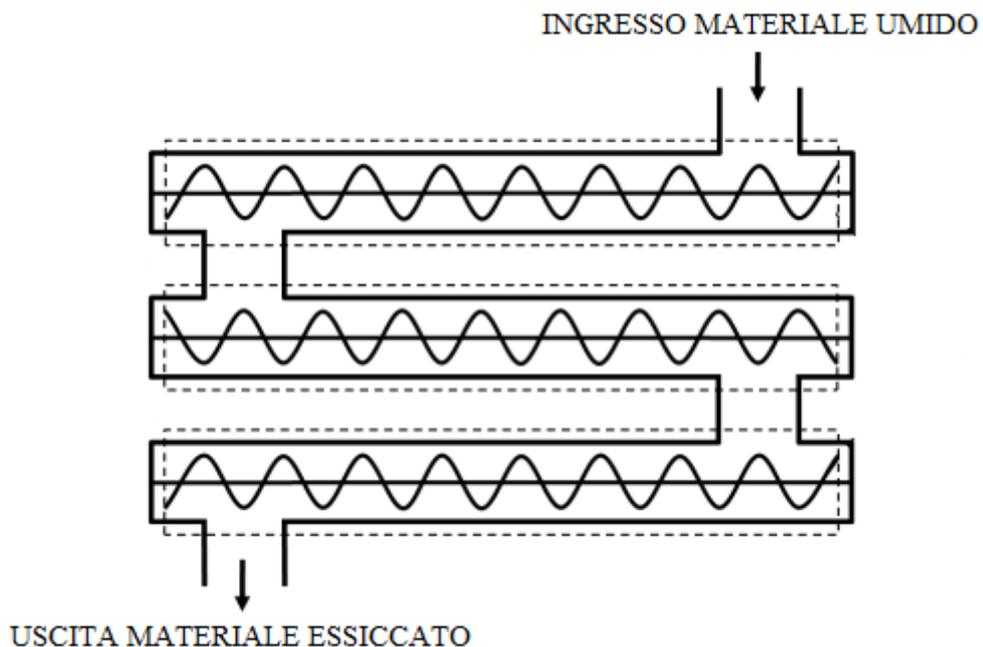


Figura 4.4. Schema di un SCD multistadio a 3 coclee.

Uno dei vantaggi dei sistemi SCD è anche quello di poter ottimizzare l'essiccamento utilizzando coclee multi stadio ma anche potendo accoppiare una coclea essiccante con altri sistemi di essiccamento, generalmente per effettuare un pre-essiccamento, quali ad esempio essiccatori a letto vibrante o a letto fluido. Oltre al solo essiccamento, come per l'essiccatore brevettato da Comolli, aziende come la Therma-Flite, Inc. [52] sviluppano sistemi termici complessi. Nel sistema per il trattamento chimico dei solidi organici in Figura 4.5 si nota, oltre ai vari stadi, la presenza di una doppia coclea all'interno della camicia termica riscaldata.

Questa soluzione tecnica viene spesso adottata per numerosi impianti, e le aziende garantiscono svariate soluzioni tecniche per numerosi casi di applicazioni, sia multistadio che a più coclee, con diversi profili di incamiciamento (Figura 4.6).

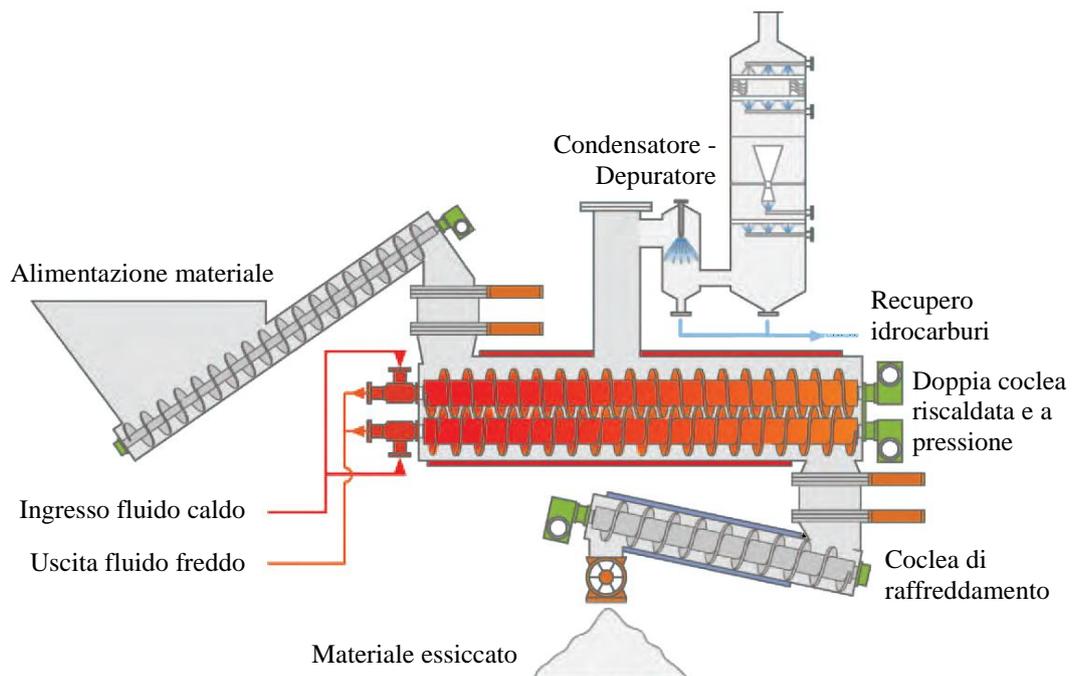


Figura 4.5. Schema per il trattamento termico dei solidi organici della Therma-Flite, Inc.

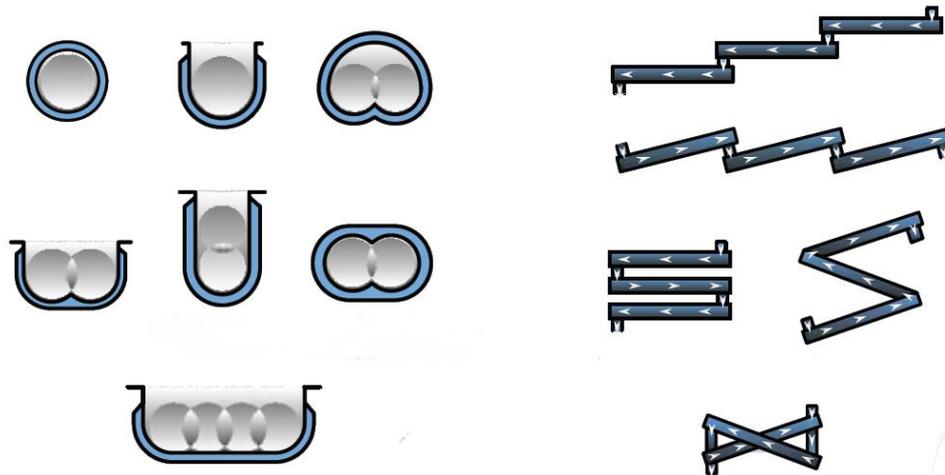


Figura 4.6. Schemi per sistemi SCD della Therma-Flite, Inc.

Un grande vantaggio degli SCD è quello di poter garantire un alto tasso di trasferimento di calore per conduzione, rispetto al rapporto area di scambio-volume del materiale da trattare. Per massimizzare ancora di più tale rapporto, i sistemi a più coclee possono essere sfruttati. Oltre a ciò, l'utilizzo di più coclee permette di avere un rinnovo continuo dei granuli a contatto con la superficie riscaldante ed un mescolamento del materiale, il quale genera uno scambio di calore convettivo ed agevola lo spostamento dell'acqua dall'interno fino alla superficie del materiale. Generalmente le coclee non vengono riempite totalmente ed il movimento del materiale fa sì che non tutta la superficie riscaldante sia a contatto con il materiale. Come ben spiega l'azienda °Celsius [53], un sistema a doppia coclea, in cui il movimento del materiale sia quello ideale, garantisce che quasi tutta la superficie della camicia riscaldata sia a contatto con il materiale da essiccare, come si può notare nella Figura 4.7 sottostante.

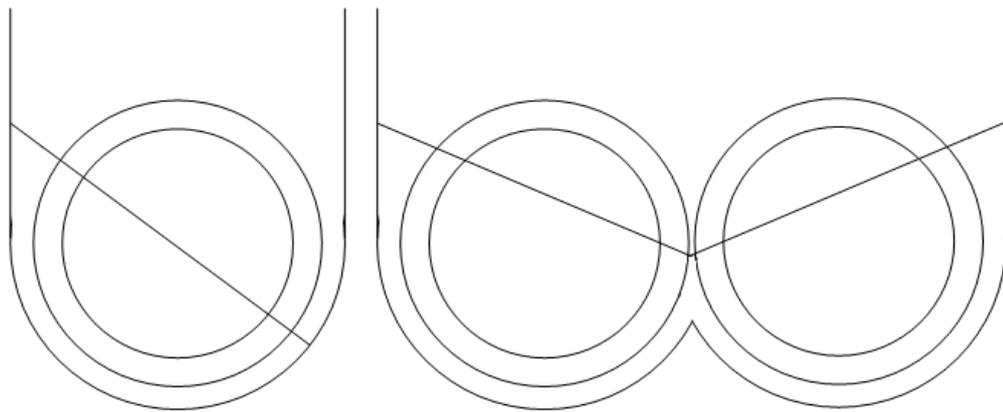


Figura 4.7. Area di scambio termico a contatto con il materiale [53]

Un altro modo di incrementare il flusso di scambio termico è quello di sfruttare anche le spire della coclea, facendovi passare al suo interno il fluido termoconvettore. L'azienda Metso Minerals Industries Inc. [54] fornisce sistemi SCD dove il passaggio del fluido termoconvettore è guidato efficacemente all'interno dell'albero della coclea e delle sue spire, come mostrato nella Figura 4.8 in basso.

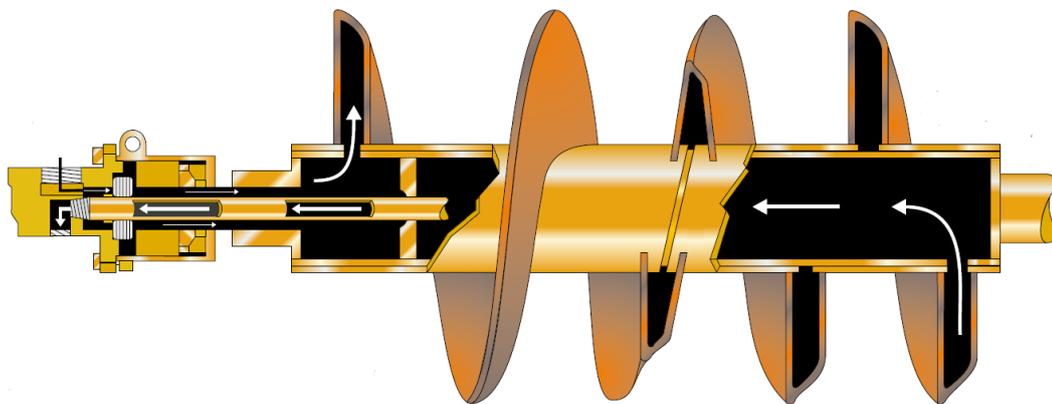


Figura 4.8. Struttura e sistema di canalizzazione nel SCD della Metso Minerals Industries Inc [54].

Come detto già precedentemente, non ci sono molte pubblicazioni scientifiche che riguardano sistemi SCD. Soltanto recentemente sono stati analizzati modelli sperimentali e teorici in cui sono stati riportati risultati tecnici, in grado di fornire informazioni importanti sui complessi effetti termodinamici che interessano l'essiccamento indiretto e diretto dei modelli a coclea. Recentemente Benali e Kudra [55] [56] hanno dimostrato la

validità tecnica dell'utilizzo di sistemi di essiccamento a coclea indiretto anche per un materiale di poco valore quale il letame e per la sua trasformazione in concime. Il sistema è composto da sette stadi di trattamento, identici e disposti a cascata, a loro volta costituiti da nove canali paralleli, con lunghezza coclee di 4.5 m diametro 15.2 cm e passo 11 cm. Kim et al. [57] hanno invece progettato e studiato un sistema di essiccamento a doppia coclea diretto ed indiretto, mediante l'uso di gas combusti di scarico, per il trattamento di fanghi da depurazione. Nella loro analisi di trasferimento termico e di massa, è stata riportata l'alta influenza dell'umidità in ingresso e della portata sulle prestazioni finali del sistema. Per quanto concerne le prestazioni di essiccamento è stato riportato che ad una portata di 100 kg/h l'umidità del materiale viene ridotta dall'80% in ingresso fino al 10%, con una efficienza di essiccamento molto alta, fino al 75%. Una medesima analisi ancor più recente è stata portata avanti da Waje et al [42]. In questo lavoro è stato progettato e sviluppato un SCD indiretto, con coclea eccentrica lunga 3m e diametro albero di 72 cm. Come fluido termoconvettore passante tra camicia ed albero è stata utilizzata acqua a 60-80 °C. Mentre una corrente di azoto a temperatura ambiente (30°C) è stata utilizzata per rimuovere l'umidità evaporata. Con una portata di 10-18.6 kg/h le sperimentazioni hanno riportato un coefficiente di scambio termico di 46-102 W/m²K, una efficienza termica nell'intervallo 25-62%. I migliori risultati sono stati ottenuti nel caso di flusso di gas in equicorrente con il flusso del materiale, e quando il macchinario è stato posto ad una sottopressione di 200 mm H₂O, in cui la capacità di essiccamento è aumentata fino a rimuovere il 92% dell'umidità in ingresso. Uno schema di SCD in sottopressione di A. S. Mujumdar e S. V. Jangam [58] è riportato nella Figura 4.9 in basso.

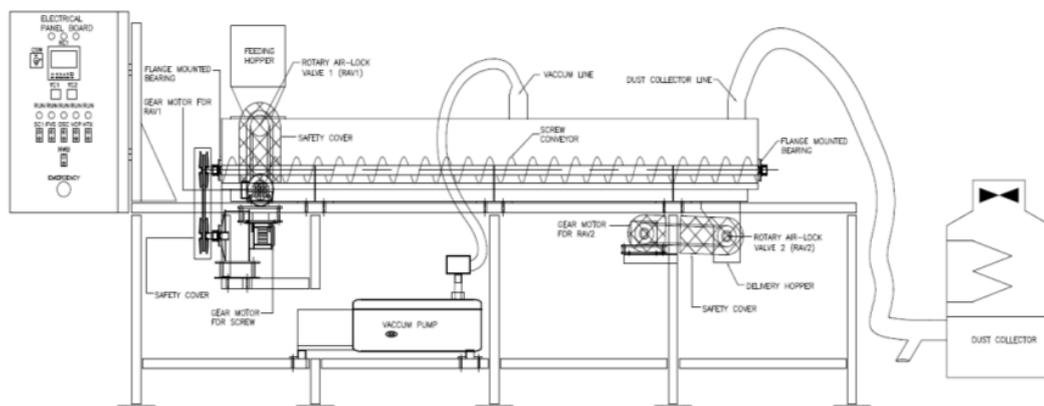


Figura 4.9. SCD in sottopressione pubblicato dal centro di ricerca M3TC della NUS (Singapore) [58].

4.5 Caratteristiche degli SCD nella movimentazione dei materiali

Un sistema di essiccamento a coclea può trasportare un'ampia varietà di materiali, da particelle solide a comportamento fluido a quelle grumose o appiccicose, come anche materiale fibrosi o che durante il processo di essiccazione diventino friabili, fino a sfaldarsi. Non è conveniente utilizzare materiali che hanno la tendenza ad incrostarsi, in particolare sulla superficie di scambio termico, poiché comprometterebbe il corretto afflusso di calore al materiale da essiccare. Il trasporto e la movimentazione del materiale sono elementi chiave per un corretto essiccamento dello stesso. Un primo fattore chiave è dato dalle dimensioni fisiche della coclea, di cui di seguito viene riportato uno schema.

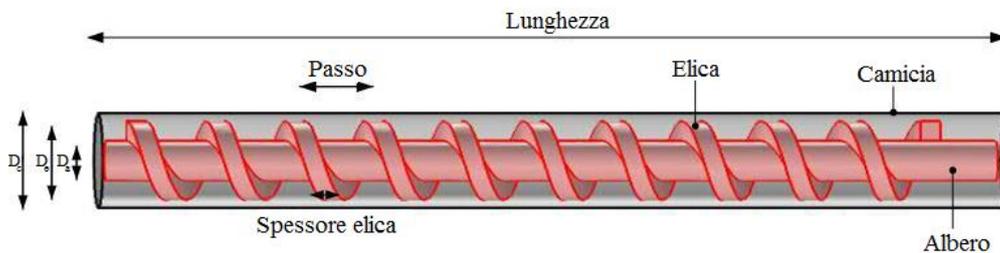


Figura 4.10. Schematizzazione di un profilo di coclea tubolare.

La portata volumetrica (m^3/h) in uscita può essere ottenuta dalla seguente formula:

$$P_v = \alpha \frac{\pi}{4} [(D_e + 2s)^2 - D_a^2] (p - e_s) n k \times 60 \quad (4.1)$$

Dove

- α è il grado di riempimento della coclea;
- D_e il diametro delle spire;
- s il gioco tra le spire e la camicia;
- D_a il diametro dell'albero;
- p il passo della coclea;
- e_s lo spessore delle spire;
- n la velocità di rotazione della coclea in rpm;

- k è una costante in funzione dell'inclinazione della coclea (pari ad 1 per coclea orizzontale).

Il grado di riempimento α è un fattore importante nei sistemi SCD, che deve essere scelto in funzione delle caratteristiche del materiale, e ne condiziona movimentazione, portata e grado di essiccamento. I valori consigliati ed utilizzati in letteratura rientrano nell'intervallo 0.15-0.45. La movimentazione del materiale è influenzata dalla velocità di rotazione, dall'inclinazione e dal grado di riempimento. Qualsiasi tipo di metodo di essiccamento cerca di agire in maniera omogenea ed efficiente su tutto il materiale, provvedendo ad un medesimo trattamento di essiccazione. Alcune disomogeneità sono fortemente influenzate dal grado di riempimento, tra cui l'efficienza nel trasportare tutto il materiale verso l'uscita e quella di mescolarlo e quindi riscaldarlo con omogeneità. Utilizzando il metodo degli elementi discreti (DEM) Owen and Cleary [59] hanno evidenziato come la movimentazione del materiale nello spazio di un passo cambi in funzione del grado di riempimento, come mostrato in Figura 4.11. Per valori di 0.3 le particelle si muovono dal basso verso l'alto raggiungendo l'apice della spira fino a scivolare giù in avanti per toccare la spira successiva. All'aumentare del grado di riempimento invece la superficie libera di coclea e camicia non a contatto con il materiale diminuisce mentre le particelle si muovono in senso circolare tra una spira e l'altra. Se questo comporta un incremento della superficie di scambio termico, ne consegue una diminuzione, in rapporto alla quantità di materiale, della superficie a contatto con l'aria esterna e quindi una diminuzione di trasferimento di massa d'acqua tra solido ed esterno. Inoltre, è noto che un alto grado di riempimento comporta un maggiore compattamento del materiale, il che comporta, nel caso reale, ad una resistenza del materiale nel muoversi circolarmente ed a mescolarsi.

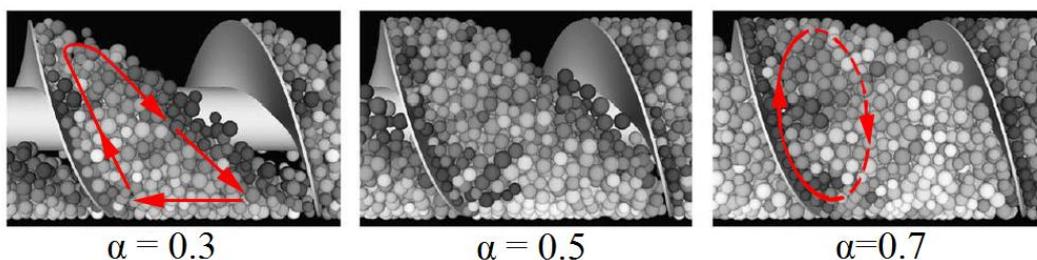


Figura 4.11. Movimento delle particelle nello spazio di un passo, Owen & Cleary [59].

Spesso accade che parte del materiale non segua la direzione lineare di movimento ma rimanga contenuto all'interno della coclea, ed un fattore determinante di questo fenomeno è il grado di riempimento. Waje et al [60] [61] ha studiato il caso reale di un essiccatore a coclea eccentrico orizzontale. La Figura 4.12 mostra le differenti situazioni al variare del grado di riempimento. Nel caso A in cui $\alpha < 0.1$, il materiale viene mosso dal basso verso l'alto seguendo la parete esterna. Esso si muove in avanti seguendo il movimento della coclea mantenendosi radente alla parete esterna e solo una pochissima percentuale rimane indietro. Il materiale subisce un buon grado di mescolamento e non c'è un flusso di materiale totalmente assiale. Nel caso B per valori di α tra 0.1 e 0.3, il materiale viene trasportato fino all'apice della spira. Una piccola parte di materiale si muove totalmente in direzione assiale mentre un'importante parte di questo fluisce all'indietro. Nel caso C per valori di $\alpha > 0.3$, il materiale occupa gran parte dello spazio tra una spira e l'altra con un andamento compatto in direzione assiale. Il materiale che ricade indietro è inferiore rispetto al caso precedente, tuttavia anche l'azione di mescolamento diminuisce.

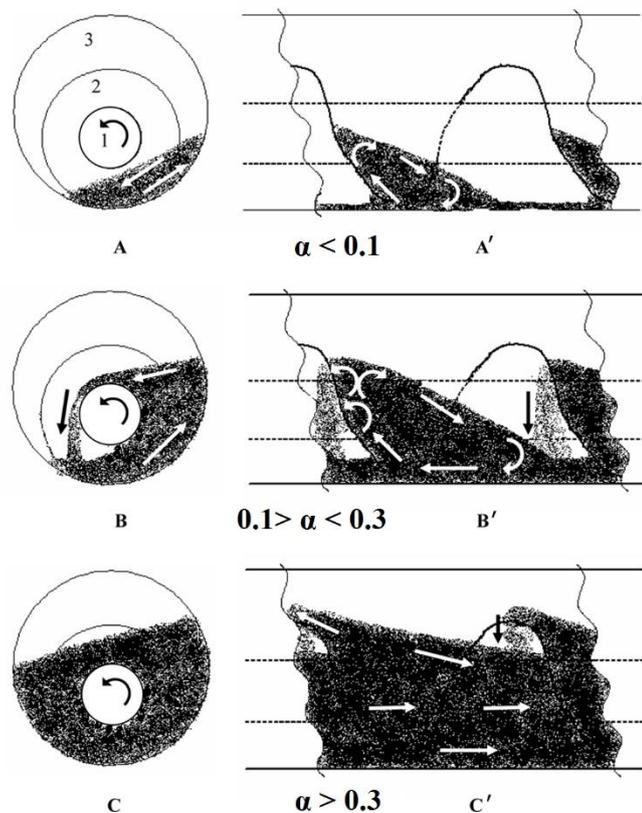


Figura 4.12. Andamento del materiale in funzione del grado di riempimento, Waje et al. [60][61]

4.6 Proprietà termodinamiche degli SCD indiretti

Negli scambiatori a coclea di tipo indiretto l'efficienza termica è data dal seguente rapporto:

$$\eta_T = \frac{\text{calore assorbito dal materiale}}{\text{calore fornito dal fluido termoconvettore}} \quad (4.2)$$

Il flusso di calore assorbito dal materiale si divide in calore sensibile fornito per incrementare la temperatura del materiale e calore latente di vaporizzazione:

$$Q_{\text{mat}} = Q_{\text{sens}} + Q_{\text{lat}} \quad (4.3)$$

$$Q_{\text{sens}} = P_v \cdot \rho \cdot c (T_{\text{m,out}} - T_{\text{m,in}}) \quad (4.4)$$

$$Q_{\text{lat}} = P_a \cdot \rho_a \cdot \lambda_{\text{lat}} \quad (4.5)$$

In assenza di altre perdite, il calore assorbito dal materiale è uguale al calore effettivo trasferito dal fluido termoconvettore, pari a:

$$Q_{\text{trasf}} = U_{\text{tot}} \cdot A_{\text{eff}} \cdot \Delta T_{\text{LM}} \quad (4.6)$$

Dove U_{tot} è il coefficiente di trasmissione del calore totale dell'essiccatore, A_{eff} è l'area effettiva di scambio termico, ΔT_{LM} la differenza di temperatura logaritmica in entrata ed uscita tra fluido termoconvettore e materiale. Questi tre parametri determinano la capacità dell'essiccatore di trasferire calore al materiale da essiccare.

Il coefficiente di trasmissione del calore U_{tot} dell'essiccatore è un parametro molto importante che dipende dal tipo di materiale da essiccare, dalle caratteristiche dell'essiccatore e dal fluido termoconvettore. Il calcolo teorico di tale coefficiente è determinato da vari fattori. Prendiamo il caso di un essiccatore di tipo indiretto con fluido termoconvettore passante nell'albero e nella camicia della coclea [53]. Per una maggiore comprensione si può pensare di distinguere due teorici coefficienti di trasmissione, uno per la camicia dell'essiccatore e l'altro per la coclea, che possono essere calcolati come:

$$\frac{1}{U_{\text{coclea}}} = \frac{1}{h_{\text{co,ftc}}} + \frac{s_{\text{albero}}}{\lambda_{\text{albero}}} + \frac{1}{h_{\text{co,m}}} \quad (4.7)$$

$$\frac{1}{U_{\text{camicia}}} = \frac{1}{h_{\text{cam,ftc}}} + \frac{s_{\text{cam}}}{\lambda_{\text{cam}}} + \frac{s_{\text{materiale}}}{\lambda_{\text{materiale}}} + \frac{1}{h_{\text{cam,m}}} \quad (4.8)$$

$h_{\text{co,ftc}}$, $h_{\text{co,m}}$, $h_{\text{cam,ftc}}$ ed $h_{\text{cam,m}}$ sono i coefficienti convettivi rispettivamente tra coclea e fluido, coclea e materiale, camicia e fluido, camicia e materiale, mentre s e λ sono

spessore e coefficiente conduttivo per l'albero e camicia dell'essiccatore. Si evince che la conduttività del materiale da essicare e del materiale che costituisce l'essiccatore influenzano la capacità di quest'ultimo di trasferire calore. Anche lo spessore delle superfici di scambio deve essere minimizzato per incrementare il valore scambiato. I coefficienti convettivi del fluido termocorrente $h_{co,ftc}$ ed $h_{cam,ftc}$ possono essere determinati in base anche alle informazioni note in letteratura. Al contrario, i coefficienti convettivi del materiale con l'essiccatore non sono facilmente calcolabili. Per tale motivo il coefficiente di trasmissione totale del calore U_{tot} viene spesso ottenuto solo per via sperimentale. I valori di U_{tot} sono relativamente bassi rispetto ad altri sistemi di scambio di calore, da un minimo di qualche unità fino a valori generalmente non superiore ai 100 W/m²K [42] [53].

L'area effettiva di scambio termico A_{eff} dipende dalle dimensioni geometriche dell'essiccatore, in particolare dal diametro della coclea, ma soprattutto dal grado di riempimento α . Nel caso in cui la coclea sia completamente cava, sia l'albero che le spire, l'area di scambio termico incrementa di molto, come evidenziato nella Figura 4.13. Prendendo di nuovo il caso precedente più comune, in cui non ci sia passaggio di flusso nelle spire della coclea ma solo l'albero risulti cavo, si utilizza un fattore di efficienza [53]:

$$\eta_{spire} = \frac{\tanh(\chi)}{\chi} \quad (4.9)$$

$$\chi = \beta \cdot l \quad (4.10)$$

$$\beta = \left(\frac{h_{co,s} \cdot P}{\lambda_{spire} \cdot S_e} \right)^{1/2} \quad (4.11)$$

Dove l , P ed S_e sono rispettivamente lunghezza perimetro e sezione delle spire.

Gli SCD possono garantire una ampia superficie di scambio termico, per un qualsiasi essiccatore a coclea ad albero cavo si può calcolare tale area totale disponibile attraverso la seguente formula:

$$A_{totale} = A_{camicia} + A_{albero} + \eta_{spire} \cdot A_{spire} \quad (4.12)$$

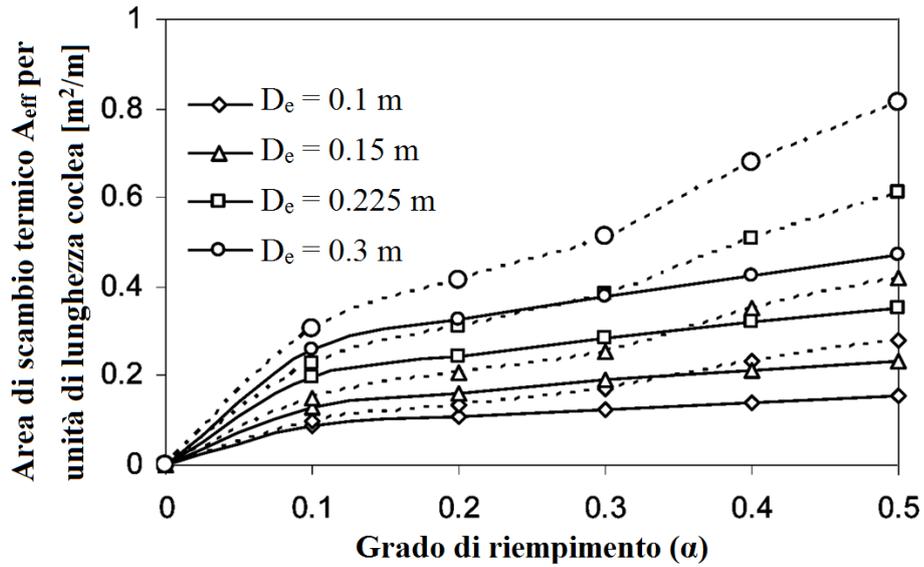


Figura 4.13. Area effettiva di scambio termico per coclea piena (—) o totalmente vuota (- -) [62].

La variazione di temperatura del solido da essiccare e del fluido termoconvettore (Figura 4.12), segue un andamento non lineare, pertanto per il calcolo del flusso di calore si utilizza la variazione di temperatura logaritmica ΔT_{LM} , attraverso la seguente formula, tipica degli scambiatori di calore:

$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{h,o} - T_{m,i}) - (T_{h,i} - T_{m,o})}{\ln\left(\frac{T_{h,o} - T_{m,i}}{T_{h,i} - T_{m,o}}\right)} \quad (4.13)$$

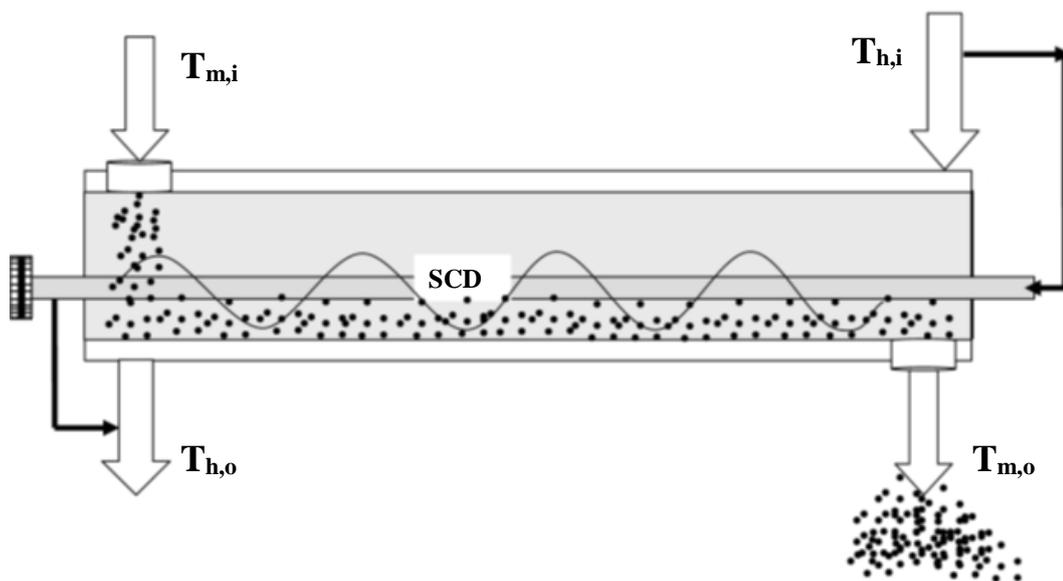


Figura 4.14. SCD indiretto: temperature del fluido e del solido in ingresso ed uscita [42].

Il grado di essiccamento è un fattore determinante dei sistemi SCD che varia in funzione delle condizioni di lavoro. Waje et al. [42] ha evidenziato che anche un flusso di corrente di gas passivo all'interno dell'essiccatore, con unico scopo quello di trasportare l'umidità evaporata lontano dal materiale, risulti essere un fattore importante. Il flusso di gas può entrare ed uscire dagli estremi dell'essiccatore ed essere in equicorrente o controcorrente con il moto del materiale da essiccare. In entrambi i casi il gas, entrando a temperatura ambiente, all'uscita incrementa la sua temperatura, come evidenziato in Figura 4.15. Nel caso di flusso equicorrente oltre ad un incremento di temperatura si avrà all'unisono un decremento della umidità relativa (curva 1-2-3). Nel caso invece di flusso controcorrente il gas aumenterà la temperatura come aumenterà anche la sua umidità relativa (curva 1-4-5). Questo fenomeno porta ad una rapida saturazione del gas che impedisce il trasferimento di massa dal materiale al gas. Di fatto, nella parte iniziale della coclea il materiale non è soggetto ad essiccazione. Ne risulta che il flusso di gas equicorrente ha un grado di essiccazione più alto di quello controcorrente.

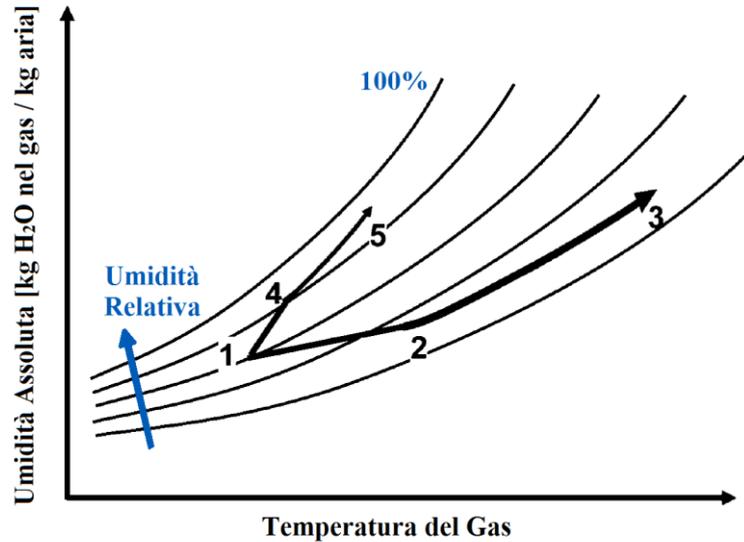


Figura 4.15. Diagramma psicrometrico qualitativo di un flusso di gas in un SCD indiretto [42].

4.7. Il progetto di essiccazione Personal Factory

Lo scopo finale del progetto di ricerca del nuovo essiccatore è quello di essiccare degli inerti minerali o degli scarti da demolizioni che poi dovranno essere puliti e vagliati in opportune pezzature, ed infine essere utilizzati nella produzione di premiscelati in polvere per l'edilizia con l'impianto Origami. Uno schema del processo è evidenziato nella figura sottostante.

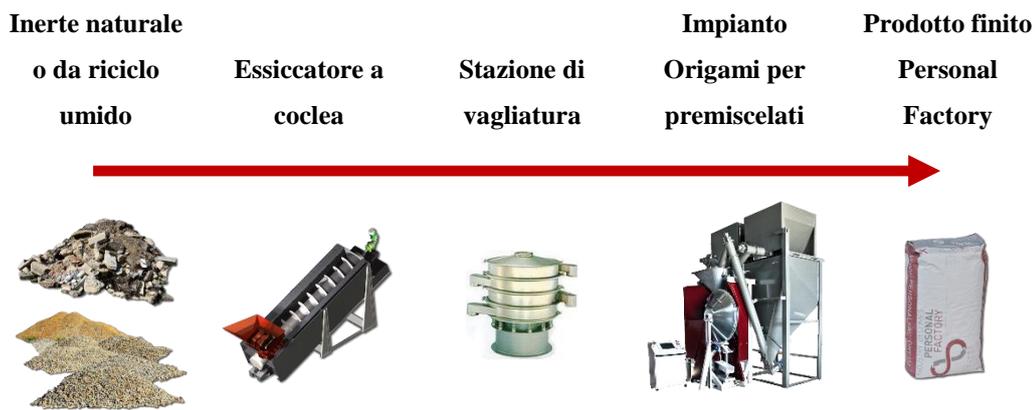


Figura 4.16. Processo di produzione da inerte umido a premiscelato secco finito.

La progettazione del macchinario è stata pertanto effettuata tenendo in considerazione sia i limiti tecnologici che gli obiettivi finali. La macchina deve poter processare un alto numero di materiale inerte, con granulometria variabile, a differente composizione chimica, e con un alto tasso di contaminazione accettabile. L'essiccatore a coclea è a scambio termico indiretto, onde evitare che, nel caso di aggregati da riciclo, residui organici da demolizione vengano a contatto con flussi caldi con il pericolo di infiammabilità. In assenza di fiamma diretta si hanno condizioni di sicurezza per gli operatori e la risoluzione di problematiche ambientali.

La produzione localizzata di un impianto Origami necessita generalmente di circa 1 ton/h di aggregato. Tale materia prima può risultare non sempre reperibile durante il corso dell'anno. Inoltre non tutto l'inerte secco viene utilizzato per la produzione di premiscelati: le particelle sopra i 2 mm, più nobili, vengono utilizzati in altre applicazioni costruttive; solo le particelle sotto gli 1.5 - 2 mm, a loro volta suddivise in 3 o 4 pezzature, vengono utilizzati per i classici premiscelati. Pertanto l'essiccatore dovrà avere una

portata in valori prossimi o superiori a 2 ton/h di aggregato essiccato. L'aggregato deve essere portato ad una certa quota da terra per poter poi essere setacciato con normali sistemi vibranti a caduta. Un esempio di piattaforma di vagliatura è riportata nella figura sottostante.

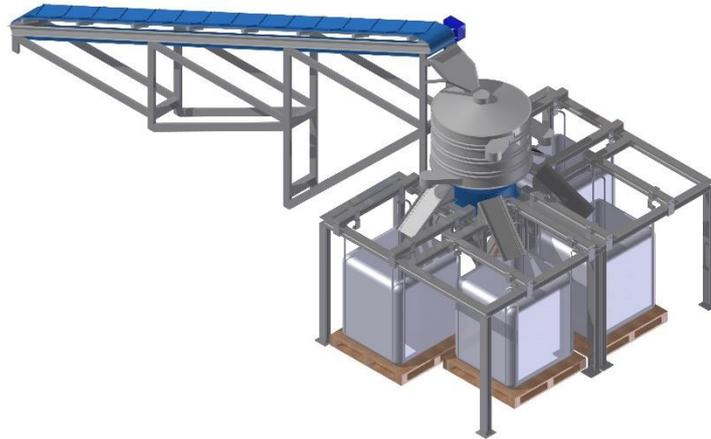


Figura 4.17. Stazione di vagliatura per inerti della Personal Factory, installazione in Tchad.

L'inerte per premiscelati in polvere deve avere un'umidità residua quasi nulla, non superiore a 0.6%. In casi eccezionali, l'essiccatore può anche rilasciare il materiale ancora non completamente essiccato: in alcune zone climatiche calde, o con periodi climatici caldi, l'umidità residua fino al 2% può essere eliminata per essiccazione naturale in breve tempo o tramite stoccaggio in serre. Nei casi reali l'inerte naturale o da riciclo ha un'umidità contenuta tra 4-6%. Questo valore è molto variabile pertanto l'essiccatore è stato progettato per operare in condizioni modulari. Un fluido termoconvettore economico e reperibile come l'acqua garantisce l'applicazione della macchina nei più svariati casi. Il sistema di circolazione dell'acqua è stato pensato a vaso aperto, per garantire una facile applicazione e rendere la macchina il più indipendente possibile dal tipo di fonte termica. Il fluido termico viene utilizzato pertanto ad una temperatura massima sotto i 100°C ed a pressione atmosferica. Tra i vari generatori di calore si può usare qualsiasi tipo di caldaia, a biomassa, a gpl, a metano o ad olio combustibile. In particolar modo l'essiccatore è stato progettato per utilizzare anche energia da fonti rinnovabili, solare in particolare, poiché fonte termica presente in abbondanza in molte aree di interesse. Data la potenza termica necessaria e temperature in gioco, si può

utilizzare anche calore di scarto proveniente da gassificatori, da digestori, da forge e da biomasse. In virtù delle caratteristiche sopracitate, l'area di scambio termico deve essere massimizzata per aumentare il flusso termico di calore al materiale da essiccare, utilizzando un grosso diametro, sia per la camicia che per l'albero della coclea, e canalizzando il fluido termoconvettore in ambedue le superfici di contatto con il materiale. Gli ingombri dell'essiccatore devono essere contenuti, in modo da garantire un trasporto a terra e via nave ed altresì una facile installazione. In virtù dei limiti dimensionali e di portata, la permanenza dell'aggregato all'interno dell'essiccatore deve perdurare il più possibile, pertanto la coclea ed il sistema di movimentazione deve lavorare a bassi valori di rpm. Il sistema si presenta in questo modo compatto, sicuro, flessibile alle fonti energetiche, e facile da installare, anche per essere usato direttamente in cantiere.

4.8. Progettazione e prototipazione parti meccaniche dell'essiccatore

La progettazione delle parti meccaniche ha seguito le specifiche di progetto ed è stata ultimata mediante l'utilizzo del software di modellazione 3D Autodesk Inventor. L'ingombro in orizzontale totale del macchinario è 7070 x 2000 x 3685 mm, con una inclinazione della coclea di 20° (Figura 4.18 e Figura 4.19).

L'essiccatore è costituito da una vasca interna, che costituisce sede della coclea e camicia riscaldante, formata da un coperchio superiore, 4 semivasche saldate e 2 flange esterne. La flangia ad una delle estremità funge da bocca di uscita della sabbia essiccata. Alla vasca interna è accoppiata una vasca esterna, costituita da un coperchio, 4 semivasce saldate e 4 flange, di cui due interne, che a loro volta nel montaggio sono solidali al telaio dell'essiccatore. All'interno è posta una coclea ad albero cavo di diametro 600mm, per una lunghezza totale di 6m. Il diametro delle spire è di 1m, con passo 250mm alla bocca di carico, e passo 500mm per le restanti 9 spire. Una volta assemblate sia le vasche che la coclea, sono installate le tenute per le suddette parti meccaniche. I disegni tecnici di quanto sopra descritto sono riportati nella figura 4.20.

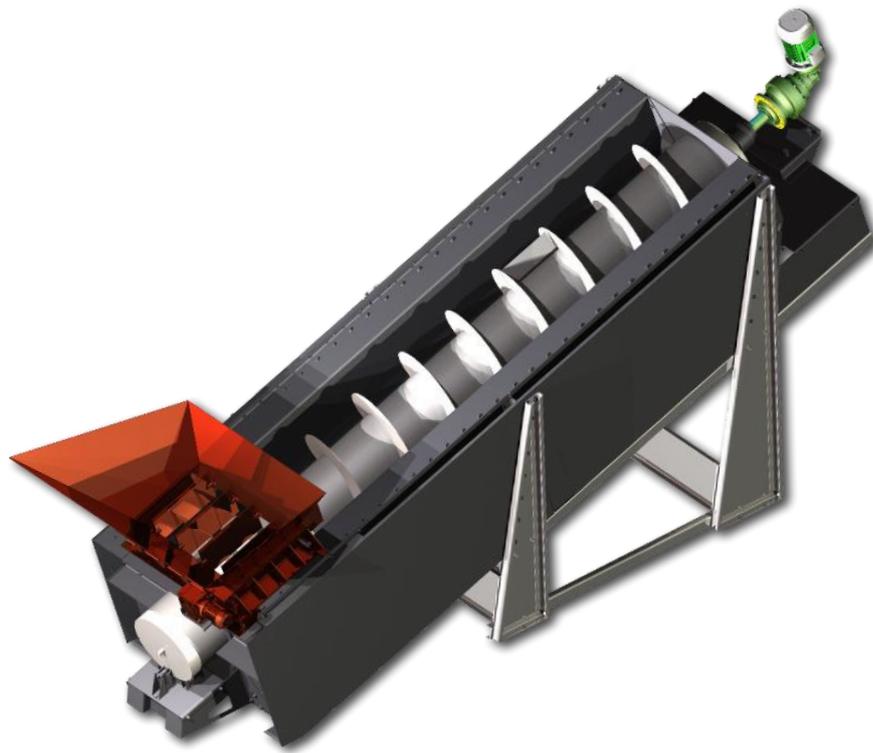


Figura 4.18. Rendering prototipo di essiccatore a coclea de la Personal Factory.



Figura 4.19. Parti meccaniche da carpenteria del prototipo di essiccatore a coclea

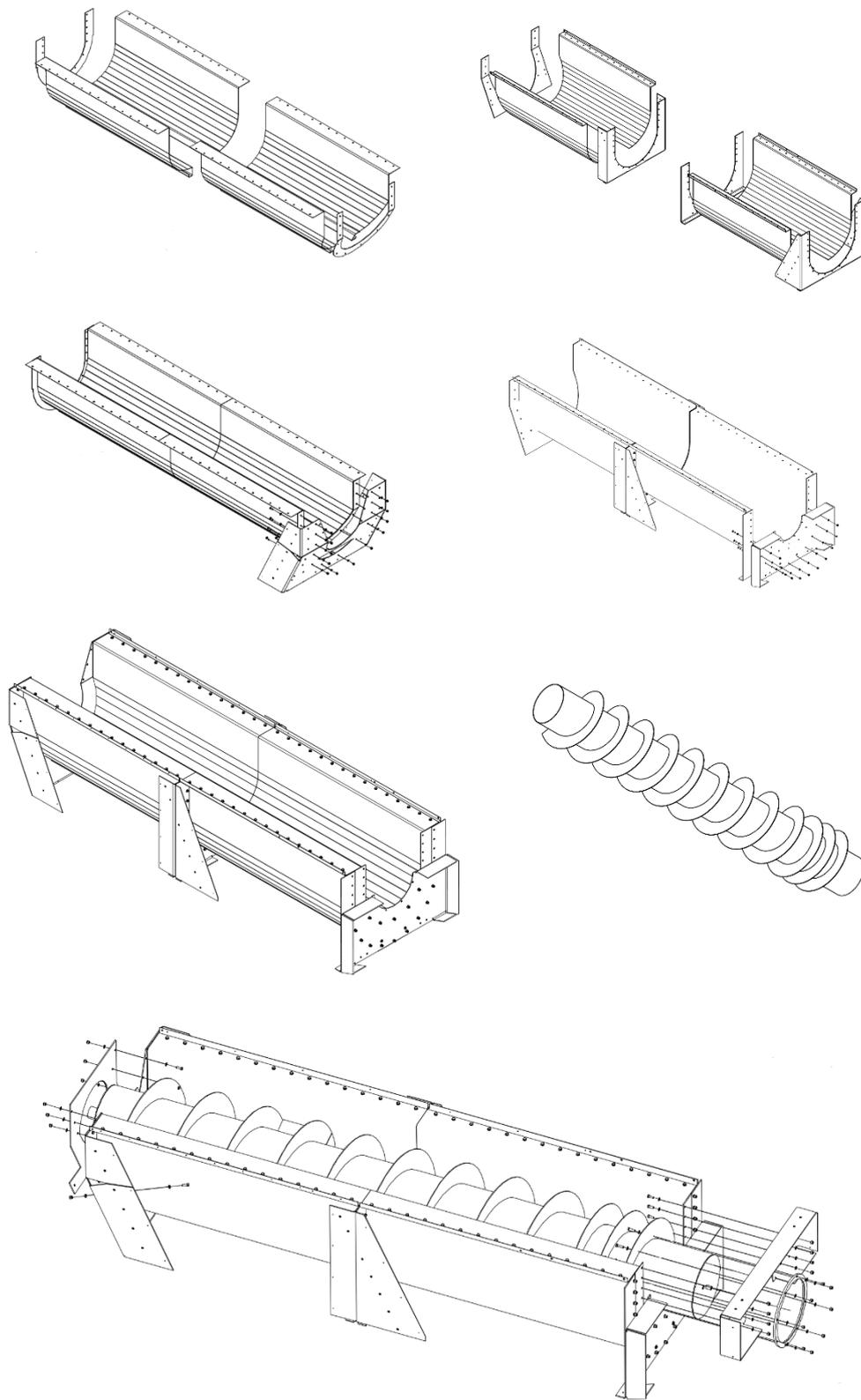


Figura 4.20. Disegni di vasche e coclea prototipo di essiccatore.

L'albero della coclea, libero di ruotare, è sostenuto da due supporti, uno per l'estremità inferiore e l'altro per l'estremità superiore. Il primo è costituito da 3 rulli di tipo L, una piastra di appoggio, ed un sostegno verticale per un rullo. Il secondo da 2 rulli, piastra di appoggio e dei sostegni diagonali. I supporti ed i rulli sono stati scelti e dimensionati in base ai calcoli strutturali. All'estremo della coclea posto in alto sono stati collegati motore e riduttore, sotto inverter, dimensionati e selezionati per garantire una velocità massima di 4rpm e minima vicino a 0.5 rpm (seguendo la specifica di una bassa rotazione ed un lungo tempo di permanenza della sabbia nella coclea) con i due componenti aventi le seguenti caratteristiche: motoriduttore epicicloidale angolare a 4 stadi con motore a 4 poli; velocità di uscita 4 rpm; rapporto di riduzione 363; rendimento 0.88; Motore 5.5kW; coppia in uscita 11714 Nm. Al lato basso della coclea è posizionata la tramoggia di carico smontabile e con aggancio rapido. La sua capacità di carico totale è di 1 m³. Per lo scarico sono presenti 4 valvole, con motoriduttore a vite senza fine e con precoppia e velocità d'uscita di 3.5 rpm. Il telaio è stato progettato seguendo l'inclinazione del macchinario ed è solidale a tre delle flange della vasca esterna, mentre la flangia all'estremo più basso poggia direttamente al suolo. La vasca è chiusa da una copertura piana e leggermente inclinata rispetto al suolo affinché l'eventuale condensa scivoli sull'estremità più bassa dove è presente un canale di scolo. Sul lato più alto è invece posizionata una griglia di areazione per far fuoriuscire l'aria con il vapore acqueo accumulato. Gli altri disegni tecnici di quanto sopra descritto sono riportati nella Figura 4.21. La commessa per la produzione del prototipo è stata affidata ad un terzista che ha fornito le parti di carpenteria (Figura 4.19).

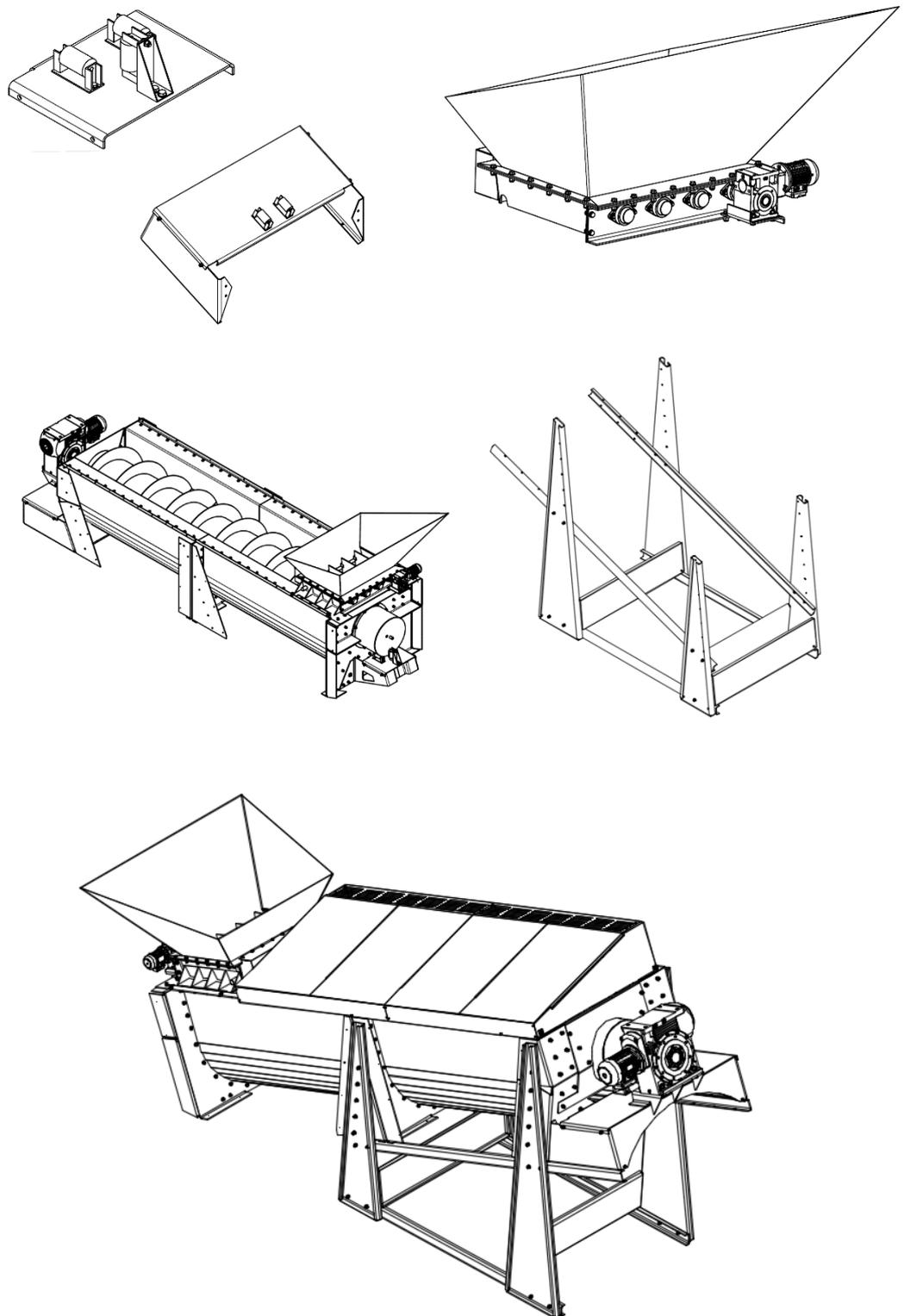


Figura 4.21. Disegni completi del prototipo di essiccatore.

4.9. Fase test del prototipo di essiccatore

Si è verificata prima la funzionalità ed i cinematismi del sistema con sabbia e sistema a freddo. La sabbia ha percorso senza fermi macchina ed in continuo l'intero percorso, dall'ingresso della tramoggia alla bocca di uscita della flangia superiore. I sistemi di apertura e chiusura valvola di scarico hanno funzionato opportunamente. I cinematismi di movimentazione coclea non hanno riscontrato intoppi. L'albero ruotava correttamente sostenuto dai supporti con rulli senza avere scarrellamenti. La coclea veniva movimentata sotto motoriduttore ed inverter, alternando la velocità di rotazione senza presentare discontinuità.

Una volta verificato il funzionamento meccanico, è stata ultimata la progettazione e la messa in opera dei canali di distribuzione del fluido termoconvettore. La Figura 4.22 è una rappresentazione del circuito che è descritto di seguito.

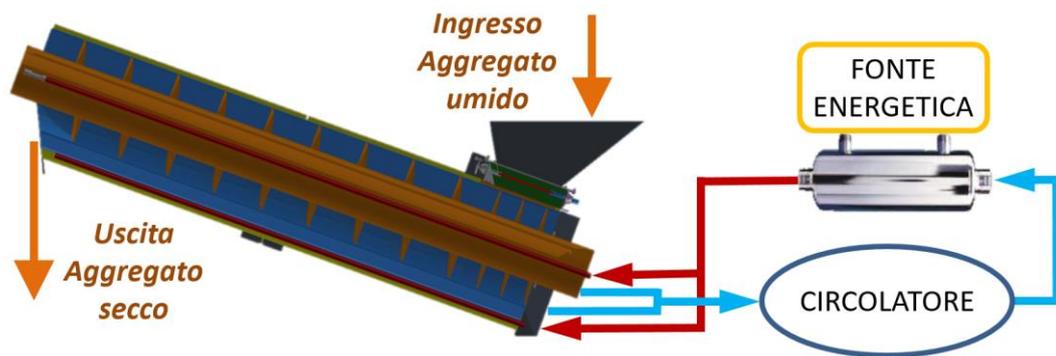


Figura 4.22. Rappresentazione del circuito di distribuzione del fluido termoconvettore.

All'interno dell'albero e della camicia della coclea sono presenti due tubi di mandata termoisolati. Per l'albero il tubo è posto al centro dello stesso mentre nella camicia è posto nella parte bassa. All'estremo basso dei due tubi entra il fluido caldo, per poi scaricarlo all'estremo opposto, ovvero il lato più alto della coclea. Affiancata alla zona di ingresso fluido caldo, e cioè sempre dal lato inferiore dell'essiccatore, sono poste le uscite dei fluidi dall'essiccatore. All'interno dell'albero circolano 2.3 m^3 di fluido mentre nella camicia il volume è di 2.8 m^3 ma riempiti solo per il 95%. Le due zone, camicia ed albero, dove il fluido caldo scambia calore, sono sigillate. Sia nella camicia che nell'albero sono presenti due valvole di sfogo per compensare una eventuale sovrappressione ed eccesso

di volume del fluido convettore, causati dalle potenziali alte temperature. Questo sistema protegga le parti meccaniche che presentano molte saldature, le quali, in caso di sovrappressione, rischiano di danneggiarsi. Per garantire la corretta rotazione della coclea è stato inserito un giunto rotante con cinematismi interni al fine di avere equilibrio tra la rotazione dell'albero e quella dei due canali di uscita ed ingresso dell'acqua (Figura 4.23).



Figura 4.23. giunto rotante per il circuito di distribuzione del fluido nell'albero.

In parallelo, è stata dimensionata e successivamente messa in opera una fonte termica idonea per garantire il flusso di acqua calda per l'essiccamento nella fase di test, cioè una caldaia a vaso aperto, alimentabile sia a gasolio che a gas, con potenza utile massima 120 kW e temperatura massima di 110 °C (Figura 4.24). Il sistema di circolazione del fluido è a vaso aperto, poiché la caldaia è a vaso a parto. Per i test è stato utilizzato come combustibile del gpl.



Figura 4.24. Caldaia alimentata a gpl per circolazione e riscaldamento acqua in fase test.

Una volta ultimato il circuito, si è svolto un primo test completo. Una volta che il fluido caldo è arrivato a regime, le elevate temperature hanno portato ad una parziale deformazione delle parti meccaniche, tra camicia e spira. Il canale sede della coclea si è leggermente compresso internamente e tale deformazione non permetteva la corretta rotazione della coclea, a causa del maggiore attrito, pertanto è stato ridotto il diametro delle spire, aumentando così il gioco tra le parti che tra spire e camicia è passato da 2 cm a 4 cm. Le tenute del giunto hanno subito delle perdite che sono state opportunamente rinforzate. L'inverter sotto motore non ha retto al sovraccarico causato dal maggiore attrito, pertanto è stato sostituito da uno maggiorato. È stato inoltre maggiorato l'appoggio del motore.

Una volta apportate tutte le modifiche è stato effettuato un terzo test, questa volta completo. La coclea è stata caricata di materiale con un grado di riempimento di 0.2 ad una velocità di 0.5 rpm, che corrisponde ad una portata volumetrica di 1.45 m³/h, che per una sabbia secca di densità circa 1.4 ton/m³ corrisponde al parametro progettuale di 2 ton/h. Non si sono riscontrati problemi meccanici di alcun genere ed il materiale ha percorso l'intero tratto dell'essiccatore in continuo. Per breve periodo è stata provata una

velocità di rotazione più bassa, senza riscontrare problemi di riduzione di moto. Si è preferito tuttavia mantenere la velocità di 0.5 rpm per effettuare il test completo. L'acqua di ingresso è stata portata ad 80°C all'uscita della caldaia, simulando un caso pratico, sia per le maggiori tipologie di caldaia, sia per le fonti di energia rinnovabile quali i pannelli solari. La sabbia ha impiegato circa 20 minuti per percorrere tutto il canale. L'umidità della sabbia in ingresso ed in uscita dal prototipo è stata rilevata attraverso campionature, calcolando la differenza di peso prima e dopo l'essiccamento di tali campioni in un forno ventilato ad elevata temperatura. I risultati hanno riscontrato una bassa riduzione dell'umidità, che dal valore di 5.5% in ingresso, dopo due passaggi all'interno dell'essiccatore, ha una riduzione in uscita fino a 4.4%.

L'essiccatore non era opportunamente isolato e le parti metalliche esterne risultavano essere ad elevata temperatura. Pertanto è stata progettato ed applicato un involucro isolante costituito da pannelli sandwich in EPS da 4cm e diviso in due zone, uno ad avvolgere la vasca esterna della coclea, l'altro applicato alla copertura inclinata (Figure 4.25 e 4.26). La sabbia invece veniva poco movimentata e si spostava in maniera troppo compatta, pertanto sono state installate delle alette di congiunzione tra una spira e l'altra, ad ottimizzare il trasporto dal basso verso l'alto del materiale (Figura 4.27).

L'essiccatore con le nuove modifiche è riportato nella figura 4.28.



Figura 4.25. Copertura isolata in pannelli sandwich sulla copertura inclinata.



Figura 4.26. Copertura isolata in pannelli sandwich per la vasca estera coclea.



Figura 4.27. Aletta di congiunzione tra due spire.



Figura 4.28. Prototipo di essiccatore a coclea de la Personal Factory.

Una volta terminati gli ultimi accorgimenti, è stato effettuato un secondo test completo, il quarto test totale. Sono state impostate le stesse condizioni del test precedente. Anche in questo test la sabbia si movimentava ancora troppo compatta, condizione evidente anche alla flangia di uscita del materiale (Figura 4.29). Il giunto con cinematismi interni, per il ritorno e la mandata di acqua all'interno dell'albero, costituiva un'ostruzione per l'intero circuito di circolazione nell'albero, a causa delle ridotte dimensioni dei canali interni. Ne risultava pertanto un flusso di acqua più basso nell'albero rispetto a quello della camicia. I risultati non si sono discostati di molto rispetto al test precedente. La temperatura di uscita della sabbia era in media di 31 °C. Si è di nuovo riscontrata una bassa riduzione dell'umidità, che da 5.7% in ingresso, dopo due passaggi all'interno dell'essiccatore si è ridotta al 4.0%.



Figura 4.29. Prototipo di essiccatore a coclea de la Personal Factory.

4.10. Analisi termodinamica

Per analizzare il comportamento termico della sabbia all'interno dell'essiccazione, sono state effettuate una serie di simulazioni tramite il software SolidWorks, al fine di evidenziare il riscaldamento della stessa sabbia in funzione: della temperatura dell'acqua passante attraverso la camicia e l'albero della coclea; delle caratteristiche della stessa sabbia in termini di caratterizzazione chimica, umidità, capacità termica e conducibilità termica; della rotazione della coclea e quindi del tempo di permanenza della sabbia all'interno dell'essiccatore.

L'analisi è utile a comprendere se e come le eventuali migliorie al sistema di essiccazione possano corrispondere ad una maggiore resa in termini di temperature della sabbia ed abbattimento dell'umidità. Non entrando nel merito di modelli sofisticati, lo studio ha interessato l'analisi semplificata di una porzione di assieme del sistema costituito da camicia, sede ed albero dell'essiccatore. La coclea ha una rotazione di 0.5 rpm, mentre la quasi totale assenza di alette e bracci comporta che la sabbia rimanga quasi totalmente compatta. In virtù di questi due eventi, gli effetti dovuti alla movimentazione e mescolamento della sabbia sono quasi nulli. Nel modello di simulazione semplificato sono stati quindi trascurati ed il modello è stato studiato nella sua condizione statica. Come è noto, la temperatura dell'acqua quale fluido termoconvettore è all'ingresso di 80 °C. Nella simulazione semplificata in SolidWorks è stata considerata uniforme sia sull'albero che nella camicia, nelle prime analisi ad una temperatura di 10 °C inferiore rispetto a quella in ingresso, e cioè 70 °C. Si è considerata la sabbia ad una temperatura iniziale di 15 °C, come nel caso reale.

Per la creazione del modello è stata utilizzata una mesh a triangolo. Effettuando una serie di analisi in funzione dell'infittimento e dimensioni della mesh, è stata individuata la mesh idonea che non comportava significative variazioni dei risultati rispetto a modelli con maggiori nodi.

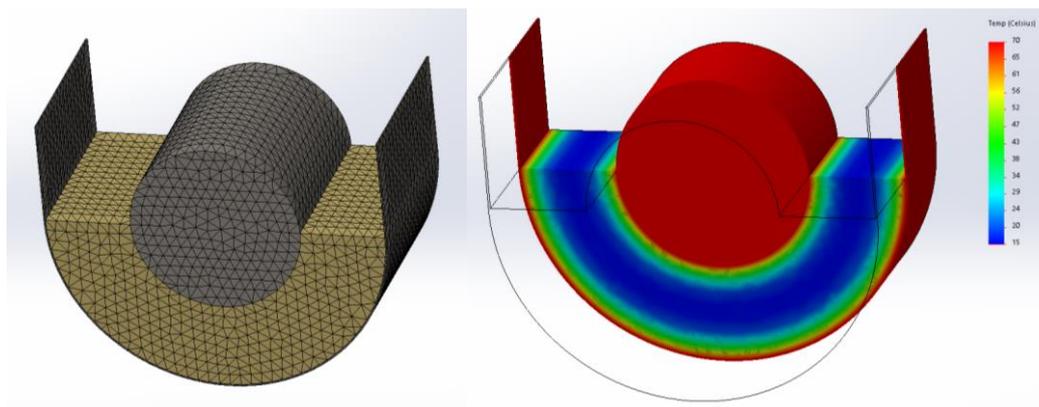


Figura 4.30. Simulazione trasferimento di calore conduttivo in SolidWorks.

Sono state lanciate una serie di simulazioni al variare delle caratteristiche del modello fisico, al fine di determinare la temperatura media della sabbia. Le simulazioni con dati significativi sono di seguito riportate nella tabella in basso.

SABBIA	CALORE SPECIFICO cp J / [kg K]	CONDUCIBILITÀ TERMICA SABBIA k W / [m K]	TEMPERATURA ACQUA CALDA °C	TEMPO Δt min.	TEMPERATURA MEDIA SABBIA °C
1: Umidità 20%	2000	2,7	70	20	26
2: Umidità 0%	800	0,35	70	20	20
3: Umidità 6%	840	1	70	20	25
4: Umidità 6%	840	1	70	25	27
5: Umidità 6%	840	1	70	400	58
6: Umidità 6%	840	1	120	20	43
7: Umidità 6%	840	1	120	25	46
8: Umidità 6%	840	1	120	200	91

Tabella 4.1. Dati e risultati delle simulazioni in SolidWorks.

Le simulazioni da 3 a 5 fanno riferimento alle condizioni termiche della sabbia vicine a quelle dei test reali. La simulazione 3 ha un tempo finale di 20 minuti, corrispondente per il test reale a quello di permanenza media della sabbia nella coclea. La temperatura finale media è di $T_{f,m} = 25\text{ °C}$, per un $\Delta T = 10\text{ °C}$, che rispetto al caso reale, $T_{m,o} = 30\text{ °C}$, per un $\Delta T = 15\text{ °C}$, si discosta di 5 °C . Dai valori finali di temperatura media si può quindi assumere che la componente di scambio termico convettiva pesa solo per un terzo sul valore del coefficiente di trasmissione del calore totale U_{tot} dell'essiccatore Personal Factory, una influenza bassa, dovuta alle basse velocità di rotazione ed alla scarsa movimentazione della sabbia. Se immaginiamo di ridurre la velocità di rotazione della coclea sotto 0.5 rpm , come di fatto è possibile ma limitatamente nell'essiccatore Personal Factory, il valore di temperatura media finale della sabbia non incrementa di molto, come si evince nella simulazione 4 che ad un tempo $\Delta t = 25\text{min}$ corrisponde una temperatura $T_{m,o} = 27\text{ °C}$, soli 2 °C superiori al $\Delta t = 20\text{ min}$. La simulazione 5 mostra che dopo 400 minuti di scambio termico la temperatura media della sabbia sale a 58 °C . Si evince che il fattore tempo di permanenza della sabbia nell'essiccatore ha una bassa influenza sulla temperatura finale media della sabbia, a causa della bassa temperatura del fluido termoconvettore. Un significativo incremento si nota nelle simulazioni da 6 ad 8, dalle quali si evince che, se la temperatura dell'acqua raggiunge valori significativi e prossimi a 130 °C , come nel caso di aggiunta di sali, la temperatura della sabbia può incrementare significativamente, in particolare, per un $\Delta t = 20\text{min}$, la temperatura finale media $T_{f,m}$ passa dai 25 °C del caso reale simulato a 43 °C . La simulazione finale 8 mostra che per un $\Delta t = 200\text{min}$, $T_{f,m} = 91\text{ °C}$, cioè incrementando il tempo di permanenza di 10 volte rispetto al caso reale, la temperatura media finale della sabbia si avvicina a valori prossimi a 100 °C .

Nella valutazione della capacità di essiccamento, è importante sottolineare che le temperature in gioco non hanno modo di raggiungere il punto di ebollizione dell'acqua, pertanto l'azione di essiccamento della sabbia si ha per evaporazione dovuta a differenza di pressione parziale dell'acqua in essa contenuta rispetto alla pressione di vapore dell'aria nell'essiccatore. L'aria all'interno dell'essiccatore non è forzata, pertanto, se non c'è azione convettiva naturale di riscaldamento, l'aria a contatto con la sabbia è vicina ad una condizione statica. Di conseguenza, una volta che l'umidità del materiale evapora,

l'aria più satura si allontanerà più lentamente dal materiale solido. L'aria all'interno dell'essiccatore è circa 6 m³, e può raggiungere una temperatura maggiore o uguale a quella della sabbia, poiché si trova anch'essa a contatto con superfici di scambio termico albero e camicia, e soprattutto $[m \times c_p]_{\text{aria}}$ è di quasi due ordini di grandezza inferiore ad $[m \times c_p]_{\text{acqua}}$, pertanto l'aria subisce un incremento di temperatura molto più rapido della sabbia. La sabbia all'interno dell'essiccatore è ad una temperatura media tra i 15°C di ingresso ed i 30°C di uscita. Se prendiamo il caso pratico e sperimentato di evaporazione nelle piscine [63] risulta che:

$$q = \lambda_{\text{lat}} \cdot \dot{m}_{\text{acq}} = S_c \cdot h_{\text{ev}} \cdot [p_{\text{v,sat}}(T_{\text{s,s}}) - p_{\text{v,aria}}(T_{\text{a}})] \quad (4.14)$$

Dove S_c è la superficie di contatto tra sabbia ed aria, h_{ev} è il coefficiente evaporativo che per aria statica in piscine è pari a 0.05 W/[m² Pa], $T_{\text{s,s}}$ è la temperatura della sabbia alla superficie di contatto mentre le due pressioni, $p_{\text{v,sat}}$ e $p_{\text{v,aria}}$, si calcolano conoscendo le condizioni di temperatura $T_{\text{a,i}}$ ed umidità relativa φ dell'aria in ingresso, e secondo l'equazione di Capleyron per la pressione di vapore saturo $p_{\text{v,sat}}(T)$, semplificata all'equazione di Antoine mediante l'uso dei coefficienti sperimentali A, a e b:

$$p_{\text{v,sat}}(T_{\text{s}}) = A \cdot 10^{\frac{a \cdot T_{\text{s}}}{b + T_{\text{s}}}} \quad (4.15)$$

$$p_{\text{v,aria}}(T_{\text{a}}) = \varphi \cdot p_{\text{v,sat}}(T_{\text{a}}) \quad (4.16)$$

La portata di acqua essiccata secondo tale formula, anche considerando casi ottimali di temperatura superficiale della sabbia di 30-50°C ed aria iniziale completamente secca, è dell'ordine di qualche unità di grammo al secondo, valore confermato nei dati sperimentali dell'essiccatore Personal Factory. Di contro, per una portata di sabbia di circa 2 ton/h la portata di acqua in ingresso è di un ordine di grandezza più elevata, e cioè di 30 g/s. Si comprende che il grado di essiccamento è di molto inferiore rispetto alla portata di umidità da rimuovere dal materiale in ingresso.

Conclusioni

Nel presente lavoro si è progettato e prototipato un impianto di essiccamento a coclea indiretto, idoneo per la produzione locale di inerti ed aggregati da riciclo per l'edilizia. La realizzazione del prototipo in questione ed i risultati dei test effettuati hanno dimostrato la fattibilità del principio di funzionamento ed il soddisfacimento delle primarie specifiche di utilizzo. Sfruttando un meccanismo di essiccazione di tipo indiretto ed a bassa entalpia specifica, non ci sono rischi di sicurezza o ambientali che possono generarsi in presenza di materiali o residui organici. Il macchinario ha la flessibilità nel poter sfruttare calore proveniente da fonti termiche diverse, con acqua calda a temperatura compresa tra gli 80 ed i 95 °C, ampiamente disponibile o facilmente generabile nei più svariati casi. L'impianto è ecologicamente sostenibile, al contrario dei sistemi classici, inoltre le basse temperature richieste potrebbero provenire anche dall'utilizzo di fonti termiche di scarto, altrimenti perse. Si possono utilizzare apparecchiature economiche e fonti energetiche di facile reperimento, fonti termiche rinnovabili da biomassa e solare. Senza la necessità di effettuare modifiche agli impianti, la messa in opera è adattabile in funzione del luogo di installazione. Il sistema di movimentazione a coclea permette di monitorare l'evolversi dell'umidità durante il processo di essiccazione, dando la possibilità di valutare e di decidere in modo dinamico la velocità di transito ed il tempo di permanenza del materiale all'interno dell'essiccatore. Il macchinario può essere inserito a monte di un sistema di vagliatura degli inerti poiché può processare anche grosse pezzature di materiale. La manutenzione dell'impianto è molto semplice e fattibile anche in luoghi disagiati, essendo costituito di un solo motore e di circuiteria standard. I risultati dei test sperimentali fanno evincere la necessità di ulteriori modifiche, mentre le analisi dimostrano grossi margini di miglioramento. I parametri in primis da migliorare sono sicuramente i materiali di scambio e le tenute che, a partire da questo primo prototipo che ha subito numerose modifiche ed adattamenti, possono essere di molto ottimizzati. Questo aumenterebbe il coefficiente di conduttività termica delle parti metalliche tra fluido termoconvettore e materiale da essiccare. Inoltre, permetterebbe di ampliare l'intervallo di temperatura di esercizio del fluido, usando miscele con glicole etilenico o cloruro di sodio, fino a 140-160 °C, incrementando quindi il flusso di calore verso il

materiale, mantenendo allo stesso tempo l'economicità della soluzione, poiché si potrebbe utilizzare sempre acqua con delle additivazioni. L'aggiunta di un flusso di corrente di gas passivo all'interno dell'essiccatore, allo scopo di trasportare l'umidità evaporata lontano dal materiale, può aumentare il grado di essiccamento, soprattutto se tale gas fosse entrante ed uscente dagli estremi dell'essiccatore ed equicorrente con il flusso di materiale. Questo agevolerebbe l'umidità ad allontanarsi agevolmente dal materiale da essiccare e permetterebbe una ottimizzazione strutturale alla copertura. La modifica alla copertura ed il meccanismo di aerazione attraverso il flusso di gas passivo permetterebbe di modificare il profilo di camicia ed ottimizzarlo, anche passando da un profilo da U a cilindrico, e permetterebbe di incrementare la superficie di scambio termico, aumentare il volume del fluido termoconvettore e migliorare l'isolamento della copertura. La modifica della spira della coclea, con una facile riduzione del passo, permetterebbe di movimentare maggiormente la sabbia, aumentando la velocità di rotazione ma mantenendo la portata costante, incrementando così il coefficiente di scambio termico per convezione tra la parete riscaldata ed il materiale da essiccare. L'aggiunta di nuove alette e bracci tra una spira e l'altra, con un idoneo profilo in funzione delle nuove spire a passo più corto, aumenterebbe la movimentazione della sabbia, scompartandola e garantendo la giusta aerazione, necessaria per agevolare la vaporizzazione e successivo allontanamento dell'umidità. L'aumento della portata del fluido termoconvettore nelle circuiterie, partendo dalla modifica del giunto cinematico per l'albero, permetterebbe un sostanziale incremento del coefficiente di scambio termico convettivo tra il fluido e la parete riscaldante dell'albero e della camicia della coclea. L'obiettivo futuro sarà pertanto finalizzare l'ottimizzazione dello scambio termico ed il necessario adattamento degli organi meccanici, fino all'ottenimento di risultati soddisfacenti, per poi passare alla commercializzazione ultima del macchinario. A tale fine, viste le peculiarità e l'adattabilità a svariate applicazioni dell'impianto, sarà importante attivare i sistemi incentivanti dei titoli di efficienza energetica. All'estero invece, si è già ottenuto il consenso di un ente pubblico francese ADEME (agenzia per l'ambiente e la gestione dell'energia) per finanziare il 70% del progetto e parallelo acquisto del macchinario da parte di un potenziale cliente nell'isola delle Martinique. Inoltre, la presentazione del sistema al seminario "Stone Waste Reciclyng", della fiera Marmomacc 2014 in Verona, ha creato un forte interesse di aziende, per la maggior parte

estere, che estraggono e tagliano blocchi e lastre di marmo da cava. Gli scarti in grosse quantità di inerti da cava, ma soprattutto quelli da taglio, all'uscita degli impianti a filtro-pressa, generano un elevato costo di smaltimento e spreco di produzione. L'impianto di essiccazione permetterebbe di trasformare tale scarto in materiale nobile, coniugando sostenibilità ambientale e guadagno economico. Per quanto riguarda il necessario sistema di vagliatura dell'aggregato, da porre a valle del sistema di essiccatura, sono stati progettate svariate linee di vagliatura e sono stati già forniti due impianti per due diverse applicazioni.

Alcune analisi di mercato hanno permesso alla Personal Factory di trovare una interessante applicazione del macchinario ideato per l'essiccazione di un altro tipo di materiale. Tre dei numerosi gassificatori presenti nell'area delle serre calabre, per la produzione di energia da cippato, hanno mostrato molto interesse all'utilizzo del sistema di essiccamento per ridurre l'umidità in ingresso del legname da gassificare. Tali gassificatori producono acqua calda in eccesso che oggi raffreddano con dei radiatori. L'essiccatore a coclea indiretto permetterebbe un corretto trattamento del materiale in ingresso, cosa non fattibile con i sistemi di essiccamento diretti in commercio. Il particolare design del nuovo essiccatore, oltre alle caratteristiche precedentemente descritte, fornirebbe ai gassificatori una serie di vantaggi:

- il trasporto del cippato direttamente nella caldaia;
- una portata variabile e regolabile in base al tasso di umidità dello stesso;
- recuperare il calore di scarto di gassificazione, eliminando i radiatori di raffreddamento a valle;
- un maggiore ritorno economico dovuto ad una maggiore efficienza di combustione.

La sfida ultima nello sviluppo di questo nuovo essiccatore sarà pertanto quella di finalizzare un impianto in grado di processare non soltanto materiali inerti minerali ma altre tipologie per altri campi di applicazione, a partire da quelli di maggiore interesse economico ed ambientale.

Riferimenti bibliografici

- [1] Brundtland G. H., *“Il futuro di noi tutti. Rapporto della commissione mondiale per l'ambiente e lo sviluppo”*, Bompiani, Milano, 1988.
- [2] Daly Herman E., *“Steady State Economics”*, Island Press, 1991.
- [3] Serageldin I., *“Sustainability and the Wealth of Nations”*, ESD 5, The World Bank, Washington DC, 1996.
- [4] www.istat.it
- [5] Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J., Behrens W. W., *“I limiti dello sviluppo”*, Mondadori, Milano, 1972.
- [6] Bastianelli F., *“La politica energetica dell'Unione europea e la situazione dell'Italia”*, La Comunità internazionale, 2006
- [7] Pozzo B., *“Le politiche comunitarie in campo energetico”*, Giuffrè Editore, 2009
- [8] COM(94) 659 disponibile su : aei.pitt.edu/1185/1/energy_gp_COM_94_659.pdf
- [9] COM(95) 682 disponibile su: europa.eu/documentation/official-docs/white-papers/pdf/energy_white_paper_com_95_682.pdf
- [10] ec.europa.eu/italia/attualita/primo_piano/futuro_ue/europa_2020_it.htm
- [11] Solomon et al, *“Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007”*, IPCC, 2007
- [12] Corti et al, *“Clima, cambiamenti climatici globali e loro impatto sul territorio nazionale”*, Quaderni dell'ISAC, 2009
- [13] Pasini A., *“Kyoto e dintorni”*, Franco Angeli Editore, 2006
- [14] www.info-ets.isprambiente.it
- [15] data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-169-2014-INIT/it/pdf
- [16] www.terna.it
- [17] www.gse.it/it/Statistiche/RapportiStatistici/Pagine/default.aspx

- [18] "La Direttiva", eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=URISERV:114527, Settembre 2010
- [19] www.normattiva.it; <http://www.gazzettaufficiale.it>
- [20] www.worldenergyoutlook.org
- [21] www.enea.it/it/pubblicazioni/pdf-volumi/v2012-guida-cb2.pdf
- [22] www.mercatoelettrico.org/it/Mercati/TEE/CosaSonoTee.aspx, 2014
- [23] Renzetti O. "*Scambio termico e scambiatori di calore*", Sierra, Vol 1, 162-163
- [24] Yunus A. Çengel, "*Termodinamica e trasmissione del calore*", McGraw-Hill, 1998
- [25] Renzetti O. "*Scambio termico e scambiatori di calore*", Sierra, Vol 1, 189-191
- [26] www.assoelettrica.it/wp-content/uploads/2013/05/DOSSIER-RINNOVABILITERMICHE-MAGGIO-2013.pdf
- [27] J.R. Couper, W Roy Penney, J.R. Fair, Stanley M. Walas, "*Chemical Process Equipment*", Third Edition, BH - Elsevier, 223-275
- [28] Alan S. Foust et al., "I principi delle operazioni unitarie" Cap. 18, Edizione italiana, Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 1967
- [29] Nonhebel G., Mass A. "*Drying of solids in the Chemical Industry*", London, 1971
- [30] Sherwood Y.K., "Trans. Am. Inst. Chem. Engrs." 32, 150, (1936)
- [31] Newmann A.B., "Trans. Am. Inst. Chem. Engrs." 27, 203, (1931)
- [32] Glasstone S., "Textbook of Physical Chemistry", 487, Princeton (1946)
- [33] Razons P. "*Theorie et pratique du sechage industriel*", Paris, 1949
- [34] Enciclopedia Treccani
- [35] Pareschi A. "*Impianti meccanici per l'industria*" Società Editrice Esculapio, 3^a Ed., 2012
- [36] Mujumdar A. S., "*Handbook of Industrial Drying*", Ed. CRC Press, 3rd Edition, Cap. 41, 2007.

- [37] Enciclopedia medica italiana, Volume 6
- [38] Degli Atti F., Sellerio U. “*L'essiccazione dei prodotti agroalimentari. Per un uso razionale dell'energia*”, Franco Angeli Edizioni, Collana ENEA, 1^a Ed. 1991
- [39] www.personalfactory.eu
- [40] Osservatorio Recycle, “*RECYCLE – “La sfida nel settore delle costruzioni”*” Legambiente, 2° rapporto, Giugno 2016
- [41] Progetto PON01_01522/F2 - ECOFIBAR - FORMAZIONE -MASTER COCEC
- [42] Waje, S.S.; Thorat, B.N.; Mujumdar, A.S.; 2006. “*An experimental study of the thermal performance of a screw conveyor dryer. Drying Technology*”, 24 (3), 293-301.
- [43] Schmalfeld P., et al.: US3520522 (1970)
- [44] Onarheim et al.: US3800865 (1974)
- [45] Whitney P., Nickerson R.: US20100051233 (2010)
- [46] Costarelli E.: US4520724 (1985)
- [47] Maffet V.: US4380496 (1983)
- [48] Mentz: US005531034 (1996)
- [49] Azuma K.: JP2001165572 (2001)
- [50] Okada K.: EP1553369 (2004)
- [51] Comolli A.G.: US4249909 (1981)
- [52] www.therma-flite.com
- [53] www.celsiusprocessing.com
- [54] www.metso.com
- [55] Benali, M.; Kudra, T.; 2001. “*Performance characteristics of the multistage screw-in-trough dryer*”. *Industrial Heat Engineering*, 3 (3-4), 59-63
- [56] Benali, M.; Kudra, T.; 2002. “*Thermal dewatering of diluted organic suspensions: Process mechanism and drying kinetics*”. *Drying Technology*, 20 (4-5), 935-951

- [57] Kim, H.; Shin, M.; Jang, D.; Na, E.; 2005. “*A study for the thermal treatment of dehydrated sewage sludge with gas-agitated double screw type dryer. Journal of Environmental Science and Health*”, Part A, 40 (1), 203–213.
- [58] www.eng.nus.edu.sg/m3tc; www.arunmujumdar.com
- [59] Owen, P.J.; Cleary, P.W.; (2009a). “*Prediction of screw conveyor performance using the Discrete Element Method (DEM)*”, Powder Technology, 193(3), 274–288
- [60] Waje, S.S.; Thorat, B.N.; Mujumdar, A.S.; 2007. “*Study of residence time distribution in a pilot scale screw conveyor dryer*”, Drying Technol. 25 (1), 249–259.
- [61] Waje, S.S.; Thorat, B.N.; Mujumdar, A.S.; 2007. “*Hydrodynamic characteristics of a pilot scale screw conveyor dryer*”, Drying Technol. 25(4), 609–616.
- [62] Waje, S.S.; Thorat, B.N.; Mujumdar, A.S.; 2007. “*Screw conveyor dryer: Process and equipment design*”, Drying Technol. 25 (1), 241–247.
- [63] Muraca A.; Laini F.; 2012. “*Il bilancio termico di una piscina: criticità e possibili rimedi*” XXXIII convegno nazionale di idraulica e costruzioni idrauliche.

Allegato A

Il protocollo di Kyoto

**KYOTO PROTOCOL TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK
CONVENTION ON CLIMATE CHANGE**



UNITED NATIONS

1998

**KYOTO PROTOCOL TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK
CONVENTION ON CLIMATE CHANGE**

The Parties to this Protocol,

Being Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change, hereinafter referred to as “the Convention”,

In pursuit of the ultimate objective of the Convention as stated in its Article 2,

Recalling the provisions of the Convention,

Being guided by Article 3 of the Convention,

Pursuant to the Berlin Mandate adopted by decision 1/CP.1 of the Conference of the Parties to the Convention at its first session,

Have agreed as follows:

Article 1

For the purposes of this Protocol, the definitions contained in Article 1 of the Convention shall apply. In addition:

1. “Conference of the Parties” means the Conference of the Parties to the Convention.
2. “Convention” means the United Nations Framework Convention on Climate Change, adopted in New York on 9 May 1992.
3. “Intergovernmental Panel on Climate Change” means the Intergovernmental Panel on Climate Change established in 1988 jointly by the World Meteorological Organization and the United Nations Environment Programme.
4. “Montreal Protocol” means the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, adopted in Montreal on 16 September 1987 and as subsequently adjusted and amended.
5. “Parties present and voting” means Parties present and casting an affirmative or negative vote.
6. “Party” means, unless the context otherwise indicates, a Party to this Protocol.
7. “Party included in Annex I” means a Party included in Annex I to the Convention, as may be amended, or a Party which has made a notification under Article 4, paragraph 2 (g), of the Convention.

Article 2

1. Each Party included in Annex I, in achieving its quantified emission limitation and reduction commitments under Article 3, in order to promote sustainable development, shall:

(a) Implement and/or further elaborate policies and measures in accordance with its national circumstances, such as:

- (i) Enhancement of energy efficiency in relevant sectors of the national economy;
- (ii) Protection and enhancement of sinks and reservoirs of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol, taking into account its commitments under relevant international environmental agreements; promotion of sustainable forest management practices, afforestation and reforestation;
- (iii) Promotion of sustainable forms of agriculture in light of climate change considerations;
- (iv) Research on, and promotion, development and increased use of, new and renewable forms of energy, of carbon dioxide sequestration technologies and of advanced and innovative environmentally sound technologies;
- (v) Progressive reduction or phasing out of market imperfections, fiscal incentives, tax and duty exemptions and subsidies in all greenhouse gas emitting sectors that run counter to the objective of the Convention and application of market instruments;
- (vi) Encouragement of appropriate reforms in relevant sectors aimed at promoting policies and measures which limit or reduce emissions of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol;
- (vii) Measures to limit and/or reduce emissions of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol in the transport sector;
- (viii) Limitation and/or reduction of methane emissions through recovery and use in waste management, as well as in the production, transport and distribution of energy;

(b) Cooperate with other such Parties to enhance the individual and combined effectiveness of their policies and measures adopted under this Article, pursuant to Article 4, paragraph 2 (e) (i), of the Convention. To this end, these Parties shall take steps to share their experience and exchange information on such policies and measures, including developing ways of improving their comparability, transparency and effectiveness. The Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall, at its first session or as soon as practicable thereafter, consider ways to facilitate such cooperation, taking into account all relevant information.

2. The Parties included in Annex I shall pursue limitation or reduction of emissions of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol from aviation and marine bunker fuels, working through the International Civil Aviation Organization and the International Maritime Organization, respectively.

3. The Parties included in Annex I shall strive to implement policies and measures under this Article in such a way as to minimize adverse effects, including the adverse effects of climate change, effects on international trade, and social, environmental and economic impacts on other Parties, especially developing country Parties and in particular those identified in Article 4, paragraphs 8 and 9, of the Convention, taking into account Article 3 of the Convention. The Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol may take further action, as appropriate, to promote the implementation of the provisions of this paragraph.

4. The Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol, if it decides that it would be beneficial to coordinate any of the policies and measures in paragraph 1 (a) above, taking into account different national circumstances and potential effects, shall consider ways and means to elaborate the coordination of such policies and measures.

Article 3

1. The Parties included in Annex I shall, individually or jointly, ensure that their aggregate anthropogenic carbon dioxide equivalent emissions of the greenhouse gases listed in Annex A do not exceed their assigned amounts, calculated pursuant to their quantified emission limitation and reduction commitments inscribed in Annex B and in accordance with the provisions of this Article, with a view to reducing their overall emissions of such gases by at least 5 per cent below 1990 levels in the commitment period 2008 to 2012.

2. Each Party included in Annex I shall, by 2005, have made demonstrable progress in achieving its commitments under this Protocol.

3. The net changes in greenhouse gas emissions by sources and removals by sinks resulting from direct human-induced land-use change and forestry activities, limited to afforestation, reforestation and deforestation since 1990, measured as verifiable changes in carbon stocks in each commitment period, shall be used to meet the commitments under this Article of each Party included in Annex I. The greenhouse gas emissions by sources and removals by sinks associated with those activities shall be reported in a transparent and verifiable manner and reviewed in accordance with Articles 7 and 8.

4. Prior to the first session of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol, each Party included in Annex I shall provide, for consideration by the Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice, data to establish its level of carbon stocks in 1990 and to enable an estimate to be made of its changes in carbon stocks in subsequent years. The Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall, at its first session or as soon as practicable thereafter, decide upon modalities, rules and guidelines as to how, and which, additional human-induced activities related to changes in greenhouse gas emissions by sources and removals by sinks in the agricultural soils and the land-use change and forestry categories shall be added to, or subtracted from, the assigned amounts for Parties included in Annex I, taking into account uncertainties, transparency in reporting, verifiability, the methodological work of the Intergovernmental Panel on Climate Change, the advice provided by the Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice in accordance with Article 5 and the decisions of the Conference of the Parties. Such a decision shall apply in the second and subsequent commitment periods. A Party may choose to apply such a decision on these additional human-induced activities for its first commitment period, provided that these activities have taken place since 1990.

5. The Parties included in Annex I undergoing the process of transition to a market economy whose base year or period was established pursuant to decision 9/CP.2 of the Conference of the Parties at its second session shall use that base year or period for the implementation of their commitments under this Article. Any other Party included in Annex I undergoing the process of transition to a market economy which has not yet submitted its first national communication under Article 12 of the Convention may also notify the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol that it intends to use an historical base year or period other than 1990 for the implementation of its commitments under this Article. The Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall decide on the acceptance of such notification.

6. Taking into account Article 4, paragraph 6, of the Convention, in the implementation of their commitments under this Protocol other than those under this Article, a certain degree of flexibility shall be allowed by the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol to the Parties included in Annex I undergoing the process of transition to a market economy.

7. In the first quantified emission limitation and reduction commitment period, from 2008 to 2012, the assigned amount for each Party included in Annex I shall be equal to the percentage inscribed for it in Annex B of its aggregate anthropogenic carbon dioxide equivalent emissions of the greenhouse gases listed in Annex A in 1990, or the base year or period determined in accordance with paragraph 5 above, multiplied by five. Those Parties included in Annex I for whom land-use change and forestry constituted a net source of greenhouse gas emissions in 1990 shall include in their 1990 emissions base year or period the aggregate anthropogenic carbon dioxide equivalent emissions by sources minus removals by sinks in 1990 from land-use change for the purposes of calculating their assigned amount.

8. Any Party included in Annex I may use 1995 as its base year for hydrofluorocarbons, perfluorocarbons and sulphur hexafluoride, for the purposes of the calculation referred to in paragraph 7 above.

9. Commitments for subsequent periods for Parties included in Annex I shall be established in amendments to Annex B to this Protocol, which shall be adopted in accordance with the provisions of Article 21, paragraph 7. The Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall initiate the consideration of such commitments at least seven years before the end of the first commitment period referred to in paragraph 1 above.

10. Any emission reduction units, or any part of an assigned amount, which a Party acquires from another Party in accordance with the provisions of Article 6 or of Article 17 shall be added to the assigned amount for the acquiring Party.

11. Any emission reduction units, or any part of an assigned amount, which a Party transfers to another Party in accordance with the provisions of Article 6 or of Article 17 shall be subtracted from the assigned amount for the transferring Party.

12. Any certified emission reductions which a Party acquires from another Party in accordance with the provisions of Article 12 shall be added to the assigned amount for the acquiring Party.

13. If the emissions of a Party included in Annex I in a commitment period are less than its assigned amount under this Article, this difference shall, on request of that Party, be added to the assigned amount for that Party for subsequent commitment periods.

14. Each Party included in Annex I shall strive to implement the commitments mentioned in paragraph 1 above in such a way as to minimize adverse social, environmental and economic impacts on developing country Parties, particularly those identified in Article 4, paragraphs 8 and 9, of the Convention. In line with relevant decisions of the Conference of the Parties on the implementation of those paragraphs, the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall, at its first session, consider what actions are necessary to minimize the adverse effects of climate change and/or the impacts of response measures on Parties referred to in those paragraphs. Among the issues to be considered shall be the establishment of funding, insurance and transfer of technology.

Article 4

1. Any Parties included in Annex I that have reached an agreement to fulfil their commitments under Article 3 jointly, shall be deemed to have met those commitments provided that their total combined aggregate anthropogenic carbon dioxide equivalent emissions of the greenhouse gases listed in Annex A do not exceed their assigned amounts calculated pursuant to their quantified emission limitation and reduction commitments inscribed in Annex B and in accordance with the provisions of Article 3. The respective emission level allocated to each of the Parties to the agreement shall be set out in that agreement.

2. The Parties to any such agreement shall notify the secretariat of the terms of the agreement on the date of deposit of their instruments of ratification, acceptance or approval of this Protocol, or accession thereto. The secretariat shall in turn inform the Parties and signatories to the Convention of the terms of the agreement.

3. Any such agreement shall remain in operation for the duration of the commitment period specified in Article 3, paragraph 7.

4. If Parties acting jointly do so in the framework of, and together with, a regional economic integration organization, any alteration in the composition of the organization after adoption of this Protocol shall not affect existing commitments under this Protocol. Any alteration in the composition of the organization shall only apply for the purposes of those commitments under Article 3 that are adopted subsequent to that alteration.

5. In the event of failure by the Parties to such an agreement to achieve their total combined level of emission reductions, each Party to that agreement shall be responsible for its own level of emissions set out in the agreement.

6. If Parties acting jointly do so in the framework of, and together with, a regional economic integration organization which is itself a Party to this Protocol, each member State of that regional economic integration organization individually, and together with the regional economic integration organization acting in accordance with Article 24, shall, in the event of failure to achieve the total combined level of emission reductions, be responsible for its level of emissions as notified in accordance with this Article.

Article 5

1. Each Party included in Annex I shall have in place, no later than one year prior to the start of the first commitment period, a national system for the estimation of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of all greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol. Guidelines for such national systems, which shall incorporate the methodologies specified in paragraph 2 below, shall be decided upon by the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol at its first session.
2. Methodologies for estimating anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of all greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol shall be those accepted by the Intergovernmental Panel on Climate Change and agreed upon by the Conference of the Parties at its third session. Where such methodologies are not used, appropriate adjustments shall be applied according to methodologies agreed upon by the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol at its first session. Based on the work of, *inter alia*, the Intergovernmental Panel on Climate Change and advice provided by the Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice, the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall regularly review and, as appropriate, revise such methodologies and adjustments, taking fully into account any relevant decisions by the Conference of the Parties. Any revision to methodologies or adjustments shall be used only for the purposes of ascertaining compliance with commitments under Article 3 in respect of any commitment period adopted subsequent to that revision.
3. The global warming potentials used to calculate the carbon dioxide equivalence of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases listed in Annex A shall be those accepted by the Intergovernmental Panel on Climate Change and agreed upon by the Conference of the Parties at its third session. Based on the work of, *inter alia*, the Intergovernmental Panel on Climate Change and advice provided by the Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice, the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall regularly review and, as appropriate, revise the global warming potential of each such greenhouse gas, taking fully into account any relevant decisions by the Conference of the Parties. Any revision to a global warming potential shall apply only to commitments under Article 3 in respect of any commitment period adopted subsequent to that revision.

Article 6

1. For the purpose of meeting its commitments under Article 3, any Party included in Annex I may transfer to, or acquire from, any other such Party emission reduction units resulting from projects aimed at reducing anthropogenic emissions by sources or enhancing anthropogenic removals by sinks of greenhouse gases in any sector of the economy, provided that:
 - (a) Any such project has the approval of the Parties involved;
 - (b) Any such project provides a reduction in emissions by sources, or an enhancement of removals by sinks, that is additional to any that would otherwise occur;

(c) It does not acquire any emission reduction units if it is not in compliance with its obligations under Articles 5 and 7; and

(d) The acquisition of emission reduction units shall be supplemental to domestic actions for the purposes of meeting commitments under Article 3.

2. The Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol may, at its first session or as soon as practicable thereafter, further elaborate guidelines for the implementation of this Article, including for verification and reporting.

3. A Party included in Annex I may authorize legal entities to participate, under its responsibility, in actions leading to the generation, transfer or acquisition under this Article of emission reduction units.

4. If a question of implementation by a Party included in Annex I of the requirements referred to in this Article is identified in accordance with the relevant provisions of Article 8, transfers and acquisitions of emission reduction units may continue to be made after the question has been identified, provided that any such units may not be used by a Party to meet its commitments under Article 3 until any issue of compliance is resolved.

Article 7

1. Each Party included in Annex I shall incorporate in its annual inventory of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol, submitted in accordance with the relevant decisions of the Conference of the Parties, the necessary supplementary information for the purposes of ensuring compliance with Article 3, to be determined in accordance with paragraph 4 below.

2. Each Party included in Annex I shall incorporate in its national communication, submitted under Article 12 of the Convention, the supplementary information necessary to demonstrate compliance with its commitments under this Protocol, to be determined in accordance with paragraph 4 below.

3. Each Party included in Annex I shall submit the information required under paragraph 1 above annually, beginning with the first inventory due under the Convention for the first year of the commitment period after this Protocol has entered into force for that Party. Each such Party shall submit the information required under paragraph 2 above as part of the first national communication due under the Convention after this Protocol has entered into force for it and after the adoption of guidelines as provided for in paragraph 4 below. The frequency of subsequent submission of information required under this Article shall be determined by the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol, taking into account any timetable for the submission of national communications decided upon by the Conference of the Parties.

4. The Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall adopt at its first session, and review periodically thereafter, guidelines for the preparation of the information required under this Article, taking into account guidelines for the preparation of

national communications by Parties included in Annex I adopted by the Conference of the Parties. The Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall also, prior to the first commitment period, decide upon modalities for the accounting of assigned amounts.

Article 8

1. The information submitted under Article 7 by each Party included in Annex I shall be reviewed by expert review teams pursuant to the relevant decisions of the Conference of the Parties and in accordance with guidelines adopted for this purpose by the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol under paragraph 4 below. The information submitted under Article 7, paragraph 1, by each Party included in Annex I shall be reviewed as part of the annual compilation and accounting of emissions inventories and assigned amounts. Additionally, the information submitted under Article 7, paragraph 2, by each Party included in Annex I shall be reviewed as part of the review of communications.

2. Expert review teams shall be coordinated by the secretariat and shall be composed of experts selected from those nominated by Parties to the Convention and, as appropriate, by intergovernmental organizations, in accordance with guidance provided for this purpose by the Conference of the Parties.

3. The review process shall provide a thorough and comprehensive technical assessment of all aspects of the implementation by a Party of this Protocol. The expert review teams shall prepare a report to the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol, assessing the implementation of the commitments of the Party and identifying any potential problems in, and factors influencing, the fulfilment of commitments. Such reports shall be circulated by the secretariat to all Parties to the Convention. The secretariat shall list those questions of implementation indicated in such reports for further consideration by the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol.

4. The Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall adopt at its first session, and review periodically thereafter, guidelines for the review of implementation of this Protocol by expert review teams taking into account the relevant decisions of the Conference of the Parties.

5. The Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall, with the assistance of the Subsidiary Body for Implementation and, as appropriate, the Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice, consider:

(a) The information submitted by Parties under Article 7 and the reports of the expert reviews thereon conducted under this Article; and

(b) Those questions of implementation listed by the secretariat under paragraph 3 above, as well as any questions raised by Parties.

6. Pursuant to its consideration of the information referred to in paragraph 5 above, the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall take decisions on any matter required for the implementation of this Protocol.

Article 9

1. The Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall periodically review this Protocol in the light of the best available scientific information and assessments on climate change and its impacts, as well as relevant technical, social and economic information. Such reviews shall be coordinated with pertinent reviews under the Convention, in particular those required by Article 4, paragraph 2 (d), and Article 7, paragraph 2 (a), of the Convention. Based on these reviews, the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall take appropriate action.
2. The first review shall take place at the second session of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol. Further reviews shall take place at regular intervals and in a timely manner.

Article 10

All Parties, taking into account their common but differentiated responsibilities and their specific national and regional development priorities, objectives and circumstances, without introducing any new commitments for Parties not included in Annex I, but reaffirming existing commitments under Article 4, paragraph 1, of the Convention, and continuing to advance the implementation of these commitments in order to achieve sustainable development, taking into account Article 4, paragraphs 3, 5 and 7, of the Convention, shall:

- (a) Formulate, where relevant and to the extent possible, cost-effective national and, where appropriate, regional programmes to improve the quality of local emission factors, activity data and/or models which reflect the socio-economic conditions of each Party for the preparation and periodic updating of national inventories of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of all greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol, using comparable methodologies to be agreed upon by the Conference of the Parties, and consistent with the guidelines for the preparation of national communications adopted by the Conference of the Parties;
- (b) Formulate, implement, publish and regularly update national and, where appropriate, regional programmes containing measures to mitigate climate change and measures to facilitate adequate adaptation to climate change:
 - (i) Such programmes would, *inter alia*, concern the energy, transport and industry sectors as well as agriculture, forestry and waste management. Furthermore, adaptation technologies and methods for improving spatial planning would improve adaptation to climate change; and
 - (ii) Parties included in Annex I shall submit information on action under this Protocol, including national programmes, in accordance with Article 7; and other Parties shall seek to include in their national communications, as appropriate, information on programmes which contain measures that the Party believes contribute to addressing climate change and its adverse impacts, including the abatement of increases in greenhouse gas emissions, and enhancement of and removals by sinks, capacity building and adaptation measures;

(c) Cooperate in the promotion of effective modalities for the development, application and diffusion of, and take all practicable steps to promote, facilitate and finance, as appropriate, the transfer of, or access to, environmentally sound technologies, know-how, practices and processes pertinent to climate change, in particular to developing countries, including the formulation of policies and programmes for the effective transfer of environmentally sound technologies that are publicly owned or in the public domain and the creation of an enabling environment for the private sector, to promote and enhance the transfer of, and access to, environmentally sound technologies;

(d) Cooperate in scientific and technical research and promote the maintenance and the development of systematic observation systems and development of data archives to reduce uncertainties related to the climate system, the adverse impacts of climate change and the economic and social consequences of various response strategies, and promote the development and strengthening of endogenous capacities and capabilities to participate in international and intergovernmental efforts, programmes and networks on research and systematic observation, taking into account Article 5 of the Convention;

(e) Cooperate in and promote at the international level, and, where appropriate, using existing bodies, the development and implementation of education and training programmes, including the strengthening of national capacity building, in particular human and institutional capacities and the exchange or secondment of personnel to train experts in this field, in particular for developing countries, and facilitate at the national level public awareness of, and public access to information on, climate change. Suitable modalities should be developed to implement these activities through the relevant bodies of the Convention, taking into account Article 6 of the Convention;

(f) Include in their national communications information on programmes and activities undertaken pursuant to this Article in accordance with relevant decisions of the Conference of the Parties; and

(g) Give full consideration, in implementing the commitments under this Article, to Article 4, paragraph 8, of the Convention.

Article 11

1. In the implementation of Article 10, Parties shall take into account the provisions of Article 4, paragraphs 4, 5, 7, 8 and 9, of the Convention.

2. In the context of the implementation of Article 4, paragraph 1, of the Convention, in accordance with the provisions of Article 4, paragraph 3, and Article 11 of the Convention, and through the entity or entities entrusted with the operation of the financial mechanism of the Convention, the developed country Parties and other developed Parties included in Annex II to the Convention shall:

(a) Provide new and additional financial resources to meet the agreed full costs incurred by developing country Parties in advancing the implementation of existing commitments under Article 4, paragraph 1 (a), of the Convention that are covered in Article 10, subparagraph (a); and

(b) Also provide such financial resources, including for the transfer of technology, needed by the developing country Parties to meet the agreed full incremental costs of advancing the implementation of existing commitments under Article 4, paragraph 1, of the Convention that are covered by Article 10 and that are agreed between a developing country Party and the international entity or entities referred to in Article 11 of the Convention, in accordance with that Article.

The implementation of these existing commitments shall take into account the need for adequacy and predictability in the flow of funds and the importance of appropriate burden sharing among developed country Parties. The guidance to the entity or entities entrusted with the operation of the financial mechanism of the Convention in relevant decisions of the Conference of the Parties, including those agreed before the adoption of this Protocol, shall apply *mutatis mutandis* to the provisions of this paragraph.

3. The developed country Parties and other developed Parties in Annex II to the Convention may also provide, and developing country Parties avail themselves of, financial resources for the implementation of Article 10, through bilateral, regional and other multilateral channels.

Article 12

1. A clean development mechanism is hereby defined.
2. The purpose of the clean development mechanism shall be to assist Parties not included in Annex I in achieving sustainable development and in contributing to the ultimate objective of the Convention, and to assist Parties included in Annex I in achieving compliance with their quantified emission limitation and reduction commitments under Article 3.
3. Under the clean development mechanism:
 - (a) Parties not included in Annex I will benefit from project activities resulting in certified emission reductions; and
 - (b) Parties included in Annex I may use the certified emission reductions accruing from such project activities to contribute to compliance with part of their quantified emission limitation and reduction commitments under Article 3, as determined by the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol.
4. The clean development mechanism shall be subject to the authority and guidance of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol and be supervised by an executive board of the clean development mechanism.
5. Emission reductions resulting from each project activity shall be certified by operational entities to be designated by the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol, on the basis of:
 - (a) Voluntary participation approved by each Party involved;

(b) Real, measurable, and long-term benefits related to the mitigation of climate change; and

(c) Reductions in emissions that are additional to any that would occur in the absence of the certified project activity.

6. The clean development mechanism shall assist in arranging funding of certified project activities as necessary.

7. The Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall, at its first session, elaborate modalities and procedures with the objective of ensuring transparency, efficiency and accountability through independent auditing and verification of project activities.

8. The Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall ensure that a share of the proceeds from certified project activities is used to cover administrative expenses as well as to assist developing country Parties that are particularly vulnerable to the adverse effects of climate change to meet the costs of adaptation.

9. Participation under the clean development mechanism, including in activities mentioned in paragraph 3 (a) above and in the acquisition of certified emission reductions, may involve private and/or public entities, and is to be subject to whatever guidance may be provided by the executive board of the clean development mechanism.

10. Certified emission reductions obtained during the period from the year 2000 up to the beginning of the first commitment period can be used to assist in achieving compliance in the first commitment period.

Article 13

1. The Conference of the Parties, the supreme body of the Convention, shall serve as the meeting of the Parties to this Protocol.

2. Parties to the Convention that are not Parties to this Protocol may participate as observers in the proceedings of any session of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol. When the Conference of the Parties serves as the meeting of the Parties to this Protocol, decisions under this Protocol shall be taken only by those that are Parties to this Protocol.

3. When the Conference of the Parties serves as the meeting of the Parties to this Protocol, any member of the Bureau of the Conference of the Parties representing a Party to the Convention but, at that time, not a Party to this Protocol, shall be replaced by an additional member to be elected by and from amongst the Parties to this Protocol.

4. The Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall keep under regular review the implementation of this Protocol and shall make, within its mandate, the decisions necessary to promote its effective implementation. It shall perform the functions assigned to it by this Protocol and shall:

(a) Assess, on the basis of all information made available to it in accordance with the provisions of this Protocol, the implementation of this Protocol by the Parties, the overall effects of the measures taken pursuant to this Protocol, in particular environmental, economic and social effects as well as their cumulative impacts and the extent to which progress towards the objective of the Convention is being achieved;

(b) Periodically examine the obligations of the Parties under this Protocol, giving due consideration to any reviews required by Article 4, paragraph 2 (d), and Article 7, paragraph 2, of the Convention, in the light of the objective of the Convention, the experience gained in its implementation and the evolution of scientific and technological knowledge, and in this respect consider and adopt regular reports on the implementation of this Protocol;

(c) Promote and facilitate the exchange of information on measures adopted by the Parties to address climate change and its effects, taking into account the differing circumstances, responsibilities and capabilities of the Parties and their respective commitments under this Protocol;

(d) Facilitate, at the request of two or more Parties, the coordination of measures adopted by them to address climate change and its effects, taking into account the differing circumstances, responsibilities and capabilities of the Parties and their respective commitments under this Protocol;

(e) Promote and guide, in accordance with the objective of the Convention and the provisions of this Protocol, and taking fully into account the relevant decisions by the Conference of the Parties, the development and periodic refinement of comparable methodologies for the effective implementation of this Protocol, to be agreed on by the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol;

(f) Make recommendations on any matters necessary for the implementation of this Protocol;

(g) Seek to mobilize additional financial resources in accordance with Article 11, paragraph 2;

(h) Establish such subsidiary bodies as are deemed necessary for the implementation of this Protocol;

(i) Seek and utilize, where appropriate, the services and cooperation of, and information provided by, competent international organizations and intergovernmental and non-governmental bodies; and

(j) Exercise such other functions as may be required for the implementation of this Protocol, and consider any assignment resulting from a decision by the Conference of the Parties.

5. The rules of procedure of the Conference of the Parties and financial procedures applied under the Convention shall be applied *mutatis mutandis* under this Protocol, except as may be otherwise decided by consensus by the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol.

6. The first session of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall be convened by the secretariat in conjunction with the first session of the Conference of the Parties that is scheduled after the date of the entry into force of this Protocol. Subsequent ordinary sessions of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall be held every year and in conjunction with ordinary sessions of the Conference of the Parties, unless otherwise decided by the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol.

7. Extraordinary sessions of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall be held at such other times as may be deemed necessary by the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol, or at the written request of any Party, provided that, within six months of the request being communicated to the Parties by the secretariat, it is supported by at least one third of the Parties.

8. The United Nations, its specialized agencies and the International Atomic Energy Agency, as well as any State member thereof or observers thereto not party to the Convention, may be represented at sessions of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol as observers. Any body or agency, whether national or international, governmental or non-governmental, which is qualified in matters covered by this Protocol and which has informed the secretariat of its wish to be represented at a session of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol as an observer, may be so admitted unless at least one third of the Parties present object. The admission and participation of observers shall be subject to the rules of procedure, as referred to in paragraph 5 above.

Article 14

1. The secretariat established by Article 8 of the Convention shall serve as the secretariat of this Protocol.

2. Article 8, paragraph 2, of the Convention on the functions of the secretariat, and Article 8, paragraph 3, of the Convention on arrangements made for the functioning of the secretariat, shall apply *mutatis mutandis* to this Protocol. The secretariat shall, in addition, exercise the functions assigned to it under this Protocol.

Article 15

1. The Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice and the Subsidiary Body for Implementation established by Articles 9 and 10 of the Convention shall serve as, respectively, the Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice and the Subsidiary Body for Implementation of this Protocol. The provisions relating to the functioning of these two bodies under the Convention shall apply *mutatis mutandis* to this Protocol. Sessions of the meetings of the Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice and the Subsidiary Body for Implementation of this Protocol shall be held in conjunction with the meetings of, respectively, the Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice and the Subsidiary Body for Implementation of the Convention.

2. Parties to the Convention that are not Parties to this Protocol may participate as observers in the proceedings of any session of the subsidiary bodies. When the subsidiary bodies serve as the subsidiary bodies of this Protocol, decisions under this Protocol shall be taken only by those that are Parties to this Protocol.

3. When the subsidiary bodies established by Articles 9 and 10 of the Convention exercise their functions with regard to matters concerning this Protocol, any member of the Bureaux of those subsidiary bodies representing a Party to the Convention but, at that time, not a party to this Protocol, shall be replaced by an additional member to be elected by and from amongst the Parties to this Protocol.

Article 16

The Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall, as soon as practicable, consider the application to this Protocol of, and modify as appropriate, the multilateral consultative process referred to in Article 13 of the Convention, in the light of any relevant decisions that may be taken by the Conference of the Parties. Any multilateral consultative process that may be applied to this Protocol shall operate without prejudice to the procedures and mechanisms established in accordance with Article 18.

Article 17

The Conference of the Parties shall define the relevant principles, modalities, rules and guidelines, in particular for verification, reporting and accountability for emissions trading. The Parties included in Annex B may participate in emissions trading for the purposes of fulfilling their commitments under Article 3. Any such trading shall be supplemental to domestic actions for the purpose of meeting quantified emission limitation and reduction commitments under that Article.

Article 18

The Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall, at its first session, approve appropriate and effective procedures and mechanisms to determine and to address cases of non-compliance with the provisions of this Protocol, including through the development of an indicative list of consequences, taking into account the cause, type, degree and frequency of non-compliance. Any procedures and mechanisms under this Article entailing binding consequences shall be adopted by means of an amendment to this Protocol.

Article 19

The provisions of Article 14 of the Convention on settlement of disputes shall apply *mutatis mutandis* to this Protocol.

Article 20

1. Any Party may propose amendments to this Protocol.
2. Amendments to this Protocol shall be adopted at an ordinary session of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol. The text of any proposed amendment to this Protocol shall be communicated to the Parties by the secretariat at least

six months before the meeting at which it is proposed for adoption. The secretariat shall also communicate the text of any proposed amendments to the Parties and signatories to the Convention and, for information, to the Depositary.

3. The Parties shall make every effort to reach agreement on any proposed amendment to this Protocol by consensus. If all efforts at consensus have been exhausted, and no agreement reached, the amendment shall as a last resort be adopted by a three-fourths majority vote of the Parties present and voting at the meeting. The adopted amendment shall be communicated by the secretariat to the Depositary, who shall circulate it to all Parties for their acceptance.

4. Instruments of acceptance in respect of an amendment shall be deposited with the Depositary. An amendment adopted in accordance with paragraph 3 above shall enter into force for those Parties having accepted it on the ninetieth day after the date of receipt by the Depositary of an instrument of acceptance by at least three fourths of the Parties to this Protocol.

5. The amendment shall enter into force for any other Party on the ninetieth day after the date on which that Party deposits with the Depositary its instrument of acceptance of the said amendment.

Article 21

1. Annexes to this Protocol shall form an integral part thereof and, unless otherwise expressly provided, a reference to this Protocol constitutes at the same time a reference to any annex thereto. Any annex adopted after the entry into force of this Protocol shall be restricted to lists, forms and any other material of a descriptive nature that is of a scientific, technical, procedural or administrative character.

2. Any Party may make proposals for an annex to this Protocol and may propose amendments to annexes to this Protocol.

3. Annexes to this Protocol and amendments to annexes to this Protocol shall be adopted at an ordinary session of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol. The text of any proposed annex or amendment to an annex shall be communicated to the Parties by the secretariat at least six months before the meeting at which it is proposed for adoption. The secretariat shall also communicate the text of any proposed annex or amendment to an annex to the Parties and signatories to the Convention and, for information, to the Depositary.

4. The Parties shall make every effort to reach agreement on any proposed annex or amendment to an annex by consensus. If all efforts at consensus have been exhausted, and no agreement reached, the annex or amendment to an annex shall as a last resort be adopted by a three-fourths majority vote of the Parties present and voting at the meeting. The adopted annex or amendment to an annex shall be communicated by the secretariat to the Depositary, who shall circulate it to all Parties for their acceptance.

5. An annex, or amendment to an annex other than Annex A or B, that has been adopted in accordance with paragraphs 3 and 4 above shall enter into force for all Parties to this Protocol six months after the date of the communication by the Depositary to such Parties of the adoption of the annex or adoption of the amendment to the annex, except for those Parties that have

notified the Depositary, in writing, within that period of their non-acceptance of the annex or amendment to the annex. The annex or amendment to an annex shall enter into force for Parties which withdraw their notification of non-acceptance on the ninetieth day after the date on which withdrawal of such notification has been received by the Depositary.

6. If the adoption of an annex or an amendment to an annex involves an amendment to this Protocol, that annex or amendment to an annex shall not enter into force until such time as the amendment to this Protocol enters into force.

7. Amendments to Annexes A and B to this Protocol shall be adopted and enter into force in accordance with the procedure set out in Article 20, provided that any amendment to Annex B shall be adopted only with the written consent of the Party concerned.

Article 22

1. Each Party shall have one vote, except as provided for in paragraph 2 below.
2. Regional economic integration organizations, in matters within their competence, shall exercise their right to vote with a number of votes equal to the number of their member States that are Parties to this Protocol. Such an organization shall not exercise its right to vote if any of its member States exercises its right, and vice versa.

Article 23

The Secretary-General of the United Nations shall be the Depositary of this Protocol.

Article 24

1. This Protocol shall be open for signature and subject to ratification, acceptance or approval by States and regional economic integration organizations which are Parties to the Convention. It shall be open for signature at United Nations Headquarters in New York from 16 March 1998 to 15 March 1999. This Protocol shall be open for accession from the day after the date on which it is closed for signature. Instruments of ratification, acceptance, approval or accession shall be deposited with the Depositary.
2. Any regional economic integration organization which becomes a Party to this Protocol without any of its member States being a Party shall be bound by all the obligations under this Protocol. In the case of such organizations, one or more of whose member States is a Party to this Protocol, the organization and its member States shall decide on their respective responsibilities for the performance of their obligations under this Protocol. In such cases, the organization and the member States shall not be entitled to exercise rights under this Protocol concurrently.
3. In their instruments of ratification, acceptance, approval or accession, regional economic integration organizations shall declare the extent of their competence with respect to the matters governed by this Protocol. These organizations shall also inform the Depositary, who shall in turn inform the Parties, of any substantial modification in the extent of their competence.

Article 25

1. This Protocol shall enter into force on the ninetieth day after the date on which not less than 55 Parties to the Convention, incorporating Parties included in Annex I which accounted in total for at least 55 per cent of the total carbon dioxide emissions for 1990 of the Parties included in Annex I, have deposited their instruments of ratification, acceptance, approval or accession.
2. For the purposes of this Article, “the total carbon dioxide emissions for 1990 of the Parties included in Annex I” means the amount communicated on or before the date of adoption of this Protocol by the Parties included in Annex I in their first national communications submitted in accordance with Article 12 of the Convention.
3. For each State or regional economic integration organization that ratifies, accepts or approves this Protocol or accedes thereto after the conditions set out in paragraph 1 above for entry into force have been fulfilled, this Protocol shall enter into force on the ninetieth day following the date of deposit of its instrument of ratification, acceptance, approval or accession.
4. For the purposes of this Article, any instrument deposited by a regional economic integration organization shall not be counted as additional to those deposited by States members of the organization.

Article 26

No reservations may be made to this Protocol.

Article 27

1. At any time after three years from the date on which this Protocol has entered into force for a Party, that Party may withdraw from this Protocol by giving written notification to the Depositary.
2. Any such withdrawal shall take effect upon expiry of one year from the date of receipt by the Depositary of the notification of withdrawal, or on such later date as may be specified in the notification of withdrawal.
3. Any Party that withdraws from the Convention shall be considered as also having withdrawn from this Protocol.

Article 28

The original of this Protocol, of which the Arabic, Chinese, English, French, Russian and Spanish texts are equally authentic, shall be deposited with the Secretary-General of the United Nations.

DONE at Kyoto this eleventh day of December one thousand nine hundred and ninety-seven.

IN WITNESS WHEREOF the undersigned, being duly authorized to that effect, have affixed their signatures to this Protocol on the dates indicated.

Annex A

Greenhouse gases

Carbon dioxide (CO₂)
Methane (CH₄)
Nitrous oxide (N₂O)
Hydrofluorocarbons (HFCs)
Perfluorocarbons (PFCs)
Sulphur hexafluoride (SF₆)

Sectors/source categories

Energy

Fuel combustion
 Energy industries
 Manufacturing industries and construction
 Transport
 Other sectors
 Other
Fugitive emissions from fuels
 Solid fuels
 Oil and natural gas
 Other

Industrial processes

Mineral products
Chemical industry
Metal production
Other production
Production of halocarbons and sulphur hexafluoride
Consumption of halocarbons and sulphur hexafluoride
Other

Solvent and other product use

Agriculture

Enteric fermentation
Manure management
Rice cultivation
Agricultural soils
Prescribed burning of savannas
Field burning of agricultural residues
Other

Waste

Solid waste disposal on land
Wastewater handling
Waste incineration
Other

Annex B

Party	Quantified emission limitation or reduction commitment (percentage of base year or period)
Australia	108
Austria	92
Belgium	92
Bulgaria*	92
Canada	94
Croatia*	95
Czech Republic*	92
Denmark	92
Estonia*	92
European Community	92
Finland	92
France	92
Germany	92
Greece	92
Hungary*	94
Iceland	110
Ireland	92
Italy	92
Japan	94
Latvia*	92
Liechtenstein	92
Lithuania*	92
Luxembourg	92
Monaco	92
Netherlands	92
New Zealand	100
Norway	101
Poland*	94
Portugal	92
Romania*	92
Russian Federation*	100
Slovakia*	92
Slovenia*	92
Spain	92
Sweden	92
Switzerland	92
Ukraine*	100
United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland	92
United States of America	93

* Countries that are undergoing the process of transition to a market economy.

Allegato B

Elenco delle principali Direttive emanate dall'Unione Europea in termini energetico-ambientali, a partire dal 2001

- **Direttiva 2001/77/CE:** promuove “un maggior contributo delle fonti energetiche rinnovabili alla produzione di elettricità nel relativo mercato interno” e pone “le basi per un futuro quadro comunitario in materia”.
- **Direttiva 2002/91/CE:** promuove “il miglioramento del rendimento energetico degli edifici nella Comunità, tenendo conto delle condizioni locali e climatiche esterne, nonché delle prescrizioni per quanto riguarda il clima degli ambienti interni e l'efficacia sotto il profilo dei costi”.
- **Direttiva 2004/8/CE:** l'intento è di “accrescere l'efficienza energetica e migliorare la sicurezza dell'approvvigionamento creando un quadro per la promozione e lo sviluppo della cogenerazione ad alto rendimento di calore ed energia, basata sulla domanda di calore utile e sul risparmio di energia primaria, nel mercato interno, tenendo conto delle specifiche situazioni nazionali, in particolare riguardo alle condizioni climatiche e alle condizioni economiche”.
- **Direttiva 2005/32/C:** promuove la progettazione ecocompatibile dei prodotti che consumano energia.
- **Direttiva 2006/32/CE:** fornisce un nuovo quadro per l'efficienza degli usi finali dell'energia e iservizi energetici, indicando un obiettivo medio di risparmio energetico da conseguire a livellonazionale per ciascun Paese entro il 2015 (9%); viene redatto un elenco di misure che consentono il miglioramento dell'efficienza energetica negli usi finali. Tale direttiva abroga la 93/76/CEE del Consiglio.
- **Decisione 2007/74/CE:** stabilisce valori di rendimento di riferimento armonizzati per la produzione separata di elettricità e di calore (in applicazione della 2004/8/CE).
- **Direttiva 2008/1/CE:** promuove “la prevenzione e la riduzione integrate dell'inquinamento”. “Essa prevede misure intese a evitare oppure, qualora non sia

possibile, a ridurre le emissioni delle suddette attività nell'aria, nell'acqua e nel suolo, comprese le misure relative ai rifiuti, per conseguire un livello elevato di protezione dell'ambiente nel suo complesso”.

- **Direttiva 2009/28/CE:** promuove l'uso dell'energia da fonti rinnovabili, reca modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE.
- **Direttiva 2009/29/CE:** modifica la direttiva 2003/87/CE al fine di perfezionare ed estendere il sistema comunitario per lo scambio di quote di emissione di gas a effetto serra.
- **Direttiva 2009/31/CE:** relativa allo stoccaggio geologico di biossido di carbonio e recante modifica della direttiva 85/337/CEE del Consiglio, delle direttive del Parlamento europeo e del Consiglio 2000/60/CE, 2001/80/CE, 2004/35/CE, 2006/12/CE, 2008/1/CE e del regolamento (CE) n. 1013/2006 del Parlamento europeo e del Consiglio.
- **Decisione n. 406/2009/CE:** stabilire “il contributo minimo degli Stati membri all’adempimento dell’impegno assunto dalla Comunità di ridurre, per il periodo dal 2013 al 2020, le emissioni di gas a effetto serra disciplinate dalla presente decisione, e le norme per la realizzazione di tali contributi e per la valutazione del rispetto di questo impegno” e “stabilisce disposizioni per la valutazione e l’attuazione di un impegno più rigoroso della Comunità in materia di riduzioni, superiore al 20 %, da applicare previa approvazione da parte della Comunità di un accordo internazionale che conduca a riduzioni delle emissioni superiori a quelle previste all’articolo 3, come risulta dall’impegno di riduzione del 30 % approvato dal Consiglio europeo del marzo 2007”.
- **Direttiva 2009/72/CE:** stabilisce norme comuni per il mercato interno dell'energia elettrica e abroga la direttiva 2003/54/CE.
- **Direttiva 2009/73/CE:** stabilisce norme comuni per il mercato interno del gas naturale e che abroga la direttiva 2003/55/CE.
- **Direttiva 2010/30/UE:** istituisce “un quadro per l’armonizzazione delle misure nazionali sull’informazione degli utilizzatori finali, realizzata in particolare mediante etichettatura e informazioni uniformi sul prodotto, sul consumo di energia e, se del caso, di altre risorse essenziali durante l’uso nonché informazioni complementari per

i prodotti connessi all'energia, in modo che gli utilizzatori finali possano scegliere prodotti più efficienti; si applica ai prodotti che hanno un notevole impatto diretto o indiretto sul consumo di energia”.

- **Direttiva 2010/31/UE:** “promuove il miglioramento della prestazione energetica degli edifici all'interno dell'Unione, tenendo conto delle condizioni locali e climatiche esterne, nonché delle prescrizioni relative al clima degli ambienti interni e all'efficacia sotto il profilo dei costi”.
- **Direttiva 2012/27/UE:** “stabilisce un quadro comune di misure per la promozione dell'efficienza energetica nell'Unione al fine di garantire il conseguimento dell'obiettivo principale dell'Unione relativo all'efficienza energetica del 20 % entro il 2020 e di gettare le basi per ulteriori miglioramenti dell'efficienza energetica al di là di tale data. Essa stabilisce norme atte a rimuovere gli ostacoli sul mercato dell'energia e a superare le carenze del mercato che frenano l'efficienza nella fornitura e nell'uso dell'energia e prevede la fissazione di obiettivi nazionali indicativi in materia di efficienza energetica per il 2020. Modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE.

Allegato C

Normativa nazionale essenziale in termini di efficienza energetica

- **Legge 373/76:** introduce dei requisiti minimi di isolamento termico, è da intendersi come una logica conseguenza agli effetti della crisi petrolifera degli anni Settanta più che un tentativo credibile di riduzione dei consumi.
- **Legge 9/1/1991, n. 10:** “Norme per l’attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell’energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia”. Definisce un elenco di fonti considerate rinnovabili “il sole, il vento, l’energia idraulica, le risorse geotermiche, le maree, il moto ondoso e la trasformazione dei rifiuti organici ed inorganici o di prodotti vegetali” o assimilate: “la cogenerazione, intesa come produzione combinata di energia elettrica o meccanica e di calore, il calore recuperabile nei fumi di scarico e da impianti termici, da impianti elettrici e da processi industriali, nonché le altre forme di energia recuperabile in processi, in impianti e in prodotti ivi compresi i risparmi di energia conseguibili nella climatizzazione e nell’illuminazione degli edifici con interventi sull’involucro edilizio e sugli impianti”. Viene richiamata l’emanazione di ulteriori norme che regolino “progettazione, installazione, esercizio e manutenzione degli impianti termici, e i seguenti aspetti: determinazione delle zone climatiche; durata giornaliera di attivazione nonché periodi di accensione degli impianti termici; temperatura massima dell’aria negli ambienti degli edifici durante il funzionamento degli impianti termici; rete di distribuzione e adeguamento delle infrastrutture di trasporto, di ricezione e di stoccaggio delle fonti di energia al fine di favorirne l’utilizzazione da parte degli operatori pubblici e privati”; viene introdotto il responsabile per la conservazione e l’uso razionale dell’energia (energy manager).
- **Legge 9/1/1991 n. 9:** istituisce il marchio del “Risparmio Energetico” oltre a regolamentare il Nuovo Piano Energetico Nazionale.
- **D.P.R. 26/8/1993 n. 412:** costituisce un’attuazione della legge 10/1991, introduce la divisione del territorio nazionale in “sei zone climatiche in funzione dei gradi-giorno

indipendentemente dall'ubicazione geografica". Stabilisce inoltre dei valori di riferimento della temperatura interna degli edifici, che è di $18\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ di tolleranza per edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali ed assimilabili e $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ di tolleranza per tutti gli altri edifici. Viene fissato il periodo di riscaldamento idoneo per ciascuna zona climatica e la modalità di funzionamento degli impianti termici durante il giorno. Vengono richiamate molte norme UNI per la progettazione, realizzazione e manutenzione degli impianti termici e viene proposto un percorso per la valutazione del bilancio energetico invernale di un edificio, dato dalla somma algebrica di apporti di calore e dispersioni. La legge impone anche la verifica della "tenuta" dell'isolamento di pareti e tetto al fine di non disperdere calore inutilmente: l'obiettivo è proprio quello di mantenere il più possibile il calore senza disperderlo per risparmiare energia.

- **Provvedimento CIP 6/92:** su mandato della legge 9/91, definisce i prezzi di cessione dell'energia elettrica per gli impianti alimentati da fonti rinnovabili e assimilate entrati in esercizio dopo il 30 gennaio 1991, prevedendo una forte incentivazione, dando sviluppo a tecnologie a fonte rinnovabile ma soprattutto e purtroppo agli impianti di termovalorizzazione, considerati alla stregua degli impianti rinnovabili.
- **D.M. 24 aprile 2001:** introduce i primi obiettivi nazionali di risparmio energetico, ma purtroppo non ha seguito attuativo.
- **D.M. 20 luglio 2004:** contiene in gran parte considerazioni dei DM 24/4/2001 e ne trovano applicazione.
- **D. Lgs. 11 maggio 2005 n.133:** “si applica agli impianti di incenerimento e di coincenerimento dei rifiuti e stabilisce le misure e le procedure finalizzate a prevenire e ridurre per quanto possibile gli effetti negativi dell'incenerimento e del coincenerimento dei rifiuti sull'ambiente, in particolare l'inquinamento atmosferico, del suolo, delle acque superficiali e sotterranee, nonché i rischi per la salute umana che ne derivino”.
- **D.M. 27 luglio 2005:** riguarda il regolamento d'attuazione della legge 9 gennaio 1991, n. 10 (articolo 4, commi 1 e 2); “definisce i criteri generali tecnico-costruttivi e le tipologie per l'edilizia sovvenzionata e convenzionata nonché per l'edilizia pubblica e privata, anche riguardo alla ristrutturazione degli edifici esistenti, al fine di favorire ed

incentivare l'uso razionale dell'energia, il contenimento dei consumi di energia nella produzione o nell'utilizzo di manufatti”.

- **D.M. 28 luglio 2005:** definisce dei criteri per l'incentivazione della produzione di energia elettrica mediante conversione fotovoltaica della fonte solare.
- **D. Lgs. 19 agosto 2005 n. 192:** recepisce la direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.
- **D.M. 24 ottobre 2005:** direttive per la regolamentazione dell'emissione dei certificati verdi alle produzioni di energia di cui all'articolo 1, comma 71, della legge 23 agosto 2004, n. 239. **D.M. 24 ottobre 2005:** aggiornamento delle direttive per l'incentivazione dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili ai sensi dell'articolo 11, comma 5, del decreto legislativo 16 marzo 1999, n. 79.
- **D.M. 6 febbraio 2006:** insieme al D.M. 28 luglio 2005 introduce il Primo Conto Energia, definisce criteri per l'incentivazione della produzione di energia elettrica mediante conversione fotovoltaica della fonte solare (verranno omessi in questo elenco i decreti che introducono i seguenti “Conto Energia”; è sufficiente ricordare che l'ultimo è il Quinto Conto Energia, introdotto nel 2012).
- **D. Lgs. 29 dicembre 2006 n. 311:** Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia. Testo coordinato dei D. Lgs. 192/05 e 311/06.
- **D. Lgs. 8 febbraio 2007 n. 20:** attuazione della direttiva 2004/8/CE sulla promozione della cogenerazione basata su una domanda di calore utile nel mercato interno dell'energia, nonché modifica alla direttiva 92/42/CEE.
- **D. Lgs. 30 maggio 2008 n. 115:** attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e abrogazione della direttiva 93/76/CEE; sancisce il conferimento all'ENEA delle funzioni di Agenzia Nazionale per l'Efficienza Energetica.
- **D. Lgs. 29 marzo 2010 n. 56:** modifiche ed integrazioni al decreto 30 maggio 2008, n. 115, recante attuazione della direttiva 2006/32/CE, concernente l'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e recante abrogazioni della direttiva 93/76/CEE.

- **D.M. 28 Dicembre 2012:** introduce misure di potenziamento del meccanismo dei certificati bianchi; vengono stabiliti degli obiettivi minimi di risparmio energetico mediante tale sistema per il quadriennio 2013-2016; vi è l'introduzione di 18 nuove schede tecniche di intervento; gestione, valutazione e certificazione dei risparmi conseguiti con progetti realizzati mediante i TEE diventano attività di competenza del GSE, prima svolte dall'AEEG.
- **D. Lgs. 16 aprile 2013 n. 74:** completa il recepimento della direttiva 2002/91/CE.
- **D. Lgs. 4 luglio 2014 n. 102:** recepisce la direttiva 2012/27/CE e rappresenta la linea guida nazionale per l'efficienza energetica.