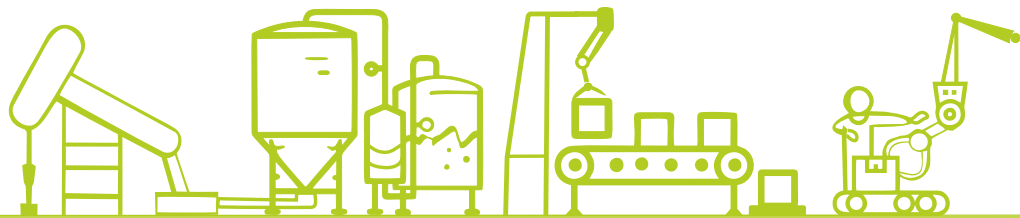


INCENERIMENTO



Efficienza
Energetica
nei Settori
Economici



QUADERNI DELL'EFFICIENZA ENERGETICA

AGENZIA NAZIONALE
EFFICIENZA ENERGETICA





INCENERIMENTO

ENEA DUEE-SPS-ESE
QUADERNI DELL'EFFICIENZA ENERGETICA

INCENERIMENTO

Prima edizione Dicembre 2021

ISBN Edizione digitale: 978-88-8286-427-9

Autori

Alessandra De Santis, Chiara Martini, Fabrizio Martini,
Marcello Salvio

Hanno collaborato

Per ENEA: G. Bruni, C. Herce, L. Leto, F.A. Tocchetti, C. Toro
Per l'Università degli Studi di Firenze: Prof. F. De Carlo, A. Cantini, L. Leoni

Si ringrazia per il prezioso supporto fornito

UTILITALIA

E. Capaccioli, R. Viselli



Questa pubblicazione è stata realizzata nell'ambito della Ricerca di Sistema PTR 2019-2021,
Progetto I.6 "Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali",
finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico (ora Ministero della Transizione Ecologica)

Resp. Scientifico, Miriam Benedetti

Work Package 4: "Definizione di best practices e di indicatori di performance per interventi di efficienza
energetica"

Resp. Scientifico, Fabrizio Martini

Editing grafico Giorgio Scavino

Tipografia La Commerciale

INCENERIMENTO

Sommario

Premessa	7
Presentazione	9
Prefazione	11
1. Quadro di riferimento	16
2. Obiettivo della pubblicazione	20
3. Il processo di incenerimento dei rifiuti in Italia	24
4. Metodologia di analisi dei dati	30
5. La diagnosi energetica	36
5.1 Redazione del rapporto di diagnosi energetica	36
5.2 La diagnosi energetica negli impianti di incenerimento dei rifiuti	39
5.2.1 Il processo di incenerimento dei rifiuti	39
5.2.1.1 Sezione combustione	40
5.2.1.2 Sezione depurazione fumi	41
5.2.1.3 Sezione di recupero energetico	45
5.2.2 Rendicontazione dei consumi energetici	46
5.2.2.1 Attività Principali	48
5.2.2.2 Servizi Ausiliari	54
5.2.2.3 Servizi Generali	55
5.3 Gli Indici di Prestazione Energetica (IPE)	56
5.3.1 Indici di Prestazione Energetica generali	57
5.3.2 Indicatori prestazionali generali riferiti alle produzioni	59
5.3.3 Indici di Prestazione Energetica specifici (IPEs)	62
5.4 Considerazioni sull'acquisizione, valutazione ed analisi dei consumi energetici	64
5.4.1 Valutazione ed analisi dei consumi energetici	64

5.4.2	Programma di misure da effettuare ai fini della esecuzione della diagnosi energetica	72
5.4.3	Il rapporto di diagnosi energetica	75
6.	Analisi dei consumi energetici	80
6.1	Il campione dati	80
6.2	Distribuzione dei consumi energetici nel processo di incenerimento dei rifiuti	80
6.3	Indici di Prestazione Energetica generali (IPEg)	88
6.3.1	Indici di Prestazione Energetica generali riferiti ai consumi	89
6.3.1.1	IPEg consumo Elettrico	89
6.3.1.2	IPEg consumo Gas naturale	90
6.3.2	Indici di Prestazione Energetica generali riferiti alle produzioni	92
6.3.2.1	IPEg Produzione (lorda) di Energia Elettrica	92
6.3.2.2	IPEg Energia Elettrica esportata (Produzione netta)	94
6.3.2.3	IPEg Energia Termica prodotta	96
6.4	IPE generale adimensionale	98
6.5	Indici di Prestazione Energetica specifici (IPEs) - Attività Principali	102
6.5.1	IPEs Elettrici	102
6.5.1.1	Movimentazione o Alimentazione dei rifiuti	102
6.5.1.2	Forno/Generatore di vapore	105
6.5.1.3	Ciclo termico	107
6.5.1.4	Depurazione fumi	112
6.5.2	IPEs Termici	114
6.5.2.1	Depurazione fumi	114
6.6	Indici di prestazione energetica specifici (IPEs) - Servizi Ausiliari	115
6.6.1	Produzione di aria compressa	115
7.	Interventi di efficienza energetica: soluzioni tecnologiche per il settore dell'incenerimento dei rifiuti	120
7.1	Trattamento meccanico dei rifiuti	121
7.1.1	Triturazione	121
7.2	Incenerimento	123
7.3	Controllo delle emissioni in aria	127
7.4	Attività nella ricezione dei rifiuti	129

7.5	Sistemi di supporto	135
7.5.1	Recupero dell'energia	135
7.5.2	Incremento dell'efficienza dell'impianto	137
8.	Analisi degli interventi individuati ed effettuati nelle diagnosi energetiche	144
8.1	Metodologia di analisi	144
8.2	Risultati complessivi	148
8.3	Risultati per il settore incenerimento rifiuti	148
ALLEGATO -		
	SCHEDE SETTORIALI DEGLI INTERVENTI EFFETTUATI E INDIVIDUATI	157
APPENDICE A -		
	DETERMINAZIONE DEL PCI DEI RIFIUTI E DEI COMBUSTIBILI AUSILIARI	167
APPENDICE B -		
	VALUTAZIONE DELLA RAPPRESENTATIVITÀ STATISTICA DI UNA ANALISI DI REGRESSIONE	171
	Bibliografia	175

Premessa

Il presente lavoro è afferente all'attività di ricerca finanziata con il **“Piano della Ricerca di sistema elettrico per il triennio 2019-2021”** e regolamentata attraverso l'Accordo di Programma² tra MiSE (oggi in capo al Ministero della Transizione Ecologica – MiTE) e RSE, ENEA e CNR.

L'attività individuata dall'accordo di programma, come previsto dall'articolo 15 della legge 241 del 1990, attraverso la cooperazione tra il Ministero dello sviluppo economico e gli Enti firmatari (ENEA, RSE e CNR) ha lo scopo di sviluppare nuove conoscenze e tecnologie in grado di contribuire alla transizione energetica del Paese e, allo stesso tempo, per gli Enti firmatari rappresenta un campo di indagine primario per lo svolgimento delle attività istituzionali di ricerca e sviluppo nel settore dell'energia.

L'attività è finanziata dal **“Fondo per il finanziamento delle attività di ricerca”** (art. 11 del decreto 26 gennaio 2000). Tale fondo è alimentato dal gettito, versato mensilmente a CSEA dai distributori elettrici, della componente tariffaria A5RIM della bolletta dei clienti finali, la cui entità è stabilita trimestralmente dall'Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente (ARERA).

L'attività oggetto di questa pubblicazione, parte integrante del Work Package 4 del Progetto di ricerca I.6. (da ora in poi WP4) **“Definizione di best practices e di indicatori di performance per interventi di efficienza energetica”**, ha lo scopo di valorizzare la banca dati costituita dalle diagnosi energetiche pervenute ad ENEA ai sensi dell'articolo 8 del D.Lgs. 102/2014. Il progetto prevede la determinazione e la valutazione di indici di prestazione energetica di riferimento per il settore produttivo manifatturiero. Inoltre, per i principali settori manifatturieri, sono previste caratterizzazioni e analisi specifiche dei processi produttivi caratteristici del settore.

¹ <http://www.ricercadisistema.it>

² <https://www.mise.gov.it/index.php/it/energia/energia-elettrica/ricerca-di-sistema-elettrico-nazionale/17-energia/energia-elettrica/2041222-piano-della-ricerca-di-sistema-elettrico-per-il-triennio-2019-2021-accordo-di-programma-tra-mise-e-rse-enea-e-cnr>

Per la realizzazione del WP4 ENEA si è avvalsa della collaborazione di cinque Università:

- ✦ **Alma Mater Studiorum - Università di Bologna** (Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali);
- ✦ **Università degli Studi di Roma Tor Vergata** (Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa);
- ✦ **Università degli Studi di Salerno** (Dipartimento di Ingegneria Industriale);
- ✦ **Università degli Studi della Tuscia** (Centro Interuniversitario per l'innovazione Tecnologica e lo sviluppo del territorio);
- ✦ **Università degli Studi di Firenze** (Dipartimento di Ingegneria Industriale).

Il WP4 si colloca all'interno di un contesto più ampio individuato dal **Progetto di ricerca 1.6** "*Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali*". L'obiettivo del progetto è la realizzazione di strumenti e metodologie per la promozione e diffusione delle tecnologie ad alta efficienza energetica, per favorire il mercato di prodotti più performanti sia a livello di componenti sia a livello di sistemi energetici e contribuire alla riduzione della spesa energetica nazionale aumentando la competitività del settore produttivo rispetto ai mercati internazionali. La finalità è quella di fornire un maggiore visibilità a quelle misure di efficientamento energetico che, in alcuni casi, sono note alla comunità scientifica, ma poco esplorate da un punto di vista ingegneristico e che presentano notevoli barriere alla diffusione di tipo conoscitivo, gestionale ed economico.

Presentazione

Con la direttiva 2012/27/UE l'Unione europea ha rimarcato il ruolo dell'efficienza energetica, in quanto capace di garantire un sistema energetico meno esposto ai rischi e alla volatilità che la crescita economica globale inevitabilmente determina e di contribuire alla riduzione di emissioni di CO₂ e inquinanti locali per una crescita sostenibile. La direttiva è stata recepita in Italia nel luglio 2014 con il Decreto Legislativo 102/2014 che, tra le altre cose, ha introdotto per una parte del sistema produttivo italiano (le grandi imprese e le imprese energivore) l'obbligo di effettuare una diagnosi energetica ogni quattro anni, a partire dal dicembre 2015. In tal modo il decreto recepisce l'indirizzo e lo spirito della Direttiva 2012/27/UE sull'Efficienza Energetica, che individua nella diagnosi energetica uno strumento efficace per la promozione dell'efficienza energetica nel mondo produttivo al fine di una corretta gestione dell'energia sia dal punto di vista tecnico sia economico.

In tale contesto il decreto assegna ad ENEA il ruolo di gestore del meccanismo delle diagnosi energetiche obbligatorie e di supporto al Ministero, nella verifica e controllo del corretto adempimento agli obblighi previsti per i soggetti obbligati.

Dall'entrata in vigore dell'obbligo di diagnosi energetica previsto dal D.Lgs.102/2014, ENEA è stata il collettore, ad oggi, di circa 30.000 diagnosi energetiche tramite il proprio portale dedicato Audit 102. Una imponente raccolta di dati che ENEA ha ritenuto doveroso valorizzare con il fine di restituire agli stakeholder utili riferimenti in termini di: consumi specifici, *best practice*, opportunità di miglioramento, analisi di scenario etc..

Il piano della Ricerca di Sistema elettrico, programma di ricerca finanziato dal MiSE, si è quindi rivelato lo strumento più opportuno all'interno del quale collocare questa attività di analisi dei dati. In particolare nel triennio 2019-2021, ENEA si è posta come obiettivo quello di analizzare tutti i settori merceologici afferenti al settore industriale manifatturiero al fine di individuare degli indici di riferimento per i consumi energetici e le principali *best practices*. Inoltre, per alcuni di questi settori è stato svolto un approfondimento maggiore, andando ad individuare, laddove dove i dati lo hanno permesso, sia indici specifici di consumi con livelli di dettaglio crescente (entrando quindi nelle fasi del processo

produttivo) che i principali interventi di efficientamento energetico per ciascuna di queste fasi. Per portare avanti questa analisi di approfondimento ci si è anche avvalsi del supporto e della competenza di cinque Università Italiane quali: Università di Roma Tor Vergata, Università degli Studi della Tuscia, Università degli Studi di Salerno, Università degli Studi di Firenze e Università di Bologna. Oltre ai partner Universitari, come consuetudine ENEA, non poteva mancare il coinvolgimento di esperti del settore come ad esempio le associazioni di categoria.

Questa attività ha quindi permesso la nascita di una collana di monografie settoriali che hanno il doppio fine di guidare da un lato l'auditor energetico nella realizzazione della diagnosi energetica e dall'altro fornire alle imprese degli spunti per individuare eventuali interventi di efficientamento energetico e per "confrontarsi" con il resto del settore industriale italiano.

Ritengo doveroso, quindi, ringraziare tutti gli attori coinvolti per il prezioso supporto fornito che ha permesso di valorizzare ed arricchire l'attività di analisi di ENEA.

Voglio, infine, rivolgere un ringraziamento particolare a UTILITALIA e alle sue imprese associate ACEA Ambiente, A2A Ambiente, HERAmbiente, IREN Ambiente e SiLEA per i numerosi spunti forniti, l'attenzione e il supporto che hanno rivolto in questa attività di ricerca.

Ilaria Bertini

*Capo Dipartimento
Unità Efficienza Energetica, Enea*

Prefazione

Il settore dell'incenerimento dei rifiuti con recupero di energia ricopre un ruolo fondamentale nella prospettiva del Green Deal Europeo. Infatti, svolge il ruolo primario di contribuire al disinquinamento ed all'igiene, trattando in sicurezza i rifiuti residui, che non possono essere preventivamente evitati o riciclati, prodotti da cittadini e imprese nonché il loro eventuale contenuto inquinante. Garantendo un servizio continuo alle comunità e alle attività produttive, il settore genera energia sotto forma di elettricità e calore.

Gli impianti di termovalorizzazione europei producono abbastanza elettricità per rifornire quasi 19 milioni di persone all'anno. Inoltre, la termovalorizzazione può fornire un carico di base locale di energia che integra le fonti di energia rinnovabile intermittente come l'eolico o il solare, rendendo allo stesso tempo l'Europa meno dipendente dalle importazioni di combustibili fossili. Oltre il 60% degli impianti di termovalorizzazione in Europa sono impianti di cogenerazione che forniscono calore alle reti urbane di teleriscaldamento e teleraffrescamento, oltre all'elettricità, distribuendo calore a circa 16 milioni di persone all'anno. Notevoli benefici climatici si ottengono quando gli impianti di termovalorizzazione forniscono vapore per essere utilizzato dalle aziende industriali vicine che possono a loro volta disattivare le loro caldaie a combustibili fossili. Oggi circa il 10% dell'energia europea coperta dal teleriscaldamento proviene dal settore dell'incenerimento dei rifiuti con recupero di energia. In alcune aree urbane, l'energia da rifiuti copre oltre il 50% della domanda di calore dei residenti, un contributo significativo anche alla sicurezza energetica e alla qualità dell'aria, poiché i residenti evitano di utilizzare caldaie individuali per il riscaldamento.

Mentre la rete elettrica vedrà in futuro una maggiore penetrazione delle rinnovabili, il settore del calore sarà più difficile da decarbonizzare. Come dimostrato da molti esempi virtuosi nelle città europee, l'accoppiamento della termovalorizzazione con sistemi di teleriscaldamento e teleraffrescamento fornirà importanti contributi climatici consentendo al contempo l'integrazione dei sistemi energetici. Oltre alla possibile riduzione delle emissioni di CO₂ attraverso la sostituzione dei combustibili fossili, un secondo importante contributo del risparmio di gas serra derivante dalla termovalorizzazione proviene dalla deviazione del rifiuto dalle discariche. La decomposizione dei rifiuti nelle discariche genera metano – un gas

serra 28 volte più potente della CO₂ in una prospettiva di 100 anni e 86 volte di più su una prospettiva di 20 anni.

Anche con i recenti progressi sulle percentuali di riciclo, l'Europa continua a portare in discarica 60 milioni di tonnellate di rifiuti urbani all'anno e, considerando anche quelli commerciali e industriali, in totale i numeri triplicano a circa 175 milioni di tonnellate di rifiuti all'anno. I benefici della deviazione dalle discariche offerti dalla termovalorizzazione diventano molto più evidenti quando si adotta un riferimento temporale di 20 anni che riflette meglio gli impatti climatici a breve termine delle emissioni di metano.

Ulteriori risparmi di CO₂ equivalente possono essere ottenuti negli impianti di termovalorizzazione anche attraverso il recupero di preziose materie prime come metalli ferrosi e non-ferrosi dalle ceneri pesanti di incenerimento, i residui del processo di combustione. Metalli e leghe come acciaio, alluminio, rame e zinco possono essere riciclati dalle ceneri pesanti come materia prima secondaria ad un costo ambientale inferiore.

La combustione di una tonnellata di rifiuti residui, non riciclabili, in un impianto di termovalorizzazione convenzionale genera circa una tonnellata di emissioni totali di CO₂ al camino.

Tuttavia, la CO₂ generata deve essere differenziata in due categorie in base alla sua origine:

- CO₂ fossile, proveniente principalmente dalla combustione di rifiuti fossili come le plastiche residue;
- CO₂ biogenica, proveniente dalla frazione biodegradabile di diversi flussi di rifiuti, come carta e cartone residui, legno, cuoio, alimenti e residui verdi che sono contaminati e quindi non riciclabili.

Sebbene i rifiuti organici siano raccolti separatamente con buone percentuali in vari paesi dell'Europa e nonostante i grandi sforzi verso tassi di riciclo più elevati, quantità considerevoli di materia biodegradabile rimangono nei flussi di rifiuti residui. Mentre i rifiuti organici raccolti separatamente vengono per lo più trattati in strutture dedicate come impianti di compostaggio o digestione anaerobica, i residui che derivano da questi processi possono essere efficacemente trattati negli impianti di termovalorizzazione.

Secondo le linee guida dell'IPCC, la CO₂ biogenica è considerata neutra e, come adottato nella modellizzazione del Life Cycle Assessment, il suo carico climatico è pari a zero.

La quota di CO₂ fossile e biogenica dipende dalla composizione dei rifiuti residui. In media, la quota di emissioni biogeniche di CO₂ monitorate a livello UE dagli impianti di termovalorizzazione è di circa il 60%, mentre il restante 40% è fossile.

Se da un lato, quindi, è importante tendere ad una riduzione sempre più spinta dei consumi energetici, dall'altro è parimenti importante considerare che la termovalorizzazione non è un settore energivoro - circa l'83%-85% dell'energia prodotta viene ceduta, mentre solo una percentuale, pari mediamente a circa il 15%-17% viene utilizzata per il funzionamento dell'impianto - quanto piuttosto una fonte importante di energia in parte rinnovabile con altresì un importante ruolo nella riduzione dei gas serra.

Su quel 15-17% di energia autoconsumata rispetto al totale dell'energia prodotta si concentra il presente documento.

Filippo Brandolini

Vice Presidente Vicario
UTILITALIA

A large, stylized, light gray graphic of a bird or wing, possibly a phoenix, is positioned at the top of the page. The graphic is composed of flowing, organic shapes that suggest feathers and movement. It is centered horizontally and occupies the upper half of the page.

QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO

1

I. Quadro normativo di riferimento

In attuazione delle Direttive sull'efficienza energetica emanate dal Parlamento Europeo l'Italia ha recepito prima con il **Decreto Legislativo n° 102 del 4 luglio 2014** (G.U. Serie Generale n.165 del 18 luglio 2014) la Direttiva 2012/27/UE e successivamente con il **Decreto Legislativo n° 73 del 14 luglio 2020** (G.U. Serie Generale n.175 del 14-07-2020) la Direttiva 2018/2002/UE che ha modificato ed adeguato alcune parti della direttiva 2012/27/UE.

L'art. 8 del D.Lgs. 102/2014 con le modifiche introdotte dal D.Lgs. 73/2020, individua i soggetti obbligati che a partire dal 5 dicembre 2015 debbono svolgere, con cadenza quadriennale, una diagnosi energetica presso i propri siti produttivi. I soggetti obbligati sono:

- ✓ le grandi imprese³ (comma 1);
- ✓ le imprese a forte consumo di energia⁴ (comma 3).

La diagnosi energetica è lo strumento cardine per analizzare il quadro della gestione energetica di un'attività (industriale, servizi, primario e terziario) perchè attraverso di essa qualunque impresa può valutare sistematicamente come venga utilizzata l'energia all'interno del proprio sito produttivo dal punto di ingresso al suo utilizzo finale.

Il D. Lgs. 102/2014 affida ad ENEA l'attività di gestione del meccanismo attraverso:

- La realizzazione di una banca dati in grado di permettere il controllo dell'applicazione dell'obbligo (Art. 8 comma 5);
- Il controllo sulla conformità delle diagnosi all'allegato 2 dei sopracitati decreti, realizzabile anche tramite attività in situ (Art.8 comma 6);
- La realizzazione e la pubblicazione di un rapporto di sintesi sulle attività diagnostiche complessivamente svolte e sui risultati raggiunti (Art. 8 comma 8).

³ *Ogni entità, a prescindere dalla forma giuridica, che eserciti un'attività economica con più di 250 occupati e con un fatturato annuo che superi i 50 milioni di euro, oppure il cui totale di bilancio annuo superi i 43 milioni di euro, i cui effettivi e soglie finanziarie sono calcolabili secondo i criteri e i principi stabiliti dalla raccomandazione 2003/362/CE della Commissione europea del 6 maggio 2003.*

⁴ *Le imprese che si avvalgono delle agevolazioni alle imprese energivore previste dal Decreto Ministeriale del 21 dicembre 2017 attuazione dell'articolo 19 della legge 20 novembre 2017, n. 167 recante Disposizioni per l'adempimento degli obblighi derivanti dall'appartenenza dell'Italia all'Unione europea.*





OBIETTIVO DELLA
PUBBLICAZIONE

2

2. Obiettivo della pubblicazione

L'obiettivo di questa pubblicazione è quello di fornire alle imprese operanti nel settore dell'incenerimento dei rifiuti ed ai professionisti a qualunque titolo coinvolti uno strumento di ausilio nella redazione di una diagnosi energetica di "qualità".

Scopo principale della diagnosi energetica è l'ottimizzazione del processo produttivo attraverso lo studio approfondito del flusso di energia nel sistema considerato, dal punto in cui essa è acquisita sino ai punti di utilizzo finale, deve identificare come e dove l'energia viene prodotta, gestita e/o consumata, contenere anche la valutazione tecnica delle possibilità di ottimizzazione del processo produttivo, lo studio e la valutazione tecnico-economica dell'insieme degli interventi possibili, finalizzati alla riduzione dei consumi, ed indicare eventuali scelte per un uso maggiormente efficiente dell'energia [Allegato 2-D.lgs 102/2014].

Per poter individuare delle opportunità di efficientamento energetico sono necessari tre presupposti fondamentali:

- una corretta analisi dei flussi energetici;
- una conoscenza degli indici/parametri di riferimento per confrontare i propri risultati (in termini di indicatori prestazionali) con lo stato dell'arte presente per lo specifico settore nella letteratura scientifica;
- una conoscenza delle possibili opportunità di miglioramento caratteristiche del settore che si sta analizzando.

La presente pubblicazione, attraverso l'analisi delle diagnosi energetiche pervenute ad ENEA nel periodo 2019-2020 a valle degli obblighi previsti dall'Art.8 del D.Lgs.102/2014, e grazie al supporto di UTILITALIA, di esperti del settore e dei gruppi di ricerca universitari coinvolti nel progetto, vuole proporsi come un utile strumento per redigere la diagnosi energetica in modo più corretto e consapevole, fornendo indicazioni specifiche relative ai tre presupposti precedentemente citati.

La parte iniziale del documento comprende una descrizione generale del settore dell'incenerimento dei rifiuti, oggetto della presente pubblicazione. I capitoli successivi, invece, trattano:

- la descrizione della metodologia di approccio alle informazioni ricavabili

sia dalle diagnosi energetiche che da pubblicazioni tecniche e da esperti del settore;

- l'illustrazione delle modalità di conduzione di una diagnosi energetica di qualità conforme a quanto previsto dall'allegato 2 del D. Lgs. 102/2014 (e successivi aggiornamenti) e che tenga conto delle prescrizioni normative legate alla presenza di dati misurati e delle linee guida generali per la redazione della diagnosi energetica realizzate da ENEA;
- la descrizione del processo di incenerimento dei rifiuti, con la rappresentazione del *flow chart* di processo, dettagliandone le fasi principali, con i relativi parametri caratteristici da prendere in considerazione nella diagnosi. Lì dove i dati delle diagnosi energetiche pervenute nel periodo 2019-2020 lo abbiano permesso, verranno forniti indici di prestazione energetica sia di primo che di secondo livello (scendendo cioè nelle fasi del processo);
- un dettagliato elenco ed un'analisi delle principali opportunità di efficientamento energetico del processo. In particolare saranno prima riportati tutti gli specifici interventi che possono insistere sulle diverse fasi del processo ricavabili in letteratura e a seguire viene fornita un'analisi tecnico-economica degli interventi proposti nelle diagnosi energetiche.

A stylized map of Italy is centered on the page, filled with a complex, overlapping pattern of light gray leaves and branches. The map's outline is clearly visible against the white background. The text is overlaid on the upper portion of the map.

INCENERIMENTO DEI RIFIUTI IN ITALIA

3

3. Incenerimento dei rifiuti in Italia

I rifiuti urbani prodotti in Italia nel 2020 sono stati circa 28,9 milioni di tonnellate, dato in calo rispetto al 2019 (-3,6%, corrispondente a circa -1,1 Mln di tonnellate), come conseguenza dell'emergenza sanitaria da Covid-19 che ha segnato il contesto socio-economico nazionale a causa delle misure di restrizione adottate e delle chiusure di diverse tipologie di esercizi commerciali. La produzione di rifiuti nel 2020 ha registrato un decremento nel Nord Italia, che ha prodotto circa 13,9 milioni di tonnellate di rifiuti, (-3,5% rispetto al 2019), al Centro (-5,4%) con circa 6,1 milioni di tonnellate e al Sud (-2,2%) con 8,9 milioni di tonnellate.

Nel 2020, sul territorio nazionale, risultano operativi 37 impianti di incenerimento (rispetto al 2019 è stato chiuso il sito di Ravenna, mentre ha ripreso ad essere operativo, solo dal dicembre 2020, quello di Fusina-Venezia) che trattano rifiuti urbani e rifiuti derivanti dal trattamento degli stessi, quali rifiuti combustibili (CSS), frazione secca (FS) e bioessiccato, mentre i rifiuti trattati complessivamente con Incenerimento nel 2020 ammontano a 6.242.511 tonnellate [1].

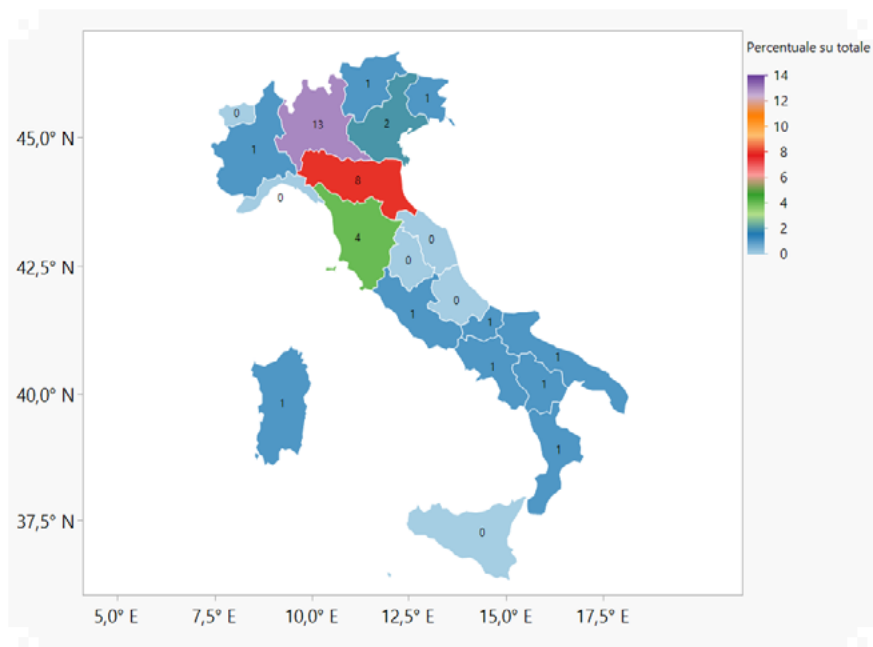


Figura 1: Numero di impianti di incenerimento dei rifiuti suddivisi per regione [1].

In *Tabella 1* è riportata, in riferimento all'anno 2020, la suddivisione per Macro-area sia degli inceneritori italiani, sia della quantità di rifiuti trattati, espressa in tonnellate, mentre in *Figura 1* è riportata la distribuzione degli inceneritori nelle regioni italiane, sempre in riferimento all'anno 2020 [1].

Macro-area	N° impianti	Quantità totale di rifiuti trattati [t]	Quantità di rifiuti urbani (RU) trattati [t]
Nord	26	4.602.987	3.739.079
Centro	5	537.478	532.399
Sud	6	1.102.046	1.053.166
Totale	37	6.242.511	5.324.644

Tabella 1 - Numero di impianti di incenerimento e quantità di rifiuti totali e urbani trattati per Macro-area [1].

Raggiungere gli obiettivi dell'economia circolare: il fabbisogno impiantistico al 2035 e il recupero energetico

Con l'adozione del pacchetto dell'economia circolare, sono stati fissati nuovi ambiziosi obiettivi in materia di gestione dei rifiuti, con particolare riguardo alla riduzione del ricorso alla discarica e all'incremento dell'effettivo riciclaggio, sia dei rifiuti nel loro complesso che per quanto concerne i soli rifiuti di imballaggio.

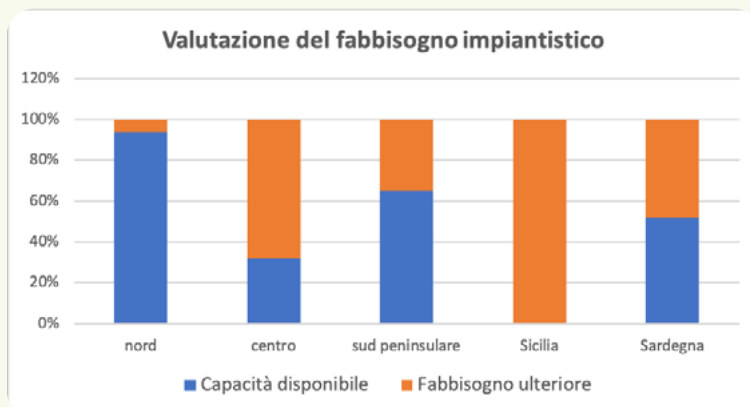
I tre obiettivi da conseguire entro il 2035 e uno entro il 2030 sono:

- 65% di riciclaggio effettivo dei rifiuti urbani da conseguire entro il 2035;
- 70% di riciclaggio dei rifiuti di imballaggio da conseguire entro il 2030;
- 10%, massimo, di smaltimento in discarica dei rifiuti urbani da conseguire entro il 2035.

L'Italia, pur non essendo molto lontana da questi obiettivi, rischia di non poterli conseguire se non si assisterà, nei prossimi anni, ad un adeguato sviluppo del parco impiantistico, soprattutto relativamente al trattamento della frazione organica, con realizzazione di impianti di digestione anaerobica per la produzione di biometano e al recupero di energia delle frazioni non altrimenti recuperabili, con realizzazione di inceneritori.

Mentre, infatti, il nord del Paese (anche se non in tutte le regioni) e la Sardegna dispongono di un sufficiente parco impiantistico, il centro, il sud peninsulare e la Sicilia soffrono già oggi di un deficit che costringe ad esportare i rifiuti verso il nord.

Questa situazione, verosimilmente, verrà acuita nei prossimi anni con l'atteso sviluppo delle raccolte differenziate dalle quali discenderanno maggiori quantità di organico e maggiori quantità di scarti che, unitamente alle frazioni residue, dovranno essere trattate esclusivamente in impianti di recupero energetico al fine di mantenere il ricorso allo smaltimento in discarica al di sotto del 10%. Per stimare il fabbisogno impiantistico di impianti per il recupero energetico al 2035, da considerare aggiuntivo rispetto agli impianti attualmente operativi, è stata calcolata la differenza tra i rifiuti urbani residui (comprensivi degli scarti delle raccolte differenziate) e l'attuale disponibilità impiantistica (corrispondente alle quantità trattate nel 2019 negli impianti di incenerimento e coincenerimento).



Dall'analisi condotta emerge quanto segue:

- il nord presenterà un fabbisogno di oltre 240.000 t;
- la Sardegna presenterà un deficit di piccola entità, ma comunque significativo rispetto all'attuale capacità;
- il centro, il sud peninsulare e la Sicilia presenteranno un importantissimo deficit pari rispettivamente ad oltre 1,2 milioni di tonnellate, oltre 600 mila tonnellate ed oltre 500 mila tonnellate.

Con la realizzazione degli impianti necessari al 2035, l'Italia sarebbe in grado di trattare in inceneritori con recupero di energia ulteriori 2.700.000 t di rifiuti urbani ogni anno.

Considerando un'efficienza pari a quella degli impianti più performanti è possibile stimare una produzione annua di energia elettrica pari a circa 2,5 milioni di MWh elettrici.

Si evidenzia che ai sensi del Decreto MISE del 6 luglio 2012 (Allegato 2, punto 6.1) il 51% dell'energia prodotta dagli impianti di incenerimento di rifiuti urbani è rinnovabile e pertanto la produzione di energia rinnovabile ammonterebbe a circa 1.250.000 MWh elettrici anno che interverrebbero in sostituzione di fonti fossili.

In altri termini, considerando che il consumo annuo medio di una famiglia è stimabile in 2.700 kWh, la produzione di energia, per la sola quota rinnovabile e per i soli nuovi impianti da realizzare nel centro e nel sud per colmare il deficit di incenerimento delle frazioni residue, potrebbe soddisfare le necessità di circa 460.000 famiglie (equivalenti a circa 1,4 milioni di abitanti).

Fonte: Rifiuti urbani. I fabbisogni impiantistici attuali e al 2035 – Utilitalia.



**METODOLOGIA
DI ANALISI DEI DATI**

4

4. Metodologia di analisi dei dati [7]

In questo capitolo viene illustrata sinteticamente la metodologia adoperata da ENEA nell'analisi dei dati per l'individuazione degli indici di prestazione energetica caratteristici del processo di Incenerimento dei rifiuti, ovvero per l'individuazione degli Indici di Prestazione Energetica di primo livello (o indici di prestazione energetica globale IPEg) e di quelli di secondo livello (o indici di prestazione energetica specifici IPEs) [7].

Per indici di primo livello si intendono gli indici calcolati andando a considerare l'energia totale consumata dei singoli vettori energetici rispetto al parametro caratteristico di produzione (es. tonnellate, metri cubi, etc.). Riprendendo la struttura energetica proposta da ENEA, sono gli indici ricavabili dai dati forniti al livello B della struttura energetica aziendale, come proposta da ENEA (Figura 2).

Per indici di secondo livello si intendono invece gli indici specifici che per ciascun vettore energetico scendono nel dettaglio del processo (es. alimentazione rifiuti, forno, consumi ausiliari, etc). Questa tipologia di indice è di più difficile determinazione in quanto dipende in maniera stretta dal processo e da come il consumo è misurato ed imputato ad esso. Facendo riferimento alla struttura energetica proposta da ENEA [2], questa tipologia di indice si basa sui dati forniti al livello D (Figura 2).

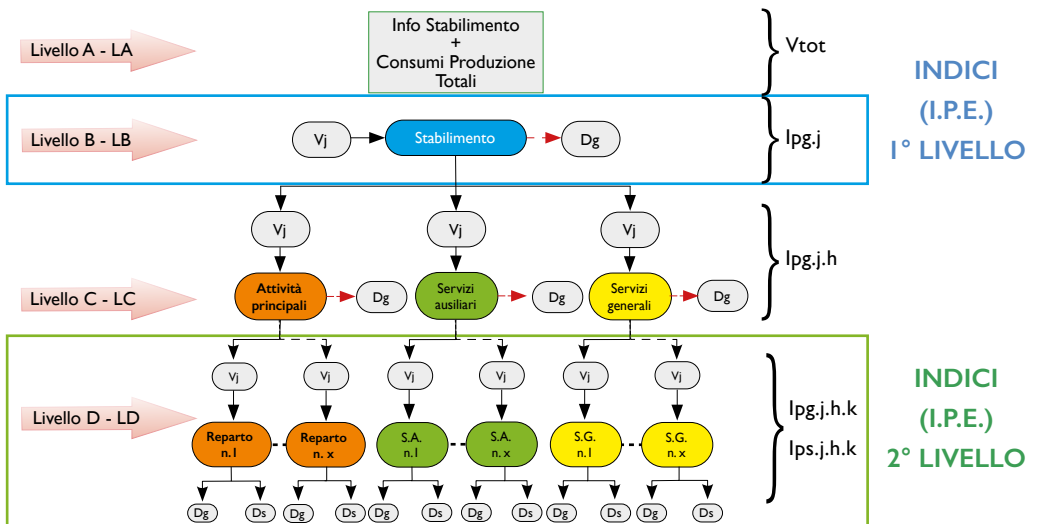


Figura 2 - Schematizzazione della struttura energetica aziendale e caratterizzazione del livello degli IPE

Sinteticamente la metodologia di analisi utilizzata può essere schematizzata nelle seguenti fasi:

- **Fase 1 - Selezione del campione statistico:** consiste nell'analisi numerica dei consumi di ogni sito per ciascun sottogruppo ATECO presente nella banca dati ENEA (detta popolazione di riferimento) e nella selezione del campione statistico utile all'implementazione matematica del modello. A tal fine, vengono studiati sia i file dei rapporti tecnici che i fogli di calcolo di riepilogo dei consumi allegati al rapporto tecnico (laddove presenti). È importante sottolineare l'ingente lavoro di omogeneizzazione effettuato preventivamente per eliminare dalla popolazione analizzata tutti gli elementi considerati non utili (ad esempio, perché aventi unità di produzione (U.P.) non coerenti con il resto della popolazione, oppure per mancanza di dati o errori di caricamento, o ancora incongruenze riferibili alla non pertinenza del sito in esame con il sottogruppo considerato). Inoltre, è stata definita una soglia numerica minima di siti rappresentativi, pari a 5, al di sotto della quale la modellizzazione risulta essere non rappresentativa.
- **Fase 2 - Ricerca della correlazione tra consumo e produzione:** viene effettuata un'analisi di regressione lineare al fine di valutare "la bontà" della relazione che c'è tra i consumi ed il parametro di aggiustamento (es. produzione) utilizzato. Questa valutazione viene fatta attraverso l'analisi dei principali indici statistici come l' R^2 , l'indice di *Pearson* ed il valore del P-value (vedi *Appendice B*). Il controllo della correlazione rappresenta un passaggio importante per capire se effettivamente il consumo energetico sia legato al parametro di aggiustamento o vi sia la presenza di altri fattori in gioco più influenti.
- **Fase 3 - Aggregazione dati:** l'analisi precedente, in alcuni casi, permette di individuare la presenza di gruppi o *cluster* di siti, che possono dare indicazioni su tipologie di prodotti o processi differenti. Oppure è possibile individuare macro raggruppamenti legati ai volumi di produzione.
- **Fase 4 – Individuazione IPE di riferimento:** ultima fase, qualora le fasi precedenti suggeriscano un legame tra il consumo energetico ed il parametro di influenza si passa all'individuazione degli IPE di riferimento, che potranno essere differenziati per specifiche tecnologie, processi, prodotti o intervalli di produzione.

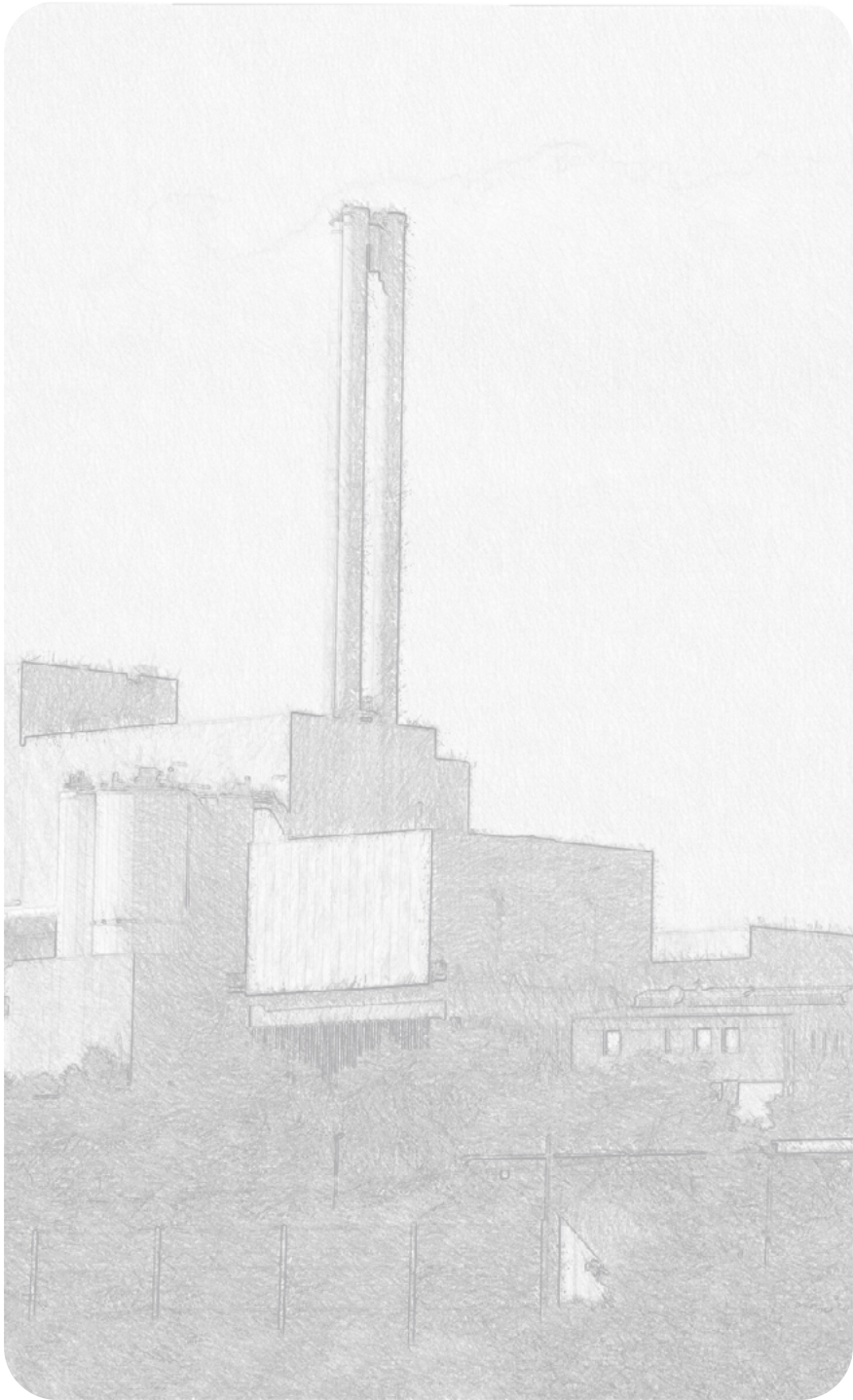
La bontà degli indici di prestazione individuati dipende, quindi, da come i dati riportati in diagnosi siano confrontabili tra loro con confini e limiti di batteria ben determinati.

Determinati l'IPE medio e la sua variazione, il livello di affidabilità dell'IPE (riferito per un specifico intervallo di produzione) è stato definito:

- «**Alto**» se il rapporto tra la deviazione standard e il valore medio risulta minore del 20%;
- «**Medio**» se il rapporto tra deviazione standard e valore medio risulta compreso tra il 20% ed il 60%;
- «**Basso**» se il rapporto tra la deviazione standard e il valore medio risulta maggiore del 60% e minore del 100%;
- «**Nulla**» se il valore del rapporto supera il 100%.

Nel presente lavoro, i dati a disposizione hanno permesso un'analisi accurata del processo, in quanto il numero di diagnosi a disposizione è risultato sufficientemente rappresentativo.

Vista la particolarità del settore, per la determinazione degli indici di primo e secondo livello si è proceduto tenendo conto di quanto proposto da UTILITALIA all'interno delle proprie Linea Guida per l'Esecuzione della diagnosi energetica ai sensi dell'articolo 8 del d.lgs. 102/2014 [3].





LA DIAGNOSI
ENERGETICA

5

5. La diagnosi energetica

In questo capitolo si entra nel merito di come deve essere condotta una diagnosi energetica di qualità, ed in particolare di come questa dovrebbe essere implementata nel settore dell'incenerimento dei rifiuti.

Dopo una panoramica generale sulla metodologia di approccio e sui contenuti minimi che debbono essere soddisfatti per redigere un rapporto di diagnosi conforme ai dettami del D.Lgs. 102/2014, si entra nello specifico del settore dell'incenerimento dei rifiuti, suggerendo struttura energetica, strategia di monitoraggio ed indici di prestazione energetica (IPE).

5.1 Redazione del rapporto di diagnosi energetica

Diagnosi Energetica o Audit energetico: procedura sistematica finalizzata a ottenere un'adeguata conoscenza del profilo di consumo energetico di un edificio o gruppo di edifici, di una attività o impianto industriale o commerciale o di servizi pubblici o privati, a individuare e quantificare le opportunità di risparmio energetico sotto il profilo costi-benefici e a riferire in merito ai risultati.

Per la stesura di un rapporto di diagnosi energetica di qualità e conforme ai dettami legislativi è necessario seguire le indicazioni presenti:

- nell'allegato 2 del decreto legislativo 102/2014, aggiornato nel luglio 2020 dal D.Lgs. 73/2020;
- nei chiarimenti del MISE [4];
- nella normativa tecnica, pacchetto UNI CEI EN 16247 [5]
- nelle linee guida generali elaborate da ENEA [2];
- nelle linee guida settoriali [3].

Come riportato nella norma tecnica UNI CEI EN 16247-1, l'esecuzione di una diagnosi energetica può essere suddivisa nelle seguenti fasi (vedi Figura 3):

- contatti preliminari;
- incontro di avvio;

- raccolta dati;
- attività in campo;
- analisi dati ed individuazione delle opportunità di efficientamento energetico;
- redazione del rapporto tecnico;
- incontro finale.

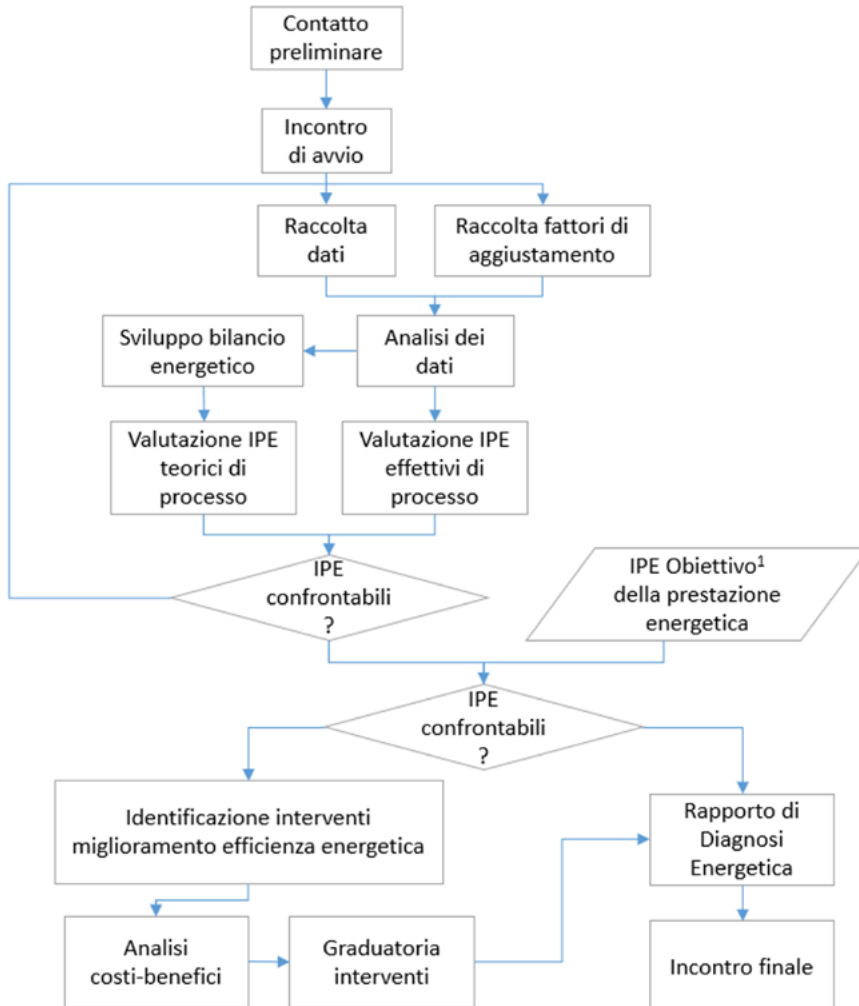


Figura 3 - Schema esecuzione diagnosi energetica secondo la UNI CEI EN 16247-1.
 (¹ Media di settore, benchmark, riferimento di legge oppure un miglioramento quantitativo rispetto alla situazione ex ante).

Nell'incontro di avvio vengono informate tutte le parti interessate su obiettivi, scopo, confini e accuratezza della diagnosi energetica e concordate le disposizioni pratiche. Vengono pianificate le attività e nominate le persone dell'organizzazione che faranno da interfaccia all'auditor.

In fase di raccolta dati l'auditor, in cooperazione con l'organizzazione, deve raccogliere tutte le informazioni necessarie ed utili per comprendere il processo produttivo, le fonti di approvvigionamento energetico e di materie prime, le modalità di gestione del sito produttivo/impianto in termini energetici, economici e organizzazione del lavoro.

L'auditor energetico **deve ispezionare in campo l'oggetto della diagnosi**, valutare gli usi energetici, comprendere le modalità operative, i comportamenti degli utenti e il loro impatto sui consumi e l'efficienza energetica, formulare idee preliminari per le opportunità di miglioramento dell'efficienza energetica e redigere un elenco di aree e processi per i quali necessitino ulteriori dati quantitativi per successiva analisi. **Deve assicurarsi che le misure ed i rilievi siano effettuati in maniera conforme a quanto previsto dal D.Lgs 102/2014, dai chiarimenti del MISE e dalle linee guida ENEA, affidabile e rappresentativa delle ordinarie condizioni di esercizio.**

In fase di analisi l'auditor deve, quindi, determinare il "livello di prestazione energetica" corrente dell'oggetto sottoposto a diagnosi, il quale rappresenterà il riferimento per individuare e valutare eventuali interventi di miglioramenti energetico e successivamente misurarne i benefici. L'analisi deve comprendere:

- a. una scomposizione dei consumi energetici suddivisi per uso e fonte;
- b. i **flussi energetici** ed un **bilancio energetico** dell'oggetto sottoposto a diagnosi;
- c. i **flussi di massa** (prodotti, semilavorati, materie prime) dell'oggetto sottoposto a diagnosi
- d. il diagramma temporale della domanda di energia;
- e. le correlazioni tra consumo energetico e fattori di aggiustamento;
- f. uno o più **indicatori di prestazione energetica** adatti a valutare l'oggetto sottoposto a diagnosi;
- g. le **opportunità di miglioramento** dell'efficienza energetica sulla base della prestazione energetica corrente dell'oggetto sottoposto a diagnosi valutandone l'impatto sulla base dei risparmi economici ottenibili, degli investimenti necessari, del tempo di ritorno, dei vantaggi non energetici e delle interazioni tra le diverse misure di

efficientamento proponibili. Le azioni di risparmio energetico devono essere elencate secondo una graduatoria basata sui criteri concordati con l'organizzazione.

Nell'incontro finale l'auditor dovrà:

- I. consegnare il rapporto di diagnosi energetica;
- II. presentare i risultati della diagnosi energetica in maniera da agevolare il processo decisionale dell'organizzazione;
- III. essere in grado di spiegare i risultati.

Uno dei punti chiave nella valutazione delle prestazioni energetiche di un sito, di un processo, etc. è il confronto delle sue prestazioni con quelle di impianti/processi simili. Questa fase di confronto però non può prescindere da una chiara standardizzazione delle caratteristiche del processo che permetta confronti omogenei con, ad esempio, Indici di prestazione energetica presenti in letteratura, o anche più semplicemente confronti con impianti simili di proprietà della stessa azienda.

5.2 La diagnosi energetica negli impianti di incenerimento dei rifiuti

In un'ottica di settorializzazione delle diagnosi energetiche ENEA, in collaborazione con UTILITALIA, ha redatto un foglio di calcolo di rendicontazione specifico [3], all'interno del quale la struttura energetica prevista dalle linee guida ENEA è calata sul settore dell'Incenerimento dei rifiuti. Questo ha permesso di individuare in maniera chiara tutte le fasi principali del processo, standardizzandone il lessico e associandone il corretto parametro di normalizzazione (es. tonnellate di rifiuti, MWh di Apporto energetico dei rifiuti, kNm³ di fumi trattati, etc.).

5.2.1 Il processo di incenerimento dei rifiuti

Lo schema del processo di Incenerimento dei rifiuti è mostrato in *Figura 4*.



Figura 4 - Schematizzazione del processo di incenerimento dei rifiuti.

Le principali sezioni costituenti un impianto di incenerimento sono le seguenti:

- ☞ Sezione di combustione;
- ☞ Sezione di depurazione fumi;
- ☞ Sezione di recupero energetico.

5.2.1.1 Sezione combustione

Le tecnologie di combustione maggiormente diffuse per il trattamento dei rifiuti urbani sono il forno a griglia ed il forno a letto fluido.

I forni a griglia costituiscono la tecnologia di più largo impiego, grazie alla flessibilità di funzionamento e all'affidabilità. Consistono in una griglia, orizzontale o inclinata, su cui viene disposto un letto di rifiuti dello spessore di alcune decine di centimetri. La griglia è costituita da un insieme di elementi, detti "barrotti", disposti in modo da consentire il passaggio dell'aria comburente e la sua ripartizione su tutto il letto di rifiuti. L'aria di combustione viene iniettata sia sotto la griglia, sia nella parte alta della camera di combustione, ovvero all'interno dei fumi; quest'ultima viene utilizzata anche per il controllo della temperatura. Il tempo di permanenza del rifiuto sulla griglia deve essere tale da garantire il completamento delle diverse fasi del processo di combustione ed è in genere

compreso tra 30 e 60 minuti. Livelli di temperatura dell'ordine dei 950 - 1000 °C sono ritenuti sufficienti, in corrispondenza di adeguati tenori di ossigeno (6 – 8 %) e turbolenza, a garantire il completamento pressoché totale dell'ossidazione dei componenti organici nei processi di combustione, minimizzando in tal modo le emissioni di prodotti incombusti. Le ceneri pesanti residue del processo vengono scaricate dalla parte finale della griglia con opportuni sistemi in vasche di accumulo a bagno d'acqua, che provvedono anche al loro raffreddamento.

Il forno a letto fluido è costituito da una camera di combustione all'interno della quale viene mantenuto un certo quantitativo di materiale inerte (il "letto"), di solito costituito da sabbia, in sospensione ("fluido") da una corrente ascendente di aria (che funge anche da comburente). Il movimento del letto di sabbia garantisce un buon contatto comburente - combustibile, oltre a una notevole uniformità di temperatura e di miscelazione, che contribuiscono a garantire una combustione costante e completa. Questa apparecchiatura, messa a punto inizialmente nell'industria petrolchimica, è stata adattata successivamente alla combustione di sostanze piuttosto omogenee e di pezzatura ridotta. I rifiuti urbani debbono dunque subire un pretrattamento costituito, come minimo, da operazioni di vagliatura e triturazione.

5.2.1.2 Sezione di depurazione fumi

Un impianto di incenerimento dà origine a emissioni di tipo gassoso, liquido e solido. Prima del loro rilascio in atmosfera i fumi sono sottoposti ad un trattamento con l'obiettivo di ridurre in modo sostanziale le concentrazioni delle sostanze inquinanti. La sezione di trattamento fumi risulta molto articolata e complessa, in conseguenza dei limiti sempre più rigorosi imposti dalla normativa e di un concreto progresso tecnologico, che ha condotto negli ultimi anni allo sviluppo di sistemi sofisticati, in grado di consentire il raggiungimento di valori di emissione al limite della soglia di misurabilità.

I contaminanti presenti nei fumi sono raggruppabili in:

- ⇒ macroinquinanti: sostanze presenti nei fumi in concentrazioni dell'ordine dei mg/Nm³, quali le polveri, gli ossidi di zolfo (principalmente anidride solforosa, SO₂) e di azoto (NO_x), il monossido di carbonio (CO) e gli acidi alogenidrici (essenzialmente HCl e HF);

- ⇒ microinquinanti: sostanze, presenti nelle emissioni in concentrazioni di molto inferiori, che includono sia specie inorganiche, come i metalli pesanti (Cd, Cr, Hg, Pb, Ni, ecc.), che organiche come diossine, furani e idrocarburi policiclici aromatici (PCDD, PCDF, IPA). I valori limite per le emissioni dei microinquinanti si collocano nell'ordine dei $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ (ricordando che $1 \mu\text{g} = 0,001 \text{ mg}$), o addirittura dei ng/Nm^3 (ricordando che 1 ng equivale a un milionesimo di mg) per le diossine e componenti analoghe, di particolare pericolosità per la salute dell'uomo.

Per quanto riguarda la riduzione di tali emissioni, secondo la normativa vigente ci si deve basare sulle BAT (*Best Available Techniques*, cioè le migliori tecniche attualmente disponibili e sfruttabili industrialmente), definite in un documento ufficiale dell'IPPC Bureau per gli impianti di incenerimento (*European Commission, 2019*). Sintetizzando quanto riportato nel documento della Commissione Europea [*European Commission, 2019*] per gli impianti di incenerimento si ha quanto segue:

- i dispositivi di abbattimento del particolato (ceneri volanti) più impiegati sono i filtri a maniche e i filtri elettrostatici (o elettrofiltri);
- l'abbattimento dei gas a comportamento acido, in particolare cloruro di idrogeno (HCl), anidride solforosa (SO_2), e fluoruro di idrogeno (HF) può essere ottenuto con modalità diverse (metodo del lavaggio a umido, a secco o a semisecco);
- le emissioni di ossidi di azoto (NO_x) vengono controllate mediante due diversi sistemi: il primo comprende accorgimenti che ne riducono la formazione durante il processo, in modo che la concentrazione risulti inferiore al limite di legge; il secondo prevede la rimozione degli NO_x mediante una reazione chimica con ammoniacca gassosa (NH_3), che li trasforma in azoto elementare. La rimozione può essere effettuata con due modalità diverse: a bassa temperatura ($300 - 400^\circ\text{C}$) in presenza di catalizzatori (SCR, *Selective Catalytic Reduction*) oppure ad elevata temperatura ($950 - 1000^\circ\text{C}$) in assenza di catalizzatori (SNCR, *Selective Non Catalytic Reduction*);
- per ciò che riguarda i microinquinanti (metalli pesanti e diossine) viene comunemente praticata l'iniezione di carbone attivo. Si segnala inoltre che i microinquinanti organici (diossine e furani in particolare)

possono essere abbattuti anche all'interno dei sistemi SCR utilizzati per l'abbattimento degli ossidi d'azoto.

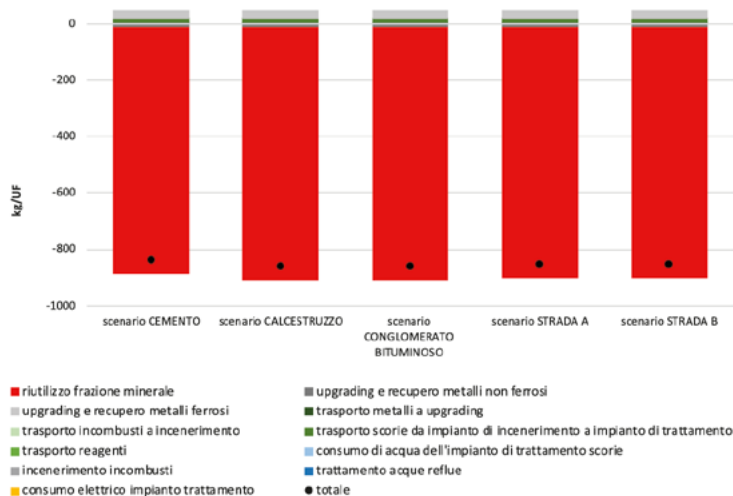
Il riciclaggio delle ceneri pesanti degli inceneritori in sostituzione di materie vergini

Nel 2017 (ultimo dato disponibile) l'85% delle ceneri pesanti (scorie) non pericolose prodotte dagli impianti di incenerimento e il 100% dei metalli da queste estratti è stato avviato a recupero di materia, minimizzandone lo smaltimento in discarica. Inoltre, i metalli recuperati da questi materiali concorrono al conseguimento degli obiettivi di riciclaggio fissati dalle direttive europee per l'attuazione dell'economia circolare (art. 3, comma 7, Decisione di esecuzione (UE) 2019/1004 della Commissione del 7 giugno 2019).

Nel 2017 gli impianti italiani hanno prodotto circa 1.035.000 t di ceneri pesanti non pericolose, di cui circa 880.000 avviate a riciclaggio (di cui 18.000 t costituite da materiali ferrosi interamente riciclati). Le quantità incenerite nello stesso anno e negli stessi impianti sono state pari a circa 6,1 milioni di tonnellate.

Solo con riferimento alla realizzazione dei nuovi impianti di incenerimento per colmare il gap impiantistico e conseguire gli obiettivi dell'economia circolare al 2035, si può stimare in circa 450.000 t/anno la produzione di ceneri pesanti di cui, nell'ipotesi conservativa di mantenere le stesse proporzioni del 2017, 380.000 t/anno potrebbero essere riciclate in sostituzione di materie vergini e da queste potrebbero verosimilmente essere recuperate circa 8.000 t/anno di metalli che concorrerebbero al calcolo degli obiettivi di riciclaggio.

Indicatore di consumo delle risorse minerali naturali associato al trattamento di 1 tonnellata di ceneri pesanti e al recupero dei metalli in esse contenuti e della frazione minerale risultante, per cinque diverse alternative di utilizzo di quest'ultima



Numerosi studi hanno valutato i benefici ambientali del recupero delle ceneri pesanti adottando un approccio del ciclo di vita (LCA). Gli impatti ambientali, associati principalmente al trasporto delle ceneri pesanti dagli impianti di incenerimento all'impianto di trattamento, all'incenerimento degli incombusti o al recupero della frazione minerale, sono infatti più che compensati dai benefici generati dal recupero dei rottami metallici, sia ferrosi che non ferrosi. Per quanto riguarda la frazione minerale, si genera mediamente un risparmio di più di 800 kg di minerali naturali per tonnellata di ceneri pesanti avviate a trattamento. A giocare un ruolo fondamentale in questo caso è proprio il recupero della frazione minerale delle ceneri pesanti in sostituzione di aggregati naturali nella produzione di cemento, calcestruzzo, conglomerato bituminoso e misti cementati. Tale materiale recuperato, costituito in buona parte da sabbia, può rivestire un ruolo importante alla luce di alcune recenti rilevazioni inerenti i rischi concreti di scarsità nella disponibilità di tale materiale a livello globale.

Fonte: Rifiuti urbani. I fabbisogni impiantistici attuali e al 2035 – Utilitalia; Libro bianco sull'incenerimento dei rifiuti urbani – Utilitalia (settembre 2020).

5.2.1.3 Sezione di recupero energetico

Il recupero di energia dall'incenerimento viene comunemente ottenuto attraverso il raffreddamento dei fumi che si rende necessario per il loro successivo trattamento. Il recupero avviene sotto forma di produzione di energia elettrica e/o termica, ottenuta attraverso l'impiego del vapore generato in un'apposita caldaia, concettualmente costituita da uno scambiatore di calore.

Lo schema impiantistico è del tutto simile a quello tipico delle centrali termoelettriche, anche se le condizioni operative (pressione, temperatura) sono assai meno severe, a causa della presenza nei fumi di composti corrosivi e di ceneri trascinate che possono dare luogo a fenomeni di corrosione e erosione, nonché alla formazione di depositi di materiale sulle pareti di scambio termico.

Il vapore prodotto dalla combustione del rifiuto può essere utilizzato secondo una delle modalità seguenti:

- fornitura diretta di vapore ad utenze termiche industriali o di acqua calda/surriscaldata ad utenze civili, mediante scambiatore di calore (solo calore);
- produzione di energia elettrica mediante espansione del vapore in turbina con ciclo a condensazione (solo elettricità);
- produzione combinata di energia elettrica e termica (cogenerazione).

Il recupero del calore prodotto

Il teleriscaldamento è una forma di riscaldamento che consiste nella distribuzione attraverso reti di tubazioni coibentate (perlopiù interrate) di acqua calda, surriscaldata o vapore (detto fluido termovettore), proveniente da una grossa centrale di produzione.



Alcuni impianti di incenerimento hanno implementato il sistema del teleriscaldamento per alimentare con il calore prodotto dagli impianti stessi le utenze limitrofe: nello specifico, viene trasformato il vapore derivato dalla combustione in energia termica ed elettrica, grazie ad un sistema di cogenerazione. Quindi, con il calore generato si va ad alimentare la rete di teleriscaldamento a servizio di utenze civili e/o industriali.

Sono evidenti i benefici ambientali derivanti dall'implementazione del sistema del TLR, che permette:

- ✓ un uso più efficiente dell'energia primaria;
- ✓ la possibilità di sfruttare una fonte energetica a “costo zero”;
- ✓ maggiori controlli sui fumi con efficace abbattimento degli inquinanti emessi complessivamente su un'unica centrale, rispetto ad uno scenario in cui il calore sia generato localmente da una serie di piccole caldaie individuali.

5.2.2 Rendicontazione dei consumi energetici

Per la rendicontazione dei consumi energetici è necessario attenersi alla suddivisione sia per differenti vettori energetici che per differenti aree funzionali e processi, come illustrato nelle Linee Guida UTILITALIA [3] e come previsto nel foglio di calcolo [6] elaborato da ENEA, in accordo con UTILITALIA. Tutto questo consente di facilitare ed uniformare la metodologia di rendicontazione dei consumi energetici del sito in oggetto.

Nel foglio di calcolo la rendicontazione dei consumi si struttura su diversi livelli:

- Livello A: dove devono essere riportate le informazioni principali del sito oggetto di analisi quali:
 - Dati identificativi dello stabilimento e della diagnosi (es.: P.IVA, località geografica, settore merceologico a sei cifre, periodo di riferimento, etc.);
 - Quantità di rifiuti trattati;
 - Vettori energetici in ingresso allo stabilimento nell'anno di riferimento, come da fatture di acquisto o contatori fiscali;
 - Vettori energetici autoprodotti, auto consumati ed esportati nell'anno di riferimento, con particolare riferimento ad energia elettrica e energia termica;
 - Altre informazioni utili alla caratterizzazione del sito produttivo: livelli di pressione del ciclo a vapore sia in ingresso alla turbina che di condensazione, eventuali interventi di revamping effettuati negli ultimi 10/15 anni.
- Livello B: qui vanno riportati i valori del consumo energetico, suddiviso per ciascun vettore energetico, effettivamente imputabili al sito produttivo.
- Livello C: prevede la suddivisione dei consumi energetici per vettore e per area funzionale (Attività Principali, Servizi Ausiliari, Servizi Generali).
- Livello D: riporta il dettaglio di come il consumo di ciascun vettore energetico si suddivide all'interno delle tre aree funzionali: Attività Principali, Servizi Ausiliari e Servizi Generali.

Per semplificare la rendicontazione e rendere i dati omogenei sono riportate, nel foglio di rendicontazione [6], tutte le fasi che possono essere presenti in uno stabilimento, con le relative sottofasi.

Per ciascun consumo è importante riportare il relativo parametro correttivo, ad esempio nella voce Alimentazione/Movimentazione rifiuti riportare le

tonnellate di rifiuti trattati, o nella fase Depurazione fumi riportare i kNm^3 di fumi trattati, ecc. Come riportato sulle Linee Guida ENEA [2] è possibile trascurare, nei livelli B, C e D, i vettori energetici utilizzati in stabilimento che abbiano un'incidenza inferiore al 5% sui consumi globali, (tra questi ad esempio il gasolio per autotrazione, etc.) i quali dovranno comunque essere sempre riportati almeno nel Livello A.

Nei paragrafi successivi sono riportate le indicazioni per la rendicontazione dei consumi energetici come concordato con l'associazione di categoria, indicazioni riprese dalle Linee Guida di Utilitalia [3].

5.2.2.1 Attività Principali

Nell'area delle Attività Principali devono confluire tutte le attività strettamente correlate alla destinazione d'uso generale dell'azienda [2].

Come riportato nelle Linee Guida di Utilitalia [3], in linea generale, un impianto d'incenerimento di rifiuti può essere schematizzato in quattro distinte macro-sezioni o reparti:

- ☞ Alimentazione/Movimentazione rifiuti;
- ☞ Forno/Generatore di vapore;
- ☞ Ciclo termico;
- ☞ Depurazione fumi.

A queste quattro macro-sezioni è possibile inserirne una quinta che chiameremo per semplicità "Altro" che tiene conto delle peculiarità del sito in esame. Infatti, è facile imbattersi in situazioni in cui l'impianto d'incenerimento coesiste, nello stesso sito industriale, con altri impianti destinati o meno al trattamento di rifiuti, con esso non necessariamente correlati. Tra questi è possibile trovare:

- Pretrattamento rifiuti (selezione meccanica/biostabilizzazione, produzione CSS/CDR, essiccamento fanghi e/o altri rifiuti speciali);
- Trattamento scorie/ceneri;
- Trattamento acque reflue di processo;

- Sezioni di impianto complementari (es. Caldaie ausiliarie/TRL);
- Altri impianti presenti in loco (Compostaggio, Trattamento post Raccolta differenziata, etc.).

L'elenco riportato non è esaustivo delle casistiche presenti sul territorio nazionale.

Nella realtà solo la prima voce dell'elenco sopra riportato risulta interconnessa, per motivi di scelta progettuale, con la funzione di recupero energetico da rifiuti; per le altre, invece, possono essere presenti forme limitate di flussi in ingresso (es.: scarti di lavorazione) o in uscita (es.: energia elettrica) dall'impianto d'incenerimento.

Per quanto riguarda il pretrattamento, esso può assumere un'accezione molto vasta, che va da trattamenti meccanici molto limitati (triturazione degli ingombranti, apertura delle balle, ecc.) necessari per una corretta alimentazione del forno sino a trattamenti di tipo meccanico-biologico piuttosto spinti, richiesti per la produzione di una frazione secca o di un vero e proprio CSS, tramite l'impiego di tecniche di tipo a flusso sia separato che unico.

In questi ultimi casi la fase di pretrattamento dovrà essere analizzata come a sé stante dal punto di vista energetico, in modo da non ascrivere i relativi consumi di energia primaria all'impianto d'incenerimento. I trattamenti preliminari di ridotta entità (triturazione ingombranti, apertura delle balle, ecc.) possono essere ricompresi nella sezione di movimentazione/alimentazione, preferibilmente evidenziandone la presenza.

Anche mantenendo il contesto della diagnosi energetica riferito all'intero sito in esame, nel caso della presenza di altre installazioni e/o impianti risulta imprescindibile disporre degli elementi necessari per l'individuazione dei consumi energetici del solo impianto d'incenerimento, come nel seguito individuato.

In quest'ottica viene richiesto espressamente di predisporre uno schema di flusso relativo a tutta l'impiantistica presente nel sito oggetto della diagnosi energetica. Su tale schema dovranno essere chiaramente riportate le interconnessioni fra i vari impianti e/o installazioni presenti, individuati i relativi confini ("*battery limits*"), nonché fornita una quantificazione dei flussi (eventuali) in ingresso e in uscita dall'impianto d'incenerimento.

A riguardo si rammenta che l'assunzione del parametro "Apporto energetico dei rifiuti" espresso in MWh, come riferimento per la determinazione degli indicatori prestazionali generali, presuppone necessariamente che venga correttamente individuato il quantitativo del mix di rifiuti alimentati al forno, nonché il corrispondente valore del PCl_w , da determinare con il massimo grado di accuratezza (vedi *Appendice A*).

Nella *Figura 5* si riporta, a titolo esemplificativo, uno schema semplificato di un ipotetico sito caratterizzato dalla presenza contestuale di più impianti (o di sezioni complementari all'attività di recupero energetico) che pur se soggetti all'obbligo di diagnosi energetica, dovrebbero essere analizzati e valutati separatamente.

Ai fini di una corretta caratterizzazione dell'impianto risulta di basilare importanza fornire un dettaglio delle tipologie di rifiuti e dei rispettivi quantitativi in ingresso, secondo il seguente schema di ripartizione:

- Rifiuti urbani indifferenziati (RUI);
- Frazione secca (FS o FST);
- Combustibile solido secondario (CSS o CDR);
- Rifiuti speciali (RS);
- Rifiuti pericolosi (RP o RSP);
- Rifiuti sanitari (RSS);
- Rifiuti sanitari pericolosi (RSSP).

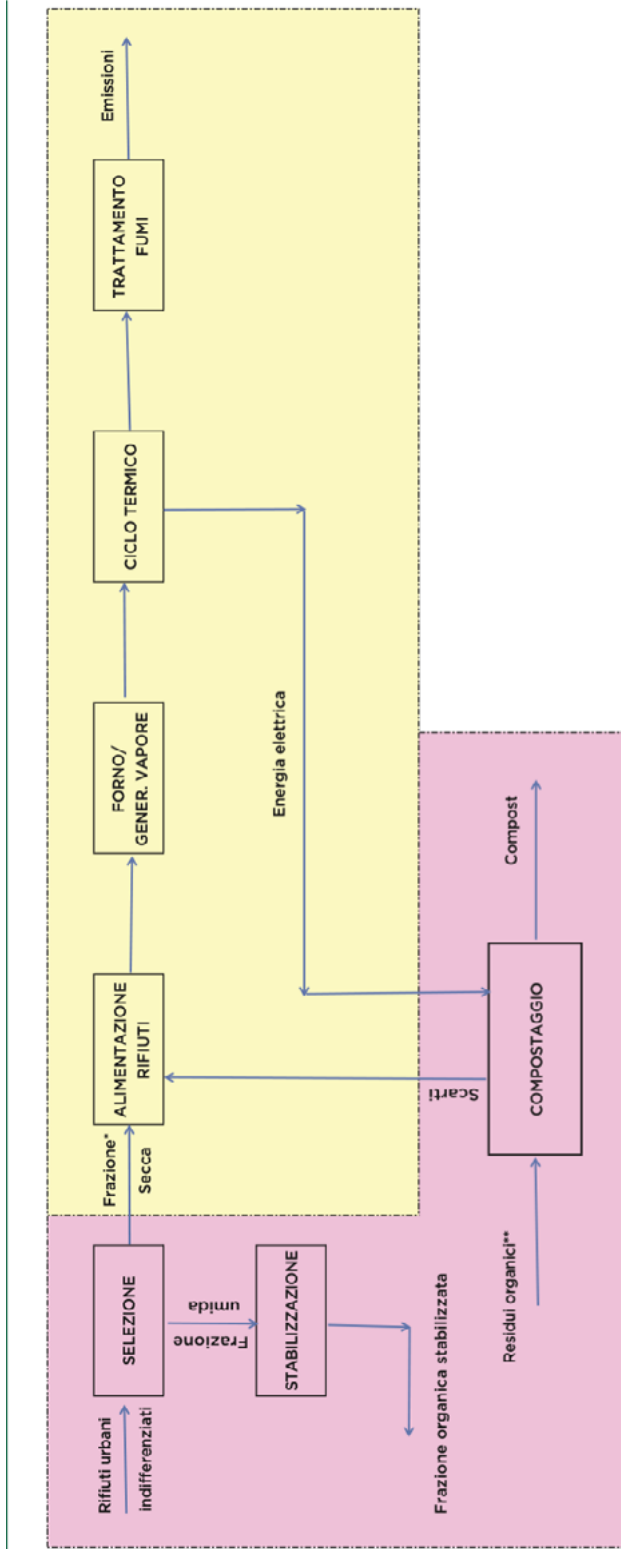
Le varie tipologie di rifiuti saranno individuate dal rispettivo codice CER. Nei casi in cui alcune delle suddette voci (es.: i RS) comprendano rifiuti di natura diversa, si dovrà riportare ciascun codice CER e il rispettivo quantitativo.

Di fondamentale importanza risulta inoltre l'individuazione dell'effettivo quantitativo ("mix") di rifiuti alimentati al forno e del relativo PCl_w , da determinarsi preferibilmente tramite il metodo riportato nell'appendice F della norma UNI/TS 11597-2015 "Caratterizzazione dei rifiuti e dei CSS in termini di contenuto di biomassa ed energetico" oppure tramite una serie significativa di caratterizzazioni (vedi *Appendice A*).

In merito alle Attività Principali, le varie sezioni costituenti possono essere individuate secondo quanto riportato, in forma sintetica, nella *Tabella 2*. Nella stessa tabella sono riportate nella colonna di destra i componenti principali di norma presenti nella corrispondente fase dell'Attività Principale o "sezione". Si precisa che per quanto riguarda l'apparecchiatura di combustione della sezione "Forno/Generatore di vapore" viene qui, come pure nel seguito, fatto riferimento al sistema di combustione a griglia, che risulta di gran lunga il più diffuso per il trattamento dei rifiuti urbani a livello nazionale. Va da sé che il tipo di apparecchiatura di combustione dovrà in ogni caso essere dichiarato e che per sistemi di diversa tipologia (letto fluido, tamburo rotante, ecc.) dovranno essere riportate le corrispondenti voci.

Nella voce "Altro", relativa alle Attività Principali, dovranno essere inclusi tutti quei sistemi, componenti ovvero veri e propri impianti presenti nel sito, la cui funzione non risulta strettamente connessa con le attività d'incenerimento individuate dalle quattro macro sezioni costituenti, riportate in dettaglio nella tabella I. In particolare dovranno essere inclusi:

- i. sistemi, componenti e/o impianti che risultano correlati all'incenerimento quali, ad esempio, la selezione meccanica dei RUI con biostabilizzazione della frazione organica, la produzione di CSS/CDR, il pretrattamento (es.: essiccamento) di fanghi e/o altri rifiuti speciali, il trattamento di scorie/ceneri, il trattamento delle acque reflue di processo, ecc;
- ii. sezioni, componenti e/o impianti complementari all'incenerimento con recupero energetico quali, ad esempio, le caldaie ausiliarie asservite a una rete di teleriscaldamento;
- iii. altre installazioni presenti in loco, ma non correlate con l'incenerimento quali, ad esempio, impianti di compostaggio, di trattamenti post RD, di trattamento di acque reflue per conto terzi, ecc..



LEGENDA

* Rifiuti urbani indifferenziati in caso di assenza di pre-trattamenti

** Frazione organica da RD, scarti agro-alimentari, verde

Impianto d'incenerimento rifiuti, oggetto della diagnosi energetica in esame

Altri impianti presenti in loco, oggetto di altra diagnosi energetica

Figura 5 – Esempio di sito caratterizzato dalla presenza di più impianti o sezioni [Linee Guida Utilitalia].

ATTIVITÀ PRINCIPALI	
Sezione	Componenti
Movimentazione/ Alimentazione rifiuti	Sistema di scarico rifiuti. Sistema di movimentazione carroponi. Sistemi di triturazione e/o apertura balle (eventuali).
Forno/Generatore di vapore	Sistema di ventilazione aria primaria, secondaria e ricircolo fumi. Sistema movimentazione griglia ⁵ e raffreddamento. Bruciatori di postcombustione. Sistema di pulizia caldaia. Sistema di evacuazione, spegnimento, trasporto e stoccaggio scorie.
Ciclo termico ⁶	Sistema di condensazione. Sistema di estrazione condense. Sistema di acqua alimento caldaia. Degasatore. Quadro controllo turboalternatore.
Depurazione fumi	Sistema di estrazione fumi. Sistemi di rimozione polveri e abbattimento inquinanti. Sistema di stoccaggio, alimentazione e dosaggio chemicals. Sistemi di convogliamento, trasporto e stoccaggio ceneri.
Altro (da specificare)	Pretrattamento rifiuti (selezione meccanica/ biostabilizzazione, produzione CSS/CDR, essiccamento fanghi e/o altri rifiuti speciali). Trattamento scorie/ceneri. Trattamento acque reflue di processo. Sezioni di impianto complementari (es. Caldaie ausiliarie/ TRL). Altri impianti presenti in loco (Compostaggio, Trattamento post Raccolta differenziata, etc.). Etc.

Tabella 2 - Individuazione delle Attività Principali e dei relativi componenti primari.

⁵ Per apparecchiature di combustione diverse dal forno a griglia vanno riportate le corrispondenti voci applicabili.

⁶ Per il ciclo termico è importante indicare i livelli di pressione del ciclo vapore e la pressione di condensazione.

I consumi energetici dovranno essere definiti per ciascuna sezione, fermo restando che, laddove siano disponibili misure, è auspicabile la compilazione dei dati relativi ai componenti più rilevanti. In merito alle Attività Principali occorre rilevare che spesso gli impianti, soprattutto quelli di maggiori dimensioni, sono realizzati in due o più linee operanti in parallelo per quanto riguarda la “linea fumi” che va dal forno/generatore di vapore al camino, mentre la produzione di energia elettrica risulta, di norma, centralizzata.⁷

In linea generale si può ritenere accettabile per gli impianti multilinea una diagnosi energetica che prenda in esame il ciclo produttivo nel suo complesso, lasciando la scelta operativa a discrezione del singolo gestore.

È comunque auspicabile che, qualora sussistano le condizioni idonee per un’analisi di maggiore dettaglio (ad esempio in termini di configurazione impiantistica, taglia, disponibilità di misure, ecc.), le varie fasi operative vengano esaminate a livello di singola linea, soprattutto nel caso di impianti di maggiori dimensioni.

Inoltre per permettere di classificare in maniera più consapevole i vari impianti è opportuno riportare all’interno del rapporto di diagnosi anche eventuali interventi di efficientamento realizzati ed anno di realizzazione. La cosa migliore sarebbe indicare nel rapporto la macro-sezione che ha subito interventi importati, la tipologia di intervento e l’anno di intervento.

5.2.2.2 Servizi Ausiliari

In questa area devono confluire sia le attività caratterizzate dalla trasformazione del vettore energetico in ingresso in altrettanti vettori energetici diversi e che sono utilizzati nell’ambito delle aree funzionali delle Attività Principali, che i processi o le utenze asservite ai processi dell’Attività Principale o che ne permettono il corretto funzionamento [2].

Esempio classico è la centrale di aria compressa che utilizza energia elettrica (vettore energetico in ingresso) per produrre aria compressa che viene utilizzata dagli azionamenti presenti nel processo aziendale.

7 La realizzazione di impianti su più “linee fumi” operanti in parallelo può essere conseguenza di esigenze progettuali e/o operative (soprattutto negli impianti di maggiori dimensioni) oppure di ristrutturazioni e/o ampliamenti succedutisi nel tempo. Nel primo caso si è di solito in presenza di linee identiche che potrebbero però presentare consumi diversi, a causa di specifici malfunzionamenti o anomalie. Nel secondo caso possono anche verificarsi configurazioni più variegata per forma e dimensioni delle linee, per le quali potrebbe essere opportuna un’analisi individuale.

Per quanto riguarda l'attività di incenerimento dei rifiuti tra i Servizi Ausiliari è possibile individuare (Tabella 3):

- Aria compressa;
- Produzione acqua di processo/DEMI;
- Altro.

In particolare, l'area funzionale "Altro" dei Servizi Ausiliari comprende le seguenti fasi:

- ✓ Sistema antincendio;
- ✓ Gruppo elettrogeno;
- ✓ SME/DCS;
- ✓ Perdite.

SERVIZI AUSILIARI
Produzione Aria compressa.
Produzione acqua di processo DEMI.
Altro: Sistema antincendio, gruppo elettrogeno, SME/DCS, stoccaggio/distribuzione (eventuali) di combustibili liquidi, perdite, ecc.

Tabella 3 – Individuazione dei principali Servizi Ausiliari.

5.2.2.3 Servizi Generali

In tale descrizione vanno inserite tutte le attività che sono in qualche modo legate alle Attività Principali i cui fabbisogni però non sono ad essi strettamente correlati. In questo contesto entrano in gioco l'illuminazione, il riscaldamento, la climatizzazione in generale, gli uffici, la mensa, gli spogliatoi, etc. Per ognuna delle suddette macro-aree vanno inserite nella maschera informatica predisposta gli specifici consumi energetici [2].

Per quanto riguarda l'attività di incenerimento dei rifiuti tra i Servizi Generali è possibile individuare:

- ☞ Illuminazione;
- ☞ Climatizzazione/Riscaldamento ambienti;
- ☞ Acqua calda sanitaria.

Inoltre, anche per i Servizi Generali è possibile individuare un reparto “Altro” che può comprendere le seguenti fasi:

- Alimentazione officina, magazzini;
- Altri servizi minori.

SERVIZI GENERALI	
Tipologia Servizio	Area
Illuminazione	Impianto produttivo. Uffici. Aree esterne.
Climatizzazione ambienti	Uffici. Eventuali altre Aree (es. Mensa).
Altro (da specificare)	Servizi Minori. Alimentazione officina, magazzini. Etc..

Tabella 4 - Individuazione dei principali Servizi Generali.

5.3 Gli Indici di Prestazione Energetica (IPE)

In considerazione della finalità primaria dell'impianto d'incenerimento, gli Indici di Prestazione Energetica (IPE) da prendere in esame sono quelli principalmente riferiti ai consumi dei vettori energetici utilizzati per il trattamento termico dei rifiuti. Tuttavia possono essere presi in considerazione anche uno o più indicatori relativi alla produzione di energia elettrica e/o termica, derivante dalla combustione dei rifiuti.

A riguardo si richiama l'attenzione sull'opportunità di impiegare, in entrambi i casi, dei valori quanto più attendibili per i poteri calorifici inferiori dei combustibili e soprattutto per quello dei rifiuti (vedi *Appendice A*), che influenza direttamente e in maniera rilevante la definizione degli Indici di Prestazione Energetica (IPE), riferiti sia ai consumi che alle produzioni.

Va sottolineato che in tema di consumi, ma soprattutto di produzioni, le prestazioni degli impianti d'incenerimento sono influenzate dal fattore di scala

dimensionale, ossia dalla taglia dell'impianto. Come già detto, la taglia viene individuata dal carico termico espresso in MW; il suo integrale nel periodo di riferimento per l'esecuzione della diagnosi energetica, l'"apporto energetico dei rifiuti" espresso in MWh costituisce la "produzione" dell'impianto in esame.

Tenuto conto dell'ampia variazione di dimensioni (correlate con la capacità di trattamento e recupero energetico) che caratterizza l'impiantistica nazionale, soprattutto nel settore dei rifiuti urbani, ne conseguirebbe che la definizione di valori di riferimento dovrebbe essere eseguita per almeno due o più classi di taglia.

Allo stato attuale si ritiene tuttavia opportuno fare riferimento, ai fini della definizione degli IPE dei consumi e della produzione, a dei valori medi in analogia a quanto riportato nel "*BRef on Waste Incineration*" che costituisce il documento di riferimento di settore per l'applicazione delle migliori tecniche disponibili.

In pratica è possibile, sia per i consumi che per le produzioni, individuare dei valori medi compresi in un intervallo definito da un minimo e un massimo. Questo perché, nonostante la taglia influisca sulle prestazioni energetiche di un impianto, la categorizzazione in fasce di potenza (carico termico) prestabilite potrebbe dare luogo a casi di difficile attribuzione, dovuti sia a caratteristiche costruttive che a variazioni succedutesi nel tempo a seguito di operazioni di ristrutturazione o ampliamento. In futuro, a seguito della disponibilità di diagnosi energetiche redatte in accordo alla presente linea guida, sarà possibile individuare parametri comuni alle diverse tipologie di impianto al fine di stabilire criteri adeguati alla suddivisione per taglia e disporre di un quadro più rappresentativo del parco impiantistico presente sul territorio nazionale.

5.3.1 Indici di Prestazione Energetica generali

In merito agli Indici di Prestazione Energetica generali (IPEg) riferiti ai consumi, la destinazione d'uso generale, come detto, è costituita dai MWh complessivi associati al quantitativo totale di rifiuti trattati nel periodo di riferimento.

Ad esempio, nel caso dell'energia elettrica l'Indice di Prestazione Energetica generale sui consumi (IPEgc) sarà dato dal rapporto adimensionale (kWh/MWh) fra i consumi totali (energia prelevata da rete sommata all'energia

consumata proveniente da autoproduzione) e l'apporto energetico dei rifiuti. Per la determinazione degli effettivi consumi di energia si raccomanda di fare riferimento a quanto riportato nell'Appendice A.

A titolo non esaustivo per i consumi possono essere individuati gli IPEg riportati in *Tabella 5*.

Vettore	IPEgc	u.m.
Energia Elettrica	Consumo E.E./apporto energetico rifiuti	kWh/MWh
Gas naturale	Consumo gas naturale/apporto energetico rifiuti	Sm ³ /MWh
Gasolio	Consumo gasolio/apporto energetico rifiuti	t/MWh
Altro	Consumo vettore/apporto energetico rifiuti	u.m. vettore/MWh

Tabella 5 - Indici di Prestazione Energetica generali riferiti ai consumi (IPEgc).

Per quanto riguarda i consumi da prendere in considerazione per la IPEgc:

- I. per l'energia elettrica: prelievo da rete sommato al consumo da autoproduzione;
- II. per il gas naturale (o altro combustibile): consumo complessivo, indipendentemente dal fatto che dia luogo o meno a produzione di energia (E.E.+E.T.) attraverso la produzione di vapore.

Inoltre, dovranno essere individuati anche specifici Indici di Prestazione Energetica di area (o sezione di impianto) come rapporto tra i consumi di area rilevati e la specifica destinazione d'uso⁸.

⁸ Ad esempio per la produzione di aria compressa (servizio ausiliario) si potrà definire il consumo specifico di energia elettrica riferito alla produzione della stessa, espresso in kWh/Nm³.

5.3.2 Indici di Prestazione Energetica generali

Analogamente volendo individuare degli Indici di Prestazione Energetica generali relativi alle produzioni (IPEgp) si possono definire come in *Tabella 6*.

Vettore	IPEgp	u.m.
Energia Elettrica	Produzione E.E./apporto energetico rifiuti	MWh/MWh (%)
Energia Elettrica	E.E. netta esportata/apporto energetico rifiuti	MWh/MWh (%)
Energia Termica	Produzione E.T./apporto energetico rifiuti	MWh/MWh (%)
Altro	Produzione vettore/apporto energetico rifiuti	u.m. vettore/MWh

Tabella 6 - Indici di Prestazione Energetica generali riferiti alle produzioni (IPEgp).

Si sottolinea il fatto che adottando un approccio analogo a quello del BRef, gli Indici di Prestazione Energetica riportati in *Tabella 6* costituiscono di fatto un rendimento percentuale (lordo o netto a seconda che si prenda in esame l'energia prodotta o quella netta esportata/immessa in rete) nel quale al denominatore compare il solo apporto energetico dei rifiuti⁹.

È tuttavia auspicabile affiancare agli indici sopra definiti, a discrezione del responsabile della diagnosi energetica (REDE)¹⁰, altri indici, calcolati tenendo conto anche del combustibile fossile utilizzato nel ciclo di produzione principale, ad integrazione dell'apporto energetico dei rifiuti. In quest'ottica un indicatore prestazionale di sicuro interesse è quello definito come rapporto tra l'energia primaria resa (sotto forma di produzione di energia elettrica e/o termica) e il totale complessivo di energia associata sia ai vettori energetici in ingresso all'impianto, sia ai rifiuti che costituiscono l'apporto energetico di gran lunga predominante.

⁹ Non viene preso in esame, in analogia a quanto adottato nel BRef, il contributo del combustibile ausiliario in camera di postcombustione che, come si è visto, risulta piuttosto limitato.

¹⁰ Il responsabile della diagnosi energetica o energy auditor è la figura professionale che esegue ed è responsabile della diagnosi energetica. Può essere un singolo professionista o una società di servizi energetici. Il soggetto responsabile della comunicazione dei risultati della diagnosi energetica è invece il legale rappresentante dell'impresa soggetta all'obbligo.

In pratica l'Indice di Prestazione Energetica generale IPEgp¹¹ (adimensionale) sarebbe definito dal seguente rapporto:

$$IPEgp = \frac{(E.El.exp[MWh] * 0,187 + E.Th.exp[MWh] * 0,095)}{\sum E.C.ing.inc. [tep]}$$

dove:

- *E.El.exp* = Energia Elettrica netta esportata (ceduta alla rete) [MWh];
- *E.Th.exp* = Energia Termica utile esportata [MWh];
- *E.C.ing. inc.* = Energia associata ai vettori energetici in ingresso all'impianto e all'apporto energetico dei rifiuti [tep].

A denominatore si dovrà tenere conto del contributo in energia primaria di tutti i vettori energetici (energia elettrica, combustibili fossili, ecc.) in ingresso all'impianto e dell'apporto energetico dei rifiuti, che costituisce la componente predominante. Tale termine dovrà essere espresso in tep, mediante l'impiego di opportuni fattori di conversione.

A titolo puramente informativo vengono riportati ulteriori Indici di Prestazione Energetica generali riferiti alla produzione di energia elettrica/termica. Nel caso di sola produzione di energia elettrica può essere fatto riferimento al rendimento di produzione di energia elettrica espresso dal rapporto tra l'energia elettrica ai morsetti dell'alternatore e l'apporto energetico dei rifiuti al quale va sommato il contributo del(i) combustibile(i) ausiliario(i) utilizzato(i) nella camera di post-combustione, in condizioni di regime.

$$\eta_{El} = E.El.p./ \left(W_w * PCI_w + \frac{\sum F_f * PCI_f}{3,6 * 10^6} \right)$$

dove:

- η_{El} = rendimento lordo [%];
- *E.El.p* = Energia Elettrica ai morsetti dell'alternatore [MWh];
- *W_w* = quantitativo totale di rifiuti trattati [t];

¹¹ In pratica si verrebbe ad adottare un approccio analogo a quello già impiegato nella definizione della cosiddetta "Formula RI" di cui alla Direttiva 2008/98/CE, adottando dei coefficienti di conversione in energia primaria riferiti al contesto nazionale. In particolare per quanto riguarda l'energia termica il coefficiente di conversione nella formula (3) è stato ricavato assumendo un rendimento convenzionale del generatore di vapore pari a 0,9.

- PCI_w = potere calorifico dei rifiuti trattati [MWh/t];
- F_f = quantitativo totale di combustibile consumato [Sm³] o [kg];
- PCI_f = potere calorifico del combustibile [kJ/ Sm³] o [kJ/kg].

Se nella formula precedente si sostituisce a numeratore il valore dell'energia esportata, depurata cioè di quella autoconsumata, viene individuato il rendimento netto.

In caso di produzione combinata di energia elettrica e termica è possibile fare riferimento al rendimento energetico totale (lordo) definito dal rapporto (somma dell'energia elettrica ai morsetti e dell'energia termica prodotta) / (apporto energetico dei rifiuti e contributo del(i) combustibile(i) ausiliario(i) utilizzato(i) nella camera di combustione).

$$\eta_{El+Th} = (E.El.p. + E.Th.p.) / \left(W_w * PCI_w + \frac{\sum F_f * PCI_f}{3,6 * 10^6} \right)$$

dove:

- η_{El+Th} = rendimento lordo [%];
- $E.El.p$ = Energia Elettrica ai morsetti dell'alternatore [MWh];
- $E.Th.p.$ = Energia Termica prodotta [MWh];
- W_w = quantitativo totale di rifiuti trattati [t];
- PCI_w = potere calorifico dei rifiuti trattati [MWh/t];
- F_f = quantitativo totale di combustibile consumato [Sm³] o [kg];
- PCI_f = potere calorifico del combustibile [kJ/ Sm³] o [kJ/kg].

In alternativa è possibile fare riferimento al rendimento elettrico equivalente definito come:

$$\eta_{El.Eq} = (E.El.p. + \beta * E.Th.p.) / F$$

dove:

- η_{El+Eq} = rendimento elettrico equivalente [%];
- $E.El.p$ = Energia Elettrica ai morsetti dell'alternatore [MWh];
- $E.Th.p.$ = Energia Termica prodotta [MWh];
- F = apporto energetico da rifiuti e combustibile(i) = $W_w * PCI_w + \sum F_f * PCI_f$;
- β = coefficiente caratteristico della turbina; esso dipende dai parametri termodinamici dello spillamento e rappresenta l'energia elettrica persa per produrre 1 MWh di energia termica.

Volendo scendere in un maggiore dettaglio e valutare separatamente l'efficienza di recupero del generatore di vapore e del ciclo termico, il rendimento (totale o equivalente) può essere determinato come prodotto tra il rendimento del generatore di vapore e del rendimento del ciclo termico (Rankine):

$$\eta_{El.Eq} = (\eta_{GV} * \eta_{CT})$$

dove:

- η_{GV} = rendimento del generatore di vapore;
- η_{CT} = rendimento del ciclo termico o di Rankine.

5.3.3 Indici di Prestazione Energetica specifici (IPEs)

Una volta definiti gli Indici di Prestazione Energetica generali, occorre procedere alla definizione per ciascuna sezione delle tre aree funzionali alla definizione di Indici di Prestazione Energetica specifici rappresentativi del funzionamento dell'impianto. Gli indici proposti costituiscono una base comune, necessaria soprattutto per l'effettuazione di analisi di settore e/o eventuali attività di *benchmarking*.

Tabella 7 - Indicatori prestazionali specifici dei consumi delle Attività Principali.

Attività Principali	IPEs,AP	u.m.
Movimentazione/ Alimentazione rifiuti	Consumo E.E. /Quantitativo di rifiuti alimentati al forno	kWh/t
Forno/Generatore di vapore	Consumo vettore ⁽¹⁾ / Apporto energetico rifiuti	(kWh)(Sm ³)(kg)/MWh
Ciclo termico	Consumo E.E. / Energia totale (E.E.+ E.T.) prodotta	kWh/tep
Depurazione fumi	Consumo vettore ⁽¹⁾ / Quantitativo in volume tal quale di fumi al camino	(kWh)(Sm ³)(kg)/kNm ³
Altro (da specificare) ⁽²⁾	n.d.	n.d.

dove:

(1) per Consumo vettore viene richiesto il consumo riferito al singolo vettore energetico in esame (kWh di energia elettrica, Sm³ di gas naturale, kg (o t) di gasolio, ecc.).

(2) nella voce "Altro" dovranno essere inclusi quei sistemi, componenti ovvero veri e propri impianti presenti nel sito ma non strettamente connessi con le Attività Principali dell'impianto di incenerimento individuate nella presente tabella. In tali casi dovranno essere definiti i pertinenti indicatori prestazionali o effettuate diagnosi energetiche ad hoc. Trattamenti preliminari di ridotta entità sui rifiuti da alimentare al forno (triturazione, apertura balle, ecc.) possono essere ricompresi nella sezione Movimentazione/Alimentazione rifiuti, preferibilmente evidenziandone la presenza.

A propria discrezione il responsabile della diagnosi energetica potrà definire anche ulteriori indici, in funzione di esigenze specifiche e della disponibilità di informazioni e dati.

Per quanto riguarda le Attività Principali i riferimenti per gli IPEs sono riportati in *Tabella 7*.

Per quanto riguarda invece i Servizi Ausiliari, individuati in *Tabella 3*, si riporta in *Tabella 8* una proposta di Indici di prestazione Energetica specifici applicabili in relazione alla relativa disponibilità di misure e dati.

Tabella 8 - Indici di Prestazione Energetica specifici dei consumi dei Servizi Ausiliari.

Servizi Ausiliari	IPE _{s,SA}	u.m.
Produzione aria compressa	Consumo E.E./Produzione aria compressa	kWh/Nm ³
Produzione acqua di processo/demineralizzata	Consumo E.E./Produzione acqua di processo/demineralizzata	kWh/m ³
Altro (da specificare) ⁽¹⁾	n.d.	n.d.

dove:

(1) Sistema antincendio, gruppo elettrogeno, SME/DCS, perdite, ecc.

Infine, per i Servizi Generali vengono individuati gli Indici di Prestazione Energetica specifici riportati in *Tabella 9*.

Tabella 9 - Indici di Prestazione Energetica specifici dei consumi dei Servizi Generali.

Servizi Generali	IPE _{s,SG}	u.m.
Illuminazione (impianto, uffici, aree esterne)	Consumo E.E./Superfici servite ⁽¹⁾	kWh/m ²
Riscaldamento/condizionamento uffici	Consumo vettore/Durata funzionamento	(kWh)(Sm ³)(kg) ⁽²⁾ / d
Altro (da specificare) ⁽³⁾	n.d.	n.d.

dove:

(1) Area totale a quota terreno + superfici a diversi piani di fabbricati/strutture. Se ritenuto significativo si può fare riferimento anche alle ore effettive di funzionamento per distinguere tra sistemi di illuminazione in servizio continuo e quelli in servizio notturno.

(2) Consumo riferito al singolo vettore energetico in esame (kWh di energia elettrica, Sm³ di gas naturale, kg (o t) di gasolio), in funzione della soluzione impiantistica adottata.

(3) Alimentazione officina/magazzini, ecc.

Tenuto conto del fatto che i Servizi Ausiliari e i Servizi Generali costituiscono, di norma, una quota minoritaria dei consumi totali di energia primaria degli impianti in esame, può essere adottata un'analisi di minore dettaglio.

5.4 Considerazioni sull'acquisizione, valutazione ed analisi dei consumi energetici ai fini della esecuzione della diagnosi energetica in un impianto d'incenerimento rifiuti

Le considerazioni riportate nel presente paragrafo vogliono fornire indicazioni di carattere generale per redigere un rapporto di diagnosi di qualità e sono state sviluppate facendo riferimento ai seguenti documenti:

- Allegato 2 del decreto legislativo 102/2014, aggiornato nel luglio 2020 dal D.Lgs. 73/2020;
- “Chiarimenti in materia di diagnosi energetica nelle imprese ai sensi dell'articolo 8 del decreto legislativo n. 102 del 2014” a cura del MiSE - edizione novembre 2016 [4];
- “Diagnosi Energetiche art. 8 del D.Lgs. 102/2014 Linee Guida e Manuale Operativo Clusterizzazione, il rapporto di diagnosi ed il piano di monitoraggio” pubblicate dall'ENEA [2].

5.4.1 Valutazione ed analisi dei consumi energetici

Nel momento in cui si decide di effettuare una diagnosi energetica all'interno di un sito produttivo, come visto nei paragrafi precedenti, non si possono trascurare alcuni aspetti fondamentali, quali:

- l'esame dei consumi relativi al generico vettore energetico V_j;
- l'esame dei consumi relativi alle tre aree energetiche funzionali (Attività Principali, Servizi Ausiliari, Servizi Generali);
- i livelli minimi di copertura dei dati misurati per ciascuna area energetica funzionale, in funzione dei consumi totali di riferimento [tep/anno] dell'impianto.

Il primo passo riguarda la caratterizzazione dei consumi di energia dell'impianto e la loro distribuzione all'interno delle tre aree energetiche funzionali individuate.

Di seguito si riportano, a titolo puramente informativo, le incidenze percentuali dei consumi di energia primaria e dei singoli vettori energetici V_j (nella maggior parte dei casi costituiti da energia elettrica e da gas naturale), messi a disposizione da alcuni gestori di impianti d'incenerimento nazionali¹². I dati sono stati raggruppati in relazione alle tre attività energetiche funzionali individuate ("Livello C") ed alle sezioni di impianto costituenti ("Livello D").

I valori riportati sono espressi come percentuale dei consumi totali dell'impianto che in questo caso viene identificato con il sito produttivo ("Livello B")¹³.

In particolare, nella *Tabella 10* è riportata la ripartizione percentuale dei consumi di energia primaria fra le tre aree funzionali. Tali valori, come pure quelli riportati nelle *Tablelle 11, 12 e 13*, sono da ritenersi puramente indicativi.

Essi possono costituire essenzialmente una base di partenza per indirizzare l'indagine; va da sé che per un'analisi più accurata dovranno essere impiegati i dati disponibili per lo specifico impianto in esame.

Tabella 10 - Incidenza dei consumi di energia primaria per le aree energetiche funzionali

Area funzionale	Medio	Minimo	Massimo
Attività Principali	85%	80%	> 90%
Servizi Ausiliari	12%	5%	15%
Servizi Generali	< 5%		

Nelle *Tablelle 11, 12 e 13* viene invece riportata la disaggregazione relativa alle macro voci costituenti le tre aree funzionali, rispettivamente per i consumi di energia primaria e per i due principali vettori energetici (energia elettrica e gas naturale).

Si può notare come la stragrande maggioranza dei consumi energetici risulti concentrata nelle Attività Principali, mentre per quanto riguarda i Servizi Ausiliari e quelli Generali l'unica voce di una certa rilevanza è costituita dalla produzione di aria compressa.

¹² *Nell'ambito del Gruppo di lavoro Utilitalia/ENEA sulla diagnosi energetica degli impianti d'incenerimento.*

¹³ *Vale a dire che non sono presi in esame in questo caso eventuali consumi riferibili alla voce "Altro" delle Attività Principali.*

Tabella 11 – Ripartizione dei consumi energetici all'interno dei principali reparti delle differenti aree funzionali.

	Reparto	Medio	Minimo	Massimo
ATTIVITÀ PRINCIPALI	Movimentazione/Alimentazione Rifiuti	5%	2,5%	7,5%
	Forno/Generatore di vapore	30%	20%	40%
	Ciclo termico	34%	28%	40%
	Depurazione fumi	25%	20%	35%
	Altro ⁽¹⁾	--	--	--
SERVIZI AUSILIARI	Produzione aria compressa	6%	3%	10%
SERVIZI GENERALI	Produzione acqua di processo/ demineralizzata	2%	< 1%	2%
	Altro ⁽²⁾	< 5%	< 5%	< 5%
	Illuminazione (impianto, uffici e aree esterne)	< 2%	< 2%	< 4%
	Riscaldamento/condizionamento uffici	< 2%	< 2%	< 4%
	Altro ⁽³⁾	< 2%	< 2%	< 2%

Dove:

(1) Pretrattamenti di ridotta entità sui rifiuti da alimentare al forno (triturazione ingombranti, apertura balle, ecc.) si ritengono inclusi nella sezione "Movimentazione/Alimentazione". Non sono qui presi in esame i consumi relativi a quanto definito come "Altro" nelle Attività Principali.

(2) Sistema antincendio, gruppo elettrogeno, SME/DCS, perdite, ecc.; valore stimato.

(3) Alimentazione officina, magazzini, ecc.; valore stimato.

Tabella 12 - Ripartizione dei consumi di energia elettrica all'interno delle aree funzionali.

	Reparto	Medio	Minimo	Massimo
ATTIVITÀ PRINCIPALI	Movimentazione/Alimentazione Rifiuti	5%	2,5%	7,5%
	Forno/Generatore di vapore	25%	15%	35%
	Ciclo termico	35%	20%	40%
	Depurazione fumi	25%	20%	35%
	Altro ⁽¹⁾	--	--	--

	Reparto	Medio	Minimo	Massimo
SERVIZI AUSILIARI	Produzione aria compressa	6%	3%	10%
	Produzione acqua di processo/ demineralizzata	2%	<1%	2%
SERVIZI GENERALI	Altro ⁽²⁾	< 3%	< 3%	< 3%
	Illuminazione (impianto, uffici e aree esterne)	< 2%	< 2%	< 4%
	Riscaldamento/condizionamento uffici	< 2%	< 1%	< 4%
	Altro ⁽³⁾	< 2%	< 1%	< 2%

Dove:

(1) Pretrattamenti di ridotta entità sui rifiuti da alimentare al forno (triturazione ingombranti, apertura balle, ecc.) si ritengono inclusi nella sezione "Movimentazione/Alimentazione". Non sono qui presi in esame i consumi relativi a quanto definito come "Altro" nelle Attività Principali.

(2) Sistema antincendio, gruppo elettrogeno, SME/DCS, perdite, ecc.; valore stimato.

(3) Alimentazione officina/magazzini, ecc.; valore stimato.

Tabella 13 - Ripartizione dei consumi di gas naturale all'interno delle aree funzionali.

	Reparto	Medio	Minimo	Massimo
ATTIVITÀ PRINCIPALI	Forno/Generatore di vapore	85%	70%	100% ca
	Depurazione fumi	13%	0%	26%
	Altro(1)	--	--	--
SERVIZI GENERALI	Riscaldamento/ condizionamento uffici	< 2%	< 1%	< 10%

Dove:

(1) Pretrattamenti di ridotta entità sui rifiuti da alimentare al forno (triturazione ingombranti, apertura balle, ecc.) si ritengono inclusi nella sezione "Movimentazione/Alimentazione.". Non sono qui presi in esame i consumi relativi a quanto definito come "Altro" nelle Attività Principali.

Per quanto riguarda i livelli minimi di copertura dei dati misurati per ciascuna area energetica funzionale da riportare ai consumi totali di riferimento (tep/a) dell'impianto, di seguito vengono fornite alcune indicazioni sul dettaglio della valutazione dei consumi e dell'analisi del flusso dei vettori energetici, nonché del livello di copertura mediante misure dei parametri energetici. In tale contesto si

farà riferimento alla struttura energetica aziendale proposta dall'ENEA [2], ed ai documenti di chiarimento del MISE [4].

Come già accennato, occorre dapprima individuare, sulla base dei dati e delle misure disponibili per l'impianto in esame, l'incidenza percentuale dei consumi di ciascun vettore energetico utilizzato rispetto ai consumi totali. Verranno analizzati nel dettaglio della diagnosi energetica esclusivamente i vettori che incidono per più del 5% rispetto ai consumi totali; analogamente si procederà a coprire con misure, con le modalità precedentemente individuate, esclusivamente i vettori la cui incidenza sui consumi totali risulti superiore al 10% (vedi Linee guida ENEA)[2].

Scendendo di livello si dovrà analizzare, con gli stessi criteri precedentemente esposti, l'incidenza percentuale di ciascuna delle tre aree funzionali in riferimento a ciascun vettore energetico utilizzato (energia elettrica, gas naturale, gasolio, ecc.).

A questo scopo si farà riferimento, a titolo esemplificativo e per chiarezza di esposizione, ai valori riportati nelle tabelle da *Tabella 10* a *Tabella 13*.

Dall'analisi dei dati tabellati si può notare come i Servizi Generali presentano, di norma, un'incidenza inferiore al 5% dei consumi totali di energia primaria (vedi *Tabella 10*). Analoga incidenza viene confermata anche per ogni singolo vettore (vedi *Tabella 12* e *Tabella 15*)¹⁴; pertanto essi costituiscono un'area funzionale non soggetta a successive indagini.

In pratica non viene richiesto la suddivisione delle varie voci componenti (illuminazione, condizionamento/riscaldamento, ecc.) né sono necessarie misure, salvo esigenze specifiche del singolo caso, a discrezione del responsabile della diagnosi energetica. In questo caso non può essere definita una destinazione d'uso specifica, ma si dovrà fare riferimento alla destinazione d'uso generale ai fini della individuazione degli Indici di Prestazione Energetica, fatta salva la facoltà, se ritenuto utile, di fare riferimento anche ad altri parametri (es.: m² di superficie servita).

Questa regola di carattere generale, ripresa dall'Allegato 2 al documento del

¹⁴ Come già detto in precedenza, i valori riportati nelle tabelle da *Tabella 10* a *Tabella 13* sono indicativi e possono costituire un mero riferimento di primo tentativo, in caso di oggettiva assenza di dati. È ovvio che, caso per caso, si dovrà fare riferimento agli effettivi valori caratteristici dello specifico impianto ripresi, ad esempio, dai risultati della precedente diagnosi energetica.

MiSE “Chiarimenti in materia di diagnosi energetica nelle imprese ai sensi dell’articolo 8 del decreto legislativo n. 102 del 2014 - edizione novembre 2016”[4] porta dunque a concludere che negli impianti d’incenerimento di rifiuti per l’analisi energetica dei Servizi Generali è, di norma, sufficiente determinare il totale delle varie voci costituenti, anche senza ricorrere a misure.

In tema di misure, queste vengono espressamente richieste, come si è detto, per i vettori energetici i cui consumi complessivi risultano superiori al 10% dei consumi totali di energia primaria dell’impianto.

Per quanto riguarda invece i consumi relativi alle singole aree funzionali viene richiesta la misura nei casi in cui i consumi del generico vettore energetico V_j all’interno della specifica area funzionale risultano superiori del 10 % dei consumi totali d’impianto dello stesso vettore.

Quanto esposto viene sintetizzato nella *Tabella 14*, riportata di seguito.

Tabella 14 - Requisiti minimali per l’effettuazione dell’analisi energetica.

		Incidenza percentuale dei consumi (I)					
		I < 5%		5% < I < 10%		I > 10%	
Esame	Riferimento	Analisi di dettaglio	Misure	Analisi di dettaglio	Misure	Analisi di dettaglio	Misure
Vettore energetico V_j	% consumi totali energia primaria [tep]	NO		SI	NO	SI	
Area funzionale (AP, SA, SG)	% consumi totali vettore V_j [tep]	NO		SI	NO	SI	

Dove:

V_j = generico vettore energetico (energia elettrica, gas naturale, gasolio, ecc.);

AP = Attività Principali;

SA = Servizi Ausiliari;

SG = Servizi Generali.

Si ricorda inoltre che una volta individuati i vettori energetici e le aree oggetto di monitoraggio, occorre assicurare un livello minimo percentuale di copertura

delle misure specifico per ciascuna delle aree funzionali che dipende dai consumi totali dell'impianto, secondo quanto riportato nella *Tabella 15*, ripresa dalle Linee Guida dell'ENEA [4].

Tabella 15 - Livelli minimi di copertura richiesti per il monitoraggio dei consumi

Consumi anno di riferimento (tep/a)		Attività Principali	Servizi Ausiliari	Servizi Generali
> 10.000		85%	50%	20%
8.900	10.000	80%	45%	20%
7.800	8.899	75%	40%	20%
6.700	7.799	70%	35%	20%
5.600	6.699	65%	30%	20%
4.500	5.599	60%	25%	10%
3.400	4.499	55%	20%	10%
2.300	3.399	50%	15%	10%
1.200	2.299	45%	10%	5%
100	1.199	40%	5%	5%

Esempio:

Un impianto di incenerimento presenta consumi di energia primaria pari a 5.450 tep, così ripartiti:

- Energia elettrica (inclusi i consumi da autoproduzione): 5.000 tep, pari al 91,7% dei consumi totali;
- Gas naturale: 450 tep, pari all'8,3% dei consumi totali.

In questo caso si può già assumere che per il gas naturale è sufficiente procedere solo ad un'analisi dei consumi energetici (in quanto risultano superiori al 5% del totale), ma non è espressamente necessario eseguire delle misure per tale vettore (in quanto sono inferiori al 10% del totale).

Per quanto riguarda invece l'energia elettrica si riscontrano i seguenti consumi:

- Attività Principali: 4.325 tep, pari all'86,5% dei consumi totali di energia elettrica dell'impianto;

- Servizi Ausiliari: 450 tep, pari al 9,0% dei consumi totali di energia elettrica dell'impianto;
- Servizi Generali: 225 tep, pari al 4,5% dei consumi totali di energia elettrica dell'impianto.

In base a quanto affermato in precedenza ne consegue che per tale vettore i requisiti minimali richiesti per l'analisi energetica risultano essere:

- Servizi Generali: questa area funzionale non necessita di ulteriori indagini di dettaglio. In particolare non sono richieste misure dei consumi di E.E., né la loro ripartizione tra le varie voci costituenti. I consumi possono riportati accorpati e riferiti alla destinazione di uso generale (MWh di rifiuti alimentati al forno);
- Servizi Ausiliari: per questa area funzionale occorre procedere ad un'analisi delle varie voci costituenti (consumi del vettore E.E. > 5% dei consumi totali di E.E.), ma non è espressamente richiesta la relativa misura (consumi del vettore E.E. < 10% dei consumi totali di E.E.). Tuttavia essendo la maggior parte dei consumi ascrivibili alla produzione di aria compressa, si raccomanda la misura dei consumi dovuti a questa voce, nonché della relativa produzione, espressa in Nm³;
- Attività Principali: in questo caso occorre procedere sia a un'analisi delle varie voci costituenti, sia alla misura quantomeno di quelle che presentano un consumo > 10% dei consumi totali di E.E.). Ad esempio, assumendo valide le ripartizioni riportate nella Tabella 12, occorrerà procedere alla misura dei consumi delle sezioni Forno/Generatore di vapore, Ciclo termico e Depurazione fumi. A questo programma di misura può essere eventualmente associato quanto riportato nelle linee guida ENEA [4] in merito ai livelli di copertura delle misurazioni da effettuare. Applicando tali criteri al caso in esame, essendo i consumi totali di energia primaria pari a 5.450 tep, sarebbe richiesto un livello minimo di copertura dei dati misurati pari al 60% (vedi *Tabella 15*).

Ovviamente un analogo approccio si sarebbe dovuto applicare anche al gas naturale, qualora i consumi di tale vettore fossero stati maggiori del 10% dei consumi totali di energia primaria dell'impianto.

Le considerazioni sin qui svolte fanno riferimento al caso in cui l'impianto d'incenerimento, così come definito tramite le quattro macro-sezioni individuate precedentemente per quanto concerne le Attività Principali, costituisca l'unica installazione presente nel sito oggetto della diagnosi energetica.

Qualora invece l'incidenza di sezioni, componenti e/o impianti elencati sotto la voce "Altro" delle Attività Principali risulti rilevante, ne consegue che quanto appena discusso in merito ai requisiti minimali per l'effettuazione dell'analisi energetica, riassunti nella *Tabella 14*, debba intendersi esteso all'intero sito oggetto della diagnosi energetica, ferma restando, ove possibile, l'esigenza di effettuare un'analisi dedicata delle prestazioni (consumi/produzioni) dell'impianto d'incenerimento.

Analogamente per quanto riguarda i livelli di copertura dei dati misurati in questo caso occorrerà fare riferimento a quanto riportato nelle Linee Guida ENEA [4], prendendo in considerazione le prestazioni energetiche (consumi totali/produzioni totali) riguardanti l'intero sito in esame.

5.4.2 Programma di misure da effettuare ai fini della esecuzione della diagnosi energetica

In questo paragrafo di vengono proposte e illustrate delle indicazioni di carattere generale per la predisposizione di un programma di misure da effettuare ai fini della esecuzione della diagnosi energetica.

Si precisa che in caso di certificazione volontaria in "Sistemi di gestione dell'energia", le misure saranno quelle definite nell'ambito di adesione allo schema ISO 50001 purché conformi a quanto prescritto nell'allegato 2 al D.Lgs 102/2014 (aggiornato dal D.Lgs. 73/2020).

Con riferimento alla redazione di una diagnosi energetica per un sito produttivo, occorre prendere in considerazione e disporre di "misure" per i vettori energetici e, più in generale, per tutte quelle grandezze che hanno un rilievo ai fini della diagnosi stessa.

Per quanto riguarda la misura complessiva dei vettori energetici e/o di grandezze energetiche entranti in un sito oggetto di analisi, sono sicuramente da prendere

in considerazione le misure:

- a. fornite mensilmente dai gestori di rete (con specifico riferimento alle forniture di energia elettrica e gas naturale);
- b. acquisite dai dati tecnici di fatturazione mensile (forniture di energia elettrica, gas naturale, gpl, gasolio, calore, ecc.);
- c. acquisite dai sistemi contatermie per fluidi termovettori;
- d. in generale, relative a dati fiscali, registrati con appositi sistemi ed applicativi software per gli adempimenti previsti dalle norme (es. pese fiscali per la misura delle quantità di rifiuti in ingresso).

Per quanto concerne la determinazione di altre grandezze energetiche (come, ad esempio, l'energia entrante in un sistema con un combustibile o con i rifiuti), per le quali non risultano disponibili misure come quelle indicate ai punti da a) a d) di cui sopra, è possibile sfruttare i sistemi di supervisione e controllo tipo DCS (*Distributed Control System*) o, in alcuni casi, PLC (*Programmable Logic Controller*), di cui gli impianti d'incenerimento risultano di norma dotati. Tali sistemi si basano sull'acquisizione di misure e di stati provenienti dalla strumentazione installata nei vari punti del processo. Le informazioni acquisite possono essere gestite tramite controlli automatici (mediante logiche software), ovvero possono fornire indicazioni agli operatori in sala controllo allo scopo di intervenire direttamente sul processo attraverso comandi o variazioni di parametri impostati ("set-point"), basati sempre su logiche software. Ciò comporta che, di norma, è disponibile una vasta mole di informazioni acquisite da tali sistemi di supervisione (DCS/PLC) ai fini della regolazione e monitoraggio del funzionamento dell'impianto.

In alcuni casi, l'energia entrante deriva da calcolo, partendo dalla misura di alcuni parametri (es.: PCI, in base a norme tecniche specifiche) e di grandezze (es.: portata combustibile), ovvero da bilanci termodinamici indiretti, in particolare nel caso dei rifiuti (vedi *Appendice A*).

Alla luce di queste premesse, si può affermare che nel concetto di "misura" possano essere ricondotte, oltre ai dati di cui ai punti a), b), c) e d) già menzionati anche quelle misure "indirette" di grandezze energetiche, determinate a partire da misure dirette di alcuni parametri di funzionamento dell'impianto, applicando formule o algoritmi previsti dalla bibliografia tecnica. A riguardo, un caso tipico

è costituito dall'impiego dei bilanci termodinamici indiretti.

Questo approccio risulta fondamentale laddove non esistano misuratori integrati di energia, ovvero non siano proprio possibili misure dirette e, più in generale, consentirebbe di sfruttare quanto già reso disponibile dai sistemi DCS/PLC. Se necessario è possibile apportare le eventuali modifiche e integrazioni software finalizzate all'esecuzione della diagnosi energetica.

È da rilevare inoltre che i sistemi DCS/PLC opportunamente modificati e integrati consentono di acquisire misure di consumo energetico di intere sezioni di impianto e/o di singole apparecchiature, riconducibili ai livelli "C" e "D" di cui alla struttura energetica del sito.

Ad esempio, la disponibilità delle misure di assorbimento di corrente delle apparecchiature e delle tensioni di sbarra da cui l'utenza è alimentata, consente la determinazione della potenza assorbita mediante l'applicazione di un fattore di potenza nominale e/o caratteristico per l'utenza in questione in relazione alle modalità di utilizzo nel processo (fattore di carico). L'energia elettrica assorbita, integrale nel tempo della potenza, può quindi essere determinata conoscendo il numero di ore di funzionamento dell'apparecchiatura.

Talune misure indirette possono essere registrate e acquisite tramite dei sistemi di azionamento a velocità variabile (*inverter*). E' ormai diffuso l'impiego di *inverter* con interfaccia di supervisione e controllo in grado di fornire in tempo reale la potenza elettrica assorbita dall'utenza, informazione che può essere acquisita e registrata dai sistemi DCS/PLC.

A tali misure indirette, possono essere sempre affiancate le misure dirette in continuo, oppure in discontinuo. Quest'ultime debbono essere caratterizzate da un elevato grado di rappresentatività, vale a dire che misure effettuate in un intervallo temporale piuttosto ristretto possano essere ritenute significative per rappresentare un intervallo temporale più ampio.

Le misure dirette in continuo o quelle dirette in discontinuo vengono effettuate rispettivamente con strumentazione fissa e portatile. Le misure dirette non necessariamente devono essere effettuate con strumenti fiscali.

Allo stesso modo possono essere ritenute accettabili misure ottenute come somma di misure dirette. Pertanto, per quanto riguarda le misure di energia/

vettori energetici/grandezze possono essere prese in esame:

- ☞ misure derivanti nell'ambito di contratti di fornitura (energia elettrica, gas naturale, gpl, gasolio, fluidi termovettori, ecc.);
- ☞ misure dirette di energia effettuate in continuo;
- ☞ misure indirette di energia effettuate in continuo (calcolate con formule fisiche, a partire da parametri e grandezze elementari);
- ☞ misure dirette di energia effettuate in discontinuo;
- ☞ misure indirette di energia effettuate in discontinuo.

Per quanto riguarda il concetto di stima, questa è da intendersi come la determinazione del consumo di energia mediante l'impiego di formule, opportunamente giustificate, basate su grandezze fisiche o dati di funzionamento effettivi e/o teorici di cui non si possiede una misura diretta (es.: stima del consumo di riscaldamento in funzione del numero degli addetti mediamente presenti ogni giorno).

5.4.3 Il rapporto di diagnosi energetica

Il rapporto di diagnosi energetica è un documento riepilogativo all'interno del quale vengono riportate tutte le informazioni necessarie alla caratterizzazione energetica del sito oggetto dell'Audit e tutte le eventuali proposte per interventi di efficientamento energetico, scaturiti dall'audit del sito.

In particolare, come cita la norma UNI EN 16247 – I [5], il rapporto deve essere redatto tenendo conto di una serie di condizioni fondamentali:

- I. deve contenere le informazioni e analisi concordate con il cliente in fase di incontro preliminare;
- II. deve riassumere le principali misurazioni effettuate nell'ambito della diagnosi energetica, con commenti relativi a:
 - » qualità e coerenza dei dati;
 - » il fondamento logico delle misurazioni effettuate e come esse contribuiscono all'analisi prodotta;
 - » eventuali criticità riscontrate;

- III. indicare se i risultati dell'analisi siano basati o meno su calcoli, simulazioni o stime;
- IV. deve riassumere e motivare le analisi e le assunzioni fatte;
- V. deve dare indicazioni sui limiti di accuratezza delle stime fatte soprattutto in merito alle stime di risparmio;
- VI. deve presentare una graduatoria (motivandone i parametri utilizzati) delle opportunità di efficientamento energetico attuabili.

A questi, va aggiunto un ulteriore punto:

- VII. rispondere ai requisiti minimi previsti dall'allegato 2 del D.Lgs. 102/2014.

Nel box seguente viene riportata una proposta, indicativa e non vincolante, di un indice per la redazione di un rapporto di diagnosi energetica per il settore dell'incenerimento dei rifiuti conforme al D.Lgs.102/2014, all'interno del quale sono presenti tutte quelle informazioni utili a rappresentare e caratterizzare il sito oggetto di diagnosi energetica.

PROPOSTA DI UN INDICE PER LA REDAZIONE DEL RAPPORTO DI DIAGNOSI ENERGETICA

Sintesi della diagnosi (“Executive Summary”)

- I. Generalità**
 - I.1 Riferimenti
 - I.1.1 Committente e descrizione del sito produttivo
 - I.1.2 Responsabili ed esecutori della diagnosi energetica
 - I.1.3 Referenti del sito produttivo
 - I.2 Obiettivi e modalità della diagnosi energetica
 - I.2.1 Periodo di riferimento
 - I.2.2 Unità di misura e valori di riferimento/Fattori di aggiustamento
 - I.2. Raccolta dati
- 2. Diagnosi energetica dell'impianto d'incenerimento**
 - 2.1 Descrizione dello stabilimento

- 2.2 Indicazione su eventuali interventi importati effettuati nel passato (ultimi 15 anni)
- 2.3 Materie prime, prodotti e servizi erogati
- 2.4 Processo produttivo
 - 2.4.1 Descrizione del processo produttivo
 - 2.4.2 Schema di flusso del processo produttivo
- 2.5 Dati di produzione
- 2.6 Individuazione e analisi dei vettori energetici
- 2.7 Consumi e costi dell'energia
- 2.8 Individuazione degli indicatori energetici prestazionali
- 3. Modelli energetici**
 - 3.4.1. Analisi dei consumi di energia elettrica ("Modello Elettrico")
 - 3.4.2. Analisi dei consumi di combustibili ("Modello Termico")
 - 3.4.3. Analisi dei consumi di energia primaria
 - 3.4.4. Analisi delle produzioni di energia
- 4. Valutazioni**
 - 4.1 Definizione degli indicatori prestazionali
 - 4.2 Confronto con indicatori di riferimento
- 5. Interventi di efficientamento effettuati (ultimi 4 anni)**
 - 5.1 Intervento effettuato I (descrizione, investimento, tempo di ritorno semplice stimato, risparmio conseguito, eventuale accesso a strumenti incentivanti)
 - 5.n Intervento effettuato n.
- 6. Interventi di efficientamento individuati**
 - 6.1 Intervento I (descrizione intervento, investimento, risparmio energetico conseguibile, parametri finanziari: tasso attualizzazione, tempo attualizzazione, equity, etc., eventuale accesso a meccanismi incentivanti ed eventuale loro valorizzazione, flussi di cassa, indici economici: VAN, TIR, TR, IP)
 - 6.n Intervento n.
 - 6.n+1. Riepilogo degli interventi e analisi costi/benefici
- 7. Conclusioni**

APPENDICI/ALLEGATI



ANALISI DEI CONSUMI
ENERGETICI DEL SETTORE

6

6. Analisi dei consumi energetici

In questo capitolo vengono presentate le analisi dei consumi energetici che ENEA ha svolto sulla base dei dati forniti con le diagnosi energetiche obbligatorie caricate sul portale AUDIT102 negli anni 2019 e 2020. Si fa presente che ogni diagnosi energetica è sempre riferita ad un singolo sito produttivo.

6.1 Il campione dati

Le diagnosi energetiche pervenute ad ENEA la cui analisi del processo produttivo del sito è riconducibile a quello dell'Incenerimento dei rifiuti sono state 26, di cui:

- ⇒ 20 appartenenti al Codice ATECO 38.21.09;
- ⇒ 1 appartenenti al Codice ATECO 38.11.00;
- ⇒ 2 appartenenti al Codice ATECO 38.22.00;
- ⇒ 3 appartenenti al Codice ATECO 35.11.00.

Analizzando le 26 diagnosi energetiche (siti) in base al combustibile utilizzato, si ha che:

- ⇒ 19 siti utilizzano solo rifiuti non precedentemente trasformati in CSS o *pulper* di cartiera;
- ⇒ 7 siti utilizzano CSS insieme a rifiuti non trattati o fanghi, di questi solamente 4 producono CSS in loco.

Infine, va rilevato che tra i siti analizzati, 8 sono collegati ad una rete di Teleriscaldamento.

6.2 Distribuzione dei consumi energetici nel processo di incenerimento dei rifiuti

I vettori energetici utilizzati in maniera prevalente all'interno dei siti oggetto dell'analisi (non considerando il rifiuto) risultano essere l'Energia elettrica ed il Gas naturale, a cui si aggiunge un moderato utilizzo di Gasolio, mentre per quanto riguarda il GPL il suo utilizzo può essere considerato trascurabile.

Va fatto presente, che i siti oggetto dell'analisi in alcuni casi presentano all'interno del proprio processo produttivo delle fasi non strettamente legate all'Incenerimento dei rifiuti (es. Selezione meccanica e biostabilizzazione dei rifiuti, produzione CSS/CDR o compost, essiccamento fanghi, trattamento scorie/ceneri o acque reflue di processo, caldaie di Teleriscaldamento, etc.). In considerazione di ciò, nella determinazione delle distribuzioni dei consumi di Energia elettrica e termica, vengono presentate due distinte elaborazioni dati: la prima in cui vengono presi in considerazione tutti i consumi energetici anche delle eventuali fasi non strettamente legate al processo di incenerimento e la seconda in cui tali consumi sono stati esclusi.

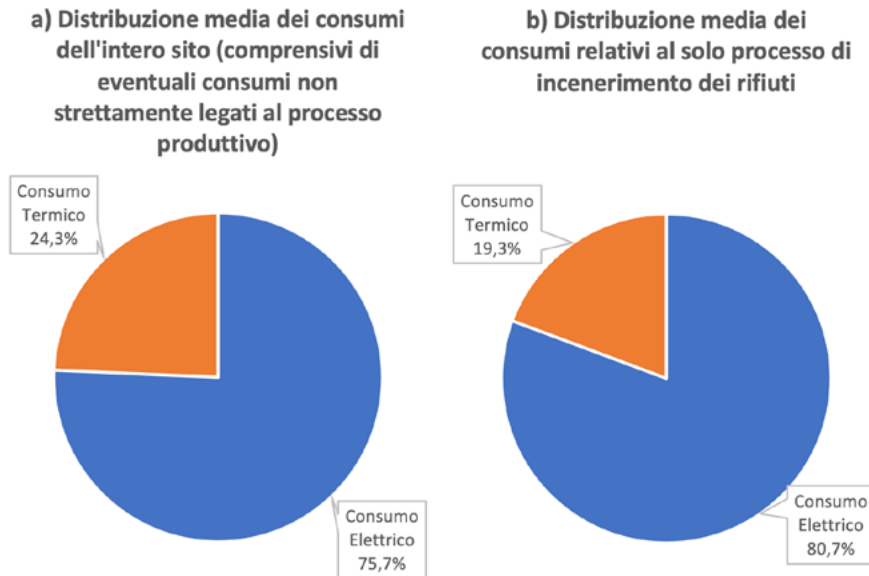


Figura 6 – Distribuzione dei consumi Elettrico e Termico all'interno del sito produttivo: in particolare nella figura a) vengono conteggiati anche i consumi al lordo dei consumi non strettamente legati al processo produttivo; nella figura b) è rappresentata la distribuzione dei consumi relativi al solo processo di incenerimento dei rifiuti.

La distribuzione dei consumi Elettrici e Termici per l'intero processo di Incenerimento dei rifiuti è mostrata nei due grafici di Figura 6. In particolare, in Figura 6a i consumi Elettrico e Termico comprendono anche quelli delle fasi non strettamente legate al processo di incenerimento, se presenti sul sito: come si può osservare in tale caso circa il 76% dei consumi è di tipo Elettrico, mentre il

restante 24% circa è di tipo Termico. In *Figura 6b*, invece, sono stati considerati solo i consumi del processo di Incenerimento, escludendo quindi quelli delle fasi non strettamente legate ad esso: come si può osservare in tale caso la percentuale del consumo Elettrico sale a circa l'81%, mentre il restante 19% circa è un consumo di tipo Termico.

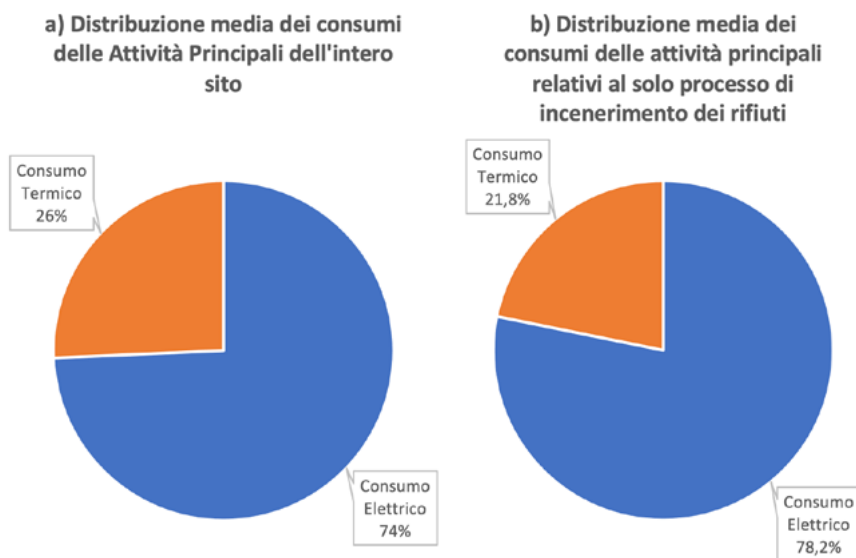


Figura 7 - Distribuzione dei consumi medi Elettrico e Termico delle Attività Principali all'interno del sito produttivo: in particolare nella figura a) vengono conteggiati anche i consumi al lordo dei consumi non strettamente legati al processo produttivo; nella figura b) è rappresentata la distribuzione dei consumi relativi al solo processo di incenerimento dei rifiuti.

In *Figura 7* è riportata la distribuzione percentuale di consumi Elettrico e Termico per le Attività Principali: in particolare, in *Figura 7a* i consumi comprendono anche quelli delle fasi non strettamente legate al processo di incenerimento, se presenti sul sito. Il consumo Elettrico ricompre circa 74% dei consumi totali, mentre il restante 26% circa è di tipo Termico.

In *Figura 7b*, invece, il consumo Elettrico e Termico delle Attività Principali è al netto dei consumi non strettamente legati al processo di Incenerimento, tuttavia: la ripartizione tra consumo termico ed elettrico non cambia in modo sensibile, infatti, il consumo di tipo Elettrico sale a circa il 78%, mentre i consumi Termici, sono pari al restante 22% circa.

La distribuzione del consumo Elettrico nelle 3 Aree Principali è mostrata nella *Figura 8*. In particolare, nella *Figura 8a* è mostrata la distribuzione del consumo Elettrico comprendendo anche quello delle fasi non strettamente legate al processo di Incenerimento dei rifiuti, se presenti sul sito. In tale caso il consumo Elettrico si distribuisce per l'88,7% nelle Attività Principali, per il 6,9% nei Servizi Ausiliari, mentre la percentuale di consumo Elettrico dei Servizi Generali ricopre una percentuale del 4,4%. In *Figura 8b* invece, il consumo Elettrico nelle 3 Aree Principali non comprende i consumi non strettamente legati al processo di Incenerimento. La distribuzione del consumo Elettrico diventa: l'87,3% per le Attività Principali, 7,7% per i Servizi Ausiliari, il restante 5% di consumo elettrico risulta ascrivibile ai Servizi Generali.

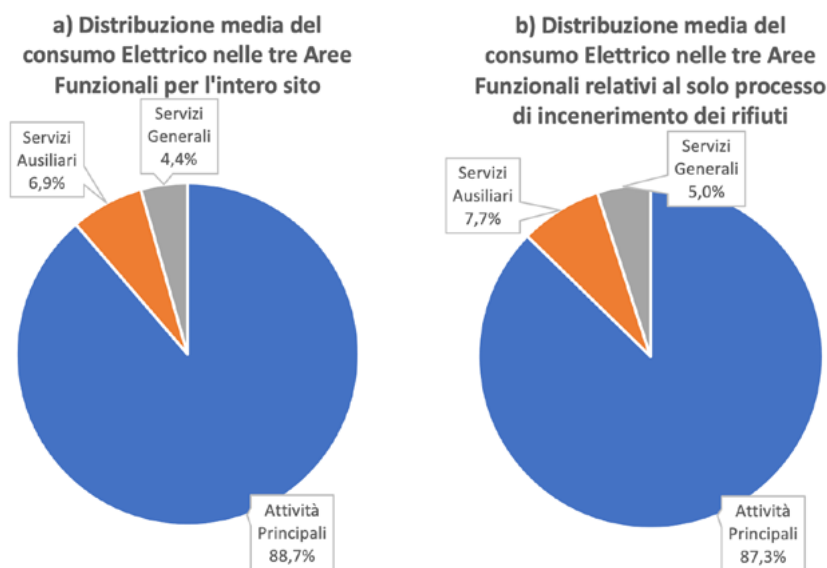


Figura 8 - Distribuzione del consumo medio Elettrico tra le Aree Funzionali: in particolare nella figura a) vengono conteggiati i consumi al lordo di quelli non strettamente legati al processo produttivo; nella figura b) la distribuzione dei consumi si riferisce ai soli strettamente legati al processo produttivo.

La distribuzione del consumo Termico nelle 3 Aree Principali è mostrata nella *Figura 9*. In particolare, nella *Figura 9a* è mostrata la distribuzione del consumo Termico comprendendo anche i consumi delle fasi non strettamente legate al processo di Incenerimento dei rifiuti, se presenti sul sito (in tale caso si tratta principalmente dei consumi di Gas naturale delle caldaie di Teleriscaldamento).

In tale caso il consumo Termico è imputabile per il 96,1% alle Attività Principali, mentre i consumi termici dei Servizi Ausiliari sono pari al 3,2%. Trascurabili sono i consumi termici dei Servizi Generali che ricoprono lo 0,7% del consumo totale Termico e sono da imputare ai consumi di Gas naturale (o, in maniera più ridotta, di GPL e Gasolio) per il Riscaldamento ambienti e produzione ACS. In Figura 9b, invece, il consumo Termico nelle 3 Aree Principali non comprende i consumi non strettamente legati al processo di Incenerimento. In questo caso la ripartizione dei consumi termici vede il 94,7% dei consumi termici imputabile alle Attività Principali, il 4,3% ai Servizi Ausiliari e l'1,0% ai Servizi Generali.

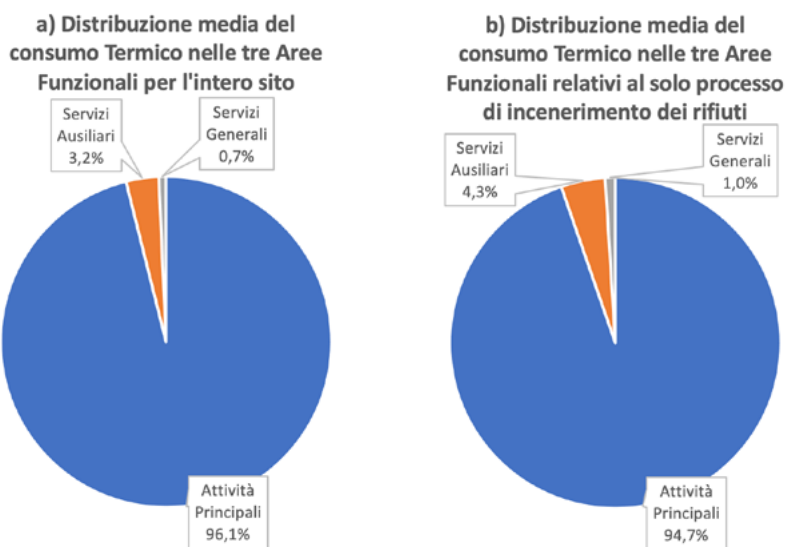


Figura 9 - Distribuzione del consumo medio Termico tra le Aree Funzionali: in particolare nella figura a) vengono conteggiati i consumi al lordo di quelli non strettamente legati al processo produttivo; nella figura b) la distribuzione dei consumi si riferisce ai soli strettamente legati al processo produttivo.

In Figura 10 è mostrata la distribuzione del consumo Termico tra i singoli vettori energetici. In particolare, in Figura 10a sono stati considerati i consumi anche delle fasi non strettamente legate al processo di Incenerimento. In questo caso, quasi il 90% dei consumi termici è legato all'utilizzo di Gas naturale, mentre il Gasolio ricopre solamente il 10% circa dei consumi. In Figura 10b, invece, sono stati esclusi i consumi delle fasi non strettamente legate al processo di incenerimento: l'utilizzo del Gas Naturale diminuisce fino all'86% dei consumi

Termici, mentre il consumo di Gasolio sale al 14%. Il consumo di GPL, in entrambi i casi, è trascurabile (corrisponde allo 0,02% circa del consumo Termico).

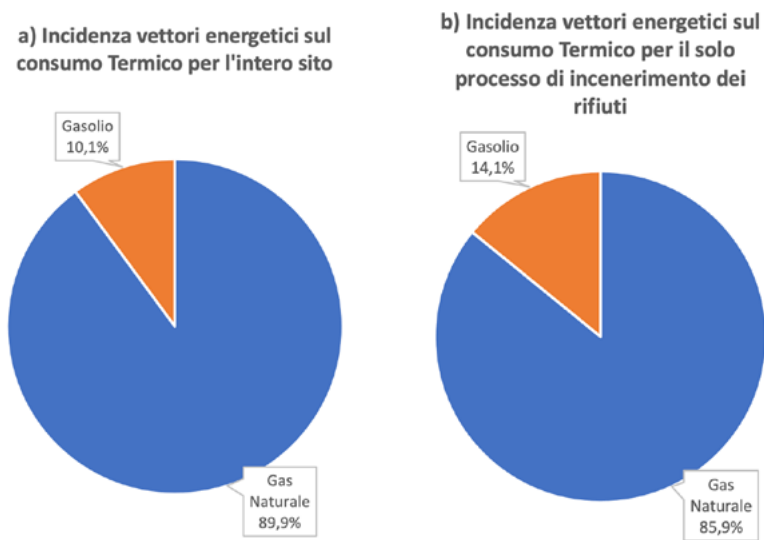


Figura 10 – Incidenza dei vettori energetici sul consumo Termico: in particolare nella figura a) vengono conteggiati i consumi al lordo di quelli non strettamente legati al processo produttivo; nella figura b) la distribuzione dei vettori si riferisce ai soli consumi strettamente legati al processo produttivo.

In Figura 11 è riportata la distribuzione del consumo Elettrico all'interno dell'Attività Principale.

Nella Figura 11a la ripartizione dei consumi tiene conto anche dei consumi non strettamente legati al processo di incenerimento. Dalla figura si evince che la maggiore percentuale del consumo Elettrico è da imputare alla fase "Ciclo Termico" che ricopre il 33,8% del totale del consumo Elettrico, le fasi di "Depurazione fumi" e "Forno o Generatore di Vapore" ricoprono rispettivamente il 27,8% e il 23,6% del consumo Elettrico. La fase di "Movimentazione/Alimentazioni" rifiuti riguarda solo il 3,6% dei consumi elettrici, mentre il restante 11,2% è ascrivibile ai consumi non strettamente legati al processo di incenerimento dei rifiuti (Pretrattamento rifiuti, Produzione di compost, Trattamento scorie e ceneri e acque reflue di processo, ecc.). In Figura 11b viene mostrata la ripartizione del consumo elettrico considerando solo i consumi strettamente legati al processo di incenerimento dei rifiuti. Ripartizione del consumo elettrico che vede crescere la fase "Ciclo

Termico” al 38,1% del totale del consumo Elettrico, quelle di “Depurazione fumi” e “Forno o Generatore di vapore” rispettivamente al 31,3 ed al 26,6 %; ed al 4,1% la fase di “Movimentazione o Alimentazioni” rifiuti.

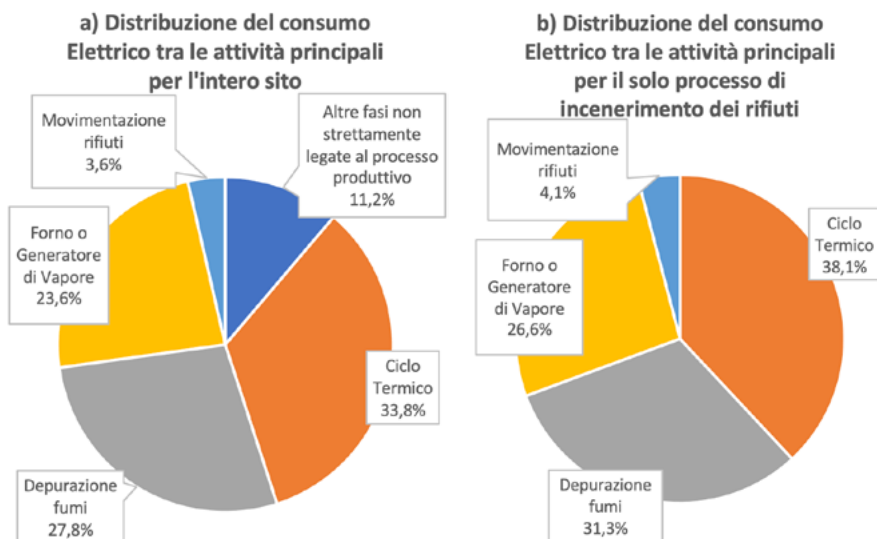


Figura 11 – Distribuzione del consumo Elettrico tra le fasi dell’Attività Principale: in particolare nella figura a) vengono conteggiati anche i consumi non strettamente legati al processo produttivo dell’incenerimento dei rifiuti; nella figura b), invece la distribuzione dei vettori si riferisce ai soli consumi strettamente legati al processo produttivo.

In Figura 12 è riportata la distribuzione percentuale del consumo Termico all’interno dell’Attività Principale. Rispetto al consumo Elettrico, sono presenti solamente due fasi legate al processo produttivo di incenerimento dei rifiuti: “Forno o Generatore di Vapore” e “Depurazione Fumi”, per quanto riguarda, invece, le fasi non strettamente legate al processo di Incenerimento dei rifiuti quella che ha il peso maggiore è il Teleriscaldamento. In particolare, in Figura 12a, che tiene conto anche dei consumi non strettamente legati al processo di Incenerimento, più della metà del consumo Termico è da imputare alla fase “Forno o Generatore di vapore” (54,1%), mentre la percentuale della fase di “Depurazione fumi” è pari al 29,1%; la quota parte non ascrivibile strettamente al processo di incenerimento dei rifiuti copre il restante 16,8%. In Figura 12b dove sono riportati i soli consumi strettamente legati al processo di incenerimento dei rifiuti, le proporzioni cambiano sensibilmente con un incremento del peso percentuale della fase “Forno o Generatore di Vapore” che arriva a ricoprire più

dei tre quarti del consumo termico (76,4%), il restante 23,6 % viene assorbito dalla fase di “Depurazione fumi”.

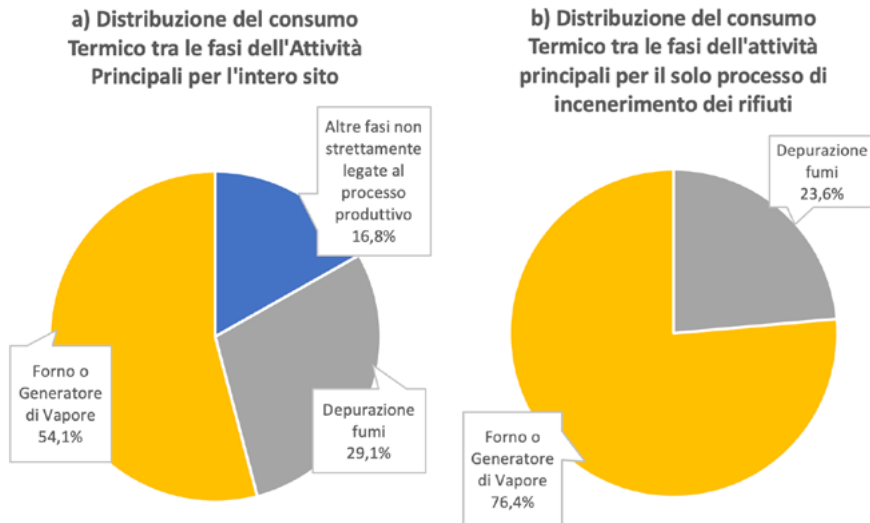


Figura 12 - Distribuzione del consumo Termico tra le fasi dell'Attività Principale: in particolare nella figura a) vengono conteggiati anche i consumi non strettamente legati al processo produttivo dell'incenerimento dei rifiuti (es.: teleriscaldamento); nella figura b), invece la distribuzione dei vettori si riferisce ai soli consumi strettamente legati al processo produttivo.

In Figura 13 è riportata la distribuzione percentuale del consumo Totale all'interno dell'Attività Principale. In Figura 13a, dove la ripartizione dei consumi tiene conto anche dei consumi non strettamente legati al processo di incenerimento, circa un terzo del consumo Totale (33%) è imputabile alla fase “Forno o Generatore di vapore”; le fasi “Ciclo termico” e “Depurazioni fumi” coprono entrambe il 26,4%; alla fase di “Movimentazione/Alimentazione rifiuti” è imputabile solo il 2,8% del consumo Totale; mentre la percentuale restante dell'11,3%, è da attribuirsi alle fasi non strettamente legati al processo di incenerimento. In Figura 13b, invece, la distribuzione del consumo Totale nelle Attività Principali tiene conto solo delle fasi strettamente legate al processo produttivo, in questo caso: circa il 37% del consumo Totale è relativo alla fase “Forno o Generatore di vapore”; mentre le fasi “Ciclo termico” e “Depurazioni fumi” coprono entrambe il 29,8%; il restante 3,2% del consumo Totale è imputabile alla fase di “Movimentazione/Alimentazione rifiuti”.

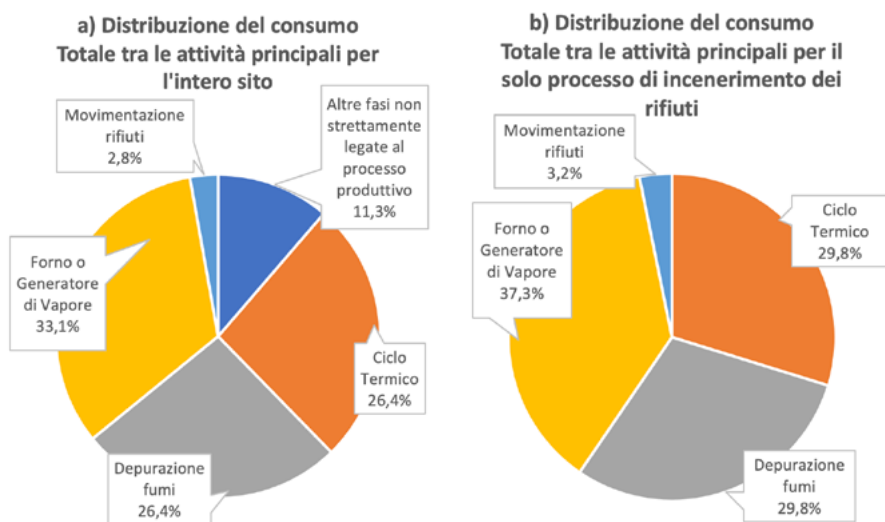


Figura 13 - Distribuzione del consumo Totale tra le fasi dell'Attività Principale: in particolare nella figura a) vengono conteggiati anche i consumi non strettamente legati al processo produttivo dell'incenerimento dei rifiuti (es.: teleriscaldamento); nella figura b), invece la distribuzione dei vettori si riferisce ai soli consumi strettamente legati al processo produttivo.

6.3 Indici di Prestazione Energetica generali (IPEg)

Dall'analisi ed elaborazione dei dati contenuti nelle diagnosi pervenute nel 2019 e nel 2020, relative ai siti in cui si effettua l'incenerimento dei rifiuti, sono stati determinati i principali Indici di Prestazione Energetica generali, così come indicato nella Guida Utilitalia [3] per il settore incenerimento rifiuti.

In particolare, sono stati analizzati i seguenti indici di prestazione energetica:

- ⇒ Indici di Prestazione Energetica riferiti ai consumi di Energia Elettrica (EE) e Gas naturale (GN);
- ⇒ Indici di Prestazione Energetica riferiti alle produzioni di Energia Elettrica (EE) e di Energia Termica (Eth);
- ⇒ Un Indice di Prestazione Energetica adimensionale riferito alla somma dell'energia associata ai vettori energetici in ingresso all'impianto e all'Apporto energetico dei rifiuti.

Le elaborazioni effettuate hanno previsto la determinazione di:

- ⇒ Retta di regressione;
- ⇒ IPE medio con la rispettiva deviazione standard e livello di affidabilità.

6.3.1 Indici di Prestazione Energetica generali riferiti ai consumi

Gli Indici prestazionali riferiti ai consumi sono definiti come:

- ⇒ IPEg consumo Elettrico = Consumo EE / Apporto energetico dei rifiuti [kWh/MWh];
- ⇒ IPEg consumo Gas naturale = Consumo gas naturale / Apporto energetico dei rifiuti [Sm³/MWh].

6.3.1.1 IPEg consumo Elettrico

L'IPEg relativo al consumo Elettrico viene determinato dal rapporto:

$$IPE_{Elettrico} \left[\frac{kWh}{MWh} \right] = \frac{\text{Consumo EE [kWh]}}{\text{Apporto energetico dei rifiuti [MWh]}}$$

Va detto che per la determinazione dell'IPE sono stati considerati solamente i consumi strettamente legati al processo di incenerimento dei rifiuti.

In *Figura 14* ed in *Tabella 16* vengono riportati rispettivamente la retta di regressione ricavata dall'elaborazione dei dati delle diagnosi considerando il consumo Elettrico in funzione dell'Apporto Energetico dei rifiuti ed i parametri riassuntivi della regressione stessa.

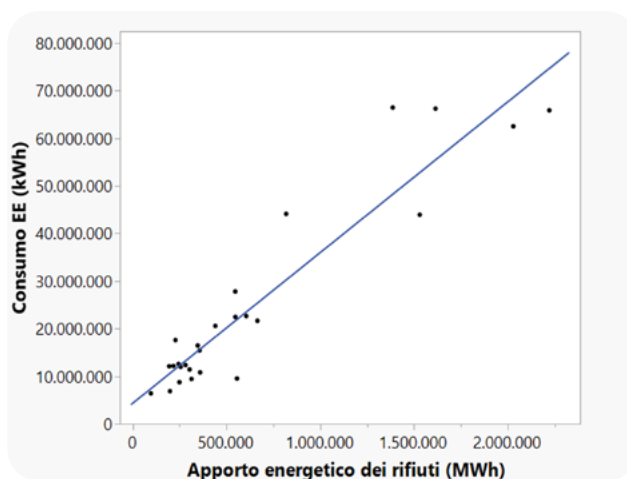


Figura 14 - Consumo Elettrico in funzione dell'Apporto Energetico dei rifiuti.

Rette di Regressione: Consumo Elettrico[kWh] vs vs Apporto Energetico dei rifiuti [MWh]						
Consumo Elettrico [kWh] = 4.338.627,6 + + 31,67 * Apporto Energetico dei rifiuti [MWh] Int. Confidenza > 99%						
	R ²	R	P _{value}	N	Rcrit (bidir.) α=0,05	Rcrit (bidir.) α=0,01
Consumo Elettrico [kWh]	0,884	0,940	<0,0001	26	0,3809	0,4869

Tabella 16 - Parametri della retta di regressione del Consumo Elettrico in funzione dell'Apporto Energetico dei rifiuti.

In Tabella 17 è riportato l'IPE medio del consumo Elettrico con relativa deviazione standard e livello di affidabilità per due intervalli di Apporto Energetico dei rifiuti.

Unità misura utilizzate	Apporto energetico dei rifiuti		MWh	
	Consumo Elettrico		kWh	
	IPE		kWh/MWh	
Campo variazione apporto energetico rifiuti		IPE	Affidabilità	
Min	Max			
MWh	MWh	kWh/MWh	Coeff. di Variazione	Livello di affidabilità
96.000	250.000	58,07 ± 14,46	25%	MEDIO
250.001	2.221.000	38,66 ± 9,30	24%	MEDIO

Tabella 17 - IPE medio del consumo Elettrico in funzione dell'Apporto Energetico dei rifiuti e relativa deviazione standard.

6.3.1.2 IPEg consumo Gas naturale

L'IPEg relativo al consumo di Gas Naturale viene determinato dal rapporto:

$$IPE_{GasNaturale} \left[\frac{Sm^3}{MWh} \right] = \frac{Consumo GN [Sm^3]}{Apporto energetico dei rifiuti [MWh]}$$

Dal consumo di Gas naturale sono stati esclusi i consumi destinati alle caldaie del teleriscaldamento, in quanto non strettamente inerenti ai consumi del processo di incenerimento dei rifiuti e non sempre presenti nei siti considerati.

La retta di regressione ricavata dall'elaborazione dei dati di consumo di Gas naturale in funzione dell'Apporto Energetico dei rifiuti è mostrata in *Figura 15*, mentre nella *Tabella 18* sono riassunti i parametri della regressione stessa.

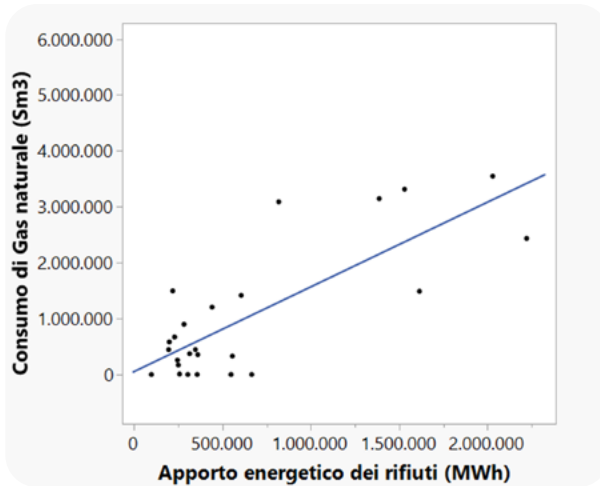


Figura 15 - Consumo di Gas naturale in funzione dell'Apporto Energetico dei rifiuti.

Rette di Regressione: Consumo G.N.[Sm ³] vs Apporto Energetico dei rifiuti [MWh]						
Consumo Gas naturale [Sm ³] = 53.875,4 + + 1,515 * Apporto Energetico dei rifiuti [MWh] Int. Confidenza > 99%						
	R ²	R	P _{value}	N	Rcrit (bidir.) α=0,05	Rcrit (bidir.) α=0,01
Consumo Gas Naturale [Sm³]	0,620	0,878	< 0,0001	25	0,3809	0,4869

Tabella 18 - Parametri della retta di regressione del Consumo di Gas naturale in funzione dell'Apporto Energetico dei rifiuti.

In *Tabella 19* è riportato l' IPE medio del consumo di Gas naturale con relativa deviazione standard e livello di affidabilità.

Unità misura utilizzate	Apporto energetico dei rifiuti		MWh	
	Consumo Gas Naturale		Sm ³	
	IPE		Sm ³ /MWh	
Campo variazione apporto energetico rifiuti		IPE	Affidabilità	
Min	Max			
MWh	MWh	Sm ³ /MWh	Coeff. di Variazione	Livello di affidabilità
96.000	244.000	3,01 ± 2,48	82%	BASSO
244.001	2.221.000	1,30 ± 1,13	87%	BASSO

Tabella 19 - IPE medio del consumo di Gas Naturale in funzione dell'Apporto Energetico dei rifiuti e relativa deviazione standard.

6.3.2 Indici di Prestazione Energetica generali riferiti alle produzioni

Gli Indici di Prestazione Energetica generali riferiti alle produzioni sono definiti come:

- IPE EE prodotta = Produzione EE / Apporto energetico dei rifiuti [MWh/MWh];
- IPE EE esportata = Esportazione EE/ Apporto energetico dei rifiuti [MWh/MWh];
- IPE ETh prodotta = Produzione ETh / Apporto energetico dei rifiuti [MWh/MWh].

6.3.2.1 IPEg Produzione lorda di Energia Elettrica

L'IPEg relativo alla produzione di Energia Elettrica viene determinato dal rapporto:

$$IPE_{Produzione_EE} \left[\frac{MWh}{MWh} \right] = \frac{Produzione\ EE\ [MWh]}{Apporto\ energetico\ dei\ rifiuti\ [MWh]}$$

La retta di regressione ricavata dall'elaborazione della produzione di energia elettrica in funzione dell'Apporto energetico dei rifiuti è mostrata in *Figura 16*, mentre nella *Tabella 20* sono riassunti i parametri della regressione stessa. Come si può osservare dalla *Tabella 20* il valore dell'intercetta della retta è negativo, questo è dovuto alla vicinanza del valore teorico della produzione di EE molto prossimo a zero per un apporto energetico nullo: il valore negativo dell'intercetta risulta quindi essere dovuto al normale errore indotto dalla dispersione statistica causata anche dalla mancanza di dati per valori di apporto energetico prossimi a zero. Tuttavia l'equazione può essere considerata accettabile all'interno del campo di esistenza individuato.

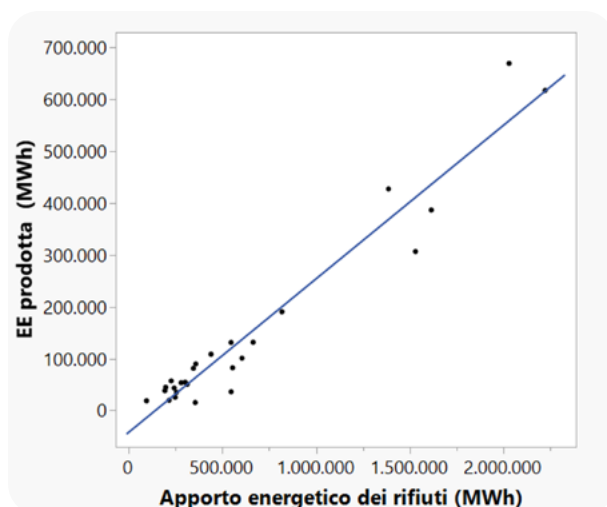


Figura 16 - Energia elettrica lorda prodotta in funzione dell'Apporto Energetico dei rifiuti.

Rette di Regressione: E.El. _{lorda_prodotta} [MWh] vs vs Apporto Energetico dei rifiuti [MWh]						
Energia El. _{lorda_prodotta} [MWh] = -42.485,7 + + 0,2965 * Apporto Energetico dei rifiuti [MWh] Int. Confidenza > 99%						
	R ²	R	P _{value}	N	Rcrit (bidir.) α=0,05	Rcrit (bidir.) α=0,01
Energia Elettrica Prodotta [MWh]	0,943	0,971	< 0,0001	26	0,3809	0,4869

Tabella 20 - Parametri della retta di regressione dell'Energia elettrica prodotta in funzione dell'Apporto Energetico dei rifiuti.

In *Tabella 21* è riportato l' IPE medio percentuale della produzione di energia elettrica ($MWh_{prodotti}$) in funzione dell'Apporto Energetico dei rifiuti ($MWh_{rifiuti}$) con la relativa deviazione standard e livello di affidabilità. In tale caso l'indice costituisce di fatto un rendimento percentuale lordo (in quanto si è presa in esame tutta l'energia elettrica prodotta) del processo di incenerimento dei rifiuti.

Unità misura utilizzate	Apporto energetico dei rifiuti		$MWh_{rifiuti}$	
	Energia Elettrica lorda prodotta		$MWh_{prodotto}$	
	IPE		% ($MWh_{prodotto}/MWh_{rifiuti}$)	
Campo variazione apporto energetico rifiuti		IPE	Affidabilità	
Min	Max			
MWh	MWh	%	Coeff. di Variazione	Livello di affidabilità
96.000	818.000	17,51 ± 6,18	35%	MEDIO
818.001	2.221.000	26,49 ± 4,92	19%	ALTO

Tabella 21 - IPE medio percentuale dell'Energia elettrica lorda prodotta in funzione dell'Apporto Energetico dei rifiuti con relativi deviazione standard e livello affidabilità.

6.3.2.2 IPEg Energia Elettrica esportata (Produzione netta)

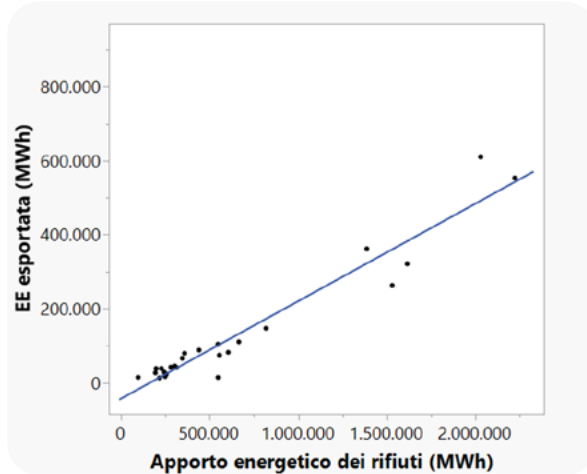
L'IPEg relativo all'Energia Elettrica esportata viene determinato dal rapporto:

$$IPE_{EE_esportata} \left[\frac{MWh}{MWh} \right] = \frac{EE_esportata [MWh]}{Apporto\ energetico\ dei\ rifiuti [MWh]}$$

La retta di regressione ricavata dall'elaborazione dell'esportazione di energia elettrica in funzione dell'Apporto energetico dei rifiuti è mostrata in *Figura 17*, mentre nella *Tabella 22* sono riassunti i parametri della regressione stessa. Come si può osservare dalla *Tabella 22* il valore dell'intercetta della retta risulta essere negativo, questo è dovuto alla vicinanza del valore teorico dell'EE esportata molto prossimo a zero per un apporto energetico nullo, il valore negativo

dell'intercetta risulta quindi essere probabilmente un normale errore indotto dalla dispersione statistica causata anche dalla mancanza di dati per valori di apporto energetico prossimi a zero, tuttavia l'equazione può essere considerata accettabile all'interno del campo di esistenza individuato.

Figura 17 - Energia elettrica esportata in funzione dell'Apporto Energetico dei rifiuti.



Rette di Regressione E.El.esportata [MWh] vs vs Apporto Energetico dei rifiuti [MWh]						
E.El.esportata [MWh] = -46.347,5 + + 0,2655 * Apporto Energetico dei rifiuti [MWh] Int. Confidenza > 99%						
	R ²	R	P _{value}	N	Rcrit (bidir.) α=0,05	Rcrit (bidir.) α=0,01
Energia Elettrica esportata [MWh]	0,933	0,966	< 0,0001	25	0,3809	0,4869

Tabella 22 - Parametri della retta di regressione dell'Energia Elettrica esportata in funzione dell'Apporto Energetico dei rifiuti.

In Tabella 23 è riportato l'IFE medio percentuale della esportazione di energia elettrica ($MWh_{\text{esportati}}$) in funzione dell'Apporto Energetico dei rifiuti (MWh_{rifiuti}) con la relativa deviazione standard e livello di affidabilità. In tale caso l'indice costituisce di fatto un rendimento percentuale netto (in quanto si è presa in esame l'energia elettrica esportata) del processo di incenerimento dei rifiuti.

Unità misura utilizzate	Apporto energetico dei rifiuti		MWh _{rifiuti}	
	Energia Elettrica esportata		MWh _{esportato}	
	IPE		% (MWh _{esportato} /MWh _{rifiuti})	
Campo variazione apporto energetico rifiuti		IPE	Affidabilità	
Min	Max			
MWh	MWh	%	Coeff. di Variazione	Livello di affidabilità
96.000	1.386.000	14,24 ± 5,11	36%	MEDIO
1.386.001	2.221.000	23,64 ± 5,12	22%	MEDIO

Tabella 23 - IPE medio dell'Energia elettrica esportata in funzione dell'Apporto Energetico dei rifiuti e relativa deviazione standard.

6.3.2.3 IPEg Energia Termica prodotta

L'IPEg relativo alla produzione di Energia termica prodotta viene determinato dal rapporto:

$$IPE_{Produzione_ETH} \left[\frac{MWh}{MWh} \right] = \frac{Produzione\ ETH\ [MWh]}{Apporto\ energetico\ dei\ rifiuti\ [MWh]}$$

In Figura 18 è riportata la retta di regressione ricavata dall'elaborazione dei dati relativi alla produzione di energia termica in funzione dell'Apporto energetico dei rifiuti, mentre in Tabella 24 sono riassunti i parametri della regressione stessa.

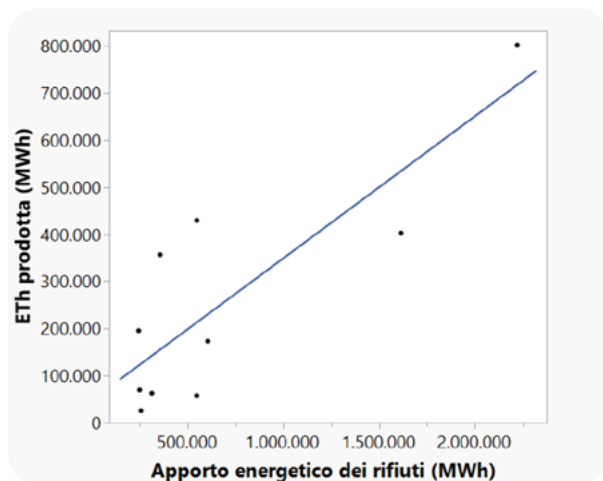


Figura 18 - Energia Termica prodotta in funzione dell'Apporto Energetico dei rifiuti.

Rette di Regressione: E.Th _{prodotta} [MWh] vs vs Apporto Energetico dei rifiuti [MWh]						
Energia Th _{prodotta} [MWh] = 48.041,7 + + 0,3013 * Apporto Energetico dei rifiuti [MWh] Int. Confidenza > 99%						
	R ²	R	P _{value}	N	Rcrit (bidir.) α=0,05	Rcrit (bidir.) α=0,01
Energia Termica prodotta [MWh]	0,693	0,832	0,0028	10	0,5760	0,693

Tabella 24 - Parametri della retta di regressione dell'Energia Termica prodotta in funzione dell'Apporto Energetico dei rifiuti.

In Tabella 25 è riportato l'IPE medio percentuale della produzione di energia termica [MWh_{ch_prodotti}] in funzione dell'Apporto Energetico dei rifiuti [MWh_{rifiuti}] con la relativa deviazione standard e livello di affidabilità. In tale caso l'indice prestazionale costituisce di fatto un rendimento percentuale lordo (in quanto si è presa in esame l'energia termica prodotta) del processo di Incenerimento dei rifiuti.

Unità misura utilizzate	Apporto energetico dei rifiuti		MWh _{rifiuti}	
	Energia Termica prodotta		MWh _{th_prodotti}	
	IPE		% (MWh _{th_prodotti} / MWh _{rifiuti})	
Campo variazione apporto energetico rifiuti		IPE	Affidabilità	
Min	Max			
MWh	MWh	%	Coeff. di Variazione	Livello di affidabilità
244.000	2.221.000	41,71 ± 32,26	77%	BASSO

Tabella 25 - IPE medio dell'Energia termica prodotta in funzione dell'Apporto Energetico dei rifiuti e relativa deviazione standard.

6.4 IPE generale adimensionale

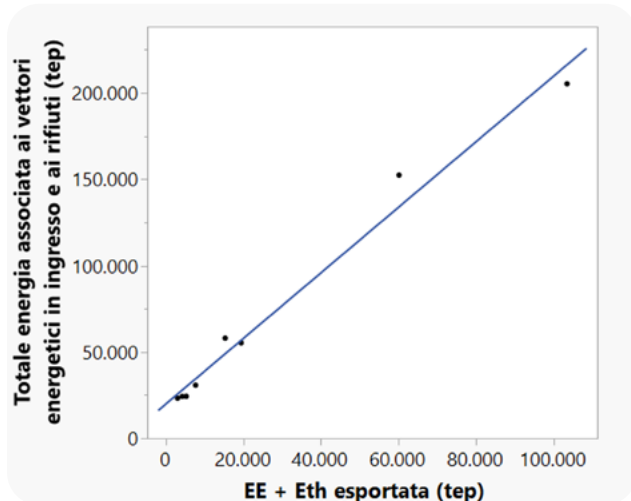
L'IPE generale adimensionale riferito alla somma dell'energia elettrica e termica esportate (espresse in tep), è determinato, come già descritto nel paragrafo 5.3.2, dalla seguente formula:

$$IPE_{gp} = \frac{(E.El.exp[MWh] * 0,187 + E.Th.exp[MWh] * 0,095)}{\sum E.C.ing.inc.[tep]}$$

Per questo IPE sono state fatte due distinte elaborazioni rispettivamente per i siti che esportano sia energia elettrica che energia termica e per i siti che invece esportano solo energia elettrica. Le due distinte elaborazioni sono mostrate in *Figura 19* e *20*, mentre i parametri statistici sono riassunti nelle *Tabelle 26* e *28*.

In particolare, in *Figura 19*, riferita ai siti che esportano sia energia elettrica che termica, è riportata la retta di regressione ricavata dall'elaborazione del totale di energia associata ai vettori energetici in ingresso e valorizzazione energetica dei rifiuti rispetto alla somma dell'energia elettrica e termica esportata (espresse in tep). Nella *Tabella 26* sono riassunti i parametri statistici della regressione stessa.

Figura 19 - Totale Energia associata ai vettori energetici in ingresso e ai rifiuti in funzione dell'Energia Elettrica e Termica esportata per i siti che esportano sia energia elettrica che termica.



Rette di Regressione: (E _{in} + E _{rifiuti}) [tep] vs vs (E.E _{esportata} + E.th _{esportata}) [tep]						
Energia in ingresso [tep] = 19.748,8 + + 1,901 * Energia elettrica e termica esportata [tep] Int. Confidenza > 99%						
	R ²	R	P _{value}	N	Rcrit (bidir.) α=0,05	Rcrit (bidir.) α=0,01
Vettori energetici e rifiuti in ingresso [tep]	0,982	0,991	< 0,0001	8	0,6319	0,7646

Tabella 26 - Parametri della retta di regressione del totale di energia associata ai vettori energetici in ingresso e ai rifiuti dei in funzione della somma dell'energia elettrica e termica esportata (esprese in tep) per i siti che esportano sia energia elettrica che termica.

In particolare, in Tabella 27 è riportato l'IPE medio adimensionale del totale di energia associata ai vettori energetici in ingresso e ai rifiuti (espressa in tep) riferita alla somma dell'energia elettrica e termica esportate (esprese in tep) con la relativa deviazione standard e livello di affidabilità per i siti che esportano sia energia elettrica che termica.

Unità misura utilizzate	EE + Eth esportata		tep	
	Energia vettori in ingresso + Rifiuti		tep	
	IPE		adimensionale	
Campo variazione Energia totale esportate		IPE	Affidabilità	
Min	Max			
tep	tep	-	Coeff. di Variazione	Livello di affidabilità
6.700	180.000	0,29 ± 0,12	41%	MEDIO

Tabella 27 - IPE medio del totale di energia associata ai vettori energetici in ingresso e ai rifiuti dei in funzione della somma dell'energia elettrica e termica esportata (esprese in tep) per i siti che esportano sia energia elettrica che termica.

In Figura 20, è riportata l'analisi riferita ai siti che esportano solo energia elettrica, con la retta di regressione ricavata dall'elaborazione del totale di

energia associata ai vettori energetici in ingresso e valorizzazione energetica dei rifiuti rispetto all'energia elettrica esportata (espressa in tep). Nella *Tabella 28* sono riassunti i parametri statistici della regressione stessa.

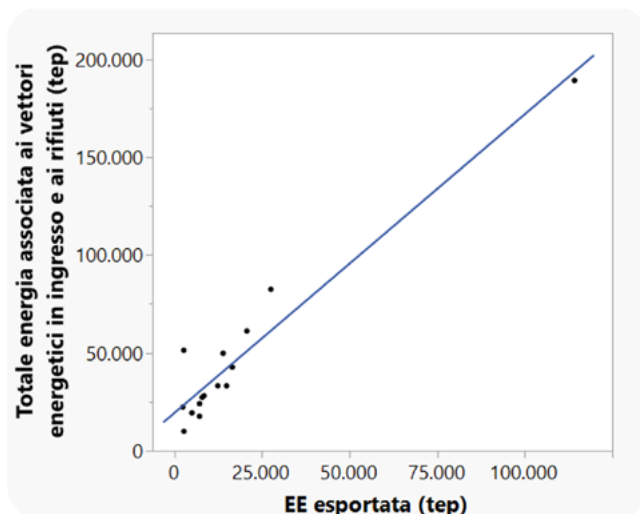


Figura 20 - Totale energia associata ai vettori energetici in ingresso e ai rifiuti in funzione dell'Energia Elettrica esportata per i siti che esportano solo Energia Elettrica.

Rette di Regressione: $E_{n_{in}} + E_{n_{rifiuti}}$ [tep] vs $E_{El_{esportata}}$ [tep]						
Totale Energia in ingresso [tep] = 19.235,0 + +1,567 * Energia elettrica esportata [tep] Int. Confidenza > 99%						
	R^2	R	P_{value}	N	Rcrit (bidir.) $\alpha=0,05$	Rcrit (bidir.) $\alpha=0,01$
Vettori energetici e rifiuti in ingresso [tep]	0,925	0,962	0,0001	15	0,4821	0,6055

Tabella 28 - Parametri della retta di regressione del totale di energia associata ai vettori energetici in ingresso e ai rifiuti dei in funzione dell'Energia Elettrica esportata (espressa in tep) per i siti che esportano solo energia elettrica.

In *Tabella 29* è riportato l'IPE medio adimensionale e del totale di energia associata ai vettori energetici in ingresso e ai rifiuti riferita all'Energia Elettrica esportata (esprese in tep) con la relativa deviazione standard e livello di affidabilità, per i siti che esportano solo energia elettrica.

Unità misura utilizzate	EE esportata		tep	
	Energia in ingresso + rifiuti		tep	
	IPE		adimensionale	
Campo variazione Energia Elettrica esportata		IPE	Affidabilità	
Min	Max		-	Coeff. di Variazione
tep	tep			
2.400	15.000	0,26 ± 0,11	42%	MEDIO
15.001	115.000	0,42 ± 0,11	26%	MEDIO

Tabella 29 - IPE medio del totale di energia associata ai vettori energetici in ingresso e ai rifiuti dei in funzione dell'energia elettrica esportata (espressa in tep) per i siti che esportano solo energia elettrica.

Energia termica esportata – Riflessioni e metodologie di calcolo

Ai fini di una determinazione dell'IPE generale adimensionale più preciso, bisogna tener conto dell'aleatorietà del coefficiente moltiplicativo di conversione dell'energia termica da MWh a tep (pari a 0,095).

Seppur valido per una prima analisi, nella pratica industriale vengono adottate altre metodologie che permettono di tenere maggiormente conto anche delle specificità dell'impianto oggetto di diagnosi (taglia, tecnologia, etc.).

Una prima metodologia consiste nel convertire l'energia termica esportata in energia elettrica (espressa in MWh) e poi riportare l'energia elettrica così ricavata da MWh a tep. A tal fine, il coefficiente moltiplicativo, che dipenderà dalle caratteristiche dello specifico impianto, è definito come il rapporto tra il quantitativo di energia elettrica che sarebbe stato prodotto in assenza di produzione combinata di energia termica e elettrica, e l'energia termica prodotta.

In alternativa, un secondo approccio prevede di convertire i MWh di energia termica esportata in tep ipotizzando di aver sostituito caldaie a metano con un valore di rendimento medio stimato (ad es. pari a 0,9), utilizzando il PCI del gas naturale ricavato dalla "Tabella dei parametri standard nazionali per il monitoraggio e la comunicazione dei gas ad effetto serra" pubblicata annualmente.

6.5 Indici di Prestazione Energetica specifici (IPEs) - Attività Principali

Dopo la determinazione degli IPE generali, sono stati analizzati i consumi delle diverse fasi del processo di Incenerimento dei rifiuti. Per ciascuna fase sono stati determinati l'IPE Elettrico o Termico o entrambi, in funzione della tipologia di consumi presenti, riferiti alla destinazione d'uso specifica della fase in esame.

All'interno delle Attività Principali, per il processo di Incenerimento dei rifiuti, si possono individuare quattro fasi:

- I. Fase Movimentazione/Alimentazione dei rifiuti.
- II. Fase Forno/Generatore di vapore.
- III. Fase Ciclo termico.
- IV. Fase Depurazione fumi.

6.5.1 IPEs Elettrici

Tutte le quattro suddette aree funzionali all'interno delle Attività Principali sono caratterizzate da un consumo di tipo Elettrico. Qui di seguito sono mostrate le elaborazioni effettuate per ognuna delle quattro fasi.

6.5.1.1 Movimentazione o Alimentazione dei rifiuti

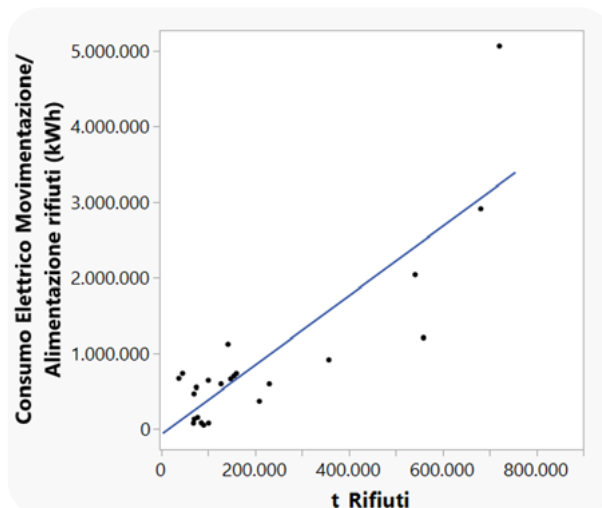
La fase di Movimentazione/Alimentazione dei rifiuti comprende i seguenti sistemi e componenti:

- Scarico dei rifiuti, che raggiungono il sito di incenerimento tramite automezzi dedicati;
- Movimentazione dei rifiuti tramite carroponi ad azionamento manuale;
- Limitati pretrattamenti dei rifiuti come Triturazione dei rifiuti ingombranti e Apertura balle (necessari per una corretta alimentazione del forno).

A volte nel sito sono presenti trattamenti più spinti dei rifiuti come, ad esempio, Trattamenti di tipo meccanico-biologico, finalizzati alla produzione di una frazione secca o di un vero e proprio CSS. In tali casi il consumo Elettrico ascrivibile a tali fasi è stato escluso, perché non strettamente attinente al processo di incenerimento.

Per la fase di processo “Movimentazione o Alimentazione dei rifiuti”, la retta di regressione del consumo Elettrico è stata ricavata in funzione della quantità di rifiuti sottoposti ad Incenerimento, espressa in tonnellate, ed è mostrata in *Figura 21*, mentre nella *Tabella 30* sono riassunti i parametri della regressione stessa. Come si può osservare in questo caso il valore dell’intercetta della retta è debolmente negativo, il valore negativo dell’intercetta risulta dovuta al normale errore indotto dalla dispersione statistica causata anche dalla mancanza di dati per valori di rifiuto movimentato prossimi a zero; tuttavia, l’equazione può essere considerata accettabile all’interno del campo di esistenza individuato.

Figura 21 - Consumo Energia elettrica in funzione della quantità di rifiuti.



Rette di Regressione: E.El _{movimentazione} [kWh] vs vs Massa_rifiuti [t]						
Consumo energia elettrica _{mov_rifiuti} [kWh] = -73.903,5 + + 4,585 * Rifiuti [t] Int. Confidenza > 99%						
	R ²	R	P _{value}	N	Rcrit (bidir.) α=0,05	Rcrit (bidir.) α=0,01
Consumo En.El movimentazione rifiuti [kWh]	0,730	0,854	< 0,0001	23	0,3961	0,5052

Tabella 30 - Parametri della retta di regressione del consumo Elettrico della fase “Movimentazione/Alimentazione dei rifiuti” in funzione della quantità di rifiuti.

In Tabella 31 è riportato l’IPE medio del consumo Elettrico della fase di “Movimentazione o Alimentazione dei rifiuti” con relativa deviazione standard e livello di affidabilità.

Unità misura utilizzate	Quantità di rifiuti		t	
	Energia elettrica movimentazione		kWh	
	IPE		kWh/t	
Campo variazione tonnellate rifiuto movimentate		IPE	Affidabilità	
Min	Max			
t	t	kWh/t	Coeff. di Variazione	Livello di affidabilità
37.000	77.000	8,56 ± 7,11	83%	BASSO
707.001	721.000	3,58 ± 2,19	61%	BASSO

Tabella 31 - IPE medio del consumo di Energia elettrica della fase “Movimentazione/Alimentazione rifiuti” in funzione della quantità di rifiuti e relativa deviazione standard.

Malgrado il campione dei dati sia limitato l’analisi dei dati sembra mostrare un legame tra il valore dell’IPE medio legato alla movimentazione dei rifiuti e la data di ultima ristrutturazione. In Tabella 32, infatti, si può vedere come i siti ristrutturati dopo il 2010 presentino un IPE sensibilmente inferiore (circa 28%) rispetto a quello dei siti con interventi di ristrutturazione Ante 2010. Tuttavia, va rimarcato come il campione dati risulta essere molto limitato, pertanto i dati

debbono essere presi con le dovute cautele.

Data di ristrutturazione	IPE (kWh/t)	Numerosità del campione
Ante 2010	5,41 ± 5,50	14
Post 2010	3,90 ± 1,89	5

Tabella 32 - IPE medio del consumo di Energia elettrica della fase “Movimentazione/Alimentazione rifiuti” in funzione della quantità di rifiuti per i siti ristrutturati ante e post 2010.

6.5.1.2 Forno/Generatore di vapore

La fase Forno/Generatore di vapore comprende i seguenti sistemi e componenti:

- Ventilazione aria primaria e secondaria;
- Ricircolo fumi;
- Movimentazione e (eventuale) Raffreddamento griglia;
- Bruciatori di post-combustione;
- Pulizia della caldaia;
- Evacuazione, spegnimento, trasporto e stoccaggio delle scorie.

Per la fase “Forno/Generatore di vapore” la retta di regressione del consumo Elettrico è stata ricavata in funzione dell’Apporto energetico dei rifiuti, espressa in MWh ed è mostrata in *Figura 22*, mentre nella *Tabella 33* sono riassunti i parametri della regressione stessa.

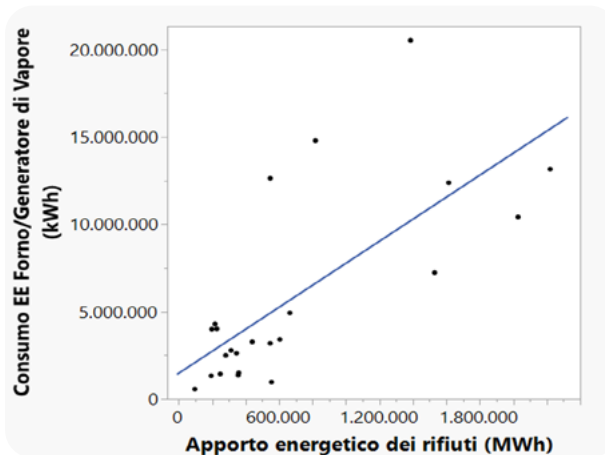


Figura 22 - Consumo Energia elettrica della fase “Forno/Generatore di vapore” in funzione dell’Apporto Energetico dei rifiuti.

Rette di Regressione: $E_{\text{Forno/GV}} [\text{kWh}]$ vs vs Apporto Energetico rifiuti [MWh]						
Consumo $E_{\text{Forno/GV}} [\text{kWh}] = 1.463.820,3 + 6,299 * \text{Apporto energetico dei rifiuti [MWh]}$ Int. Confidenza > 99%						
	R^2	R	P_{value}	N	Rcrit (bidir.) $\alpha=0,05$	Rcrit (bidir.) $\alpha=0,01$
Consumo En.El Forno/GV [kWh]	0,730	0,854	< 0,0001	23	0,3961	0,5052

Tabella 33 - Parametri della retta del consumo Elettrico della fase “Forno/Generatore di vapore” in funzione dell’Apporto Energetico dei rifiuti.

In Tabella 34 è riportato l’IPE medio del consumo Elettrico della fase “Forno/Generatore di vapore” e la relativa deviazione standard e livello di affidabilità.

Unità misura utilizzate	Apporto energetico dei rifiuti		MWh		
	Energia elettrica fase Forno o GV		kWh		
	IPE		kWh/MWh		
Campo variazione apporto energetico rifiuti		IPE		Affidabilità	
Min	Max				
MWh	MWh	kWh/MWh		Coeff. di Variazione	Livello di affidabilità
96.000	250.000	14,03 ± 7,11		51%	MEDIO
250.001	2.221.000	8,13 ± 5,36		66%	BASSO

Tabella 34 - IPE medio del consumo di Energia elettrica della fase “Forno/Generatore di vapore” in funzione dell’Apporto Energetico dei rifiuti e relativa deviazione standard.

Si evidenzia come la maggioranza dei siti del campione (87%), hanno forni della tipologia a griglia mobile (MG) con raffreddamento ad aria o ad acqua, mentre i restanti siti hanno forni della tipologia a letto fluido (FB) bollente o ricircolato [1]. Dall’elaborazione separata dei dati di consumo elettrico dei forni delle due tipologie, come è mostrato in Tabella 35, risulta che i forni a griglia mobile sono caratterizzati da un IPE elettrico medio per la fase “Forno/Generatore di vapore” sensibilmente minore (meno della metà) rispetto a quelli a letto fluido. Anche in questo caso va fatta presente l’esiguità del campione dei forni a letto

fluido, pertanto i risultati mostrati nella *Tabella 35* debbono essere presi con le dovute cautele.

Tipologia di Forno	IPE [kWh/MWh]	Numerosità del campione
Griglia mobile	8,05 ± 5,33	20
Letto fluido	18,48 ± 1,12	3

Tabella 35 - IPE medio del consumo di Energia elettrica della fase “Forno/Generatore di vapore” in funzione dell’Apporto Energetico dei rifiuti per le due tipologie di forni presenti nei siti (MG o FB).

In *Tabella 36* vi è un’analisi dei valori dell’IPE in funzione del periodo in cui è stata effettuata un’ultima ristrutturazione. In particolare, si sono suddivisi i dati energetici dei siti tra quelli sottoposti a ristrutturazione prima del 2010 e quelli ristrutturati successivamente.

Dall’elaborazione separata dei dati di consumo elettrico per i due periodo, risulta che i siti ristrutturati post 2010 sono caratterizzati da un IPE elettrico medio per la fase “Forno/Generatore di vapore” inferiore di circa il 33% rispetto a quelli ristrutturati ante 2010, sempre tenendo presente l’esiguità del campione dei siti ristrutturati post 2010.

Data di ristrutturazione	IPE [kWh/MWh]	Numerosità del campione
Ante 2010	10,83 ± 7,10	14
Post 2010	7,31 ± 4,76	5

Tabella 36 - IPE medio del consumo di Energia elettrica della fase “Forno/Generatore di vapore” in funzione dell’Apporto Energetico dei rifiuti per i siti ristrutturati ante 2010 o post 2010.

6.5.1.3 Ciclo termico

La fase “Ciclo termico” comprende i seguenti sistemi e componenti:

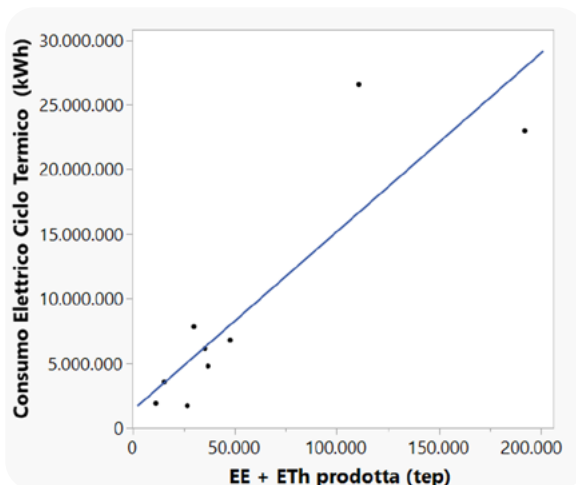
- ☞ Condensazione dell’acqua di alimento caldaia;
- ☞ Estrazione delle condense;
- ☞ Acqua di alimento caldaia;
- ☞ Degasatore;
- ☞ Quadro di controllo del turboalternatore.

Il consumo da imputare alla fase di “Ciclo termico” è solo di tipo Elettrico. Per questo IPE sono state fatte due distinte elaborazioni rispettivamente per i siti che producono sia energia elettrica che energia termica e per i siti che invece producono solo energia elettrica.

Le due distinte elaborazioni sono mostrate nelle *Figure 23* e *24*, mentre i parametri statistici sono riassunti nelle *Tabelle 37* e *39*.

In particolare, in *Figura 23*, riferita ai siti che producono sia energia elettrica che termica, è riportata la retta di regressione ricavata dall’elaborazione del consumo Elettrico della fase “Ciclo termico” rispetto alla somma dell’energia elettrica e termica prodotte (esprese in tep). In *Tabella 37* sono riassunti i parametri statistici della regressione stessa.

Figura 23 - Consumo Energia elettrica della fase “Ciclo termico” in funzione dell’Energia elettrica e termica (lorda) prodotta, per i siti che producono sia energia elettrica che termica.



Rette di Regressione: E.El _{ciclo termico} [kWh] vs vs Energia prodotta [tep]						
Consumo El. Ciclo termico [kWh] = 1.352.455,3 + + 138,2 * Energia prodotta [tep] Int. Confidenza > 99%						
	R ²	R	P _{value}	N	Rcrit (bidir.) α=0,05	Rcrit (bidir.) α=0,01
Consumo En.El Ciclo Termico [kWh]	0,785	0,886	0,0015	9	0,6321	0,7348

Tabella 37 - Parametri della retta del consumo Elettrico della fase “Ciclo termico” in funzione dell’Energia elettrica e termica (lorda) prodotta per i siti che producono sia energia elettrica che termica.

In *Tabella 38* è riportato l'IPE medio del consumo Elettrico della fase "Ciclo termico" riferita alla somma dell'energia elettrica e termica prodotte (esprese in tep) con relativa deviazione standard e livello di affidabilità.

Unità misura utilizzate	Energia elettrica e termica lorda prodotta		tep	
	Energia Elettrica consumata ciclo termico		kWh	
	IPE		kWh/tep	
Campo variazione energia prodotta		IPE	Affidabilità	
Min	Max			
tep	tep	kWh/tep	Coeff. di variazione	Livello di affidabilità
11.400	192.000	169,21 ± 64,11	38%	MEDIO

Tabella 38 - IPE medio[kWh/tep] del consumo di Energia elettrica della fase "Ciclo termico" in funzione dell'Energia elettrica e termica lorda prodotta con relativa deviazione standard e livello di affidabilità.

In *Figura 24*, riferita ai siti che producono solo energia elettrica, è riportata la retta di regressione ricavata dall'elaborazione del consumo Elettrico della fase "Ciclo termico" rispetto all'energia elettrica prodotta (espressa in tep). Nella *Tabella 39* sono, invece, riassunti i parametri statistici della regressione stessa.

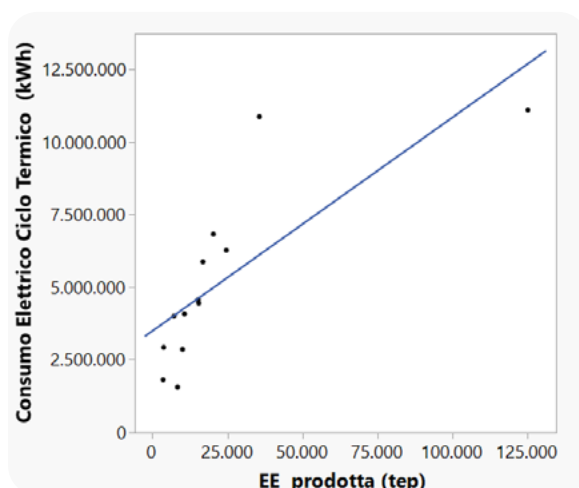


Figura 24 - Consumo Energia elettrica della fase "Ciclo termico" in funzione dell'Energia elettrica (lorda) prodotta, per i siti che producono solo energia elettrica.

Rette di Regressione: E.El _{ciclo_termico} [kWh] vs vs Energia elettrica prodotta [tep]						
Consumo El. _{ciclo_termico} [kWh] = 3.490.616,8 + + 73,46 * Energia elettrica prodotta [tep] Int. Confidenza > 99%						
	R ²	R	P _{value}	N	Rcrit (bidir.) α=0,05	Rcrit (bidir.) α=0,01
Consumo En.El Forno/GV [kWh]	0,603	0,777	0,0018	13	0,5140	0,6411

Tabella 39 - Parametri della retta del consumo Elettrico della fase “Ciclo termico” in funzione dell’Energia elettrica lorda prodotta per i siti che producono solo energia elettrica.

In Tabella 40 è riportato l’IPE medio del consumo Elettrico della fase “Ciclo termico” riferita all’energia elettrica prodotta (espressa in tep) con la relativa deviazione standard e livello di affidabilità per i siti che producono solo energia elettrica.

Unità misura utilizzate	Energia elettrica lorda prodotta		tep	
	Energia Elettrica consumata		kWh	
	IPE		kWh/tep	
Campo variazione energia prodotta		IPE	Affidabilità	
Min	Max			
tep	tep	kWh/tep	Coeff. di variazione	Livello di affidabilità
3.500	15.000	452,99 ± 215,57	48%	MEDIO
15.001	125.000	274,64 ± 87,72	32%	MEDIO

Tabella 40 - IPE medio[kWh/tep] del consumo di Energia elettrica della fase “Ciclo termico” in funzione dell’Energia elettrica e termica (lorda) prodotta e relativa deviazione standard per i siti che producono sia energia elettrica che termica.

Si evidenzia che il valore dell’IPE “Ciclo Termico”, espresso in kWh/tep non consente di apprezzare in maniera chiara il rapporto tra il consumo Elettrico e la produzione Elettrica ed eventualmente termica del processo di Incenerimento. Convertendo il consumo Elettrico in tep, si ha una evidente valutazione della convenienza energetica (come consumo rispetto a produzione) della fase “Ciclo

Termico” e dell’intero processo di incenerimento rifiuti.

In *Tabella 41* vi è un’analisi dei valori dell’IPE in funzione del periodo in cui è stata effettuata l’ultima ristrutturazione. In particolare, si sono suddivisi i dati energetici dei siti tra quelli sottoposti a ristrutturazione prima del 2010 e quelli ristrutturati successivamente.

Dall’elaborazione separata dei dati di consumo elettrico per i due periodi, risulta che i siti ristrutturati post 2010 sono caratterizzati da un IPE elettrico medio, per la fase “Ciclo Termico”, superiore di circa il 20% rispetto a quello dei siti ristrutturati ante 2010. Nella valutazione del risultato va tenuta presente l’esiguità del campione dei siti ristrutturati post 2010 pertanto i dati debbono essere presi con le dovute cautele. Tuttavia, si può provare a dare una motivazione a questa “anomalia” che potrebbe essere dovuta al fatto che, alcuni interventi di efficientamento effettuati durante la ristrutturazione degli impianti sul “Ciclo termico” (come ad esempio eventuali recuperi termici o l’installazione di torri evaporative), pur garantendo un aumento dell’efficienza complessiva dell’impianto, comportano un aumento del consumo elettrico della fase in oggetto.

Data di ristrutturazione	IPE [kWh/tep]	Numerosità del campione
Ante 2010	264,39 ± 189,73	15
Post 2010	330,32 ± 163,33	4

Tabella 41 - IPE medio del consumo di Energia elettrica della fase “Ciclo termico” in funzione dell’Apporto Energetico dei rifiuti per i siti ristrutturati ante 2010 o post 2010.

Per la fase “Ciclo Termico” è possibile analizzare l’IPE anche sulla base dei livelli di pressione del ciclo stesso. In particolare, vengono riportati separatamente gli impianti con livelli di pressione del “Ciclo Termico” rispettivamente maggiore e minore di 50 bar.

Come mostrato in *Tabella 42*, i siti con livello di pressione maggiore di 50 bar, hanno un IPE, per la fase “Ciclo Termico”, inferiore di circa il 25% rispetto ai siti che invece hanno un livello di pressione minore di 50 bar, evidenziando come a più elevati livelli di pressione corrispondano consumi elettrici inferiori.

Livello di pressione del Ciclo Termico	IPE [kWh/tep]	Numerosità del campione
<50 bar	254,26 ± 84,11	9
>50 bar	194,40 ± 120,17	6

Tabella 42 - IPE medio del consumo di Energia elettrica della fase “Ciclo termico” in funzione dell’Apporto Energetico dei rifiuti per i siti con livello di pressione inferiore o superiore 50 bar.

6.5.1.4 Depurazione fumi

La fase “Depurazione fumi” comprende i seguenti sistemi e componenti:

- ☞ Estrazione fumi;
- ☞ Rimozione polveri e abbattimento inquinanti;
- ☞ Alimentazione e dosaggio chemicals;
- ☞ Convogliamento/trasporto e stoccaggio ceneri.

Per la fase “Depurazione fumi” il consumo da imputare è di tipo sia Elettrico che Termico.

La retta di regressione del consumo Elettrico della fase “Depurazione fumi” è stata ricavata in funzione della quantità di fumi al camino, espressa in kNm³, ed è mostrata in Figura 25, mentre nella Tabella 44 sono riassunti i parametri della regressione stessa.

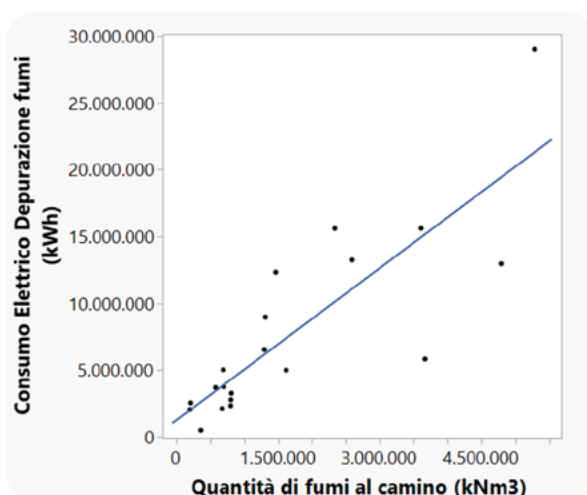


Figura 25 - Consumo Energia elettrica della fase “Depurazione fumi” in funzione della quantità di fumi.

Rette di Regressione: Consumo el.dep.fumi [kWh] vs vs fumi al camino [kNm ³]						
Consumo El.dep. fumi [kWh] = 1.225.327,4 + + 3,803 * Quantità di fumi al camino [kNm ³] Int. Confidenza > 99%						
	R ²	R	P _{value}	N	Rcrit (bidir.) α=0,05	Rcrit (bidir.) α=0,01
Consumo En.El Dep. Fumi [kWh]	0,693	0,832	< 0,0001	20	0,4227	0,5368

Tabella 44 - Parametri della retta de consumo Elettrico della fase “Depurazione fumi” in funzione della quantità di fumi.

In Tabella 45 è riportato l’IPE medio del consumo Elettrico della fase “Depurazione fumi” con la relativa deviazione standard e livello di affidabilità.

Unità misura utilizzate	Quantità di fumi		kNm ³	
	Energia Elettrica		kWh	
	IPE		kWh/kNm ³	
Campo variazione quantità fumi		IPE	Affidabilità	
Min	Max			
kNm ³	kNm ³	kWh/kNm ³	Coeff. di variazione	Livello di affidabilità
197.000	700.000	6,79 ± 4,16	61%	BASSO
700.001	5.230.000	4,64 ± 1,86	40%	MEDIO

Tabella 45 - IPE medio del consumo di Energia elettrica della fase “Depurazione fumi” in funzione della quantità di fumi e relativa deviazione standard.

In Tabella 46 vi è un’analisi dei valori dell’IPE in funzione del periodo in cui è stata effettuata l’ultima ristrutturazione. In particolare, si sono suddivisi i dati energetici dei siti tra quelli sottoposti a ristrutturazione prima del 2010 e quelli ristrutturati successivamente. Dall’elaborazione separata dei dati di consumo elettrico per i due periodi, risulta che i siti ristrutturati post 2010 sono caratterizzati da un IPE elettrico per la fase “Depurazione fumi” inferiore di circa il 30% rispetto a quelli ristrutturati ante 2010. Nella valutazione di questi dati va sempre tenuta presente l’esiguità del campione di siti oggetto dell’indagine.

Data di ristrutturazione	IPE [kWh/ kNm ³]	Numerosità del campione
Ante 2010	5,97 ± 3,28	12
Post 2010	4,18 ± 2,01	5

Tabella 46 - IPE medio del consumo di Energia elettrica della fase “Depurazione fumi” in funzione dell’Apporto Energetico dei rifiuti per i forni ristrutturati ante 2010 o post 2010.

6.5.2 IPEs Termici

Le fasi delle Attività Principali caratterizzate da consumi di tipo Termico sono la è la Depurazione Fumi ed il Forno/generatore di vapore, tuttavia, per quest’ultima il consumo termico è legato alle attività di accensione e spegnimento e quindi intrinsecamente casuali, pertanto, per questa non viene calcolato l’IPEs.

6.5.2.1 Depurazione fumi

Il combustibile utilizzato in questa fase è il Gas naturale.

La fase di “Depurazione fumi” vede un consumo sia di tipo Elettrico che Termico. Essendo il campione dati costituito da pochi siti non è riportata la retta di regressione. Nella *Tabella 47* è riportato l’IPE medio del consumo di Gas naturale in funzione della quantità di fumi trattati, espressa in kNm³ con relativa deviazione standard e livello di affidabilità.

Unità misura utilizzate	Quantità di fumi		kNm ³	
	Gas Naturale		Sm ³	
	IPE		Sm ³ /kNm ³	
Campo variazione quantità fumi		IPE	Affidabilità	
Min	Max			
kNm ³	kNm ³	Sm ³ /kNm ³	Coeff. di variazione	Livello di affidabilità
200.000	5.280.000	0,66 ± 0,63	95%	BASSO

Tabella 47 - IPE medio del consumo di Gas naturale della fase “Depurazione fumi” in funzione della quantità di fumi.

Essendo il campione dati limitato per questa fase non è stato possibile effettuare ulteriori analisi.

6.6 Indici di prestazione energetica specifici (IPEs) - Servizi Ausiliari

In questo paragrafo viene riportata l'analisi del reparto di produzione di aria compressa compreso all'interno dei Servizi Ausiliari.

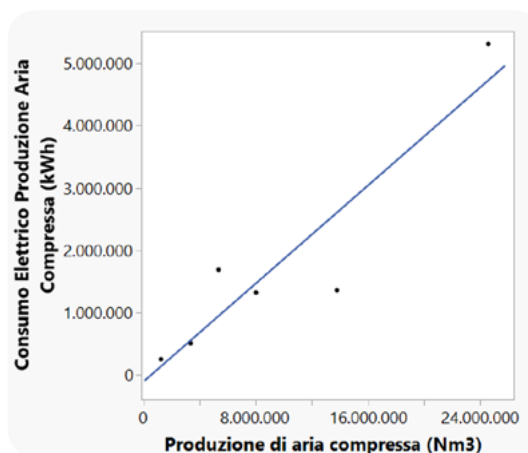
Purtroppo per gli altri reparti afferenti all'area funzionale Servizio Ausiliari causa mancanza di informazioni statisticamente sufficienti non è stato possibile effettuare approfondimenti e analisi.

6.6.1 Produzione di aria compressa

Per la Produzione di aria compressa il consumo risulta essere solo di tipo Elettrico. Malgrado il campione dati risulti essere limitato è stato possibile determinare sia la retta di regressione che il valore dell'IPE medio.

In *Figura 26* è riportata la retta di regressione dei consumi Elettrici della fase di Produzione di aria compressa in funzione della quantità di aria compressa prodotta, espressa in Nm³, mentre nella *Tabella 48* sono riassunti i parametri della regressione stessa. Come si può osservare la retta di regressione presenta l'intercetta negativa questo è probabilmente dovuto alla scarsa numerosità del campione distribuito su un campo di esistenza molto elevato.

Figura 26 - Consumo Energia elettrica della fase di produzione di aria compressa in funzione della quantità di aria compressa prodotta.



Rette di Regressione: Consumo El.Aria_compr. [kWh] vs vs Produzione Aria compr. [Nm ³]						
Consumo El.Aria_compr. [kWh] = -102.664,3 + 0,1963 * * Aria compressa prodotta [Nm ³] Int. Confidenza = 99%						
	R ²	R	P _{value}	N	Rcrit (bidir.) α=0,05	Rcrit (bidir.) α=0,01
Consumo En.El Aria compressa [kWh]	0,853	0,924	0,0086	6	0,7067	0,8343

Tabella 48 - Parametri della retta di regressione del consumo di Energia elettrica della fase di Produzione di aria compressa in funzione della quantità di aria compressa prodotta.

In Tabella 49 è riportato l' IPE medio del consumo Elettrico della fase di Produzione di aria compressa con relativa deviazione standard e livello di affidabilità.

Unità misura utilizzate	Aria compressa		Nm ³		
	Energia Elettrica		kWh		
	IPE		kWh/kNm ³		
Campo variazione produzione di aria compressa		IPE		Affidabilità	
Min	Max				
Nm ³	Nm ³	kWh/Nm ³		Coeff. di variazione	Livello di affidabilità
1.200.000	25.000.000	0,192 ± 0,074		39%	MEDIO

Tabella 49 - IPE medio del consumo di Energia elettrica della fase di Produzione di aria compressa in funzione della quantità di aria compressa prodotta.





INTERVENTI
DI EFFICIENZA ENERGETICA

7

7. Interventi di efficienza energetica: soluzioni tecnologiche per il settore dell'incenerimento dei rifiuti

In questo capitolo vengono rappresentate le principali soluzioni tecnologiche di efficientamento energetico presenti oggi sul mercato.

Vengono quindi elencati gli interventi di efficientamento energetico suddivisi per le fasi del processo.

Inoltre, vengono proposti anche i principali interventi che potrebbero essere presi in considerazione per l'efficientamento degli impianti ausiliari.

Scopo del presente capitolo è quello di fornire un elenco il più completo possibile delle soluzioni tecnologiche che allo stato dell'arte potrebbero essere considerate per l'efficientamento energetico del sito. Per completezza verranno qui riportate anche soluzioni tecnologiche innovative non ancora utilizzate su larga scala, ma limitate per lo più a progetti pilota.

Ovviamente l'individuazione di un possibile intervento di efficientamento non può prescindere né dall'impatto che la sua messa in opera ha sul sito né dalla peculiarità specifica del processo presente all'interno del sito produttivo. Vista quindi la varietà di casistiche riscontrabili all'interno dei diversi siti di incenerimento, vengono qui proposti sia gli interventi – in alcuni casi alternativi tra loro - che possono essere messi in atto solo in caso di revamping importanti che quelli riguardanti fasi di processo non strettamente legati al processo di incenerimento come il trattamento dei rifiuti (cap. 7.1) e le attività legate alla ricezione dei rifiuti (cap.7.4) che solo in alcuni casi sono svolti all'interno del sito produttivo. Pertanto, l'individuazione dell'intervento di efficientamento energetico deve essere accompagnata da una accurata analisi di fattibilità e di costo-beneficio che tenga conto delle peculiarità e caratteristiche specifiche del sito oggetto di analisi.

Gli interventi di efficientamento energetico vengono riportati suddivisi per fase di processo e rappresentati in tabelle dove ciascuna fase viene suddivisa ulteriormente nelle sue componentistiche principali (oggetto della soluzione) e per ciascuna di queste vengono proposte una o più soluzioni tecnologiche (Soluzione), accanto ad ogni soluzione tecnologica vengono riportati i riferimenti bibliografici utili per eventuali approfondimenti (Riferimenti) e infine eventuali note e contributi di esperti dell'associazione di categoria che forniscono ulteriori informazioni riguardo la soluzione individuata. Oltre ai riferimenti bibliografici

per l'individuazione degli interventi sono state utilizzate anche le informazioni riportate nelle diagnosi energetiche pervenute ad ENEA. Nel caso in cui una delle soluzioni proposte è stata riscontrata all'interno delle diagnosi energetica questa sarà evidenziata con un colore diverso (rosato) e all'interno del campo riferimenti comparirà [DE].

7.1 Trattamento meccanico dei rifiuti

Come menzionato nella premessa al capitolo 7, il trattamento meccanico dei rifiuti è uno di quei processi che nella maggior parte dei casi, non è presente all'interno dei siti di incenerimento dei rifiuti, ma viene svolto tipicamente a monte prima dell'ingresso dei rifiuti nel sito.

7.1.1 Triturazione

I rifiuti in ingresso vengono spinti in una camera di triturazione, dove dei trituratori (*shredders*) ne riducono le dimensioni facendo passare il materiale tra martelli rotanti e un'incudine ancorata alle pareti della camera di triturazione. I trituratori possono essere mulini a martelli o a catene, o alberi dentati in rotazione. La triturazione può essere effettuata in un'unica volta, o in due fasi, dove la prima è detta pretrattamento (*pre-shredding*). I rifiuti continuano ad essere processati fino a che non raggiungono dimensioni tali da passare dei setacci d'uscita [8]. Dei sistemi di areazione, poi, rimuovono la polvere dal processo. Le ridotte dimensioni dei rifiuti permettono una più facile separazione dei materiali tra metallici e non metallici. L'acciaio recuperato può essere reinserito in fornace nelle industrie produttrici di acciaio. Invece, i rifiuti che possono essere riutilizzati come combustibile subiscono un processo di pellettizzazione, ottenibile con “*flatbed presses*”, “*ring die presses*”, e “*disc agglomerators*”. Esistono differenti varianti di trituratori [8] [9] [10], tra cui *mixed scrap shredders*, *zerdirators*, *kondirators*, trituratori LSHT (*Low Speed High Torque*), *roll crushers*, *semi-wet shredders*, *shear cutters*, *wet shredders*, *jaw crushers*, *cascade ball mills e shredders* per cavi [8]. Un'alternativa alla triturazione è il “*criogenic grinding*” in cui, dopo una prima separazione dei liquidi dai materiali solidi, l'azoto liquido è usato per infragilire i rifiuti e ridurne le dimensioni mediante macinatura, setacciamento ed estrazione a basse temperature (-100° ÷ -196 °C).

Trattamento meccanico*			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
Trituratore	<i>Pre-shredder</i>	Installazione di un <i>pre-shredder</i>	[8]
Trituratore	<i>Shear cutter</i>	Installazione di un <i>shear cutter</i>	[10]
Trituratore	<i>Mixed scrap shredder</i>	Installazione di un <i>mixed scrap shredder</i>	[8]
Trituratore	Zerdirator	Installazione di un zerdirator	[8]
Trituratore	<i>Roll crusher</i>	Installazione di un <i>roll crusher</i>	[10]
Trituratore	<i>Jaw crusher</i>	Installazione di un <i>jaw crusher</i>	[10]
Trituratore	Kondirato	Installazione di un kondirato	[8]
Trituratore	<i>Semi-wet shredder</i>	Installazione di un <i>semi-wet shredder</i>	[8]
Trituratore	<i>Wet shredder</i>	Installazione di un <i>wet shredder</i>	[8]
Trituratore	<i>Shredder per cavi</i>	Installazione di un <i>shredder per cavi</i>	[8]
Trituratore	<i>Cascade ball mill</i>	Installazione di un <i>cascade ball mill</i>	[10]
Trituratore	Trituratore	Regolazione dei setacci in uscita per aumentare il materiale in camera e quindi l'efficienza	[8]
Trituratore	Trituratore a bassa velocità ed alta coppia	Installazione di un trituratore a bassa velocità ed alta coppia	[9][8]
Trituratore	Trituratore a martelli	Installazione di un trituratore a martelli	[9][8]

* In merito alle soluzioni presentate, l'associazione di categoria e/o gli esperti del settore fanno presente che: "Non sempre si ha la possibilità di fare upgrade o passare a una tecnologia indicata come migliore dallo stato dell'arte poiché impattanti in modo significativo su spazi e/o parametri di lavoro dei sistemi confinanti."

7.2 Incenerimento

I rifiuti vengono inseriti in una camera di combustione e portati al di sopra della temperatura di autoignizione (temperatura sopra cui cominciano a bruciare in presenza di ossigeno). Il calore che si sviluppa durante la combustione è generalmente sufficiente a innescare una reazione a catena in grado di autoalimentare termicamente il processo, limitando o addirittura eliminando la necessità di combustibili aggiuntivi. In questo modo, i rifiuti vengono ossidati così da ridurre il volume, catturare o distruggere sostanze potenzialmente dannose e, infine, recuperare sotto forma di energia termica l'energia in essi contenuta (impianti *Waste-to-Energy*) [17][18][19][20].

Le fasi principali del processo di incenerimento sono tre: asciugatura e degasaggio (con un primo riscaldamento a 100-300° C si asciuga il materiale e si rimuovono i componenti gassosi), pirolisi e gassificazione (le sostanze organiche si decompongono in assenza di ossigeno a temperature di 250-700° C e i residui solidi di carbonio reagiscono con vapore d'acqua e CO₂ ad una temperatura di 500-1000° C diventando gassosi) e ossidazione (i gas combustibili creati nella fase precedente sono ossidati, generando gas di combustione a 800-1450° C). In uscita si ottengono ceneri leggere (trasportate dai fumi) e ceneri pesanti (accumulate sul fondo), che possono essere trattate meccanicamente e riutilizzate.

Il trattamento delle ceneri avviene mediante setacciamento (*rotary screens, flat screens* vibranti e non, *finger screens, star screens*), frantumazione e rimozione delle frazioni incombuste a bassa densità (*air separation*). I metalli ferrosi vengono rimossi tramite separatori magnetici mentre quelli non ferrosi si estraggono con separatori a correnti parassite [20]. Altri trattamenti innovativi per le ceneri sono la vetrificazione con microonde (sia per le ceneri leggere che pesanti) [21][22] e la vetrificazione con plasma (per ceneri leggere) [23]. L'incenerimento può avvenire mediante inceneritori a camera di combustione: inceneritori a grate [20][24][25][26], forni rotativi [27][20] o forni a letto fluido (*stationary fluidised bed, rotating fluidised bed, sperader-stroker furnace, circulating fluidised bed*) [20][24][26][28]. In alternativa, l'incenerimento può avvenire con sistemi di pirolisi (o torrefazione) e gassificazione, che trattano rifiuti selezionati e di dimensioni minori rispetto a quelli processati nei sistemi a combustione, ma mantengono separate le reazioni (combustione, pirolisi e gassificazione) che in una normale

camera di combustione avvengono in contemporanea. Infine, esiste la possibilità di usare entrambi i sistemi in modo congiunto [20].

Incenerimento in camera di combustione*			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
Inceneritore a grate	Inceneritore con <i>roller grates</i>	Installazione di un inceneritore con <i>roller grates</i>	[24][20]
Inceneritore a grate	Inceneritore con <i>chain grates</i>	Installazione di un inceneritore con <i>chain grates</i>	[20]
Inceneritore a grate	Inceneritore con <i>push grates</i>	Installazione di un inceneritore con <i>push grates</i>	[20]
Inceneritore a grate	Inceneritore con <i>rocking grates</i>	Installazione di un inceneritore con <i>rocking grates</i>	[25][25] [20]
Inceneritore a grate	Inceneritore con <i>reciprocating grates</i>	Installazione di un inceneritore con <i>reciprocating grates</i>	[24] [20]
Inceneritore a grate	Inceneritore con <i>travelling grate</i>	Installazione di un inceneritore con <i>travelling grate</i>	[24] [20]
Inceneritore a grate	Areazione	Installazione di un inceneritore con flusso d'aria controcorrente	[25][20]
Inceneritore a grate	Areazione	Installazione di un inceneritore con flusso d'aria secondo corrente	[25][20]
Inceneritore a grate	Areazione	Installazione di un inceneritore con flusso d'aria multiplo	[25][20]
Forno rotativo	Forno rotativo	Installazione di un forno rotativo	[25][20]
Inceneritore a letto fluido	<i>Stationary fluidised bed</i>	Installazione di uno <i>stationary fluidised bed</i>	[24] [20]
Inceneritore a letto fluido	<i>Rotating fluidised bed</i>	Installazione di un <i>rotating fluidised bed</i>	[20]

Incenerimento in camera di combustione*			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
Inceneritore a letto fluido	<i>Fornace spreader-stroker</i>	Installazione di una fornace <i>spreader-stroker</i>	[20]
Inceneritore a letto fluido	<i>Circuilating fluidised bed</i>	Installazione di un <i>circuilating fluidised bed</i>	[20]
Inceneritore a letto fluido	Turbocompressore	Installazione di un turbocompressore nel sistema d'areazione di un inceneritore a letto fluido	[28]
Dispositivo microonde	Dispositivo microonde	Installazione di un sistema a microonde per la solidificazione delle ceneri leggere	[22]
Dispositivo microonde	Dispositivo microonde	Installazione di un sistema a microonde per la vetrificazione delle ceneri pesanti	[21]
Dispositivo al plasma	Dispositivo al plasma	Installazione di un sistema al plasma per la vetrificazione delle ceneri	[23]

* In merito alle soluzioni presentate, l'associazione di categoria e/o gli esperti del settore fanno presente che: "Non sempre si ha la possibilità di fare upgrade o passare a una tecnologia indicata come migliore dallo stato dell'arte poiché impattanti in modo significativo su spazi e/o parametri di lavoro dei sistemi confinanti."

Pirolisi e gassificazione			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
Gassificatore	Gassificatore a letto fluido	Installazione di un gassificatore a letto fluido	[29][20]
Gassificatore	<i>Fixed bed downdraft gasifier</i>	Installazione di un <i>fixed bed downdraft gasifier</i>	[29][20]
Gassificatore	<i>Fixed bed updraft gasifier</i>	Installazione di un <i>fixed bed updraft gasifier</i>	[29]
Gassificatore	Gassificatore a forno rotativo	Installazione di un gassificatore a forno rotativo	[29]

Pirolisi e gassificazione			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
Gassificatore	Gassificatore a grate mobili	Installazione di un gassificatore a grate mobili	[29]
Gassificatore	Gassificatore al plasma	Installazione di un gassificatore al plasma	[29]
Gassificatore	Gassificatore a sistema ciclonico	Installazione di un gassificatore a sistema ciclonico	[20]
Gassificatore	<i>Entrained flow gasifier</i>	Installazione di un <i>entrained flow gasifier</i>	[29]
Gassificatore	Gassificatore in atmosfera d'idrogeno	Installazione di un gassificatore in atmosfera d'idrogeno	[30]
Gassificatore	Gassificatore al plasma d'idrogeno	Installazione di un gassificatore al plasma d'idrogeno	[30]
Dispositivo per la pirolisi	Dispositivo per la pirolisi	Installazione di un dispositivo per la pirolisi	[20]
Dispositivo per la pirolisi	Dispositivo per la pirolisi al plasma	Installazione di un dispositivo per la pirolisi al plasma	[34]
Dispositivo per la pirolisi	Dispositivo per la torrefazione	Installazione di un dispositivo per la torrefazione	[35]
Dispositivo per pirolisi e combustione	Dispositivo per pirolisi e combustione	Installazione di un forno rotativo	[20]
Dispositivo per la pirolisi e gassificatore	Dispositivo per la pirolisi e gassificatore	Installazione di un sistema di pirolisi e gassificazione a processo disconnesso (di conversione)	[20]
Dispositivo per la pirolisi e gassificatore	Processo connesso	Installazione di un sistema di pirolisi e gassificazione a processo connesso	[20]
Gassificatore e combustore	Gassificatore a letto fluido e fornace	Installazione di un gassificatore a letto fluido + fornace per lo scioglimento delle ceneri	[20]

Pirolisi e gassificazione			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
Gassificatore e combustore	Forno a pozzo	Installazione di un forno a pozzo	[20]

7.3 Controllo delle emissioni in aria

I gas di scarico in uscita dall'inceneritore sono generalmente ricchi di polveri e ceneri. Allo stesso modo anche i processi di triturazione e processamento biologico portano a diffusione di agenti inquinanti. Di seguito si citano i principali sistemi per il controllo delle emissioni in ambiente: cicloni [8][20][36][37], precipitatori elettrostatici (a filtro, umidi, o a condensazione) [20], filtri a manica [8][20][37], filtri assoluti (*High-Efficiency Particle Air filters* o *Ultra-Low Penetration Air filters* formati da carta o fibra di vetro) [8], sistemi di ossidazione termica (combustione) [8], sistemi di biofiltraggio e ossidazione naturale con microorganismi [8], sistemi a condensazione [8], sistemi ad adsorbimento [8], sistemi di *wet scrubbing* (*ionisation wet scrubbers* [8][20], *venturi scrubbers* [20], *jet scrubbers*, *rotation scrubbers*, *venturi scrubbers*, *dry tower scrubbers*, *spray scrubbers* e *packed tower scrubbers* [37]) e, infine, sistemi di riduzione selettiva catalitica [20]. I gas contenenti tracce di VFC/VHC (derivanti dal processamento di dispositivi con liquidi refrigeranti), invece, possono essere trattati in diversi modi [8] tra cui tecniche di conversione catalitica e tecniche di adsorbimento.

Controllo emissioni in aria			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
Separatore	Sistema ciclonico	Installazione di un sistema ciclonico	[8][36]
Separatore	Sistema multiciclonico	Installazione di un sistema multiciclonico	[20]
Separatore	Filtro in tessuto	Installazione di un filtro in tessuto	[8][37]
Separatore	Filtro a manica	Aumento del numero di filtri a manica	[D.E.]

Controllo emissioni in aria			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
Separatore	<i>Absolute filter</i>	Installazione di un <i>absolute filter</i>	[8]
Separatore	Ossidatore termico	Installazione di un ossidatore termico	[8]
Precipitatore	Precipitatore elettrostatico	Installazione di un precipitatore elettrostatico	[8][37]
Precipitatore	Precipitatore elettrostatico umido	Installazione di un precipitatore elettrostatico umido	[20]
Precipitatore	Precipitatore elettrostatico a condensazione	Installazione di un precipitatore elettrostatico a condensazione	[20]
DeNOx	Recuperatore di calore	Installazione di un sistema DeNOx con recuperatore di calore	[D.E.]
DeNOx	Preriscaldamento	Installazione di un sistema di preriscaldamento a scambiatori usando i fumi (sostituendo i bruciatori a metano)	[D.E.]
Assorbitore	Filtro al carbone attivo	Installazione di un filtro al carbone attivo	[8]
Assorbitore	Filtro a zeoliti	Installazione di un filtro a zeoliti	[8]
Scrubber	<i>Jet scrubber</i>	Installazione di un <i>jet scrubber</i>	[20]
Scrubber	<i>Packed column scrubber</i>	Installazione di un <i>packed column scrubber</i>	[37]
Scrubber	<i>Rotation scrubber</i>	Installazione di un <i>rotation scrubber</i>	[20]
Scrubber	<i>Scrubber a ionizzazione</i>	Installazione di un scrubber a ionizzazione	[20]
Recuperatore di VFC/VHC	Dispositivo per la tecnica di conversione catalitica	Installazione di un dispositivo per la tecnica di conversione catalitica	[8]

Controllo emissioni in aria			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
Recuperatore di VFC/VHC	Dispositivo per la tecnica di assorbimento	Installazione di un dispositivo per la tecnica di assorbimento	[8]
Condensatore	Condensatore	Installazione di un condensatore	[8]
Dispositivo trattamento VOC	Sistema di riduzione selettiva catalitica (SCR)	Installazione di un sistema SCR	[20][37]
Dispositivo trattamento VOC	Ionizzatore e assorbitore	Installazione di un sistema formato da ionizzatore e assorbitore	[8]

7.4 Attività nella ricezione dei rifiuti

Come evidenziato nella premessa al capitolo 7, oltre al trattamento meccanico dei rifiuti (cap 7.1) anche l'attività di ricezione è una di quelle fasi che nella maggior parte dei casi non viene svolta all'interno del sito di incenerimento, ma effettuata a monte prima dell'ingresso dei rifiuti nel sito. Tuttavia, visto che in alcuni casi residuali queste attività vengono svolte all'interno del sito di incenerimento si è ritenuto utile inserire le eventuali soluzioni tecnologiche di efficientamento energetico. Le attività di ricezione dei rifiuti a monte del processo principale di trattamento [8] sono molteplici:

- Rimozione liquidi e umidità (asciugatura) con mezzi meccanici (decantatori, centrifughe, *belt filter presses* e *chamber filter presses*), sistemi a calore ed essiccazione (*disk dryer*, *drum dryer*, *fluidised bed dryer*, *belt dryer*, *thin film dryer*, *centrifugal dryer*, essiccatori a letto statico, essiccatori rotanti, essiccatori a tunnel, ed essiccatori pneumatici) [38], un eventuale passaggio di digestione anaerobica dei fanghi (biodrying) [39][40][41] e/o *immersion frying* [38].
- Miscelazione mediante *propeller mixers*, *turbo mixers*, *blade mixers*, *auger mixers*, *tumble mixers*, *drum mixers* e *rotary mixers*. Per i rifiuti solidi o pastosi può essere persino utilizzato un impastatore, un *forced aeration*

mixer o un *plough-share mixer*. Per i rifiuti liquidi si utilizzano agitatori o pompe.

- Pesatura, trasporto e controllo in ingresso.
- Ispezione e *sorting* (cernita dei rifiuti) mediante separazione manuale (dopo un'esaminazione visiva), separazione automatica (mediante scansione con metal detector e telecamera a colori e successivo allontanamento con aria compressa degli elementi da espellere) [8], separazione magnetica dei metalli ferrosi (magneti semplici, sistemi detti "*overband magnetic separator*" o cilindri magnetici) [8], separazione elettromagnetica dei metalli non ferrosi (separatori a correnti parassite) [8][36], separazione di tutti i tipi di metalli (bobine di rilevamento) [8], sistemi di separazione ottica (con spettroscopia a infrarossi o raggi X e getti d'aria per l'espulsione) [8], sistemi di separazione per densità e sistemi di separazione centrifughi (classificatori ad aria a zig zag, rotanti, ad e a flusso incrociato [10][36], sistemi *sink-float* [8], sistemi di separazione balistica [8], tavole vibranti [8], tavole a getti d'aria [8], aspiratori, setacciatori (cilindri rotanti, tele oscillanti, tele di tessuto plastico o gommoso) [10].

Rimozione liquidi			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
Estrattore di liquidi	Decantatore	Installazione di un decantatore	[20]
Estrattore di liquidi	Centrifuga	<i>Installazione di una centrifuga</i>	[20]
Estrattore di liquidi	Pressa filtrante a nastro	<i>Installazione di una pressa filtrante a nastro</i>	[20]
Estrattore di liquidi	Filtropressa	Installazione di una filtropressa	[20]
Essiccatore	<i>Immersion frying</i>	Installazione di un dispositivo per l' <i>immersion frying</i>	[38]
Essiccatore	Essiccatore a disco	Installazione di un essiccatore a disco	[20]

Rimozione liquidi			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
Essiccatore	Essiccatore rotante	Installazione di un essiccatore rotante	[38]
Essiccatore	Essiccatore a letto statico	Installazione di un essiccatore a letto statico	[38]
Essiccatore	Essiccatore a tamburo	Installazione di un essiccatore a tamburo	[20]
Essiccatore	Essiccatore a tunnel	Installazione di un essiccatore a tunnel	[38]
Essiccatore	Essiccatore a letto fluido	Installazione di un essiccatore a letto fluido	[20][38]
Essiccatore	Bioessiccatore	Installazione di un bioessiccatore	[39][40][41]
Essiccatore	bioessiccatore in serra	Installazione di un bioessiccazione in serra	[41]
Essiccatore	Essiccatore a nastro	Installazione di un essiccatore a nastro	[20]
Essiccatore	Essiccatore pneumatio	Installazione di un essiccatore pneumatio	[38]
Essiccatore	Essiccatore a film sottile	Installazione di un essiccatore a film sottile	[20]
Essiccatore	Essiccatore centrifugo	Installazione di un essiccatore centrifugo	[20]
Essiccatore	Essiccatore solare	Installazione di un essiccatore solare	[20]

Miscelazione			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
Miscelatore ad albero rotante	Miscelatore ad elica	Installazione di un miscelatore ad elica	[8]
Miscelatore ad albero rotante	Mescolatore a coclea	Installazione di un mescolatore a coclea	[8]
Miscelatore ad albero rotante	Turbomiscelatore	Installazione di un turbomiscelatore	[8]
Miscelatore ad albero rotante	Impastatore	Installazione di un impastatore	[8]

Miscelazione			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
Miscelatore ad albero rotante	<i>Forced areation mixer</i>	Installazione di un <i>forced areation mixer</i>	[8]
Miscelatore ad albero rotante	Miscelatore a lama sigma	Installazione di un miscelatore a lama sigma	[8]
Miscelatore ad albero rotante	<i>Plough share mixer</i>	Installazione di un <i>plough share mixer</i>	[8]
Miscelatore a contenitore rotante	<i>Tumble mixer</i>	Installazione di un <i>tumble mixer</i>	[8]
Miscelatore a contenitore rotante	Miscelatore a tamburo	Installazione di un miscelatore a tamburo	[8]
Miscelatore a contenitore rotante	<i>Rotary mixer</i>	Installazione di un <i>rotary mixer</i>	[8]
Miscelatore per liquidi	Pompe	Installazione di pompe per la miscelazione dei liquidi	[8]
Miscelatore per liquidi	Agitatore	Installazione di un agitatore per la miscelazione dei liquidi	[8]

Trasporto rifiuti			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
Macchina movimento terra	Macchine movimento terra	Utilizzo di macchine movimento terra	[8]
Trasportatore	Trasportatore automatica	Installazione di un sistema automatizzato di trasporto, apertura e pulizia contenitori	[8]
Trasportatore	Nastro trasportatore	Installazione di un nastro trasportatore	[8]
Trasportatore	Trasportatore a dischi	Sostituzione trasporto polveri ad aria con trasportatore a dischi	[D.E.]

Accettazione rifiuti			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
Bilancia	Bilance interrante per camion	Installazione di bilance interrante per camion	[8]
Misuratore di flusso	Misuratore di flusso	Installazione di un misuratore di flusso	[8]
Dispositivi per il controllo della radioattività	Dispositivi per il controllo della radioattività	Installazione di dispositivi per il controllo della radioattività	[8]

Sorting			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
Separatore	Separatore automatico	Installazione di un separatore automatico	[8]
Separatore	Separatore con spettroscopia del vicino infrarosso	Installazione di un separatore con spettroscopia del vicino infrarosso	[8]
Separatore	Separatore con sistema a raggi X	Installazione di un separatore con sistema a raggi X	[8]
Separatore	Separatore con sistema XRF ad alta velocità	Installazione di un separatore con sistema XRF ad alta velocità	[8]
Separatore	Classificatore ad aria - zig-zag	Installazione di un classificatore ad aria - zig-zag	[10]
Separatore	Classificatore ad aria - rotante	Installazione di un classificatore ad aria - rotante	[10]
Separatore	Classificatore ad aria - aspirante	Installazione di un classificatore ad aria - aspirante	[10]
Separatore	Classificatore ad aria - a flusso incrociato	Installazione di un classificatore ad aria - a flusso incrociato	[10]
Separatore	Serbatoio <i>sink-float</i>	Installazione di un serbatoio <i>sink-float</i>	[8][10]

Sorting			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
Separatore	Separazione balistica	Installazione di un dispositivo per la separazione balistica	[8]
Separatore	Tavolo vibrante	Installazione di un tavolo vibrante	[8]
Separatore	Tavolo ad aria	Installazione di un tavolo ad aria	[8]
Separatore	Aspiratore	Installazione di un aspiratore (rimozione parte leggera)	[8]
Separatore	Setaccio cilindrico rotante	Installazione di un setaccio cilindrico rotante	[8][10]
Separatore	Setaccio vibrante piatto	Installazione di un setaccio vibrante piatto	[8]
Separatore	Setaccio oscillante	Installazione di un setaccio oscillante	[10]
Separatore	<i>Finger screen</i>	Installazione di un <i>finger screen</i>	[8]
Separatore	<i>Disk screen</i>	Installazione di un <i>disk screen</i>	[10] [36]
Separatore	Setaccio a tamburo	Installazione di un setaccio a tamburo	[8]
Separatore	Setaccio a stella	Installazione di un setaccio a stella	[8]
Separatore	Separatore magnetico	Installazione di un separatore magnetico	[8][10]
Separatore	Separatore magnetico <i>overband</i>	Installazione di un separatore magnetico <i>overband</i>	[8]
Separatore	<i>Magnetic drum</i>	Installazione di un <i>magnetic drum</i>	[8]
Separatore	Separatore elettromagnetico a correnti parassite	Installazione di un separatore elettromagnetico a correnti parassite	[8][10] [36]
Separatore	Separatore <i>all-metal</i>	Installazione di un separatore <i>all-metal</i>	[8]

7.5 Sistemi di supporto

7.5.1 Recupero dell'energia

La maggior parte dell'energia prodotta durante il processo di incenerimento viene trasmessa ai gas di combustione. Il recupero termico può essere effettuato tramite uno scambiatore di calore a convezione che a sua volta rappresenta un surriscaldatore [20], oppure tramite *boiler* (orizzontali, verticali o misti e a circolazione naturale o forzata continua o discontinua) che raffredda i gas di scarico facendo evaporare un liquido al suo interno (acqua calda, bassa pressione di vapore o alta pressione di vapore). Il calore recuperato può, poi, essere convertito in energia elettrica mediante turbine (turbine *back-pressure* o turbine a condensazione, turbine a condensazione con estrazione) [20][27] [42][43]. Possono essere utilizzati anche cicli ORC (*Organic Rankine Cycle*) [44]. Un altro sistema per il recupero termico sono le pompe calore (con compressore, ad assorbimento o aperte) [45].

Recupero energetico			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
Inceneritore	Scambiatore di calore	Installazione di uno scambiatore di calore a piastre	[20]
Inceneritore	Scambiatore di calore	Installazione di uno scambiatore di calore a bassa pressione (incremento del recupero)	[D.E.]
Inceneritore	Scambiatore di calore	Installazione di uno scambiatore a tubi lisci	[D.E.]
Inceneritore	Scambiatore di calore	Installazione di uno scambiatore di calore	[D.E.]
<i>Boiler</i>	<i>Boiler</i>	Installazione di un <i>boiler</i> orizzontale	[20]
<i>Boiler</i>	<i>Boiler</i>	Installazione di un <i>boiler</i> verticale	[20]
<i>Boiler</i>	<i>Boiler</i>	Installazione di un <i>hot water boiler</i>	[25]
<i>Boiler</i>	<i>Boiler</i>	Installazione di un <i>boiler</i> a vapore a bassa pressione	[25]

Recupero energetico			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
Boiler	Boiler	Installazione di un boiler a vapore ad alta pressione	[25]
Boiler	Boiler	Installazione di un boiler a circolazione naturale	[20]
Boiler	Boiler	Installazione di un boiler a circolazione forzata	[20]
Boiler	Boiler	Installazione di un boiler a flusso continuo forzato	[20]
MCI a Biogas	Recupero calore	Installazione di un circuito ORC per il recupero calore degli MCI a biogas	[D.E.]
Condensatore	Pompa di estrazione incondensabili	Installazione di una pompa di estrazione incondensabili nel condensatore	[D.E.]
Condensatore	Condensatore	Installazione di un secondo condensatore ad acqua	[D.E.]
Accumulatore termico	Accumulatore termico	Installazione di un sistema di accumulo termico per disaccoppiare produzione ed utilizzo (teleriscaldamento)	[D.E.]
Rete di teleriscaldamento	Rete di teleriscaldamento	Installazione di un sistema di teleriscaldamento	[42]
Rete di teleriscaldamento	Rete di teleriscaldamento	Utilizzo del teleriscaldamento per gli uffici	[D.E.]
Compressori	Recupero calore	Installazione di un sistema di recupero termico dai compressori	[D.E.]
Gruppo frigo	Gruppo frigo	Sostituzione dell'assorbitore con un chiller ad alta efficienza	[D.E.]
Turbina	Turbina	Installazione di una turbina a condensazione	[20]

Recupero energetico			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
Turbina	Turbina	Installazione di una turbina a condensazione con spillamento	[20]
Turbina	Turbina	Installazione di una turbina a condensazione in due fasi	[20][43]
Turbina	Turbina	Installazione di una turbina a contropressione	[20][27] [D.E.]
Turbina	Utilizzo elettricità	Aumento dell'utilizzo interno di elettricità prodotta	[D.E.]
Turbina	Turbina	Installazione di un circuito ORC per la produzione di energia elettrica	[44]
Pompa calore	Pompa calore	Installazione di una pompa di calore con compressore	[20]
Pompa calore	Pompa calore	Installazione di una pompa di calore ad assorbimento	[20]
Pompa calore	Pompa calore	Installazione di una pompa calore aperte	[20]

7.5.2 Incremento dell'efficienza dell'impianto

Nel caso di ottenimento di biogas, esso può essere riutilizzato come combustibile in un motore a combustione interna, può essere usato in un boiler per la produzione di vapore ad alta temperatura, o può essere incanalato in un motore *Stirling* (motore a combustione esterna) per la generazione di energia elettrica [46].

Un altro approccio per aumentare la produzione di energia è integrare un impianto di incenerimento di rifiuti con un impianto di produzione dell'energia (impianti *Waste-to-Energy* - WtE). Una soluzione molto efficiente sarebbe quella di unire l'impianto WtE ad un impianto (principale) di produzione di energia elettrica alimentato a combustibile tradizionale, dove l'impianto WtE sarebbe

ridotto a semplice elemento di supporto per l'impianto principale. I due sistemi condividerebbero la stessa turbina oppure trasferirebbero calore mediante due rispettivi scambiatori e il calore generato dal WtE verrebbe usato per preriscaldare il vapore in ingresso al *boiler* alimentato a combustibile tradizionale [19][47].

Incremento efficienza dell'impianto			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
Motori elettrici	Motori elettrici	Sostituzione dei motori elettrici con elementi ad alta efficienza	[8], [D.E.]
Motori elettrici	Motori elettrici	Sostituzione di motori elettrici con elementi correttamente dimensionati	[8]
Motori elettrici	<i>Inverter</i>	Installazione di <i>inverter</i> sui motori elettrici	[20], [D.E.]
Impianto CHP	Impianto CHP	Produzione combinata di calore e energia elettrica	[8]
Impianto CHP	Impianto CHP	Produzione combinata di elettricità e calore utilizzando il biogas ottenuto dai processi anaerobici	[8], [D.E.]
Impianto CHP	Impianto CHP	Produzione di energia utilizzando una miscela di syngas derivato dalla gassificazione e di biogas derivante dalla digestione anaerobica	[16]
Motore Stirling	Motore <i>Stirling</i>	Installazione di un motore Stirling per la produzione di elettricità alimentato da un <i>boiler</i> a biogas	[46]
Sistema di turbine	Integrazione	Integrazione di un inceneritore con un impianto di generazione di energia elettrica	[19][47]

Incremento efficienza dell'impianto			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
MCI	MCI	Installazione di un motore a syngas per la produzione di energia elettrica	[33]
Caldaia	Caldaia a condensazione	Sostituzione di una caldaia con un elemento a condensazione	[D.E.]
Caldaia	Caldaia	Installazione di un sistema di caldaie	[D.E.]
Impianto CHP	Impianto CHP	Installazione di un sistema di cogenerazione a metano	[D.E.]
Generatore di vapore	Generatore di vapore a metano	Sostituzione del generatore di vapore a GPL con uno a metano	[D.E.]
Pompa calore	Pompa calore	Sostituzione delle caldaie a gasolio con pompe di calore	[D.E.]
Coibentazione	Coibentazione	Coibentazione di edifici soggetti a condizionamento (cappotto termico)	[8], [D.E.]
Coibentazione	Coibentazione	Sostituzione infissi con elementi coibentanti	[D.E.]
Impianto fotovoltaico	Impianto fotovoltaico	Installazione di un impianto fotovoltaico	[D.E.]
Impianto solare termico	Impianto solare termico	Installazione di un impianto solare termico	[D.E.]
Impianto fotovoltaico	Impianto fotovoltaico	Installazione di un impianto fotovoltaico per la produzione di idrogeno	[30]
<i>Power quality</i>	Sistema automatico di stabilizzazione	Installazione di un sistema automatico di stabilizzazione della tensione	[D.E.]

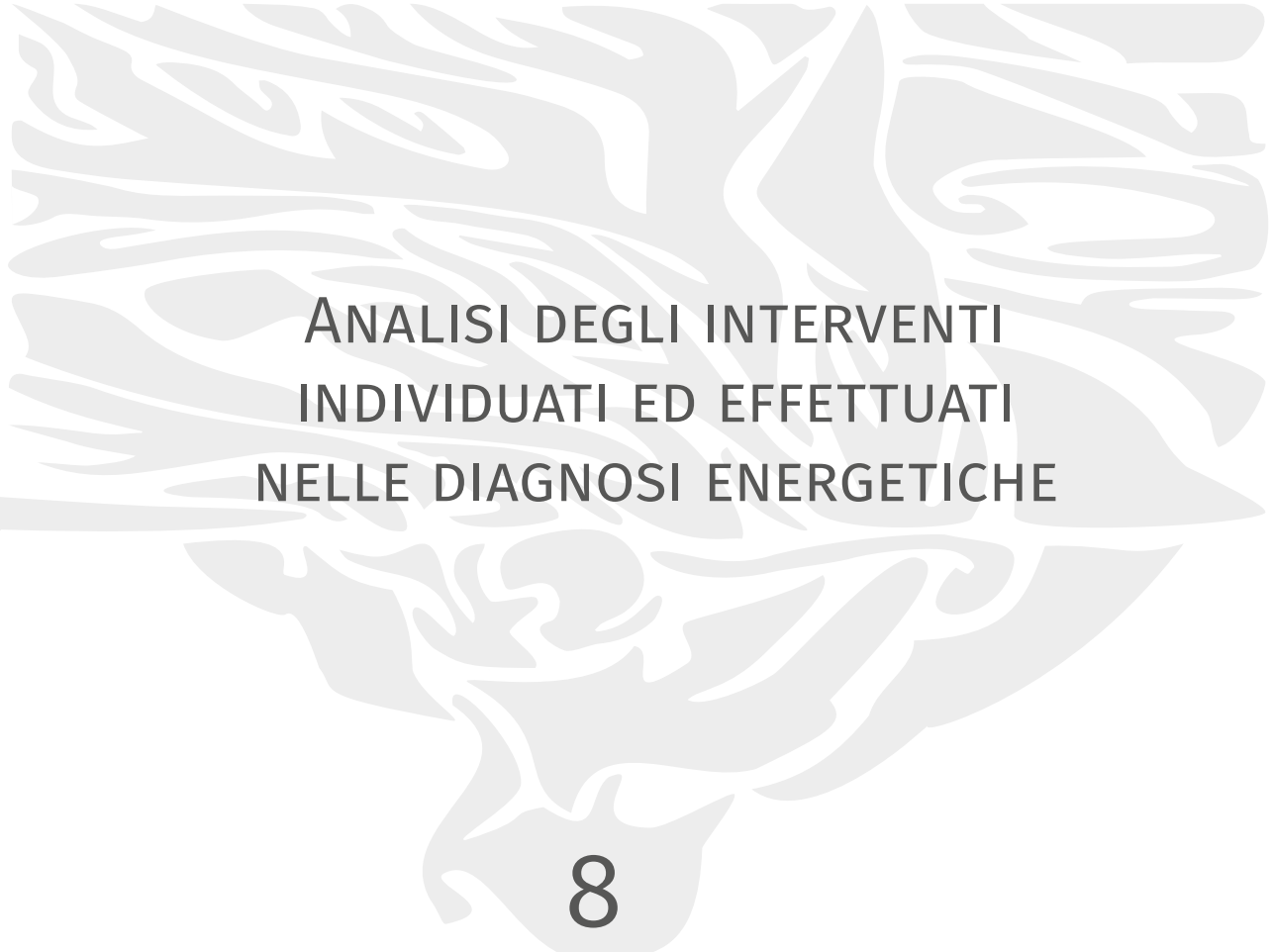
Incremento efficienza dell'impianto			
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte
<i>Power quality</i>	Filtro passivo	Installazione di un filtro passivo per il miglioramento della qualità dell'energia elettrica in ingresso	[D.E.]
Macchinari movimentazione interna	Macchinari movimentazione interna	Utilizzo di mezzi elettrici per la movimentazione carichi	[D.E.]
Macchinari movimentazione interna	Pneumatici	Montaggio pneumatici "energy saving"	[D.E.]
Macchinari movimentazione interna	Macchinari movimentazione interna emissioni inferiori	Sostituzione veicoli a gasolio con elementi a classe emissioni inferiori	[D.E.]
Macchinari movimentazione interna	Tecnologia <i>Start&Stop</i>	Installazione sistemi <i>Start&Stop</i> sui veicoli	[D.E.]
Compressore	Compressore	Sostituzione di un compressore con un elemento più performante	[D.E.]
Compressore	<i>Inverter</i>	Sostituzione di un compressore con un elemento dotato di <i>inverter</i>	[D.E.]
Pompa	<i>Inverter</i>	Sostituzione di una pompa con un elemento dotato di <i>inverter</i>	[D.E.]
Pompa	<i>Inverter</i>	Installazione di un <i>inverter</i> sulle pompe	[D.E.]
Sistema d'areazione	Ventilatori	Sostituzione dei ventilatori centrifughi con elementi più efficienti	[D.E.]

PRODUZIONE DI IDROGENO DA WASTE TO ENERGY (WtE)

Con l'adozione del Green Deal, l'Unione Europea ha fissato sfidanti obiettivi energetico-climatici che necessiteranno di una radicale trasformazione degli scenari energetici comunitari. In questo contesto si inserisce l'idrogeno, un vettore energetico che potrà contribuire a decarbonizzare significativamente i c.d. settori "*hard to abate*", ma che necessita di un adeguato supporto per lo sviluppo sia dell'offerta stessa di tale vettore che della sua domanda da parte degli utilizzatori finali.

Una possibile modalità di produzione dell'idrogeno è quella da *Waste to Energy (WtE)*, ovvero utilizzando l'elettricità generata dalla combustione dei rifiuti, elettricità che, tenuto conto della frazione da biomassa contenuta mediamente nel rifiuto solido urbano trattato, è considerata in parte rinnovabile e, conseguentemente, se utilizzata per produrre idrogeno, questo dovrebbe essere classificato come un idrogeno "*clean*".

Ed è proprio l'esercizio affidabile e costante degli impianti di termovalorizzazione che rende attrattivo per gli operatori il ricorso alla produzione di H₂ da WtE, in quanto garantisce un numero elevato di ore equivalenti del sistema di elettrolisi e permette di contenere i costi di produzione di idrogeno. Inoltre, pensando al sistema delle Utilities, l'idrogeno così prodotto potrebbe essere successivamente utilizzato in un'ottica di "economia circolare" per alimentare mezzi di trasporto (per esempio quelli adibiti alla raccolta dei rifiuti o al TPL) permettendo quindi di contribuire alla riduzione delle emissioni GHG del settore.



ANALISI DEGLI INTERVENTI
INDIVIDUATI ED EFFETTUATI
NELLE DIAGNOSI ENERGETICHE

8

8. Analisi degli interventi individuati ed effettuati nelle diagnosi energetiche

8.1 Metodologia di analisi

L'obiettivo della metodologia qui sviluppata è stato la sistematizzazione dell'analisi degli interventi effettuati e individuati riportati nelle diagnosi, elaborando un approccio metodologico replicabile per ogni ATECO e aggiornabile nel tempo.

L'applicazione della metodologia ha consentito di produrre schede settoriali per i diversi ATECO a 6 cifre esaminati: dopo un inquadramento generale del settore, esse forniscono i risparmi energetici da interventi effettuati e individuati, per tipologia di vettore energetico, in termini di energia finale o primaria a seconda dell'area di intervento. Sono forniti anche indicatori di natura economica, relativi a investimenti totali e medi per area di intervento, distribuzione degli interventi per classe di tempo di ritorno e costo efficacia, cioè il costo di risparmiare un tep di energia finale o primaria per ogni area di intervento.

Le schede settoriali hanno il duplice scopo di monitorare i risparmi energetici conseguiti e potenziali, rapportandoli anche ai consumi totali, elettrici e termici, e di fornire informazioni utili agli operatori del settore e ai policy makers, affiancando le informazioni di risparmio energetico anche ad indicatori di natura economica. Le informazioni caricate sul portale Audit 102 e automaticamente raccolte in un unico database hanno costituito una fondamentale base di partenza per elaborare le informazioni di seguito presentate. Le informazioni non sono state utilizzate tal quali, ma è stata applicata una metodologia di analisi che ha previsto alcuni step di riorganizzazione dei dati e verifica della loro coerenza.

Gli step metodologici applicati possono essere così sintetizzati:

1. Ricodifica di circa 300 aree di intervento individuali in 17 principali, descritte in *Tabella 50*¹³.

¹³ L'elenco di interventi riportato nella seconda colonna intende avere un carattere esemplificativo e non esaustivo di tutti i possibili interventi. Chiaramente ogni area di intervento sarà più o meno rilevante a seconda delle specificità del codice ATECO esaminato e anche del sito produttivo oggetto di diagnosi.

2. Individuazione degli indicatori di interesse, così elencabili:
 - ↳ risparmio totale di energia finale;
 - ↳ risparmio totale di energia primaria;
 - ↳ risparmi per tipologia: risparmi di energia elettrica, risparmi di energia termica, risparmi di carburante, altri risparmi;
 - ↳ tempo di ritorno semplice;
 - ↳ investimento;
 - ↳ costo efficacia, definito come Investimento/Risparmio di energia finale o primaria.
3. Definizione e calcolo delle variabili che non erano presenti nel database, come risparmi totali e costo efficacia; in questo step è stata effettuata la conversione dei risparmi elettrici e termici in tep di energia finale o primaria.
4. Eliminazione dei duplicati dei risparmi elettrici, termici o di carburante rispetto ai valori riportati alla voce “altri risparmi”.
5. Definizione delle aree di intervento con risparmi di energia primaria e correzione dei relativi risparmi, ove necessario.
6. Riallocazione dei risparmi di carburante nelle categoria di appartenenza rilevante di caso in caso, individuabile tra risparmi elettrici, termici e altri risparmi.
7. Analisi delle singole diagnosi per specifici codici ATECO e verifica/integrazione delle informazioni relative agli interventi caricate sul portale.

In particolare, relativamente al punto 5, le aree di intervento con risparmi di energia primaria sono state identificate in Cogenerazione/Trigenerazione e Produzione da fonti rinnovabili.

Il risparmio di energia elettrica associato all'autoproduzione di energia elettrica è considerato un risparmio di energia primaria, in quanto tale energia elettrica non viene più prelevata dalla rete e quindi prodotta dal sistema di generazione nazionale.

Nel caso dell'area Cogenerazione/Trigenerazione, o di alcuni interventi nell'area Produzione da fonti rinnovabili associati alla produzione di energia termica, un discorso analogo può essere applicato alla produzione di calore.

Tabella 50 - Aree di classificazione degli interventi e relativa descrizione.

Area di intervento	Descrizione
Altro	<ul style="list-style-type: none"> • Interventi non altrove classificati. • Interventi di natura mista, appartenenti a diverse categorie (per esempio la riqualificazione globale, con interventi ricadenti nelle aree Climatizzazione, Involucro edilizio e Illuminazione).
Aria compressa	<ul style="list-style-type: none"> • Sostituzione di compressori. • Ricerca ed eliminazione delle perdite. • Installazione di sistemi di misura. • Ottimizzazione degli impianti. • Installazione di <i>inverter</i>.
Aspirazione	<ul style="list-style-type: none"> • Sostituzione di motori usati per aspirazione con nuovi di categoria più efficiente (IE3 o superiore) • Installazione di <i>inverter</i>. • Ottimizzazione degli impianti.
Centrale termica/ Recuperi termici	<ul style="list-style-type: none"> • Sostituzione dell'impianto di generazione calore di processo con modelli più efficienti. • Recupero termico, tra cui anche sistemi ORC. • Sostituzione dei bruciatori.
Climatizzazione	<ul style="list-style-type: none"> • Sostituzione dell'impianto di riscaldamento e/o raffrescamento con modelli più efficienti.
Cogenerazione/ Trigenerazione	<ul style="list-style-type: none"> • Installazione di un impianto di cogenerazione o trigenerazione. • Miglioramento di impianti esistenti.
Freddo di processo	<ul style="list-style-type: none"> • Sostituzione di gruppi frigo. • Sostituzione di ventilatori di raffreddamento. • Ottimizzazione della gestione.
Generale/Gestionale	<ul style="list-style-type: none"> • Introduzione o miglioramento del sistema di monitoraggio. • Interventi di tipo organizzativo, come lo spegnimento programmato nelle ore notturne o nel weekend. • Corsi di formazione in ambito efficienza energetica. • Adozione della certificazione ISO 50001. • Installazione di contatori. • Adozione di nuovi strumenti software. • Interventi di natura comportamentale.
Illuminazione	<ul style="list-style-type: none"> • Introduzione di LED in aree specifiche. • Relamping dello stabilimento. • Installazione di rilevatori di presenza.

Area di intervento	Descrizione
Impianti elettrici	<ul style="list-style-type: none"> • Installazione di un sistema power quality. • Sostituzione di trasformatori. • Installazione di economizzatori di rete.
Involucro edilizio	<ul style="list-style-type: none"> • Rifacimento del cappotto esterno. • Coibentazione della copertura. • Installazione o sostituzione di schermature solari. • Sostituzione degli infissi.
Linee produttive	<p>Interventi relativi ai processi nell'area attività principale, come ad esempio:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sostituzione del forno fusorio. • Revamping dello stabilimento. • Ottimizzazione della gestione dei forni. • Interventi sui nastri trasportatori. • Sostituzione dei carica batteria muletti.
Motori elettrici/ <i>Inverter</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Sostituzione di motori elettrici con nuovi di categoria più efficiente (IE3 o superiori). • Installazione di <i>inverter</i>.
Produzione da fonti rinnovabili	<ul style="list-style-type: none"> • Installazione di un impianto fotovoltaico, solare termico o di una centrale a biomassa.
Rifasamento	<ul style="list-style-type: none"> • Rifasamento degli impianti. • Installazione di nuovi rifasatori.
Trasporti	<ul style="list-style-type: none"> • Mobilità elettrica e altri interventi di conversione del parco veicoli con modelli a maggiore efficienza • Corsi di formazione su eco-driving.
Reti di distribuzione	<ul style="list-style-type: none"> • Ricerca delle perdite di distribuzione. • Verifica dello stato della rete vapore. • Verifica delle coibentazioni nella rete di trasporto calore. • Sostituzione di scaricatori di condensa.

8.2 Risultati complessivi

Le diagnosi energetiche inviate ad ENEA e caricate sul portale Audit 102 riportano 7.513 interventi effettuati, da parte di 2.429 imprese. Gli interventi individuati attraverso le diagnosi energetiche sono invece 31.261 e si riferiscono a 5.870 imprese, di cui 2.801 imprese che si dichiarano energivore.

Secondo quanto dichiarato nelle diagnosi, gli interventi effettuati hanno consentito il raggiungimento di un risparmio di energia finale di 475 ktep/anno e di un risparmio di energia primaria di 193 ktep/anno, associato a interventi nelle categorie Cogenerazione/Trigenerazione e Produzione da fonti rinnovabili. Gli interventi individuati, se realizzati, sarebbero associati a un risparmio di energia finale di circa 1,690 Mtep/anno, suddiviso in diverse tipologie: risparmi di energia elettrica (23% del totale), di energia termica (14%), di carburante (4%) e altri risparmi (59%). La categoria altri risparmi può contenere diverse tipologie di risparmi, ad esempio risparmi associati a vettori energetici non altrove classificati o risparmi di energia finale o primaria relativi a più di un vettore energetico (ad esempio calore ed energia elettrica negli interventi di cogenerazione)¹³. Gli interventi individuati sarebbero inoltre associati ad un risparmio di energia primaria di circa 0,859 Mtep/anno, riconducibile alle aree di intervento Cogenerazione/Trigenerazione e Produzione da fonti rinnovabili.

Sette divisioni ATECO, appartenenti ai settori C (Attività manifatturiere) e G (Commercio all'ingrosso e al dettaglio; Riparazione di autoveicoli e motocicli) arrivano a rappresentare circa la metà del totale degli interventi complessivi individuati.

8.3 Risultati per il settore incenerimento rifiuti

Per l'incenerimento rifiuti sono state esaminate alcune delle diagnosi appartenenti a quattro codici ATECO¹⁴ per integrare e, ove necessario, correggere le informazioni

¹³ La categoria è attualmente oggetto di approfondimento. Sulla base delle informazioni eventualmente disponibili in diagnosi energetica si è proceduto, per alcuni codici ATECO tra cui il raggruppamento incenerimento rifiuti, a riallocare i risparmi categorizzati come altri risparmi nelle altre tre categorie più specifiche. In questo modo la categoria "Altri risparmi" è rimasta una categoria residuale.

¹⁴ Si tratta dei seguenti codici: 35.11.00 Produzione di energia elettrica, 38.21.09 Trattamento e smaltimento di altri rifiuti non pericolosi, 38.11.00 Raccolta di rifiuti solidi non pericolosi, 38.22.00 Trattamento e smaltimento di rifiuti pericolosi.

relative agli interventi caricate sul portale, come da step 7 della metodologia descritta nel paragrafo precedente. L'esito di questa analisi è stato la produzione della scheda riportata in Appendice, che contiene tabelle e grafici di sintesi degli indicatori calcolati; la *Figura 27* fornisce un'idea della struttura della scheda. Le tabelle relative agli interventi effettuati sono proposte anche relativamente agli interventi individuati e in questo caso l'analisi è corredata da informazioni relative al tempo di ritorno semplice, elaborate per classi e combinate con i valori cumulati di risparmio potenziale e investimenti corrispondenti. Per gli interventi individuati è inoltre riportato un diagramma a bolle che combina l'informazione del costo efficacia medio dei risparmi di energia finale, rappresentato dalla dimensione della bolla, con il tempo di ritorno medio e l'investimento medio riportati rispettivamente in ascissa e ordinata. Infine sono inclusi, per gli interventi effettuati ed individuati, i grafici di Pareto con la distribuzione degli interventi e l'indicazione dei primi cinque per valore dei risparmi di energia finale o primaria, a seconda dell'area di intervento coinvolta.

Le diagnosi relative ad incenerimento rifiuti appartengono a diversi codici ATECO: 35.11.00 Produzione di energia elettrica, 38.21.09 Trattamento e smaltimento di altri rifiuti non pericolosi, 38.11.00 Raccolta di rifiuti solidi non pericolosi e 38.22.00 Trattamento e smaltimento di rifiuti pericolosi.

Le informazioni contenute nella scheda possono essere organizzate in tabelle qualitative e quantitative di sintesi. La *Tabella 51* sintetizza la presenza di interventi effettuati e individuati nelle diverse aree. Si fa riferimento agli interventi con informazioni, cioè descritti in termini di risparmio conseguito o potenziale e di costo di investimento. Una scala di colori indica la numerosità degli interventi, che chiaramente è dipendente dal numero di diagnosi pervenute per il codice ATECO esaminato ma anche dalla qualità delle diagnosi stesse.

	Incenerimento rifiuti
Aria compressa	●
Aspirazione	○●
Centrale termica/Recuperi termici	○●
Climatizzazione	○●
Cogenerazione/Trigenerazione	
Freddo di processo	○●
Generale/Gestionale	●
Illuminazione	○●
Impianti elettrici	
Involucro edilizio	
Linee produttive	●
Motori elettrici/Inverter	○●
Produzione da fonti rinnovabili	●
Rifasamento	
Trasporti	●

area presente in interventi effettuati con informazioni
 area presente in interventi individuati con informazioni
 se interventi individuati > 20
 se interventi effettuati e individuati > 20
 se interventi effettuati > 20

○
●

Tabella 51 - Quadro di sintesi del numero interventi effettuati ed individuati.

La *Tabella 52* fa riferimento agli interventi effettuati e sintetizza la presenza di risparmi elettrici e termici per ogni area di intervento. Anche in questo caso una scala di colori indica se il valore dei risparmi totali conseguito in quel codice ATECO è superiore a una soglia, individuata in 50 tep sulla base della distribuzione osservata. Il valore dei risparmi è strettamente collegato al numero di diagnosi pervenute a ENEA ma anche a specificità settoriali e di sito produttivo.

	Incenerimento rifiuti
Aria compressa	
Aspirazione	◇
Centrale termica/Recuperi termici	□
Climatizzazione	◇ □
Cogenerazione/Trigenerazione	
Freddo di processo	◇
Generale/Gestionale	
Illuminazione	◇
Impianti elettrici	
Involucro edilizio	
Linee produttive	
Motori elettrici/Inverter	◇
Produzione da fonti rinnovabili	
Rifasamento	
Trasporti	

interventi effettuati risparmi di energia elettrica
 interventi effettuati con risparmi di energia termica
 se risparmi elettrici > 50 tep
 se risparmi termici > 50 tep
 se risparmi elettrici e termici > 50 tep

◇
□

Tabella 52 - Quadro di sintesi dei risparmi da interventi effettuati.

Nella *Tabella 53* sono fornite maggiori informazioni, in termini quantitativi, relativamente ai risparmi di energia finale conseguiti dagli interventi effettuati per area di intervento.

In particolare si riportano i risparmi elettrici e termici attraverso quattro diversi indicatori per ogni area di intervento:

1. risparmi totali della specifica area di intervento e relativa quota rispetto al consumo elettrico o termico totale dei siti esaminati;
2. risparmi medi della specifica area di intervento e relativa quota rispetto al consumo elettrico o termico totale dei siti esaminati.

	RISPARMI ELETTRICI		RISPARMI TERMICI	
	TOTALI	MEDI	TOTALI	MEDI
Aria compressa	-	-	-	-
Aspirazione	98,6 (0,17%)	98,6 (0,17%)		
Centrale termica/ Recuperi termici	-	-	1.411,0 (3,56%)	705,5 (1,78%)
Climatizzazione	35,1 (0,06%)	7,0 (0,01%)	8,0 (0,02%)	4,0 (0,01%)
Freddo di processo	51,6 (0,09%)	51,6 (0,09%)	-	-
Generale/ Gestionale	-	-	-	-
Illuminazione	58,8 (0,10%)	8,4 (0,01%)	-	-
Impianti elettrici	-	-	-	-
Involucro edilizio	-	-	-	-
Linee produttive	-	-	-	-
Motori elettrici / Inverter	259,1 (0,46%)	43,3 (0,08%)	-	-
Rifasamento	-	-	-	-
Trasporti	-	-	-	-

Tabella 53 – Risparmi Elettrici e Termici da interventi effettuati (tep e % dei rispettivi consumi).

La *Tabella 54* sintetizza la presenza di interventi individuati nelle diverse aree di intervento per i siti oggetto di analisi. Gli interventi individuati sono generalmente in numero maggiore rispetto agli interventi effettuati per ogni sito esaminato. È opportuno ricordare che gli interventi individuati sono un set di proposte contenuto in diagnosi energetica: in quanto tali non saranno attuati tutti e la loro eventuale implementazione sarà dilazionata nel tempo. Il risparmio è quindi da intendersi come un risparmio potenziale, ragion per cui in questo caso non si è ritenuto opportuno identificare una soglia di risparmio.

	Incenerimento rifiuti
Aria compressa	◇ □
Aspirazione	◇
Centrale termica/Recuperi termici	◇ □
Climatizzazione	◇
Cogenerazione/Trigenerazione	
Freddo di processo	◇
Generale/Gestionale	◇
Illuminazione	◇
Impianti elettrici	
Involucro edilizio	
Linee produttive	◇
Motori elettrici/Inverter	◇
Produzione da fonti rinnovabili	◇
Rifasamento	
Trasporti	◇
interventi individuati con risparmi di energia elettrica	◇
interventi individuati con risparmi di energia termica	□

Tabella 54 - Quadro di sintesi dei risparmi da interventi individuati

In modo analogo agli interventi effettuati, in *Tabella 55* sono fornite informazioni quantitative relativamente ai risparmi potenziali di energia finale associati agli interventi individuati, per tipologia di risparmio (elettrico o termico) e area di intervento.

	RISPARMI ELETTRICI		RISPARMI TERMICI	
	TOTALI	MEDI	TOTALI	MEDI
Aria compressa	7,4 (0,01%)	1,5 (0,0%)	21,3 (0,05%)	5,3 (0,01%)
Aspirazione	136,6 (0,24%)	68,3 (0,12%)	-	-
Centrale termica/ Recuperi termici	3,3 (0,01%)	3,3 (0,01%)	2.788,3 (7,04%)	1.394,2 (3,52%)
Climatizzazione	0,2 (0,00%)	0,2 (0,00%)	-	-
Freddo di processo	22,3 (0,04%)	22,3 (0,04%)	-	-
Generale/ Gestionale	152,7 (0,27%)	19,1 (0,03%)	-	-
Illuminazione	166,7 (0,29%)	16,7 (0,03%)	-	-
Impianti elettrici	-	-	-	-
Involucro edilizio	-	-	-	-
Linee produttive	154,8 (0,27%)	154,8 (0,27%)	-	-
Motori elettrici / Inverter	137,1 (0,24%)	13,7 (0,02%)	-	-
Rifasamento	-	-	-	-
Trasporti	0,3 (0,03%)	0,2 (0,00%)	-	-

Tabella 55 - Risparmi elettrici e termici da interventi individuati (tep e % dei rispettivi consumi).

L'analisi delle diagnosi energetiche ha consentito, oltre che di integrare e correggere le informazioni relative agli interventi caricati a portale, di aggiungere 50 interventi effettuati e 23 interventi individuati, arricchendo quindi il campione esaminato.

Gli interventi effettuati sono 54, con la quota maggiore di interventi, pari al 24%, relativa all'area Illuminazione, seguita da Motori elettrici/Inverter (17%) e poi da Climatizzazione (15%). I risparmi di energia finale conseguiti sono disponibili per 20 interventi e pari a 1.922 tep/anno: l'area Centrale termica/Recuperi termici risulta associata a quasi i tre quarti dei risparmi (73% del totale, pari a 1.411 tep/anno), seguita da Motori elettrici/Inverter (13%, 259 tep/anno). Non essendo riportati interventi effettuati nelle aree Produzione da fonti rinnovabili e Cogenerazione/

Trigenerazione, non si rilevano risparmi di energia primaria.

È stato possibile esaminare gli investimenti per 10 interventi, associati ad un investimento complessivo di circa 585.000 Euro. La quota maggiore degli investimenti è relativa all'area Illuminazione (70% del totale).

Sulla base delle informazioni descritte sopra, è stato possibile calcolare il costo efficacia dei risparmi di energia finale ma soltanto per 6 interventi: la media del costo efficacia, relativa alle aree Climatizzazione, Illuminazione e Motori elettrici/Inverter, risulta essere quasi 4.000 Euro/tep.

Gli interventi individuati sono 52, un numero analogo a quello degli interventi effettuati. Le aree di intervento prevalenti sono rappresentate da Generale, Illuminazione e Motori elettrici/Inverter, con un numero di interventi tra 10 e 12 (tra il 19% e 23% del totale). Il risparmio potenziale di energia finale, disponibile per 42 interventi e pari a 3.613 tep/anno, risulta attribuibile per più di metà all'area Centrale termica/Recuperi termici (77% del totale, pari a 2.792 tep/anno), seguita da Aspirazione, Generale, Illuminazione, Linee produttive e Motori elettrici/Inverter, ognuna con quote intorno al 4% del totale (circa 150 tep/anno). L'informazione sui risparmi potenziali è disponibile anche per un intervento nell'area Produzione da fonti rinnovabili, associato a 28 tep/anno di risparmio di energia primaria.

L'investimento, disponibile per 43 interventi, è pari in totale a circa 3,5 milioni di Euro, e risulta maggiore per l'area Illuminazione (32% del totale), seguita da Aspirazione (23%) e Motori elettrici/Inverter (12%).

Sulla base di queste informazioni è stato calcolato il costo efficacia per 38 interventi con risparmi di energia finale. L'area di intervento con il migliore costo efficacia è Aspirazione, con un valore di circa 1.200 Euro/tep; anche Centrale termica/Recuperi termici e Linee produttive hanno buoni valori dell'indicatore, intorno a 2.000 Euro/tep.

Inoltre, è stata svolta l'analisi di 39 interventi per cui è stato riportato in diagnosi il tempo di ritorno semplice, rappresentativi di circa il 75% degli interventi associati a risparmi di energia finale. Risultano prevalenti le classi intermedie, con tempo di ritorno tra 3 e 5 anni e tra 5 e 10 anni, rispettivamente con 9 e 11 interventi (23% e 28% del totale). La realizzazione degli interventi individuati con tempo di ritorno fino a 3 anni (16 interventi) implicherebbe il conseguimento di circa il 17% del risparmio annuo di energia finale (0,4 ktep/anno), a fronte di un investimento complessivo pari a circa 755.000 Euro (23% degli investimenti totali).



ALLEGATO

**Schede settoriali degli interventi
effettuati e individuati**



APPENDICE A

**Determinazione del PCI dei rifiuti e dei
combustibili ausiliari**

APPENDICE B

**Valutazione della rappresentatività
statistica di una analisi di regressione**



ALLEGATO

**Schede settoriali degli
interventi effettuati e
individuati**

ATECO 35.11.00, 38.21.09, 38.11.00, 38.22.00

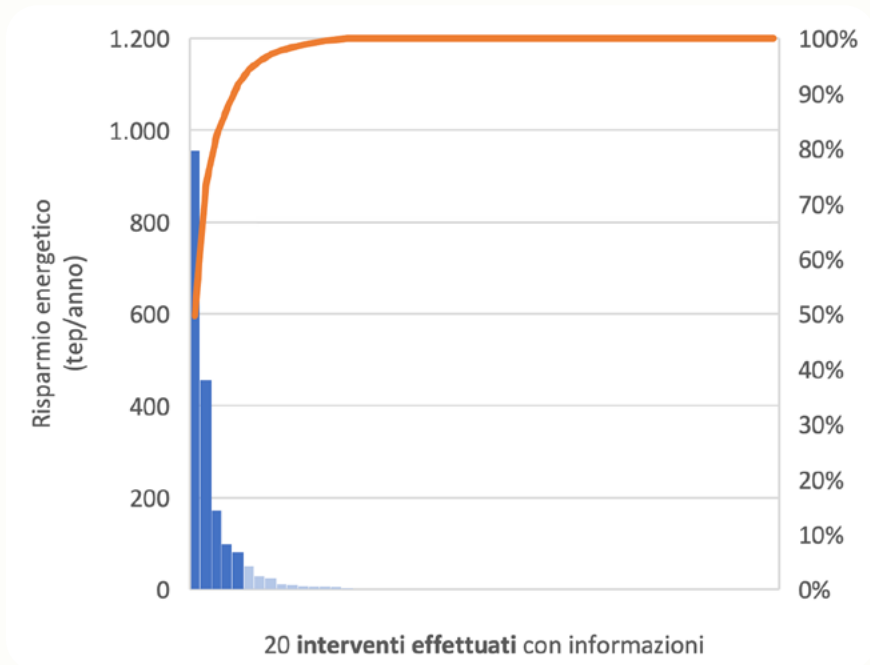
Produzione di energia elettrica, Trattamento e smaltimento di altri rifiuti non pericolosi, Raccolta di rifiuti solidi non pericolosi, Trattamento e smaltimento di rifiuti pericolosi

INQUADRAMENTO GENERALE					
Numero diagnosi (siti)			Numero P.IVA		
26			20		
Numero grandi imprese			Numero grandi imprese energivore		
20			0		
Numero siti ISO 50001			Numero siti sottoposti a monitoraggio		
2			23		
INTERVENTI EFFETTUATI			INTERVENTI INDIVIDUATI		
Numero medio interventi per sito		2,1	Numero medio interventi per sito		2,0
Quota di diagnosi contenenti interventi		73%	Quota di diagnosi contenenti interventi		73%
N° interventi	Risparmio annuo di energia finale (tep/anno)	Risparmio medio di energia finale per intervento (tep)	N° interventi	Risparmio annuo di energia finale (tep/anno)	Risparmio medio di energia finale per intervento (tep)
54	1.922,2	96,1	52	3.612,5	86,0
Risparmio annuo totale/ Consumo totale	Risparmio annuo di energia elettrica/ Consumo elettrico totale	Risparmio annuo di energia termica/ Consumo termico totale	Risparmio annuo totale/ Consumo totale	Risparmio annuo di energia elettrica/ Consumo elettrico totale	Risparmio annuo di energia termica/ Consumo termico totale
2,0%	0,9%	3,6%	3,7%	1,4%	7,1%

ANALISI DEGLI INTERVENTI EFFETTUATI							
Area di intervento	N° interventi	INVESTIMENTI				COSTO EFFICACIA	
		N° interventi con informazioni	Investimento totale (€)	Investimento totale (€)	Investimento medio (€)	N° interventi con informazioni	Costo efficacia (€/tep di energia finale)
Altro	1	0	-	-	-	0	-
Aria compressa	2	0	-	-	-	0	-
Aspirazione	4	0	-	-	-	0	-
Centrale termica/Recuperi termici	6	2	96.000,0	16,4%	48.000,0	0	-
Climatizzazione	8	1	16.590,0	2,8%	16.590,0	1	1.543,3
Freddo di processo	2	1	46.000,0	7,9%	46.000,0	0	-
Generale	7	0	-	-	-	0	-
Illuminazione	13	5	406.800,0	69,7%	81.360,0	4	6.856,1
Linee produttive	2	0	-	-	-	0	-
Motori elettrici/Inverter	9	1	19.400,0	3,3%	19.400,0	1	3.580,7
Totale	54	10	584.790,0	100,0%	42.270,0	6	3.993,3*

*Valore medio

ANALISI DEGLI INTERVENTI EFFETTUATI									
RISPARMI DI ENERGIA FINALE									
Area di intervento	N° interventi con informazioni	Risparmio annuo totale (tep/anno)	Risparmio annuo totale (%)	Risparmio annuo totale medio (tep/anno)	Risparmio annuo di energia elettrica (tep/anno)	Risparmio annuo di energia termica (tep/anno)	Risparmio annuo di carburante (tep/anno)	Altri risparmi annui (tep/anno)	
Altro	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Aria compressa	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Aspirazione	1	98,6	5,1%	98,6	98,6	0,0	0,0	0,0	0,0
Centrale termica/ Recuperi termici	2	1.411,0	73,4%	705,5	0,0	1.411,0	0,0	0,0	0,0
Climatizzazione	6	43,1	2,2%	7,2	35,1	8,0	0,0	0,0	0,0
Freddo di processo	1	51,6	2,7%	51,6	51,6	0,0	0,0	0,0	0,0
Generale	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Illuminazione	7	58,8	3,1%	8,4	58,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Linee produttive	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Motori elettrici/ Inverter	3	259,1	13,5%	86,4	259,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Totale	20	1.922,2	100,0%	159,6	503,2	1.419,0	0,0	0,0	0,0



Primi 5 interventi effettuati evidenziati:

1. Centrale termica/Recuperi termici: modifica condizioni di scarico vapore turbina e gestione accumulo calore in rete.
2. Centrale termica/Recuperi termici: nuovo surriscaldatore con by-pass SH esterno- gestione ottimizzata aria comburente.
3. Motori elettrici/Inverter: ottimizzazione del sistema pompe alimento caldaie, a seguito dell'installazione di nuovi inverter di media tensione (6 kV), aventi potenza nominale di 500 kW;
4. Aspirazione: installazione di un nuovo ventilatore aria secondaria.
5. Motori elettrici/Inverter: inverter per l'azionamento e la regolazione dei ventilatori di ricircolo fumi per ciascuna linea di combustione.

ANALISI DEGLI INTERVENTI INDIVIDUATI									
Area di intervento	N° interventi individuati	INVESTIMENTI				COSTO EFFICACIA - ENERGIA FINALE			
		N° interventi con informazioni	Investimento totale (€)	Investimento totale (%)	Investimento medio (€)	N° interventi con informazioni	Costo efficacia (€/tep di energia finale)	Tempo di ritorno medio (anni)	
Aria compressa	7	5	62.260,0	1,8%	12.452,0	4	7.330,3	4,2	
Aspirazione	2	2	182.000,0	5,2%	91.000,0	2	1.242,4	5,5	
Centrale termica /Recuperi termici	3	2	812.000,0	23,1%	406.000,0	2	2.057,3	7,0	
Climatizzazione	1	1	1.250,0	0,0%	1.250,0	1	8.534,9	11,0	
Freddo di processo	1	1	75.000,0	2,1%	75.000,0	1	3.357,9	2,3	
Generale	12	10	326.400,0	9,3%	32.640,0	7	2.809,9	2,6	
Illuminazione	11	10	1.113.389,0	31,6%	111.338,9	10	5.912,3	4,9	
Linee produttive	1	1	300.000,0	8,5%	300.000,0	1	1.938,0	2,0	
Motori elettrici/Inverter	10	9	411.787,0	11,7%	45.754,1	9	5.120,4	5,6	
Produzione da fonti rinnovabili	1	1	95.000,0	2,7%	95.000,0	-	-	-	
Trasporti	3	1	140.000,0	3,98%	140.000,0	-	15.555,6	4,0	
Totale	52	43	3.519.086,0	100,0%	119.130,5	38	5.385,9	4,9*	
COSTO EFFICACIA - ENERGIA PRIMARIA									
Area di intervento	N° interventi con informazioni	Costo efficacia (€/tep di energia primaria)		Tempo di ritorno medio (anni)					
Produzione da fonti rinnovabili	1	3.386,8	6,5						
Totale	1	3.386,8	6,5						

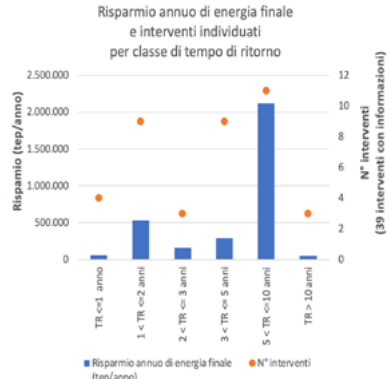
*Valore medio

ANALISI DEGLI INTERVENTI INDIVIDUATI									
RISPARMI DI ENERGIA FINALE									
Area di intervento	N° interventi con informazioni	Risparmio annuo totale (tep/anno)	Risparmio annuo totale (%)	Risparmio annuo totale medio (tep/anno)	Risparmio annuo di energia elettrica (tep/anno)	Risparmio annuo di energia termica (tep/anno)	Risparmio annuo di carburante (tep/anno)	Altri risparmi annui (tep/anno)	Altri risparmi annui (tep/anno)
Aria compressa	5	28,7	0,8%	5,7	7,4	21,3	0,0	0,0	0,0
Aspirazione	2	136,6	3,8%	68,3	136,6	0,0	0,0	0,0	0,0
Centrale termica/ Recuperi termici	3	2.791,6	77,3%	930,5	3,3	2.788,3	0,0	0,0	0,0
Climatizzazione	1	0,1	0,0%	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Freddo di processo	1	22,3	0,5%	22,3	22,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Generale	7	165,3	4,6%	23,6	152,7	0,0	0,0	12,5	12,5
Illuminazione	10	166,7	4,6%	16,7	166,7	0,0	0,0	0,0	0,0
Linee produttive	1	154,8	4,3%	154,8	154,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Motori elettrici/Inverter	10	137,1	3,8%	13,7	137,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Trasporti	2	9,3	0,3%	4,7	0,3	0,0	9,0	9,0	9,0
Totale	42	3.612,5	100,0%	124,0	781,4	2.809,6	9,0	12,5	12,5
RISPARMI DI ENERGIA PRIMARIA									
Area di intervento	N° interventi con informazioni	Risparmio annuo totale (tep/anno)	Risparmio annuo totale (%)	Risparmio annuo totale medio (tep/anno)	Risparmio annuo di energia elettrica (tep/anno)	Risparmio annuo di energia termica (tep/anno)	Risparmio annuo di carburante (tep/anno)	Altri risparmi annui (tep/anno)	Altri risparmi annui (tep/anno)
Produzione da fonti rinnovabili	1	28,1	100,0%	28,1	28,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Totale	1	28,1	100,0%	28,1	28,1	0,0	0,0	0,0	0,0

ANALISI DEGLI INTERVENTI INDIVIDUATI

CLASSI DI TEMPO DI RITORNO

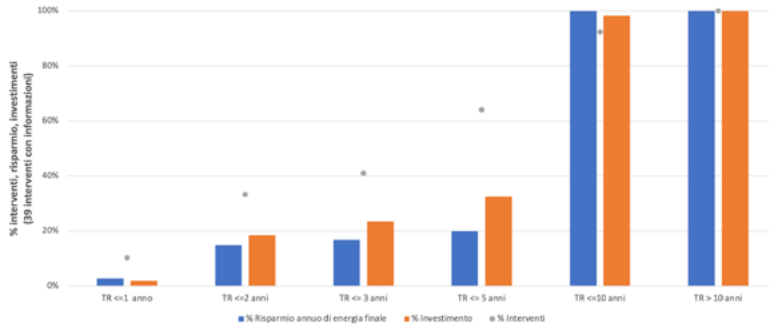
Classe	N° interventi	Risparmio annuo di energia finale (tep/anno)	Investimento (€)
TR <= 1 anno	4	68,4	62.760,0
1 < TR <= 2 anni	9	304,4	530.800,0
2 < TR <= 3 anni	3	50,7	162.207,0
3 < TR <= 5 anni	9	79,2	290.930,0
5 < TR <= 10 anni	11	2.011,8	2.123.215,0
TR > 10 anni	3	2,9	52.174,0



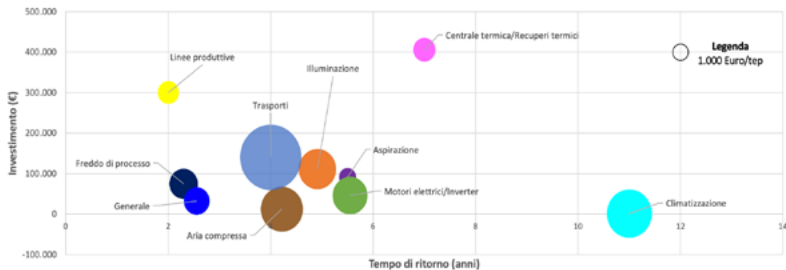
DISTRIBUZIONE CUMULATA PER CLASSI DI TEMPO DI RITORNO

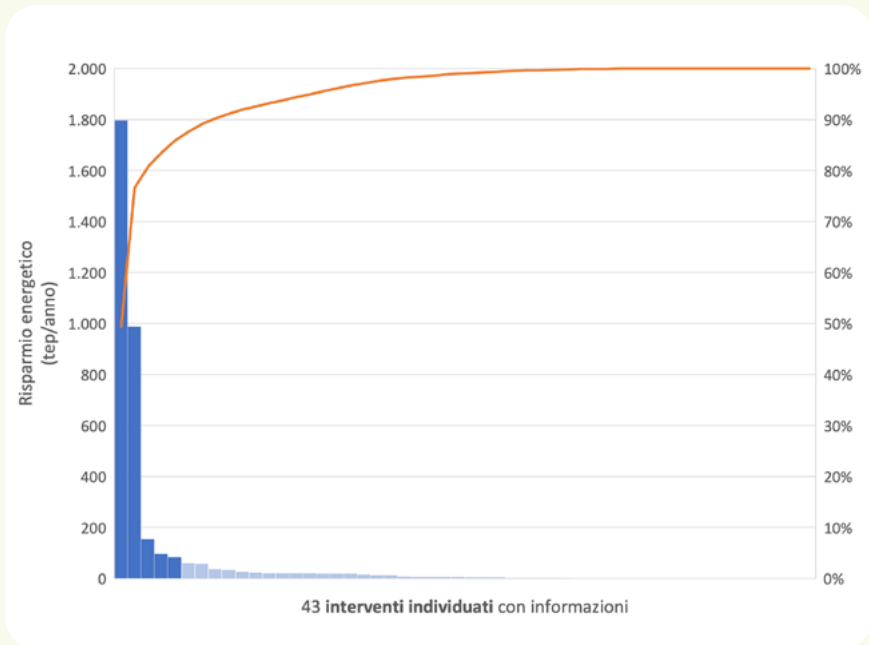
Classe	N° interventi	Interventi %	Risparmio annuo di energia finale (tep/anno)	% Risparmio annuo di energia finale	Investimento (€)	Investimento %
TR <= 1 anno	4	10,3%	68,0	2,7%	62.760,0	1,9%
TR <= 2 anni	13	33,3%	373,0	14,8%	593.560,0	18,4%
TR <= 3 anni	16	41,0%	423,0	16,8%	755.767,0	23,5%
TR <= 5 anni	25	64,1%	503,0	20,0%	1.046.697,0	32,5%
TR <= 10 anni	36	92,3%	2.515,0	99,9%	3.169.912,0	98,4%
TR > 10 anni	39	100,0%	2.517,0	100,0%	3.222.086,0	100,0%

Risparmi e investimenti cumulati per classe di tempo di ritorno



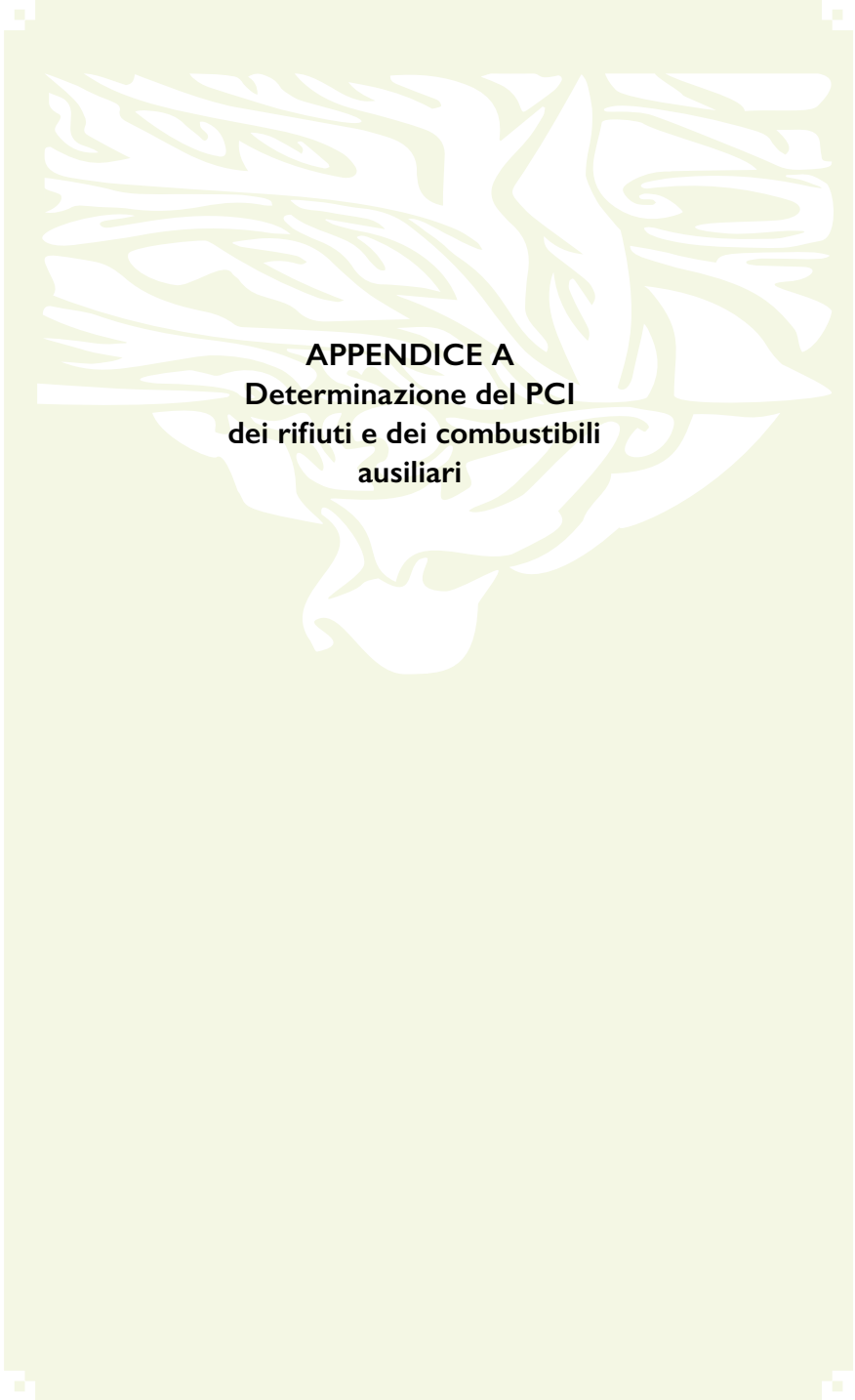
Incenerimento rifiuti (dimensione bolla = costo efficace)





Primi 5 interventi individuati evidenziati:

1. Centrale termica/Recuperi termici: installazione di un sistema di preriscaldamento dei fumi in ingresso al sistema DENOX nella sezione SCR.
2. Centrale termica/Recuperi termici: accumulo termico.
3. Linee produttive: aumento superficie di scambio condensatori.
4. Aspirazione: riduzione dei consumi elettrici associati alla depurazione fumi.
5. Generale: installazione di un sistema di monitoraggio in continuo dei consumi principali di processo attraverso l'implementazione di n°84 punti di misura e report dati su una piattaforma ad hoc.



APPENDICE A
Determinazione del PCI
dei rifiuti e dei combustibili
ausiliari

APPENDICE A - Determinazione del PCI dei rifiuti e dei combustibili ausiliari

La funzione principale degli impianti d'incenerimento è il trattamento termico dei rifiuti e non la produzione di energia (elettrica e/o termica). Tra i vettori in ingresso all'impianto non deve perciò essere inserito il contributo relativo all'apporto energetico dei rifiuti, espresso come prodotto tra il quantitativo di rifiuti destinati a incenerimento e il rispettivo PCI_w medio, entrambi relativi al periodo di riferimento.

Si rammenta che, nell'ambito della finalità principale dell'impianto d'incenerimento, il carico termico (Portata rifiuti x PCI_w) individua univocamente la "taglia", mentre l'apporto energetico (quantitativo di rifiuti trattati x PCI_w) costituisce la "produzione", da esprimere in MWh.

In mancanza di dati effettivi, ai fini della determinazione dei PCI dei combustibili si suggerisce di fare riferimento alla tabella A.1, riportata di seguito.

Tabella A.1 – Fattori di conversione in tep dei principali vettori energetici.

Vettore	u.m.	Fattore di conversione in tep
Energia elettrica	MWh	0,187
Gas naturale	Sm ³	0,836x10 ⁻³
Gas naturale	Nm ³	0,882x10 ⁻³
Gas naturale liquefatto	t	1,08
Gasolio	t	1,02
GPL (stato liquido)	t	1,10
GPL (stato liquido)	litri	0,616x10 ⁻³
GPL (stato gassoso)	Sm ³	2,53x10 ⁻³
GPL (stato gassoso)	Nm ³	2,67x10 ⁻³
Olio combustibile	t	0,98
Energia termica	MWh	0,095
Altro	t	PCI [kcal/kg]x10 ⁻⁴ = PCI [MJ/kg]/41,87

Fonte: Elaborazione ENEA su fonte FIRE.

I valori sopra riportati, da utilizzare in assenza di dati effettivi, sono ripresi dalla tabella FIRE riportata nelle “Linee guida per la nomina dell’energy manager v2.0 2017”, in accordo a quanto previsto dalla Circolare MiSE del 18 dicembre 2014. In particolare per il gas naturale la misura dei consumi dovrebbe essere espressa in Sm³, salvo casi particolari; in ogni caso all’unità di misura di consumo utilizzata deve essere associato il corrispondente PCI, così come riportato nella tabella A.1. Per quanto riguarda invece i rifiuti alimentati il PCI_w deve essere determinato con il massimo grado di accuratezza possibile. Il metodo più attendibile è quello riportato nell’appendice F della norma UNI/TS 11597-2015 - “Caratterizzazione dei rifiuti e dei CSS in termini di contenuto di biomassa ed energetico” che fornisce i criteri generali per la caratterizzazione dei rifiuti e dei CSS ai fini della determinazione del contenuto di biomassa ed energetico.

Tale metodo consente di ricavare il PCI_w medio in un certo intervallo di tempo a partire dalla potenza lorda entrante calcolata in un intervallo temporale di riferimento, conoscendo il quantitativo di rifiuti inceneriti nel medesimo intervallo e il contributo energetico fornito dal combustibile ausiliario, secondo la:

$$PCI_w \left[\frac{MWh}{t} \right] = \frac{(Q_{Le} - Q_{Lc})}{M_{rifiuti}}$$

Dove:

- Q_{Le} è l’energia termica entrante nel periodo di riferimento [MWh];
- Q_{Lc} è l’energia entrante con il combustibile ausiliario [MWh];
- $M_{rifiuti}$ è il quantitativo di rifiuti inceneriti [t].

Tale metodo risulta applicabile agli impianti che dispongono delle misure in continuo necessarie all’effettuazione del bilancio energetico sul sistema forno/generatore di vapore, di cui all’appendice E, punto E.2.2 della medesima norma UNI/TS 11597-2015. Esso consente inoltre di ovviare alla necessità di ricorrere alla caratterizzazione di ciascuna delle diverse tipologie di rifiuti (RUI, FS, CSS, RS, ecc.), spesso trattati in combinazione.

Per gli impianti che non dispongono di tale sistema occorrerà ricorrere all’effettuazione di un set di analisi merceologiche che, tenendo conto delle diverse tipologie di rifiuti che vengono avviate a incenerimento, risulti sufficientemente rappresentativo del funzionamento dell’impianto durante il periodo di riferimento per l’esecuzione della diagnosi energetica.

Allo scopo si raccomanda vivamente di rifarsi a quanto riportato nella succitata norma UNI/TS 11597-2015 e nei riferimenti normativi in essa citati, in merito ai

metodi di campionamento e di caratterizzazione analitica da applicare, nonché alle modalità di derivazione di valori di riferimento per il PCIw di specifici rifiuti. È possibile inoltre fare ricorso a eventuali specifiche prescrizioni emesse dall'organismo preposto al rilascio dell'autorizzazione e/o alle verifiche di esercizio dell'impianto in esame (Regione, Provincia, GSE, ecc.).



APPENDICE B

Valutazione della rappresentatività statistica di una analisi di regressione

APPENDICE B

VALUTAZIONE DELLA RAPPRESENTATIVITÀ STATISTICA DI UNA ANALISI DI REGRESSIONE

Per valutare la rappresentatività statistica di una generica analisi di correlazione lineare (Figura A) possono essere utilizzate differenti metodologie.

In queste linee guida si fa riferimento ai seguenti parametri (Tabella A) statistici:

- A. coefficiente di correlazione R;
- B. significatività statistica attraverso l'utilizzo del P-value;
- C. coefficiente di determinazione R^2 .

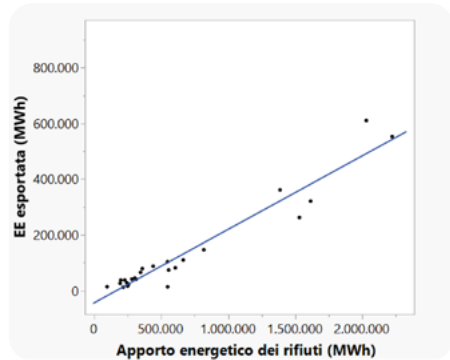


Figura A - Esempio grafico analisi di regressione.

Rette di Regressione E.El.esportata [MWh] vs vs Apporto Energetico dei rifiuti [MWh]						
E.El.esportata(MWh) = -46.347,5 + + 0,2655 * Apporto Energetico dei rifiuti [MWh] Int. Confidenza > 99%						
	R^2	R	P_{value}	N	Rcrit (bidir.) $\alpha=0,05$	Rcrit (bidir.) $\alpha=0,01$
Energia Elettrica esportata [MWh]	0,933	0,966	< 0,0001	25	0,3809	0,4869

Tabella A - Esempio di analisi di regressione.

Il **coefficiente di correlazione R** è un parametro utilizzato nell'analisi della correlazione per quantificare la forza della relazione lineare tra due variabili (ad esempio consumo di energia e produzione). Il coefficiente R può variare da +1 correlazione perfetta positiva (all'aumentare della produzione aumenta il consumo energetico) a -1 correlazione perfetta negativa (all'aumentare della temperatura di un pannello fotovoltaico diminuisce la sua efficienza). **Tanto più R è vicino a +1, ovvero -1, tanto più la relazione tra le due variabili è forte. Più R si avvicina a zero, più la correlazione lineare è debole.**

Calcolato il coefficiente di correlazione R, per la sua interpretazione è necessario appurare se il campione su cui è stata calcolata la relazione di correlazione è rappresentativo della popolazione; in altre parole, la domanda è se la numerosità e le caratteristiche del campione consentono di interpretare la presenza o la mancanza di correlazione come non casuale.

Si tratta a questo punto di attivare un processo di inferenza per sapere quanto possiamo fidarci della correlazione calcolata.

Senza bisogno di applicare le formule, si possono consultare delle apposite tavole (Tavole del valore di R critico di *Pearson*), che forniscono la probabilità associata

ad un certo valore di R, per un determinato grado di libertà.

Le tavole forniscono la probabilità che l'ipotesi nulla possa essere respinta quando è vera, secondo diverse numerosità campionarie (gradi di libertà, definiti come la dimensione del campione meno 2) e livelli di significatività. L'ipotesi nulla del test è l'assenza di correlazione ($R=0$): ad esempio, un livello di significatività α dello 0,05 indica un rischio del 5% di concludere che esiste

df	Livello di Significatività per un Test a Due-Code					
	.20	.10	.05	.02	.01	.001
1	0.951	0.988	0.997	0.9995	0.9999	0.99999
2	0.800	0.900	0.950	0.980	0.990	0.999
3	0.687	0.805	0.878	0.934	0.959	0.991
4	0.608	0.729	0.811	0.882	0.917	0.974
5	0.551	0.669	0.755	0.833	0.875	0.951
6	0.507	0.621	0.707	0.789	0.834	0.925
7	0.472	0.582	0.666	0.750	0.798	0.898
8	0.443	0.549	0.632	0.715	0.765	0.872
9	0.419	0.521	0.602	0.685	0.735	0.847
10	0.398	0.497	0.576	0.658	0.708	0.823
11	0.380	0.476	0.553	0.634	0.684	0.801
12	0.365	0.457	0.532	0.612	0.661	0.780
13	0.351	0.441	0.514	0.592	0.641	0.760
14	0.338	0.426	0.497	0.574	0.623	0.742
15	0.327	0.412	0.482	0.558	0.606	0.725

Figura B – Esempio: Tavole del valore di R critico di *Pearson*.

correlazione, rigettando l'ipotesi nulla, quando l'ipotesi nulla è invece valida e non vi è alcuna correlazione tra le variabili esaminate.

Solitamente si utilizzano per la determinazione del valore di R critico livelli di significatività α di 0,05 e di 0,01.

Entrando nella Tavola del valore di R critico di Pearson con il grado di libertà e con il livello di significatività α scelto si può estrarre il valore dell'R critico. **Nel caso in cui il valore di R sia maggiore del valore di R critico si può affermare che il test di verifica è stato superato.** Superato il test è possibile determinare l'intervallo di confidenza CI come $CI = 1 - \alpha$.

Un ulteriore test statistico che permette di avere indicazione sulla significatività statistica dell'analisi svolta è quello del P-value. **Il P-value è un test sulla significatività statistica dei coefficienti stimati o del modello stimato.** In particolare, se:

- $0,01 \leq P\text{-value} < 0,05$ la stima può dirsi statisticamente significativa;
- $0,001 \leq P\text{-value} < 0,01$ la stima può dirsi molto significativa;
- $P\text{-value} < 0,001$ la stima può dirsi estremamente significativa.

Infine, il **coefficiente di determinazione R^2** fornisce un'indicazione su quanto è forte la capacità predittiva del modello di correlazione. In parole più semplici, R^2 rappresenta la variazione nei valori della variabile dipendente che può essere giustificata dalla variazione della variabile indipendente. **Più grande è il valore di R^2 , migliore è la capacità delle variabili esplicative di prevedere i valori della variabile dipendente. Al contrario valori bassi di R^2 indicano una scarsa predittività del modello di regressione,** dovuta principalmente al fatto che la variabile dipendente analizzata dipenda, in maniera rilevante, anche da altri parametri che non sono stati presi in considerazione dal modello. Tuttavia, in alcune situazioni l'utilizzo dell' R^2 può essere fuorviante, infatti un modello che presenta un valore alto dell' R^2 può comunque non essere rappresentativo della relazione esistente tra le variabili.

La correlazione lineare può essere considerata forte se $R^2 > 0,5$ e moderata se $R^2 > 0,25$.

Pertanto, ad esempio alla luce delle informazioni qui riportate, la correlazione può essere considerata statisticamente rappresentativa se:

- $P\text{-value} < 0,05$;
- $R > R$ critico;
- $R^2 > 0,5$.

Bibliografia

- [1] Rapporto rifiuti urbani, Edizione 2021, Ispra.
- [2] Diagnosi Energetiche art 8 del D.Lgs. 102/2014 Linee Guida e Manuale Operativo Clusterizzazione, il rapporto di diagnosi ed il piano di monitoraggio, ENEA, 2021.
- [3] Linea Guida per l'Esecuzione della diagnosi Energetica ai sensi dell'articolo 8 del d.lgs. 102/2014: Impianti di Incenerimento dei rifiuti, febbraio 2018, a cura di UTILITALIA.
- [4] Chiarimenti in materia di Diagnosi Energetica nelle imprese ai sensi dell'articolo 8 del Decreto Legislativo N. 102 del 2014, novembre 2016, MISE.
- [5] UNI CEI EN 16247:1-4.
- [6] Foglio di rendicontazione dei consumi energetici per gli impianti di Incenerimento dei rifiuti.
- [7] G.Bruni, A. De Santis, C. Herce, L.Leto, C.Martini, F.Martini, M.Salvio, F.A. Tocchetti and C.Toro, "From Energy Audit to Energy Performance Indicators (EnPI): A Methodology to Characterize Productive Sectors. The Italian Cement Industry Case Study", *Energies* 2021, 14(24), 8436; <https://doi.org/10.3390/en14248436>.
- [8] European Commission. Joint Research Centre., Best available techniques (BAT) reference document for waste treatment: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (integrated pollution prevention and control). LU: Publications Office, 2018. Consultato: giu. 10, 2021. [Online]. Disponibile su: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/407967>.
- [9] G. C. Fitzgerald, «SHREDDING MUNICIPAL SOLID WASTES PRIOR TO DISPOSAL». 2009.
- [10] B. Bilitewski, «Mechanical Treatment: Unit Processes», in *Solid Waste Technology & Management*, John Wiley & Sons, Ltd, 2010, pagg. 319–348. doi: 10.1002/9780470666883.ch24.
- [11] U. Krogmann, I. Körner, e L. F. Diaz, «Composting: Technology», in *Solid Waste Technology & Management*, John Wiley & Sons, Ltd, 2010, pagg. 533–568. doi: 10.1002/9780470666883.ch35.

- [12] S. Q. Aziz, I. Omar, e J. Mustafa, «Design and Study for Composting Process Site», vol. 7, pagg. 9–18, nov. 2018.
- [13] S. Wang e Y. Wu, «Hyperthermophilic Composting Technology for Organic Solid Waste Treatment: Recent Research Advances and Trends», *Processes*, vol. 9, n. 4, Art. n. 4, apr. 2021, doi: 10.3390/pr9040675.
- [14] B. Ouhammou, M. Aggour, Â. Frimane, M. Bakraoui, H. El Bari, e A. Essamri, «A new system design and analysis of a solar bio-digester unit», *Energy Convers. Manag.*, vol. 198, pag. 111779, ott. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.111779.
- [15] K. Li et al., «Performance assessment and metagenomic analysis of full-scale innovative two-stage anaerobic digestion biogas plant for food wastes treatment», *J. Clean. Prod.*, vol. 264, pag. 121646, ago. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121646.
- [16] J. Zhang et al., «A hybrid biological and thermal waste-to-energy system with heat energy recovery and utilization for solid organic waste treatment», *Energy*, vol. 152, pagg. 214–222, giu. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.03.143.
- [17] C. Cimpan e H. Wenzel, «Energy implications of mechanical and mechanical–biological treatment compared to direct waste-to-energy», *Waste Manag.*, vol. 33, n. 7, pagg. 1648–1658, lug. 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2013.03.026.
- [18] S. T. Tan, W. S. Ho, H. Hashim, C. T. Lee, M. R. Taib, e C. S. Ho, «Energy, economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in Malaysia», *Energy Convers. Manag.*, vol. 102, pagg. 111–120, set. 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.02.010.
- [19] H. Chen et al., «An innovative waste-to-energy system integrated with a coal-fired power plant», *Energy*, vol. 194, pag. 116893, mar. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116893.
- [20] European Commission. Joint Research Centre., Best Available Techniques (BAT) reference document for waste incineration: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). LU: Publications Office, 2019. Consultato: giu. 10, 2021. [Online]. Disponibile su: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/761437>.

- [21] G. Flesoura, N. Dilissen, G. Dimitrakis, J. Vleugels, e Y. Pontikes, «A new approach for the vitrification of municipal solid waste incinerator bottom ash by microwave irradiation», *J. Clean. Prod.*, vol. 284, pag. 124787, feb. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124787.
- [22] Q. Qiu, X. Jiang, Z. Chen, S. Lu, e M. Ni, «Microwave-Assisted Hydrothermal Treatment with Soluble Phosphate Added for Heavy Metals Solidification in MSWI Fly Ash», *Energy Fuels*, vol. 31, n. 5, pagg. 5222–5232, mag. 2017, doi: 10.1021/acs.energyfuels.6b02516.
- [23] S.-L. Pei, T.-L. Chen, S.-Y. Pan, Y.-L. Yang, Z.-H. Sun, e Y.-J. Li, «Addressing environmental sustainability of plasma vitrification technology for stabilization of municipal solid waste incineration fly ash», *J. Hazard. Mater.*, vol. 398, pag. 122959, nov. 2020, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122959.
- [24] A. Buekens, *Incineration Technologies*. New York, NY: Springer New York, 2013. doi: 10.1007/978-1-4614-5752-7.
- [25] T. Hulgaard e J. Vehlow, «Incineration: Process and Technology», in *Solid Waste Technology & Management*, John Wiley & Sons, Ltd, 2010, pagg. 363–392. doi: 10.1002/9780470666883.ch26.
- [26] L. Makarichi, W. Jutidamrongphan, e K. Techato, «The evolution of waste-to-energy incineration: A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, pagg. 812–821, ago. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.088.
- [27] L. Lombardi, E. Carnevale, e A. Corti, «A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste», *Waste Manag.*, vol. 37, pagg. 26–44, mar. 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2014.11.010.
- [28] T. Murakami et al., «Combustion characteristics of sewage sludge in an incineration plant for energy recovery», *Fuel Process. Technol.*, vol. 90, n. 6, pagg. 778–783, giu. 2009, doi: 10.1016/j.fuproc.2009.03.003.
- [29] U. Arena, «Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review», *Waste Manag.*, vol. 32, n. 4, pagg. 625–639, apr. 2012, doi: 10.1016/j.wasman.2011.09.025.
- [30] A. Perna, M. Minutillo, e E. Jannelli, «Hydrogen from intermittent renewable energy sources as gasification medium in integrated waste gasification combined cycle power plants: A performance comparison», *Energy*, vol. 94, pagg. 457–465, gen. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.10.143.

- [31] S. Evangelisti, C. Tagliaferri, R. Clift, P. Lettieri, R. Taylor, e C. Chapman, «Life cycle assessment of conventional and two-stage advanced energy-from-waste technologies for municipal solid waste treatment», *J. Clean. Prod.*, vol. 100, pagg. 212–223, ago. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.03.062.
- [32] S. Di Fraia, N. Massarotti, L. Vanoli, e M. Costa, «Thermo-economic analysis of a novel cogeneration system for sewage sludge treatment», *Energy*, vol. 115, pagg. 1560–1571, nov. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.07.144.
- [33] S.-W. Park, Y.-C. Seo, S.-Y. Lee, W.-S. Yang, J.-H. Oh, e J.-H. Gu, «Development of 8 ton/day gasification process to generate electricity using a gas engine for solid refuse fuel», *Waste Manag.*, vol. 113, pagg. 186–196, lug. 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2020.06.004.
- [34] M. Punčochář, B. Ruj, e P.K. Chatterj, «Development of Process for Disposal of Plastic Waste Using Plasma Pyrolysis Technology and Option for Energy Recovery», *Procedia Eng.*, vol. 42, pagg. 420–430, gen. 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.433.
- [35] J. Ali et al., «Modalities for conversion of waste to energy — Challenges and perspectives», *Sci. Total Environ.*, vol. 727, pag. 138610, lug. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138610.
- [36] *The Solid Waste Handbook*, 1a ed. John Wiley & Sons, Ltd, 1986. doi: 10.1002/9780470172957.
- [37] J. Vehlow e S. Dalager, «Incineration: Flue Gas Cleaning and Emissions», in *Solid Waste Technology & Management*, John Wiley & Sons, Ltd, 2010, pagg. 393–420. doi: 10.1002/9780470666883.ch27.
- [38] H. Perazzini, F. Freire, F. Freire, e J. Freire, «Thermal Treatment of Solid Wastes Using Drying Technologies: A Review», *Dry. Technol.*, vol. 34, pag. 150130063944001, gen. 2015, doi: 10.1080/07373937.2014.995803.
- [39] H. Chen, L. Zhang, Y. Yang, C. Wu, e W. Wei, «Practice and Development of Municipal Solid Waste Rapid Composting in China», in *2011 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*, feb. 2011, pagg. 2140–2143. doi: 10.1109/CDCIEM.2011.464.
- [40] P. Psaltis e D. Komilis, «Environmental and economic assessment of the use of biodrying before thermal treatment of municipal solid waste», *Waste Manag.*, vol. 83, pagg. 95–103, gen. 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2018.11.007.

- [41] M. M. Tun e D. Juchelkova, «Drying methods for municipal solid waste quality improvement in the developed and developing countries: A review», *Environ. Eng. Res.*, vol. 24, n. 4, pagg. 529–542, 2019, doi: 10.4491/eer.2018.327.
- [42] D. Panepinto e G. Genon, «Environmental evaluation of the electric and cogenerative configurations for the energy recovery of the Turin municipal solid waste incineration plant», *Waste Manag. Res.*, vol. 32, n. 7, pagg. 670–680, lug. 2014, doi: 10.1177/0734242X14538304.
- [43] O. Gohlke, «Efficiency of energy recovery from municipal solid waste and the resultant effect on the greenhouse gas balance», *Waste Manag. Res.*, vol. 27, n. 9, pagg. 894–906, nov. 2009, doi: 10.1177/0734242X09349857.
- [44] S. Sedpho, S. Sampattagul, N. Chaiyat, e S. H. Gheewala, «Conventional and exergetic life cycle assessment of organic rankine cycle implementation to municipal waste management: the case study of Mae Hong Son (Thailand)», *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, n. 11, pagg. 1773–1784, nov. 2017, doi: 10.1007/s11367-016-1216-4.
- [45] F. Huang, J. Zheng, J. M. Baleyraud, e J. Lu, «Heat recovery potentials and technologies in industrial zones», *J. Energy Inst.*, vol. 90, n. 6, pagg. 951–961, dic. 2017, doi: 10.1016/j.joei.2016.07.012.
- [46] A. Colmenar-Santos, G. Zarzuelo-Puch, D. Borge-Diez, e C. García-Diéguez, «Thermodynamic and exergoeconomic analysis of energy recovery system of biogas from a wastewater treatment plant and use in a Stirling engine», *Renew. Energy*, vol. 88, pagg. 171–184, apr. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.11.001.
- [47] M. Pavlas, M. Touš, P. Klimek, e L. Bébar, «Waste incineration with production of clean and reliable energy», *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 13, n. 4, pagg. 595–605, ago. 2011, doi: 10.1007/s10098-011-0353-5.
- [DE] Intervento riportato in *Diagnosi Energetica*.

ENEA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO

TOR VERGATA



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI ROMA



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DELLA
TUSCIA



ALMA MATER STUDIORVM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE



UTILITALIA

FEDERAZIONE UTILITIES
acqua | ambiente | energia

RdS

RICERCA DI SISTEMA

La presente pubblicazione è stata realizzata nell'ambito della Ricerca di Sistema PTR 2019-2021, progetto I.6 "Efficienza Energetica dei prodotti e dei processi industriali", finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico