



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

OTTIMIZZAZIONE IMPIANTO RICICLO CAVI
ELETTRICI

OPTIMIZATION OF THE ELECTRICAL CABLE
RECYCLING SYSTEM

Relatore:

Prof.Ing. Filippo Emanuele Ciarapica

Laureando:

Simone Mari

Mtr.219145

Correlatore

Dott.Ing. Andrea Sparapani

Anno Accademico 2020/2021

INDICE

Introduzione.....	1
Capitolo 1: L'ECONOMIA CIRCOLARE	
1.1 Risorse naturali e demografia.....	2
1.2 Impronta ecologica.....	3
1.3 Verso un nuovo modello economico: l'economia circolare.....	5
1.4 Definizione.....	6
1.4.1 L'Economia circolare e lineare: una cambio di prospettiva.....	10
1.5 Il ruolo dell'industria 4.0 nell'economia circolare.....	13
1.6 UE ed economia circolare.....	14
 Capitolo 2: RICICLO CAVI: ANALISI DELLO STATO DELL'ARTE	
2.1 Tecnologie di smaltimento cavi.....	16
2.2 Tecnologia di frantumazione.....	16
2.2.1 Riduzione dimensionale.....	17
2.2.1.1 Triturazione o macinazione primaria.....	17
2.2.1.2 Riduzione, granulazione e raffinazione.....	20
2.2.2 Separazione e vagliatura.....	21
2.2.2.1 Separazione dimensionale: vagliatura.....	22
2.2.2.2 Separazione gravimetrica.....	22
2.2.2.2.1 Ciclone decantatore.....	23
2.2.2.2.2 Separatore aeraulico Zig Zag.....	24
2.2.2.2.3 Tavole densimetriche.....	24
2.2.2.2.4 Tavole di separazione ad acqua.....	25
2.2.2.2.5 Sistema di aspirazione.....	26
2.2.2.3 Separatori magnetici.....	26
2.2.2.3.1 Separatori magnetici a nastro o overbelt.....	27
2.2.2.3.2 Separatori magnetici sospesi.....	28
2.2.2.3.3 Separatori magnetici a pulegge.....	29
2.2.2.3.4 Separatori magnetici a tamburo.....	29
2.2.2.3.5 Separatori magnetici per Acciaio Inox.....	30
2.2.2.4 Separatori elettrici.....	31
2.2.2.4.1 Separatori a correnti indotte.....	31
2.2.2.4.2 Separatori elettrostatici.....	32

2.3 Tecnologia di congelamento.....	33
2.4 Tecnologia del getto d'acqua ad alta pressione.....	34
2.5 Tecnologia di separazione ad ultrasuoni.....	35
2.6 Tecnologia di separazione chimica.....	36
2.7 Tecnologie termiche.....	37
2.7.1 Incenerimento.....	37
2.7.2 Deformazione termica.....	37
2.8 Confronto tra tecnologie.....	38

Capitolo 3: LAYOUT IMPIANTO

3.1 Descrizione impianto.....	40
3.1.1 Linea 1: Macinazione e sorting primario.....	40
3.1.1.1 Trituratore primario.....	41
3.1.1.2 Separatore magnetico overbelt.....	43
3.1.1.3 Centralina idraulica di potenza.....	44
3.1.2 Linea 2: Raffinazione e separazione materiali.....	45
3.2.1.1 Descrizione processo linea 2.....	45
3.2.1.2 Turbina verticale.....	48
3.2.1.3 Sistema di separazione Zig Zag.....	49
3.2.1.4 Turbina orizzontale.....	49
3.2.1.5 Separatori densimetrici.....	51
3.2.1.6 Ciclone decantatore.....	51
3.2.1.7 Impianto filtrante.....	52

Capitolo 4: SISTEMA DI GESTIONE E CONTROLLO IMPIANTO

4.1 Programmable Logic Controller (PLC).....	54
4.2 Avviamento Impianto.....	54
4.2.1 Avviamento linea turbine.....	55
4.2.2 Avviamento linea separatori.....	56
4.3 Setting e monitoraggio parametri.....	57
4.3.1 Parametri di lavoro.....	58
4.3.2 Monitoraggio temperature.....	59
4.3.3 Allarmi e Avvisi.....	60
4.3.4 Allarmi Analisi e Avvisi.....	62

4.3.4 Monitoraggio pressione tritratore.....	63
4.3.5 Monitoraggio turbine.....	65
4.3.5.1 Turbina verticale.....	65
4.3.5.2 Turbine orizzontali.....	66
4.4 Prodotto in uscita.....	67
4.5 Multimetro.....	68
4.6 Ciclo di Pulizia.....	69
4.7 Consumo energia.....	69
4.8 Cabina MT.....	69

INTRODUZIONE

In questa trattazione andremo ad analizzare un nuovo impianto di riciclaggio di un'azienda marchigiana specializzata nel recupero di materie plastiche e metalli derivante dallo smaltimento dei cavi elettrici, della quale non farò il nome per richiesta della stessa.

Negli ultimi decenni l'importanza di questo tipo di attività produttive è divenuta molto importante a causa della sempre maggiore scarsità di materie prime vergini.

Questa scarsità è uno degli aspetti che sta favorendo e accelerando la transizione della nostra economia dal modello basato sul concetto di "Economia Lineare" al modello basato sul concetto di "Economia Circolare".

Poiché l'attività di recupero dei materiali è uno degli aspetti fondamentali del nuovo modello economico circolare, nel primo capitolo andremo ad analizzare questo cambiamento in atto. Partiremo dall'analisi della situazione attuale frutto del modello produttivo basato sull'economia lineare, proseguiremo con la definizione di economia circolare, descrivendolo come soluzione praticabile per un sistema economico ecosostenibile. Infine metteremo l'accento sui vantaggi del riciclo di plastica e metalli dal punto di vista ambientale rispetto all'attività estrattiva mineraria.

Nel secondo capitolo descriveremo le metodologie utilizzate nel recupero di plastica, metalli ferrosi e non ferrosi dallo smaltimento di cavi elettrici, facendo poi un confronto fra le varie tecniche.

Nel terzo capitolo descriveremo nello specifico il funzionamento del nuovo impianto di smaltimento dell'azienda marchigiana. Analizzeremo nel dettaglio le linee di lavorazione mettendo in evidenza alcune scelte produttive che permettono di ottenere una migliore gestione dell'impianto e materie prime secondarie di qualità.

Nel quarto capitolo descriveremo i sistemi di controllo dell'impianto e analizzeremo gli avvisi di errore rilevati in un dato periodo di funzionamento.

1 ECONOMIA CIRCOLARE

1.1 RISORSE NATURALI E DEMOGRAFIA

L'incremento demografico mondiale degli ultimi 50 anni è stato esponenziale. Ciò ha portato al sovrasfruttamento delle risorse naturali inducendo la comunità internazionale a prendere coscienza della necessità di cambiare il modello di sviluppo.

Il modello di crescita economica che ha caratterizzato gli ultimi 150 anni di storia è definito “Economia Lineare” (Fig1.1) cioè un’economia industriale, di mercato, basata sull’estrazione di materie prime sempre nuove, sul consumo di massa e sulla produzione di scarto.[1]



Fig. 1.1 sistema economico lineare

Si parla di sistema lineare perché quando il prodotto ha terminato il suo ciclo di vita viene gettato come rifiuto. Nonostante i tentativi di cambiamento l’odierna economia è, per buona parte, ancora basata su tale approccio che può essere sintetizzato con le parole “prendi, produci, usa, getta”.

La necessità di un cambiamento era già stata descritta in una ricerca del MIT¹ del 1972 intitolato “*Limits of Growth*”[2]. In tale rapporto, redatto da Donella Medouws, veniva simulato al computer l’effetto dell’incremento della popolazione sulle riserve naturali di materie prime (Fig.1.2). Lo studio metteva in guardia sul fatto che, con la crescita della popolazione, all’inizio del terzo millennio sarebbero terminate le riserve petrolifere.

Grazie ad alcune variabili intervenute nel corso degli anni quali la diversificazione energetica (energia nucleare e alle fonti alternative) e la scoperta di nuovi giacimenti di fonti fossili, tale scenario non si è ancora verificato, ma purtroppo il processo di esaurimento delle risorse naturali è ancora in atto.

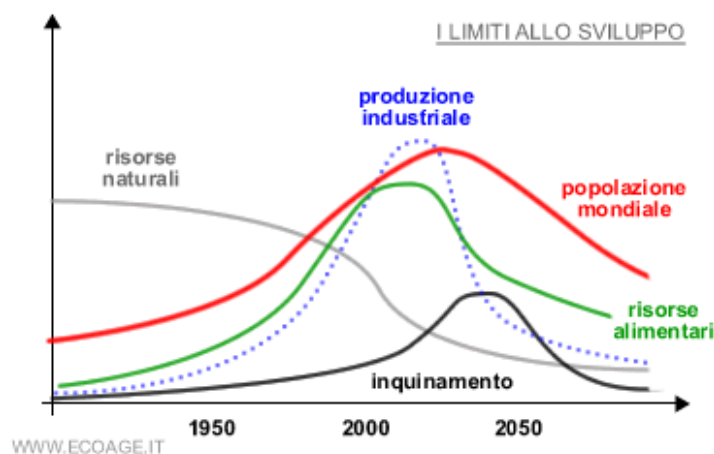


Fig.1.2 Grafico rapporto “Limits of Growth”

Nelle conclusioni della ricerca i relatori, spaventati da simili previsioni, introdussero il concetto di sviluppo sostenibile e auspicarono l’uso di fonti alternative al posto di quelle fossili.

Ci furono altri studi e conferenze sul cambiamento del modello di sviluppo legato alla sostenibilità ambientale. Ma il primo vero raduno dei capi di stato che ha avuto come oggetto l’ambiente è stata la conferenza di Rio del 1992. Dopo Rio sono stati tenuti diversi altri incontri, come quelli di Kyoto o il più recente di Parigi, durante i quali sono stati raggiunti accordi che spesso vengono disattesi.

1.2 IMPRONTA ECOLOGICA

La difficoltà di abbandonare il modello di sviluppo lineare è testimoniata dai rapporti dell’organizzazione internazionale Global Footprint Network che misura la cosiddetta “Impronta Ecologica”, cioè il consumo annuo delle risorse naturali (vegetali, carne, pesce, legna, frutta, capacità di assorbimento della CO₂, etc...), confrontandolo con ciò che la natura ci mette a disposizione. Dal grafico di Fig.1.3 si evince che sin dal 1970 lo sfruttamento delle risorse naturali annue da parte dell’uomo ha superato ciò che la natura mette a disposizione nello stesso periodo. Ogni anno Il Global Footprint Network rileva, quindi, l’“Earth Overshoot Day”, ovvero il giorno in cui iniziamo a sovra sfruttare il pianeta usando più risorse di quelle che gli ecosistemi sono in grado di rigenerare. Osservando il grafico di Fig.1.4 si può verificare facilmente che a partire dagli anni settanta il giorno del sovrasfruttamento del pianeta è giunto sempre con anticipo rispetto agli anni precedenti[3]. Soltanto nel 2020, conseguentemente al periodo di lockdown imposto dalla pandemia da Covid-19 che ha fermato interi settori economici, l’“Earth Overshoot Day” è stato rilevato il 22 agosto, quindi in ritardo rispetto agli anni precedenti (nel 2019 era caduto il 29 luglio). [4].

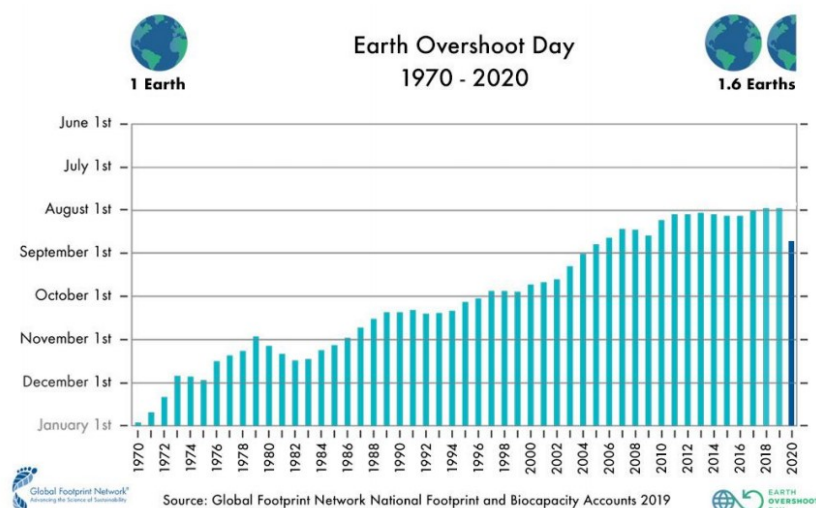


Fig. 1.3 Overshoot day

L'organizzazione Global Footprint Network ci fornisce ulteriori strumenti per valutare questa situazione di squilibrio. Osservando Fig.1.4 è possibile constatare che, in base agli attuali livelli di consumo delle risorse naturali, viviamo molto al di sopra delle possibilità concesse dal nostro pianeta. Infatti nel 2019 abbiamo consumato risorse 1,75 volte più velocemente del tempo necessario all'ecosistema per rigenerarle.

Nella fig.1.5b lo stesso valore viene rilevato per ogni singolo stato. Gli italiani, ad esempio, in base alla loro attuale domanda di risorse naturali avrebbero bisogno di 4,7 "Italie" per coprire il loro fabbisogno energetico.

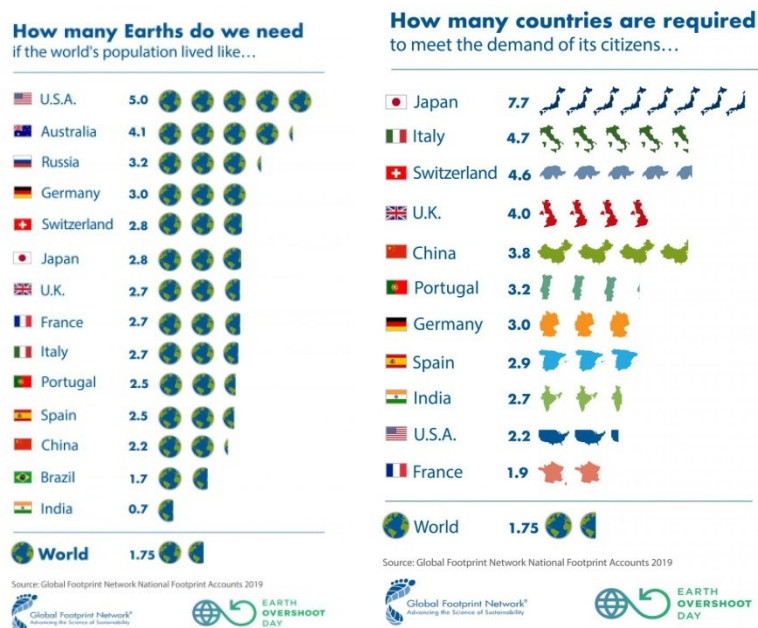


Fig1.4 Pianeti necessari se vivessi come.....

L'impronta ecologica è sempre più evidente in quanto i prodotti sono pensati per rispondere ad un solo bisogno, esaurito il quale vengono gettati come rifiuti generando inquinamento. Ad aggravare l'incontrollato consumo di risorse concorre inoltre un vastissimo impiego di combustibili fossili per la produzione di energia, con la conseguente emissione di gas serra responsabili dei cambiamenti climatici.

Il costo di questo disequilibrio ecologico si manifesta in modo evidente sull'ambiente attraverso:

- aumento della temperatura con conseguente scioglimento ghiacciai e innalzamento del livello del mare;
- deforestazioni, consumo del territorio e dissesto idrogeologico
- fenomeni climatici estremi quali siccità e uragani sempre più violenti e frequenti

Nell'ecosistema naturale non esistono discariche, i “materiali” vanno e vengono. Tutto quello che è scarto per una specie è alimento per un'altra. Il sole fornisce l'energia, le piante crescono, muoiono rendendo alla terra i loro elementi nutritivi e questo ciclo si ripete ogni volta. Questo modello naturale funziona da millenni in maniera impeccabile, ed è proprio da esso che può trarre ispirazione il nuovo sistema economico.

1.3 VERSO UN NUOVO MODELLO ECONOMICO: L'ECONOMIA CIRCOLARE

L'Agenda 2030 delle Nazioni Unite per lo Sviluppo Sostenibile e l'Accordo di Parigi sui cambiamenti climatici, firmati entrambi nel 2015, mettono in luce l'estrema necessità di una transizione verso un modello di sviluppo economico che ponga in primo piano non solo redditività e profitto, ma anche progresso sociale e salvaguardia del pianeta, al fine di scongiurare un futuro caratterizzato da problematiche sociali e ambientali. In questo contesto, un aspetto cruciale è quello della più razionale e sostenibile gestione delle risorse naturali, sempre più sotto pressione a causa della crescente popolazione, dell'aumento di domanda di materie prime e dell'incremento delle diseguaglianze anche nelle nazioni meno ricche. Il tema è caratterizzato da una doppia dimensione: a monte (upstream), si tratta di gestire le risorse in modo più efficiente, ovvero aumentandone la produttività nei processi di produzione e consumo, riducendo gli sprechi e mantenendo il più possibile il valore dei prodotti e dei materiali. A valle (downstream), occorre evitare che oggetti contenenti ancora una qualche utilità intrinseca non vengano smaltiti in discarica in forme peraltro non sempre legali, ma siano recuperati e reintrodotti nel sistema economico. Questi due aspetti costituiscono l'essenza dell'economia circolare, modello economico che sfrutta l'innovazione

tecnologica per ottenere maggiore efficienza e meno impatto sull'ambiente, ma soprattutto introduce una nuova visione dei concetti di prodotto e di rifiuto. Il paradigma produttivo da secoli basato sulla logica di “approvvigionamento-produzione-utilizzo-scarto” viene via via abbandonato per passare a un modello circolare. Nel sistema lineare il rifiuto è considerato fuori dal ciclo produttivo e commerciale, un elemento inquinante e non riutilizzabile, materia da smaltire e allontanare dal nostro sguardo perché considerata dannosa da un punto di vista economico e ambientale. Ma guardato da un'altra angolazione lo scarto si manifesta portatore di grande ricchezza non utilizzata, una grande risorsa da recuperare.

Basta pensare ai rifiuti elettronici, vere e proprie miniere di metalli rari da riutilizzare, o alle batterie esauste che, gettate nella spazzatura, non solo disperdono grandi quantità di metalli e acidi nell'ambiente, ma vedono andare sprecato il 30-40% della capacità di stoccaggio che ancora contengono. Per non parlare dei rifiuti alimentari: cibo prodotto con grande dispendio di denaro ed energie, che invece di essere buttato nella pattumiera potrebbe sfamare milioni di persone strette dalla morsa della fame. Questo nuovo modo di guardare ai rifiuti è peculiare del modello economico circolare, dove lo scarto è “miniera” e il consumatore diventa utilizzatore in grado di rigenerare la materia. L'attore di questo nuovo paradigma economico quindi non è la grande azienda che fornisce prodotti ai clienti, ma il consumatore circolare e responsabile che impiega alcune risorse della Terra permettendone poi il ritorno allo stato iniziale. Una rivoluzione epocale, una transizione apparentemente utopica ma che, come dimostrano molti esempi “virtuosi”, diventa possibile ripensando il funzionamento delle industrie, i metodi di produzione, distribuzione e uso[4].

1.4 DEFINIZIONE

“Un'economia pensata per potersi rigenerare da sola. In un'economia circolare i flussi di materiali sono di due tipi: quelli biologici, in grado di essere reintegrati nella biosfera, e quelli tecnici, destinati ad essere rivalorizzati senza entrare nella biosfera”[6].

Questa è la definizione che ne dà la Ellen MacArthur Foundation, una delle realtà più attive nella promozione di questo modello di sviluppo, finanziata dalla velista Ellen MacArthur e sostenuta da colossi del mondo industriale.

Dalla definizione possiamo vedere che alla base dell'economia circolare, intesa come flusso continuo basato sul “take, make, use, return” (prendi, produci, usa e riusa o ricicla), c'è il funzionamento dell'ecosistema naturale. In natura non esistono discariche, i “materiali” vanno e vengono. Tutto quello che è scarto per una specie è un alimento per un'altra. Il sole fornisce

l'energia, le piante crescono, muoiono rendendo alla terra i loro elementi nutritivi e questo ciclo si ripete all'infinito. Il modello naturale funziona da millenni in maniera impeccabile, ed è proprio da esso che può trarre ispirazione il nuovo sistema economico, come ci insegna anche la **biomimetica (biomimicry)**. Secondo questo principio, infatti, l'uomo studiando a fondo la natura può "mimarne" i processi biologici e trasferirli nel mondo artificiale, al fine di progettare e realizzare oggetti e manufatti tecnici utili al miglioramento della società umana. Un importante approccio biomimetico è quello del **Cradle to Cradle (dalla culla alla culla)**, detto anche **C2C** o **progettazione rigenerativa**, che si pone come obiettivo principale l'eliminazione del concetto di "rifiuto" introducendo processi produttivi circolari. Generalmente le materie prime vengono estratte, trasformate, parzialmente consumate sotto forma di prodotti ed infine gettate come rifiuto o bruciate, così il loro "valore" si disperde definitivamente. I processi produttivi umani sono a senso unico: "dalla culla alla tomba" (o C2G: cradle to grave) . Al contrario, osservando i processi naturali è possibile ridisegnare ecologicamente i processi industriali e progettare prodotti in cui i materiali, reinseriti in successivi cicli produttivi, divengono nutrienti e si muovono dentro circoli metabolici, quindi chiusi[7].

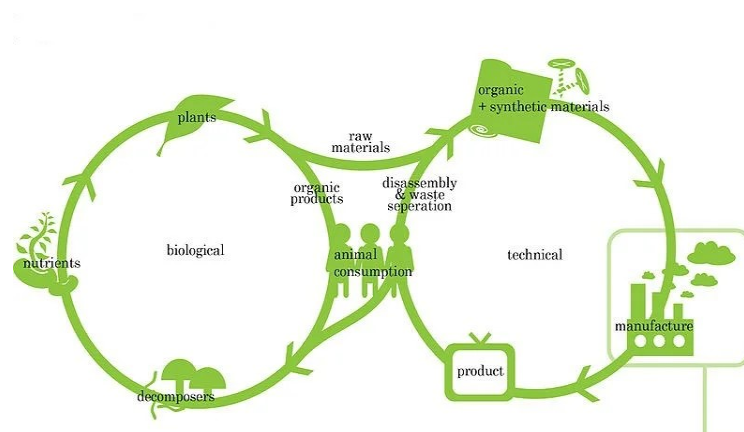


Fig.1.5 Ciclo biologico e ciclo tecnico[8]

Prendendo ancora spunto dalla definizione di economia circolare possiamo distinguere i materiali in due grandi categorie(Fig.1.6):

1. **Materiali biologici:** materiali biodegradabili che naturalmente rientrano nel ciclo biologico e sulla base dei quali dovremmo riprogettare i futuri prodotti in modo da renderli compostabili.
2. **Materiali tecnici:** materiali non biodegradabili, come metalli e polimeri, per i quali è necessario predisporre un sistema di riciclo integrato capace di recuperarli conservandone la qualità in modo da divenire materia prima per nuovi prodotti.

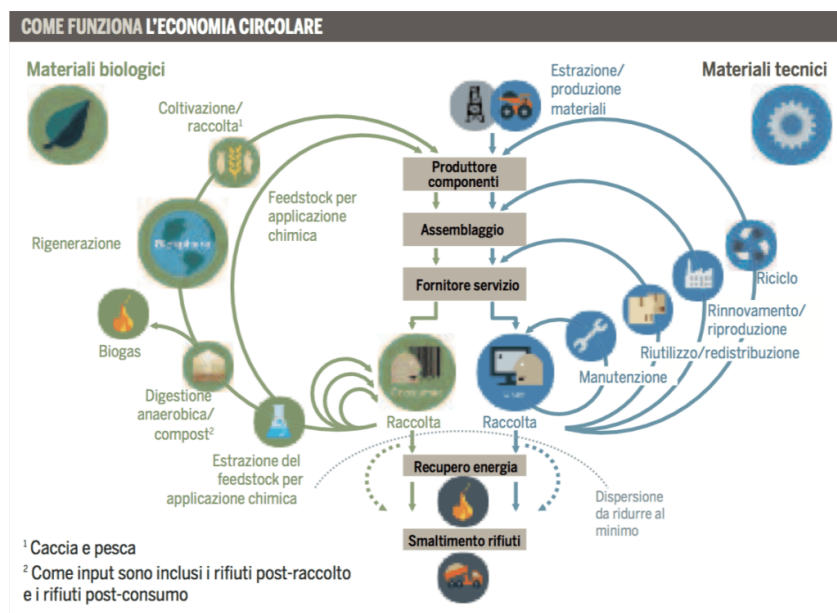


Fig1.6 Ciclo materiali biologici e tecnici

L'economia circolare si basa su alcuni concetti fondamentali:

1. **Eco-progettazione (eco-design):** consiste nel ripensare il modo di progettare i prodotti, ragionando fin dall'inizio su un loro eventuale impiego a fine vita, ideandoli con caratteristiche che ne permettano lo smontaggio o la ristrutturazione;
2. **Estensione della vita utile del prodotto:** attraverso una corretta progettazione si cerca di dare modularità, versatilità e adattabilità ai prodotti in modo che possano essere adattati ad usi diversi da quello originario (riuso). Viene inoltre programmata una manutenzione ricorrente in modo da estendere il più possibile la vita del prodotto. Oltre a facilitarne la manutenzione le caratteristiche sopra citate possono essere molto utili in caso di riparazione, pratica considerata scomoda e costosa ma che in realtà può allungare la durata del prodotto. Viene infine abbandonata una volta per tutte la cattiva pratica dell'obsolescenza programmata;
3. **Energie rinnovabili:** si fa sempre più affidamento sulle energie rinnovabili, sia nella produzione che nella distribuzione dei prodotti, cercando di abbandonare progressivamente il vecchio modello basato sulle fonti di energia fossile;
4. **Approccio ecosistemico:** nell'ambito dell'economia circolare si cerca di pensare in modo olistico, ovvero prendendo in considerazione le relazioni di causa effetto fra le diverse componenti del sistema;

5. **Recupero e riciclo dei materiali:** viene privilegiato l'uso di materie prime seconde provenienti da filiere di recupero che ne conservino la qualità attraverso riciclo, riuso, rigenerazione, in modo da sostituirle progressivamente alle materie prime vergini;
6. **Sharing:** viene incentivato lo sviluppo di piattaforme di condivisione che si basano sulla gestione comune dei prodotti tra gli stessi utilizzatori, al fine di aumentare l'intensità di utilizzo dei beni e di ridurre la creazione di nuovi prodotti non necessari. La condivisione inoltre riduce i costi di accesso a prodotti e servizi e permette una situazione di interazione e coesione sociale;
7. **Prodotto come servizio:** modello di business il cui scopo è la vendita al cliente di servizi associati ad un determinato prodotto e non la vendita del prodotto stesso. Infatti le nuove tecnologie digitali permettono a uno o più consumatori di non acquistare il prodotto, ma di utilizzarlo attraverso un contratto tipo "pay-per-use". Questo modello, utilizzato in diversi comparti quali l'automobile, gli apparecchi IT, l'abbigliamento, gli imballaggi e molti altri ancora, permette una maggiore interazione tra cliente e azienda;
8. **End of life:** La gestione del fine vita del prodotto offre varie soluzioni oltre alla possibilità di riciclo: mentre nel riciclo a catena aperta i materiali recuperati vengono utilizzati per generare beni di minore valore (**Downcycling**), nell'economia circolare i prodotti che giungono a fine vita possono essere trasformati e reimmessi nel ciclo produttivo generando maggiore valore rispetto alla loro destinazione iniziale, (**Upcycling**). Ne è un esempio la bioraffinazione, tecnica che permette di estrarre piccole quantità di materiali pregiati o di trasformare i rifiuti in energia. Un'altra soluzione è la cosiddetta "Regenerating", rigenerazione o riparazione estensiva che porta il prodotto ad essere reimmesso nel mercato.

Uno dei principi fondamentali dell'economia circolare è il **paradigma delle R**, il quale definisce le strategie da attuare per portare il sistema alla circolarità. Caratteristica peculiare è che tutte attività iniziano per la lettera R.

Nel 2017 lo studio "*Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions*" ha teorizzato l'esistenza di almeno 9 strategie R, suddivise in tre categorie e combinabili in vari modi.

Obiettivo	Strategia	Definizione
Fabbricare e utilizzare il prodotto in maniera più intelligente	R0 Rifiutare	Rendere il prodotto superfluo abbandonando la sua funzione o offrendo la stessa funzione con un prodotto radicalmente diverso

	R1 Ripensare	Fare uso intensivo di un prodotto (es: condivisione)
Estendere la vita del prodotto e delle sue parti	R2 Ridurre	Aumentare l'efficienza nella produzione o uso dei prodotti riducendo l'uso di risorse naturali o materiali
	R3 Riuso	Riuso di un prodotto scartato ancora in buone condizioni e che svolge la sua funzione originale parte di un nuovo consumatore
	R4 Riparare	Riparazione e manutenzione di un prodotto malfunzionante così da poterlo utilizzare nella sua funzione originale
	R5 Rinnovare	Ripristinare un vecchio prodotto e aggiornarlo
	R6 Rifabbricare	Usare prodotti scartati o sue parti in un nuovo prodotto con stessa funzione
	R7 Riqualificare	Usare prodotti scartati o sue parti in un nuovo prodotto con una funzione diversa
Applicazione utile dei materiali	R8 Riciclo	Processare i materiali per ricavarne la stessa qualità o più bassa
	R9 Recupero	Recupero di energia tramite incenerimento dei materiali

1.4.1 ECONOMIA CIRCOLARE E LINEARE: CAMBIO DI PROSPETTIVA

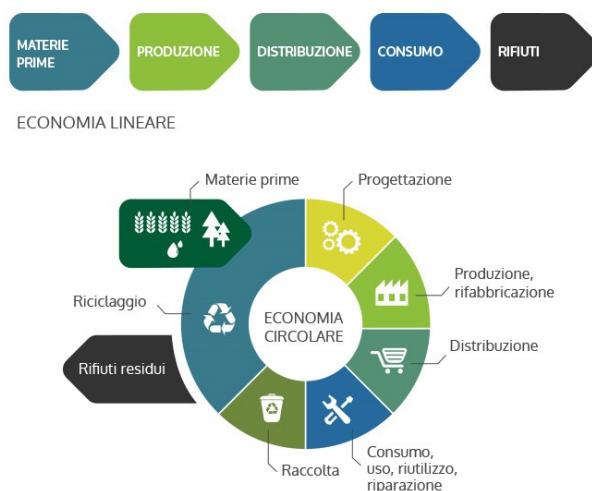


Fig. 1. 7 Modelli produttivi

La transizione dall'attuale modello produttivo lineare al modello economico circolare è inevitabile. Le azioni intraprese al fine di limitare l'impatto delle attività umane sulle risorse naturali, sull'ambiente e sul clima possono solo ritardare leggermente ciò che ora sembra inevitabile: l'esaurimento delle risorse naturali e i cambiamenti climatici.

Il passaggio tra i due modelli dipenderà molto dalla velocità con cui aziende e consumatori riusciranno ad adattarsi a quello che si presenta come un cambiamento epocale di mentalità. Infatti come vedremo i due sistemi si fondano su comportamenti e abitudini opposte. Vediamone alcuni aspetti:

1. **Valore aggiunto:** Il primo aspetto che andremo ad analizzare è il valore aggiunto. Nel modello economico lineare la creazione del valore del prodotto è data dalla differenza tra prezzo di mercato e costo di produzione. Per tale motivo il maggior profitto dell'azienda è dato dalla riduzione dei costi e dal numero delle vendite. Ricordiamo che la riduzione dei costi ha effetti anche sul livello di occupazione e sulle retribuzioni. Nel modello circolare il valore aggiunto non è dato solo dalla vendita ma anche dai servizi associati al prodotto. Infatti tra gli asset dell'impresa vi sono, oltre ai prodotti, la durata degli stessi, il riuso, la riparabilità e la riciclabilità che sono guidate dalla responsabilità estesa del produttore.
2. **Innovazione:** Altro aspetto importante è l'innovazione. Nel sistema lineare l'innovazione tecnologica è spinta dalla necessità di indurre il consumatore all'acquisto di nuovi beni favorendo la precoce obsolescenza degli stessi, mentre nel sistema circolare l'innovazione punta sulla ricerca di nuovi materiali ecocompatibili.
3. **Vita e fine vita:** Nell'economia lineare il modello di business basato sulla vendita fa sì che le aziende tendano a produrre beni ad obsolescenza programmata. I prodotti a lunga durata e le riparazioni vengono evitate a favore di prodotti di breve durata che sono più a buon mercato. Le aziende si disinteressano della durata anche perché non hanno alcun obbligo nello smaltimento. Nel modello circolare, come detto, i prodotti fanno parte di un business integrato, incentrato sulla fornitura di un servizio di riparazione e manutenzione e sulla responsabilità estesa del produttore che ha quindi l'interesse a fornire prodotti di qualità con lunga vita.
4. **Riconoscibilità del prodotto:** Nell'attuale sistema economico il consumatore cerca prodotti che siano al passo con la moda e il commercio elettronico ha favorito questa

tendenza facilitando la ricerca dei beni a basso costo su tutti i mercati internazionali. Il consumatore è quindi indotto all'acquisto della versione più recente di un dato prodotto e il suo possesso, più che il servizio offerto, è il termine più comune che lega il bene al suo utilizzo. Al contrario nell'economia circolare i consumatori possono aver accesso ai servizi offerti dal prodotto senza esserne necessariamente possessori. Questo capovolge la prospettiva in quanto il prodotto viene identificato grazie alla sua accessibilità e alla soddisfazione che deriva dal suo utilizzo. Il cliente userà anche la prossimità come criterio di scelta, in quanto gli sarà necessaria l'accessibilità al fornitore del servizio. Inoltre il contratto di utilizzo del servizio è un incentivo alla cura del prodotto che dopo l'uso va restituito al fornitore. Nell'economia circolare il consumatore riveste dunque un ruolo importante e carico di responsabilità, in quanto le sue scelte orientano l'agire dei produttori di beni e servizi. Un cliente consapevole dell'impatto dei suoi consumi sull'ambiente si rivolgerà infatti più volentieri ad aziende che usano criteri di produzione ecosostenibili piuttosto che a produttori meno sensibili dal punto di vista ambientale.

L'adozione del modello economico circolare, prevedendo una forte spinta all'innovazione tecnologica e all'utilizzo di materiali, prodotti e processi ecocompatibili, rappresenta un'occasione unica sotto molti punti di vista. Un ruolo fondamentale in questo campo è giocato dalla digitalizzazione, in particolare nell'ambito della gestione dei processi.

Il primo beneficio legato ad un approccio circolare è di tipo ambientale, in quanto la migrazione verso le fonti pulite di energia con riduzione delle emissioni di gas serra, il minor consumo di materie prime e l'obiettivo del rifiuto zero forniscono un apporto importante alla lotta contro l'inquinamento terrestre, marino e atmosferico e aiutano a contenere il surriscaldamento globale. Dal lato dell'estrazione e della prima lavorazione delle risorse a scala globale le maggiori emissioni di gas serra sono infatti connesse all'estrazione e all'uso dei combustibili fossili (38,4 GtCO₂eq), alle attività di deforestazione, alla liberazione del carbonio stoccato nei suoli e alle emissioni prodotte dagli allevamenti (16 GtCO₂eq); 1,9 GtCO₂eq sono associate alla produzione e gestione dei rifiuti, in particolare dovute alle emissioni di gas dalle discariche in attività per decenni e con un elevato potenziale di effetto serra; 1,6 Gt e 1,2 GtCO₂eq sono dovute rispettivamente all'estrazione e alle prime lavorazioni dei minerali e dei metalli. L'UNEP (United Nation Environmental Programme), tramite l'IRP (International Resource Panel), per esempio, rileva che la produzione di acciaio con il riciclo del rottame di ferro consente fino al 38% di riduzione delle emissioni di gas serra rispetto alla produzione di acciaio primario ottenuto con minerale di ferro e carbone. L'ENEA ha stimato che il riciclo dell'alluminio consente di ridurre le emissioni di gas serra fino all'80%

rispetto alla produzione di alluminio con l'uso di materie prime vergini. Anche il riciclo della plastica consente una riduzione delle emissioni di gas serra fino al 90% in meno rispetto alla produzione con i derivati dal petrolio.

Altro vantaggio molto importante è l'incremento di competitività dovuto all'uso di materie prime secondarie che permettono di creare una struttura di costi con meno rischio di volatilità dei prezzi legati alle dinamiche economiche, sociali e politiche dei paesi estrattori.

Anche l'occupazione risentirà positivamente del cambiamento, poiché l'aumento di servizi che aggiungono valore al prodotto e l'utilizzo di materiali riciclati dovrebbero permettere un più cospicuo investimento aziendale sul capitale umano piuttosto che sull'approvvigionamento di materie prime. Il passaggio dall'attuale modello di economia lineare a quello circolare richiede un ripensamento delle strategie e dei modelli di mercato per salvaguardare la competitività dei settori industriali e il patrimonio delle risorse naturali. Il cambiamento deve passare anche attraverso una revisione normativa che ne semplifichi l'attuazione e ne migliori la coerenza, che renda strutturale la collaborazione tra tutti gli attori dell'economia circolare - Pubbliche Amministrazioni, imprese, istituti di ricerca scientifica e tecnologica – andando a favorire l'innovazione e il trasferimento di tecnologie e la competitività dei settori industriali.

1.5 IL RUOLO DELL'INDUSTRIA 4.0 NELL'ECONOMIA CIRCOLARE

La quarta rivoluzione industriale, cosiddetta "Industria 4.0", grazie alla diffusione delle tecnologie digitali sta trasformando profondamente il comparto industriale. Grazie all'accresciuta capacità di interconnettere e far cooperare le risorse produttive (asset fisici, persone e informazioni, sia all'interno della fabbrica sia lungo la catena del valore), le tecnologie digitali non solo possono aumentare competitività ed efficienza, ma fanno da leva all'introduzione di nuovi modelli di business, fino a superare la tradizionale distinzione tra prodotto, processo produttivo e servizio.

La digitalizzazione sarà un fattore imprescindibile per la transizione verso il modello di economia circolare. La connessione dei prodotti e delle fabbriche, della catena del valore e degli utenti consentirà di progettare il ciclo di fabbricazione del prodotto assieme a quello del suo utilizzo e del suo riutilizzo in una logica di sostenibilità ambientale ed economica. A livello aziendale, sarà possibile ottimizzare il consumo di risorse, ridurre gli sprechi energetici e gli scarti generati nel processo di produzione, la gestione del magazzino sarà resa più efficiente collegando richieste provenienti dalla produzione e approvvigionamento. L'impatto si estende oltre la dimensione aziendale. Riguarderà l'intero sistema produttivo, andando ad abilitare la progettazione e la gestione

di filiere integrate di produzione e de-produzione, rendendo possibile anche la simbiosi industriale[10][11].

1.6 UE ED ECONOMIA CIRCOLARE

Puntare a essere il primo continente a impatto climatico zero: è l'obiettivo principale **dell'European Green Deal**, ovvero il progetto normativo varato nel 2019 dalla Commissione Europea per dare risposta all'emergenza dei problemi climatici, che mira a fare dell'Europa il primo continente carbon neutral entro il 2050 attraverso una rivoluzione industriale capace di garantire produzioni sostenibili. Una transizione ecologica socialmente giusta che secondo Ursula von der Layen, presidente della Commissione UE, consentirà di ridurre le emissioni e creare posti di lavoro, richiedendo però un notevole cambio di mentalità. La transizione green è anche la priorità strategica del **Piano Next Generation EU**, attraverso il quale l'Unione Europea intende fronteggiare l'emergenza causata dalla pandemia da COVID-19. In questo ambito l'UE a marzo 2020 ha presentato sia il **nuovo Piano di azione per l'economia circolare** che la nuova **Strategia industriale europea**, ovvero due strumenti utili a guidare la trasformazione industriale verso un'economia green, puntando alla competitività e allo sviluppo delle infrastrutture digitali. Prioritario è inoltre il passaggio da un'economia lineare a un'economia circolare, fondamentale per il raggiungimento dell'obiettivo **emissioni nette zero di gas serra**. Il piano Next generation UE è supportato da un notevole impegno finanziario di **750 miliardi di euro** che vanno ad aggiungersi ai 1100 miliardi di euro già previsti dal Quadro finanziario pluriennale 2021-2027, si prevedono inoltre l'**emissione di obbligazioni** ("green bond") e altre misure di finanziamento, fra cui la **plastic tax**, applicata dal 1 gennaio 2021 ai rifiuti di imballaggio non riciclati, una **border carbon tax** e una revisione del sistema di scambio delle quote di emissione, l'introduzione di una **web tax** che assicuri maggiore equità fiscale globale. Agli Stati membri che intendono usufruire dei finanziamenti è stato richiesto di definire e presentare i Piani nazionali di ripresa e resilienza entro il 30 aprile 2021: piani che secondo le richieste del Parlamento europeo dovrebbero puntare a incrementare l'economia circolare e a raddoppiare la percentuale di utilizzo dei materiali circolari nel prossimo decennio, visto che attualmente soltanto il 12% dei materiali utilizzati dall'industria UE proviene dal riciclaggio.

Con la risoluzione approvata il 10 febbraio 2021 il Parlamento europeo sottolinea l'importanza di migliorare l'accesso ai fondi per i progetti di ricerca e innovazione sull'economia circolare e ha richiesto norme più severe sul riciclo con obiettivi vincolanti per l'uso e il consumo di materiali da raggiungere entro il 2030.

Per realizzare un mercato europeo di prodotti sostenibili, neutrali per il clima ed efficienti dal punto di vista delle risorse, la Direttiva per la progettazione ecocompatibile viene estesa anche ai prodotti non connessi all'energia. Inoltre l'Europarlamento ha approvato anche delle iniziative per combattere l'obsolescenza programmata, migliorare la durata e la riparabilità dei prodotti e rendere più forti i diritti dei consumatori con il "diritto alla riparazione". È stata sottolineata anche l'importanza del diritto dei consumatori di essere correttamente informati sull'impatto ambientale dei prodotti e i servizi acquistati. La circolarità e la sostenibilità devono essere integrate in tutte le fasi della catena del valore per raggiungere un'economia completamente circolare: dalla progettazione alla produzione, fino al consumatore.

Fra gli atti legislativi più importanti del Parlamento europeo c'è il **Regolamento UE sulla tassonomia**, entrato in vigore il 12 luglio 2020, ovvero il primo sistema al mondo di classificazione delle attività economiche sostenibili, che consentirà di valutare la sostenibilità ambientale degli investimenti in progetti e attività economiche e quindi di orientare gli investimenti verso tecnologie e imprese più sostenibili e circolari. Il Regolamento prevede di classificare come ambientalmente sostenibile un'attività economica se questa contribuisce al raggiungimento di almeno uno dei seguenti obiettivi:

1. mitigazione dei cambiamenti climatici;
2. adattamento ai cambiamenti climatici
3. uso sostenibile e protezione delle risorse idriche e marine
4. transizione verso un'economia circolare, inclusa la prevenzione dei rifiuti e l'aumento dell'utilizzo di materie prime secondarie
5. prevenzione e riduzione dell'inquinamento
6. protezione e ripristino della biodiversità e degli ecosistemi[12]

2 RICICLO CAVI: ANALISI DELLO STATO DELL'ARTE

2.1 TECNOLOGIE DI SMALTIMENTO CAVI

In questo capitolo sarà effettuata una panoramica delle tecniche utilizzate per il recupero di materiali plastici e metallici derivanti dal riciclo dei cavi (elettrici, ASR, cavi sottomarini), anche se principalmente ci occuperemo dei cavi elettrici.

Le tecnologie che andremo ad analizzare sono[13]:

1. Tecnologia di frantumazione
2. Tecnologia di congelamento
3. Tecnologia del getto d'acqua ad alta pressione
4. Tecnologia di separazione ultrasonora
5. Tecnologia di recupero chimico
6. Tecnologie Termiche

2.2 TECNOLOGIA DI FRANTUMAZIONE

Il processo di riciclo prevede essenzialmente due fasi che possiamo sintetizzare nel seguente modo:

1. Riduzione dimensionale
2. Separazione e vagliatura materiali

All'interno dell'attività di smaltimento le fasi sopraelencate possono avvenire più volte e con differente sequenza in funzione del processo tecnologico adottato. Il fine è quello di separare i materiali costituenti i cavi (Cu, Al, materiali ferrosi, materie plastiche) e renderli quanto più possibili puri. Per Cu e Al si superano percentuali di purezza del 99,5% mentre la percentuale di contaminazione della frazione plastica da metallo è dello 0,2%[13]. Ciò li rende immediatamente disponibili, come materia prima, per l'industria manifatturiera in sostituzione dei materiali derivanti da attività estrattiva e da raffinazione di petrolio. In figura 2.1 è rappresentato un esempio di linea di frantumazione con due stadi di riduzione la quale presenta alcuni dei dispositivi che andrò a descrivere più avanti.

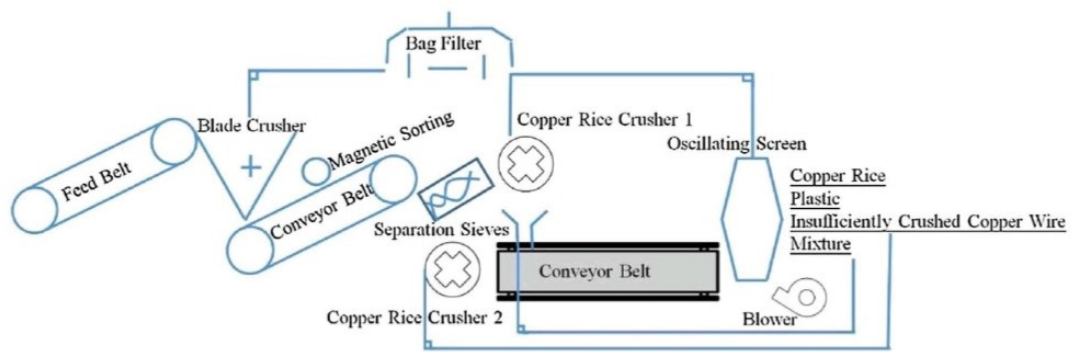


Fig 2.1 Esempio di linea di frantumazione

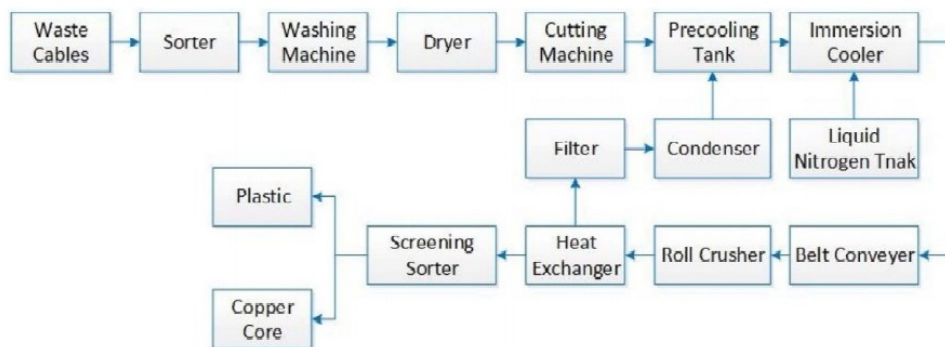


Fig. 2.2 Flusso della linea di frantumazione

2.2.1 RIDUZIONE DIMENSIONALE

La riduzione dimensionale può essere divisa in due stadi principali:

1. Triturazione o macinazione primaria
2. Granulazione e raffinazione

2.2.1.1 TRITURAZIONE O MACINAZIONE PRIMARIA

La fase di triturazione rappresenta il primo stadio del processo di smaltimento e recupero dei materiali che arrivano all'impianto di trattamento. Con essa si ha la prima riduzione dimensionale, presupposto per una più facile separazione dei componenti.

I primi strumenti che andremo ad analizzare sono i triturator o macinatori primari (Fig.2.3).



Fig.2.3 Trituratore primario bialbero Stokkermill

Questi sono costituiti da un sistema di carico a tramoggia che fa confluire il materiale nella camera di taglio dove si ha la prima macinazione. La camera può essere dotata di uno spintore idraulico per forzare il materiale ad entrare. E' provvista di uno o più rotori (fino a 4) dotati di superfici taglienti o masse laceranti. La configurazione usata dipende dal grado macinazione che si vuole ottenere. Si possono avere camere di taglio con:

1. Lame imbullonate al rotore e controlame fisse (semplice manutenzione e sostituzione Fig.2.4a)
2. Lame calettate al rotore (maggiore robustezza Fig.2.4b)
3. Martelli laceranti (molto robusti e usati anche per medi quantitativi di cavi ASR[1]). Fig.2.5



a)



b)

Fig.2.4 Lame imbullonate Bano recycling(a). Rotore con ruote calettate Eldan recycling(b)



Fig.2.5 Mulino a martelli Stokkermill

Nel caso di trituratori multialbero (fig.2.4b) gli alberi adiacenti sono in contro rotazione. Le camere di taglio sono provviste di una apertura idraulica per una rapida manutenzione e/o sostituzione dei taglienti. Sono alimentati da una unità di potenza costituita da un motore elettrico collegato mediante trasmissione idraulica o meccanica.

Hanno una bassa velocità di rotazione e elevata coppia e ciò consente di lavorare materiali molto resistenti (in molti casi anche cavi armati). Sono dotati di sistema automatico per il controllo dei sovraccarichi che riduce la pressione dello spintore e rallenta la velocità di rotazione sino ad invertire il senso del moto, se necessario. All'uscita della camera di taglio viene fatto il primo controllo dimensionale del prodotto in uscita mediante:

1. Regolazione del gioco tra lame e controlame.
2. Vaglio (griglie forate)

L'utilizzo del primo o del secondo sistema dipende molto dalla tipologia e dal quantitativo di cavi da trattare e dal prodotto che si desidera. Infatti in alcuni casi c'è bisogno di una fase di pretritatura. Questa viene effettuata con macchine di elevata potenza che spezzettano i cavi in frammenti non gestibili mediante vaglio (Fig4).



Fig.2.5 Pretrituratore Super Chopper Eldan Recycling

2.2.1.2 RIDUZIONE, GRANULAZIONE E RAFFINAZIONE

Il processo di riduzione dimensionale prosegue mediante

1. Mulini granulatori
2. Turbine raffinatrici

Queste macchine vengono alimentate dal prodotto in uscita dei triturator. Il materiale viene immesso nella camera di granulazione/raffinazione che riduce ulteriormente la pezzatura rendendola di forma granulare sino a raggiungere dimensioni di pochi millimetri.

Il controllo della dimensioni può essere fatto grazie ad un vaglio posto all'uscita della macchina. Queste tipologie di dispositivi per la riduzione dimensionale operano con un rotore ad alta velocità ma in modo differente.

I mulini granulatori, come i triturator a lame, sono costituiti da una camera di riduzione con un rotore su cui sono imbullonate lamine taglienti con tutto quello che ne consegue per quanto riguarda le necessità di manutenzione mediante rifilatura e sostituzione. Esistono mulini con asse di rotazione sia orizzontale che verticale.

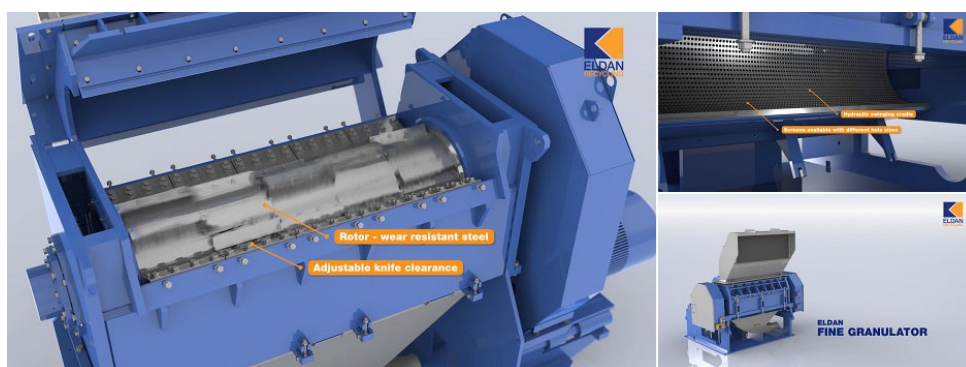
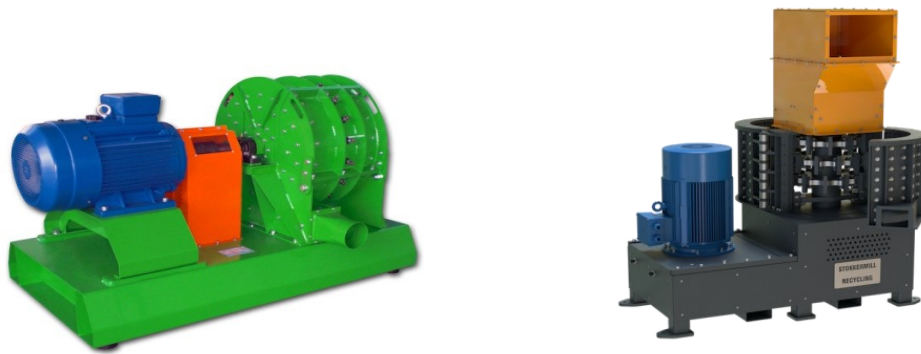


Fig.2.5 Granulatore fine Eldan Recycling, vista camera taglio e vaglio

Le turbine di raffinazione, invece, effettuano la riduzione dimensionale del materiale mediante urto e frizione all'interno di una camera corazzata dotata di palette in acciaio alto-resistenziale. Gli urti sono generati da vortici e variazioni di pressione[14]. Le turbine possono presentare da 2 a 5 stadi in base al livello di riduzione dimensionale e separazione che si vuole ottenere. Sono disponibili con rotore ad asse verticale e orizzontale. La camera di taglio è dotata di apertura per rapida manutenzione e sostituzioni di corazza e palette. Queste rendono disponibile il materiale per il trasferimento agli stadi successivi della lavorazione mediante sistema pneumatico.



a)

b)

Fig.2.6 Turbina orizzontale Guidetti (a) Turbina verticale Stokkermill(b)

Rispetto ai mulini granulatori a lame le turbine hanno i seguenti vantaggi:

1. Mancanza di parti taglienti da sostituire (le più soggette ad usura)
2. Possono lavorare anche in presenza di residui ferrosi ed acciai

Questo ulteriore processo produce grani di materiale di pochi millimetri e lo predispone per il trattamento con tavole densimetriche[15].

2.2.2 SEPARAZIONE e VAGLIATURA

In contemporanea al processo di riduzione della pezzatura viene effettuata la selezione del materiale in base alle dimensioni raggiunte e ai diversi componenti che si possono trovare nel riciclo dei cavi (metalli ferrosi e non e sostanze organiche)

Alla fine di tale processo di separazione si ottengono i costituenti dei cavi quasi puri con percentuali oltre il 99,5%

I metodi usati per la selezione e separazione si basano sulle seguenti proprietà fisiche:

1. Dimensionali
2. Gravimetriche
3. Magnetiche
4. Elettriche

2.2.2.1 SEPARAZIONE DIMENSIONALE: VAGLIATURA

La selezione dimensionale del materiale viene fatta mediante vagli che, come detto, non sono altro che griglie forate montate in uscita della camera di taglio di trituratori, granulatori e

raffinatori. Solitamente sono removibili e sostituibili con altri aventi fori delle dimensioni desiderate.

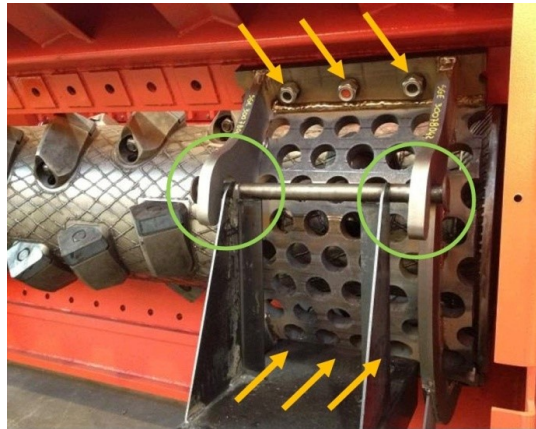


Fig.2.7 Vaglio trituratore

Altra tipologia di vaglio è il vibrovaglio. Si caratterizza per la semplicità costruttiva. Sono vagli dotati di moto vibratorio con velocità regolabile mediante un inverter per adattarla al materiale da setacciare. In genere hanno da due a quattro stadi di separazione per dividere materiale con diversa granulometria. E' possibile una rapida sostituzione delle griglie in funzione del prodotto desiderato. Necessitano di interventi di manutenzione e pulizia estremamente ridotti[15]. Vengono messi nei passaggi finali del processo di riciclo poiché sono progettati per lavorare materiale con granulometria fine.



Fig.2.8 Vibrovaglio Stokkermill

2.2.2.2 SEPARAZIONE GRAVIMETRICA

I sistemi di separazione dei materiali che prevedono la loro selezione in base al peso specifico sono basati sui seguenti componenti:

1. Cicloni decantatori
2. Sistemi Zig-Zag
3. Tavole di separazione ad aria
4. Tavole di separazione ad acqua
5. Sistema aspirazione

2.2.2.2.1 CICLONE DECANTATORE

Nelle fasi successive la macinazione primaria, spesso il materiale viene trasportato mediante un sistema di trasferimento pneumatico che facilita le successive operazioni di separazione dei materiali ad iniziare dal filtraggio delle polveri.

L'operazione di separazione delle polveri dal resto del flusso di materiale viene effettuata mediante ciclone decantatore (Fig.2.9). Il flusso d'aria entra tangenzialmente alla sommità del ciclone e assume un movimento ciclonico decrescente. Per effetto della forza centrifuga le particelle più pesanti vengono spinte verso le pareti e separate dal resto del flusso.



Fig.2.9 Ciclone decantatore

La parte più leggera e polverosa, torna verso l'alto e viene indirizzata verso il filtro dell'impianto. Il materiale pesante cade per gravità e fuoriesce dalla parte inferiore del ciclone.

2.2.2.2.2 SEPARATORE AEREAULICO ZIG-ZAG

Successivamente ai cicloni decantatori si possono trovare i separatori con condotto del tipo a “Zig-Zag” (Fig.2.10) costituiti da un condotto a zig-zag collegato al decantatore mediante valvola stellare (Fig.2.11). Il funzionamento si basa su un flusso d’aria che attraversa il condotto dal basso verso l’alto.



Fig.2.10 Condotto Zig-Zag Bano Recycling

Le particelle più pesanti, in genere metalli ferrosi e non, seguono il percorso zig-zag e cadono in basso mentre la parte più leggera segue il flusso d’aria principale diretto verso l’alto e viene aspirata attraverso il condotto pneumatico che la conduce verso un secondo ciclone decantatore.



Fig.2.11 Valvola stellare: vista rotore

2.2.2.2.3 TAVOLE DENSIMETRICHE

Altro sistema di separazione dei materiali plastici da rame e alluminio è dato dai separatori a tavole densimetriche (Fig.2.12). Questo dispositivo separa materiali di uguale granulometria ma diverso peso specifico. Sono costituite da una tavola inclinata vibrante all’interno della quale viene fatto passare un flusso d’aria. Sono dotate di sistemi di regolazione della frequenza di vibrazione, dell’inclinazione della tavola e della pressione del flusso d’aria

garantendo elevati indici di purezza dei materiali separati. La combinazione di queste tre variabili consente la separazione della frazione metallica, di quella organica e di quella mista ancora da separare. Possono essere collegate col sistema di trasporto pneumatico, ciclone, valvola stellare di dosaggio e filtro di aspirazione delle polveri di processo[15].



Fig.2.12 Tavola di separazione Stokkermill con valvola stellare

2.2.2.2.4 TAVOLE DI SEPARAZIONE AD ACQUA

Tutti i processi descritti di separazione in precedenza sono a secco. Ci sono anche tavole di separazione ad acqua. Il sistema di separazione dell'acqua è una soluzione per recuperare polvere metallica e fili fini dalla frazione plastica dopo la separazione del metallo. Utilizzando una combinazione ben bilanciata di acqua, inclinazione della tavola e movimenti oscillanti è possibile ottenere una frazione di plastica quasi pulita con perdite metalliche fino a uno 0,2%. La frazione metallica avrà una purezza del 98-99% (in peso) dopo che questa è stata asciugata. L'acqua viene pulita attraverso sedimentazione e ricircolazione in un sistema chiuso.[16]



Fig. 2.13 Tavola di separazione ad acqua Eldan Recycling

2.2.2.2.5 SISTEMA ASPIRAZIONE

Al sistema di trasmissione pneumatico del materiale da riciclare è abbinato un sistema di filtraggio che consente di raccogliere e separare le polveri che si generano nelle varie fasi del processo.[2]



Fig.2.14 Filtri PJ autopulenti a maniche modulari a pannelli

2.2.2.3 SEPARATORI MAGNETICI

I separatori magnetici consentono la separazione del materiale ferroso (ferro e acciaio inox) dal resto del materiale da riciclare. Il campo magnetico usato per tale processo può essere prodotto mediante:

1. Magneti permanenti
2. Elettromagneti

I magneti permanenti principalmente usati sono il NEODIMIO (metallo che fa parte delle terre rare) e la FERRITE. I magneti in ferrite sono i più utilizzati in questi sistemi perché generano un campo magnetico considerevole e non hanno problemi legati alle temperature (max. 250°C). Il Neodimio è più potente dal punto di vista magnetico; per questa ragione è più adatto per il rilevamento di particelle ferrose molto piccole. Uno dei principali vantaggi dei separatori a magneti permanenti è la totale assenza di costi di manutenzione del magnete e l'assenza di consumi elettrici per creare il campo magnetico[17]. Nei separatori

elettromagnetici il campo viene prodotto mediante corrente continua circolante su una bobina avvolta su un nucleo di materiale ferromagnetico.

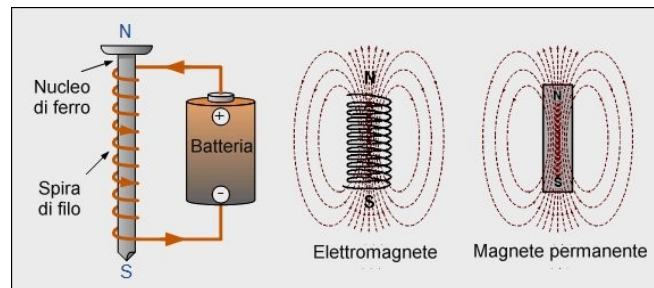


Fig.2.15 Schema elettromagnete

Il campo magnetico prodotto dall'elettromagnete è dato da:

$$\vec{B} = \frac{\mu \vec{I} n}{L}$$

Con B=campo magnetico I=Corrente elettrica n=Numero di spire L=lunghezza solenoide

In commercio esistono diverse configurazioni in funzione di dove è posizionato il magnete o l'elettromagnete:

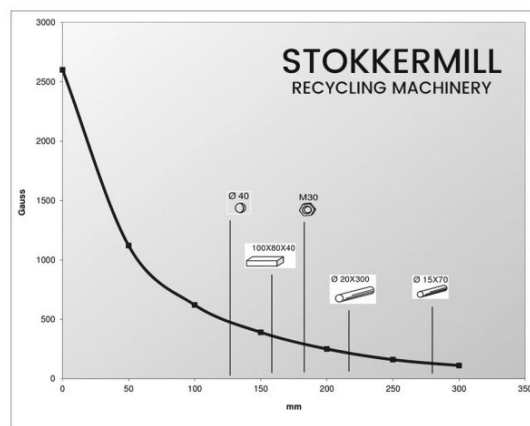
1. A nastro sospeso o overbelt
2. A magneti sospesi
3. A puleggia
4. A tamburo
5. Magnetici per Acciaio inox

2.2.2.3.1 SEPARATORI MAGNETICI A NASTRO O OVERBELT

I separatori a nastro sono molto diffusi e presenti in quasi tutti gli impianti di riciclo. Vengono installati sospesi sopra i nastri convogliatori e sono usati per la separazione di parti ferrose medio-grandi dal flusso di materiale. Sono costituiti da un piccolo nastro trasportatore con un magnete posizionato tra le pulegge che recupera la parte ferrosa e la scarica su cassone di raccolta, per questo hanno la caratteristica di essere autopulenti. In funzione dell'ambiente di lavoro e del tipo di applicazione sono realizzati con magneti permanenti od elettromagneti. Nelle Fig.2.16 di seguito possiamo vedere un nastro overbelt dell'azienda Stokkermill e un grafico che mostra l'intensità del campo magnetico necessaria per catturare i metalli ferrosi in funzione della distanza dal nastro.



a)



b)

Fig.2.16 Separatore Overbelt(a) Campo magnetico(Gauss)-distanza nastro(mm)(b)

Dalla Fig.2.17 sotto si possono vedere le due possibili configurazioni dell'overbelt rispetto al nastro convogliatore del materiale. Nella figura di sinistra il nastro è disposto trasversalmente con scarico laterale del materiale ferroso mentre nella figura di destra è posto longitudinalmente.

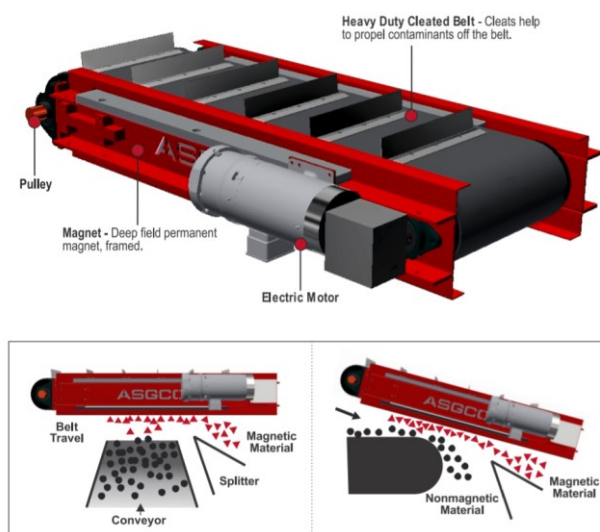


Fig.2.17 Schema Overbelt - convogliatore trasversale(sx) e longitudinale(dx)

2.2.2.3.2 SEPARATORI A MAGNETI SOSPESI

Le piastre magnetiche a sospensione trovano applicazione in quei casi in cui il volume di contaminazione da metalli è ridotto ed è richiesta una pulizia solo occasionale. Il magnete viene installato sopra il nastro di trasporto con l'ausilio di tiranti regolabili, così da ottenere l'inclinazione della superficie magnetica più adatta per l'estrazione dei materiali ferrosi.

La pulizia dei magneti è manuale. Viene fatta togliendo l'alimentazione all'elettromagnete o, nel caso dei sistemi permanenti, mediante una piastra di scorrimento che allontana i materiali estratti dal campo magnetico.



Fig.2.18 Separatore a magnete sospeso Bunting

2.2.2.3.3 SEPARATORI MAGNETICI A PULEGGE

Le pulegge magnetiche (Fig.2.19) vengono installate al posto del tamburo di testa dei nastri trasportatori e sono particolarmente adatte alla rimozione di contaminazioni ferrose di medio-piccole dimensioni. Il sistema magnetico a 360° trattiene il ferro scaricandolo dietro la linea centrale della puleggia, mentre il prodotto pulito segue la sua traiettoria naturale. Questi sistemi a magneti permanenti semplificano la separazione di materiale ferroso permettendo il recupero automatico senza fermi di produzione [17][18].

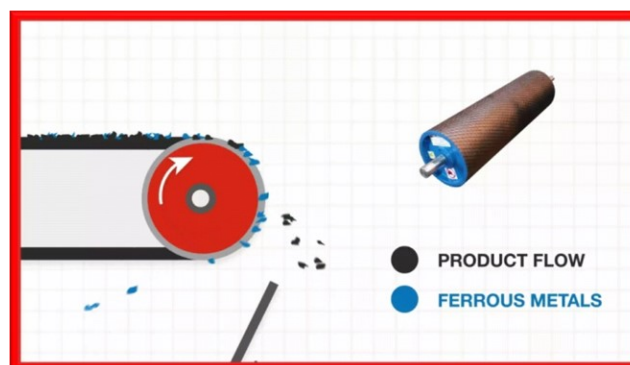


Fig.2.19 Separatore magnetico a puleggia

2.2.2.3.4 SEPARATORI MAGNETICI A TAMBURO

I tamburi magnetici sono utilizzati in applicazioni in cui è richiesta un'alta produttività e l'estrazione di materiali ferrosi molto piccoli. Sono realizzati con un campo magnetico fisso a

180° attorno al quale ruota un tamburo in materiale amagnetico. Il campo può essere generato da un magnete permanente in neodimio o ferrite o da un elettromagnete. Nel caso di applicazioni gravose ad alte e basse temperature si possono realizzare magneti in leghe speciali[19]. Possono essere installati secondo due diverse configurazioni. Come visibile dalla Fig.2.20 nella configurazione overfeed il materiale ferroso viene trattenuto e cade prima della linea di caduta. Nella configurazione underfeed invece il materiale ferroso segue il moto del tamburo e cade oltre la naturale linea di caduta dei materiali non magnetici che sono separati per gravità. Per la separazione di materiali molto mescolati e disomogenei si producono tamburi a poli magnetici alternati. Questa configurazione magnetica consente un risultato migliore e l'ottenimento di prodotti più puliti. [17] I tamburi possono essere inseriti in un alloggiamento completamente chiuso per i prodotti che devono essere tenuti lontani da potenziali contaminazioni.

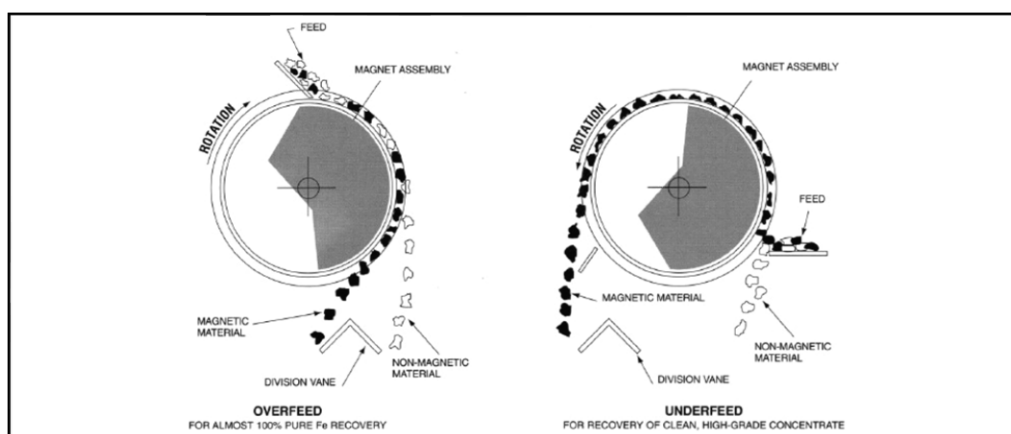


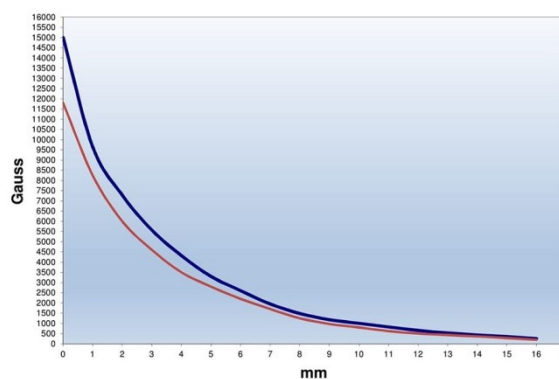
Fig.2.20 Deferrizzatori a tamburo: configurazioni overfeed(sx) e underfeed(dx)

2.2.2.3.5 SEPARATORI MAGNETICI PER ACCIAIO INOX

Ci sono inoltre specifici separatori magnetici per acciaio inox. Questi vengono installati, in genere, dopo i separatori magnetici tradizionali e dopo i separatori elettrostatici. Hanno un campo magnetico molto più elevato rispetto ai normali separatori alle terre rare in quanto l'acciaio ha bassa suscettibilità magnetica. I separatori per acciaio inossidabile sono utilizzati per la separazione automatica di materiali magnetici e paramagnetici all'interno di prodotti fini e granulari. La particolare configurazione della puleggia magnetica, integrata nella macchina, consente d'ottenere un'elevata intensità di campo magnetico, (11000 ÷ 15000 Gauss), scelto in funzione della granulometria del materiale da trattare[17].



a)



b)

Fig2.21 Separatore magnetico Stokkermill(a) Grafico campo magnetico(Gauss)-distanza(mm)

2.2.2.4 SEPARATORI ELETTRICI

Tra i separatori che sfruttano le proprietà elettriche dei materiali ci sono:

1. Separatori a correnti indotte
2. Separatori elettrostatici

2.2.2.4.1 SEPARATORI A CORRENTI INDOTTE

I separatori a correnti indotte (Fig.2.22) basano il loro funzionamento sulla differente conducibilità elettrica (σ) dei materiali. Sappiamo che un campo magnetico variabile genera correnti indotte sui materiali conduttori che vengono in contatto con esso. Tali correnti sono tanto maggiori quanto maggiore è la conducibilità elettrica del materiale. Queste correnti indotte producono nel materiale un campo magnetico che si oppone a quello che le ha generate. Tale repulsione è tanto maggiore quanto maggiori sono queste correnti. Il separatore a correnti indotte è quindi costituito da un nastro trasportatore dotato di un tamburo di testa all'interno del quale vi è un rotore magnetico ad alta velocità che genera delle correnti nei metalli al loro passaggio. Le correnti indotte generano un campo magnetico opposto a quello del rotore provocando la spinta dei metalli oltre una piastra di separazione. La plastica invece viene scaricata per gravità alla fine del nastro. Tale separatore permette inoltre di eliminare eventuali residui ferrosi in quanto questi rimangono attratti dal campo magnetico e cadono in un contenitore sotto il nastro.

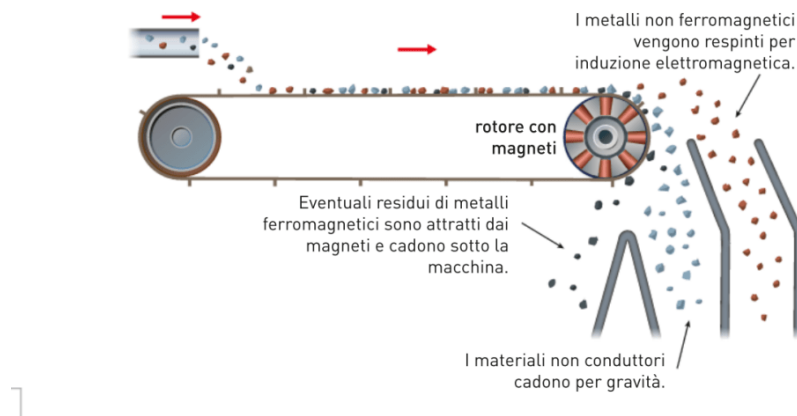


Fig2.22 Separatore a correnti indotte

2.2.2.4.2 SEPARATORI ELETTROSTATICI

I separatori elettrostatici sfruttano la differente conduttività elettrica tra isolanti (plastica) e conduttori (rame e alluminio) per ottenere la loro separazione mediante un rullo carico elettricamente e collegato a terra. La capacità di produrre la separazione dipende da una serie di caratteristiche chiave del materiale tra cui:

- Conduttività
- Umidità (è importante che il materiale sia asciutto)
- Intervallo di dimensioni delle particelle

Il materiale viene fatto passare su un rullo di acciaio inossidabile in rotazione (generalmente 20-50rpm)[17] collegato a terra e soggetto a una scarica ad alta tensione generata da un elettrodo a filo di tungsteno. La separazione avviene grazie al fatto che i materiali a bassa conduttività (come la plastica) rimangono attaccati al rullo mentre i metalli (alta conduttività) perdono immediatamente la carica e vengono lanciati dalla forza centrifuga cadendo nel contenitore di raccolta. La differenziazione può essere controllata regolando la posizione della piastra di separazione posta sotto il rullo, regolando la velocità di rotazione o la posizione dell'elettrodo. Il voltaggio può essere variato tra 0-40 KeV. La maggior parte delle applicazioni lavorano nel campo 20-30 KeV. In molte applicazioni, spesso a causa della granulometria molto fine, il separatore elettrostatico è l'unica tecnologia che consente la separazione dei materiali. Infatti i separatori elettrostatici vengono usati per separare materiali con granulometria minore di 2 mm fino a 106 micron al di sotto del normale campo di lavoro dei separatori a correnti indotte.

Possono essere utilizzati anche per separare particelle metalliche con diversa conducibilità come ad esempio rame e alluminio[17].



Fig2.23 Separatore elettrostatico Stokkermill

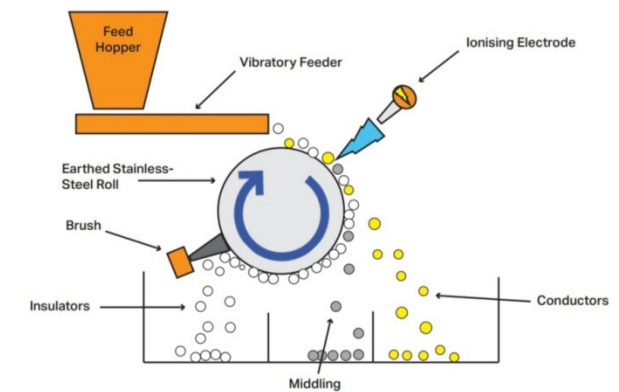


Fig.2.24 Schema separatore elettrostatico[17]

2.3 TECNOLOGIA DI CONGELAMENTO

Questa tecnica si basa sull'uso di refrigeranti per abbassare la resistenza alla frattura (FT) della guaina di materiale plastico che ricopre i cavi elettrici mentre il nucleo di rame mantiene la propria resistenza. Sono necessarie quindi minori forze di frantumazione da parte del trituratore. A questo seguono le tecniche di separazione magnetica, elettrica, gravimetrica e di vagliatura dimensionale già descritte in precedenza.

Il refrigerante più usato per tale processo è l'azoto liquido. La temperatura di ebollizione dell'azoto è -196°C per cui è facile ottenere temperature del materiale inferiori a -100°C . A tali temperature tutte le sostanze volatili, comprese quelle tossiche, congelano e rimangono intrappolate. Vediamo ora il processo nel dettaglio:

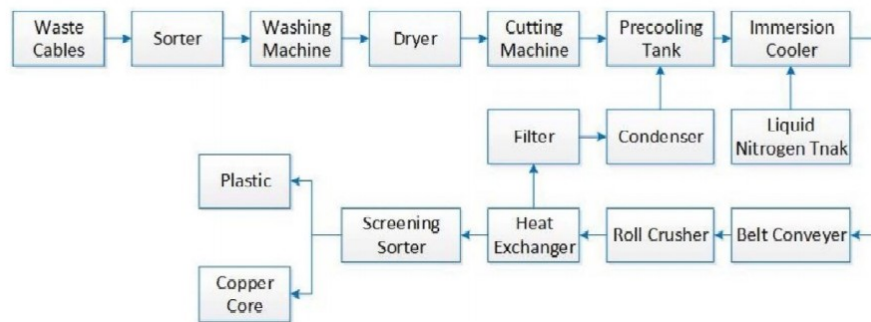


Fig2.25 Trattamento per congelamento: flusso processo

1. fase di pretrattamento con selezione dei cavi, lavaggio, asciugatura e riduzione dimensionale con pezzatura a 5-10 cm.
2. Inserimento in una vasca di preraffreddamento con successiva immersione in quella di raffreddamento per 10 minuti con un rapporto liquido solido di 2,5-3,5
3. Successivamente i cavi vengono frantumati con un martello a rulli liberando il rame dalla guaina di plastica
4. Il materiale frantumato viene inviato al sistema di separazione.
5. L'azoto in cui è immerso il materiale viene recuperato mediante uno scambiatore di calore sotto forma di gas, viene filtrato e ricondensato per essere riutilizzato nella vasca di preraffreddamento.

Tale procedura presenta i seguenti vantaggi:

- le forze di frantumazione sono molto più basse
- basso inquinamento da polveri
- nessun inquinamento da gas e liquidi di scarto
- I materiali non ossidano grazie alle basse temperature

L'aspetto negativo principale è dato dal costo elevato. Nonostante ciò, per quanto detto, è stato apprezzato nel riciclo dei rifiuti plastici e degli pneumatici[13].

2.4 TECNOLOGIA DEL GETTO D'ACQUA AD ALTA PRESSIONE

Questa tecnica si basa sul taglio col getto d'acqua. Il getto d'acqua lacera lo strato plastico grazie alla variazione di pressione generata sulla guaina del cavo in un tempo molto breve. L'effetto lacerante è quindi concentrato nell'impatto iniziale. E' una tecnica di taglio a freddo

che non genera deformazioni termiche e che non influisce sulla qualità del nucleo di rame. I getti lavorano con pressioni maggiori di 55MPa e con velocità di avanzamento che dipende dal tipo di cavo da trattare. Questa tecnica è ancora poco automatizzata, deve essere controllata in ogni istante dagli operatori. Inoltre per buona parte del tempo il getto non è diretto contro i cavi con conseguente spreco di acqua ed energia. Ci sono alcuni ricercatori cinesi dell'Anhui University of Technology che hanno migliorato il processo implementando un sistema di controllo del getto e aumentando il numero di posizioni possibili per gli ugelli.[13]

2.5 TECNOLOGIA DI SEPARAZIONE AD ULTRASUONI

Un'altra tecnica innovativa per la separazione del materiale metallico dalla plastica nei fili elettrici è basata sulla tecnologia ad ultrasuoni. La produzione di ultrasuoni ($f > 20\text{kHz}$) in un liquido genera il fenomeno della cavitazione ultrasonica. Questa consiste nella crescita e nel successivo collasso di cavità microscopiche in un liquido quando la pressione ultrasonora raggiunge determinati livelli. Il collasso di queste bolle fa vibrare i cavi e favorisce la separazione. Nel 2010 alcuni ricercatori hanno analizzato l'effetto combinato della temperatura dell'acqua, della lunghezza dei cavi e del rapporto liquido-solido sulla separazione ultrasonica di cavi monocore e multicore e hanno osservato che la situazione ottimale si ottiene con onde a 20kHz, acqua a 60°C con durata del trattamento di 5 minuti. Hanno anche notato che l'efficienza del processo è inversamente proporzionale alla lunghezza dei cavi.

Successivamente nel 2013 altri ricercatori cinesi hanno brevettato questa tecnologia. Il processo prevede i seguenti passaggi:

- Pretrattamento cavi mediante selezione, lavaggio e frantumazione
- Raffreddamento a -10°C per 6 ore in modo da modificare le proprietà fisiche della guaina di materiale plastico
- Immersione in acqua con rapporto solido/liquido tra 10/1 e 20/1. I cavi vengono trattati 2 volte con ultrasuoni ad una temperatura di 40°-50°C potenza 500W, intensità acustica di $0,3 \text{ W/cm}^2$ per un tempo tra 5s e 5 min.

La separazione metallo-plastica supera il 90%. Il trattamento ad ultrasuoni fa sì che la componente polverosa di rame sia bassa e quindi che ci siano poche perdite di materiale. Il

pregio di questa tecnica deriva dal fatto che non ci sono alterazioni fisico chimiche dei materiali trattati e che non presenta impatto ambientale[13].

2.6 SEPARAZIONE CHIMICA

Per la separazione dei componenti dei cavi elettrici è stata studiata la possibilità di una separazione chimica mediante immersione in una soluzione di lisciviazione. Questa tecnica è stata pensata per trattare rottami di cavi di diametro non uniforme. La lisciviazione è l'operazione, detta anche estrazione solido-liquido, consistente nella separazione di uno o più componenti da una massa solida mediante un solvente[13]. Mediante lisciviazione si ottengono soluzioni con ioni metallici. I componenti vengono ottenuti attraverso processi di spostamento, cristallizzazione, estrazione o elettrolisi. Tra i solventi tipici ci sono sale di ammonio, sistemi di cloruro, sistemi di acido citrico, sistemi di biolisciviazione.

Questa tecnica nel caso dei cavi richiede una gran quantità di solvente per produrre ioni di rame con forte rischio di inquinamento secondario[20].

Per i cavi in rame è stata studiata una soluzione di lisciviazione catalizzata da TiO_2 (biossido di titanio). La guaina di plastica si decompone velocemente rilasciando principalmente gas, polveri, vapore acqueo, CO_2 e piccole quantità di gas acido o tossico.

Il processo si svolge in un serbatoio di reazione nel quale viene continuamente immessa aria calda per mantenere la temperatura nel campo $400\text{-}580^\circ\text{C}$. In un'ora è possibile ottenere una quantità di $10\text{-}50\text{ kg}$ di rame mediante 100kg di TiO_2 .

E' stato studiato un metodo bioidrometallurgico per ottenere rame da rottami di cavi già trattati mediante separazione fisica. Sono stati fatti studi col batterio *Acithiobacillus ferrooxidans*[21] su plastica con un contenuto di rame del 4.9% . Alle condizioni ottimali di 35°C e con una concentrazione iniziale di 7.0 g/l Fe^{3+} è stato estratto il 90% del rame residuo. Comunque sino ad ora la separazione chimica si è dimostrata poco adattabile al processo di riciclo dei cavi perché c'è necessità di usare reagenti differenti in base al tipo di plastica e, a causa della elevata quantità di solventi, si può intaccare la qualità del rame e produrre notevole inquinamento secondario[13].

2.7 TECNOLOGIE TERMICHE

2.7.1 INCENERIMENTO

L'incenerimento è stato il primo metodo per il riciclo dei cavi elettrici. Tale tecnica prevede che la guaina di plastica venga bruciata mediante un inceneritore. Ciò provoca una forte ossidazione del rame che, per questo, non può essere direttamente riutilizzato ma deve essere trattato mediante fusione ed elettrolisi. Ciò aumenta notevolmente i tempi e i costi del riciclaggio. Nel processo vengono persi tra i 20-30 kg di rame per tonnellata trattata. Inoltre il processo è altamente inquinante in quanto le plastiche che ricoprono i cavi sono termoindurenti e ritardanti di fiamma (PVC e PE) e il loro incenerimento produce gas e polveri tossiche. Per tale motivo in molti paesi è stato vietato.

In sostituzione è stata implementata la nuova tecnica del bagno di fusione dove i cavi vengono immessi in una zona ad alta temperatura (850°C) in modo tale che la parte organica possa essere decomposta velocemente senza produrre diossina. Per lo stesso motivo, finito il trattamento di incenerimento il materiale viene raffreddato rapidamente. Nonostante questi accorgimenti i fumi di scarico devono essere comunque trattati per mezzo di impianti per l'abbattimento della diossina.[13]

2.7.2 DECOMPOSIZIONE TERMICA

Il processo di separazione per decomposizione termica è un sistema alternativo di riciclo dei cavi che sfrutta il calore. Tale sistema prevede l'inserimento del materiale in un contenitore sigillato in assenza di ossigeno e riscaldato a temperature tra 500-900°C. Ciò evita l'ossidazione del rame, consente di decomporre la guaina di plastica e di trasformarla in combustibile mediante distillazione, impedendo la formazione di diossine. La chiave del processo è il controllo della temperatura, infatti si deve fare attenzione ad evitare sottoriscaldamento e surriscaldamento per non pregiudicare l'efficienza del processo e permettere la produzione di gas tossici. Uno dei metodi di riscaldamento sperimentati è quello ad induzione. Questo processo produce elevata purezza del rame, alta efficienza, facile controllo della temperatura e risparmio di tempo rispetto al processo di incenerimento. Tuttavia l'elevato costo e il fatto che non si è mostrato adatto per cavi di piccolo diametro ne hanno limitato l'uso.

Altra tecnologia usata nel trattamento di decomposizione termica è l'HTSG (High temperature steam gasification). Con tale metodo si è ottenuto rame puro al 99,85%.

I pregi dei trattamenti di decomposizione termica sono la formazione di gas pilorico che è un combustibile, olio combustibile e nerofumo nel quale si fissano gran parte delle sostanze tossiche come lo zolfo(S). Questa tecnologia è ancora in fase di studio, non ancora disponibile su larga scala[13].

2.8 CONFRONTO TRA TECNOLOGIE

Nei paragrafi precedenti abbiamo descritto le differenti tecnologie per il recupero di metalli e materiali plastici dal riciclo di cavi. Nella tabella viene mostrato il riepilogo dei vantaggi e svantaggi delle varie tecniche.

	PRO	CONTRO
TECNICA DI FRANTUMAZIONE	• Adatta per tutte le varietà di cavo • Elevata purezza metallo 99,5% • 0,2% residuo rame in plastica • Modularità linea • Gradualità processo con facilità di controllo	• Produzione di calore per attrito
TECNICA DI CONGELAMENTO	• Bassa forza di frantumazione • Elevato recupero Cu • No produzione gas e liquidi • No ossidazione	• Costo elevato
TECNICA GETTO ACQUA ALTA PRESSIONE	• Taglio a freddo, no deformazioni termiche	• Costoso perché poco automatizzato
TECNICA SEPARAZIONE ULTRASONORA	• Non altera le proprietà fisico chimiche dei materiali	
TECNOLOGIA DI RECUPERO CHIMICO	• Bioidrometallurgia: eliminazione 90% del residuo di rame(4.9%) in guina plastica	• Inquinamento causa elevato uso di solventi • Solvente differente in funzione del tipo di plastica
TECNICA INCENERIMENTO		• Ossidazione rame con perdita elevata • Inquinamento con produzione gas tossici • Necessità di fusione e elettrolisi per essere riusato

TECNICA DECOMPOSIZIONE TERMICA	• Elevata purezza 99,85 % (con HTSG) • Produzione gas pilorico combustibile • Sostanze tossiche come lo zolfo intrappolate nel nerofumo • Niente ossidazione	• Costo elevato • Non adatto per cavi con guaina troppo sottile
--	---	--

Ad oggi la tecnologia di recupero di gran lunga più utilizzata è quella della frantumazione. Ciò si evince dall'elevato numero di aziende impegnate nella progettazione dei macchinari utilizzati per la triturazione e separazione con i metodi fisici descritti (magnetico, elettrico, dimensionale e gravimetrico). Inoltre tali aziende si occupano anche della progettazione e realizzazione di intere linee di lavorazione sulla base delle richieste del cliente. Questa stretta collaborazione sta permettendo ad entrambe le parti un continuo miglioramento dei macchinari, dei processi e del prodotto che ha raggiunto standard di qualità elevatissima. Altro aspetto positivo di tale tecnologia riguarda l'aspetto ambientale in quanto non vi è produzione di sostanze tossiche, rischio che è elevato nel caso di procedimento chimico o termico.

Tra le tecnologie che sfruttano il calore si sta studiando la possibilità di utilizzare la tecnica della decomposizione termica che, essendo un processo di tipo pilorico (ambiente privo di ossigeno) consente di ovviare sia alla produzione di sostanze nocive sia all'ossidazione del cuore di rame tipica dell'incenerimento. Inoltre tale processo promette livelli di purezza elevatissimi paragonabili con quelli della frantumazione (tecnica HTSG).

L'aspetto negativo della tecnologia di frantumazione è dato dalla produzione di calore per attrito dovuto alle elevate forze in gioco. Questo problema potrebbe essere risolto mediante una maggiore integrazione con la tecnologia di congelamento che, grazie alla bassa temperatura, rende fragile la guaina dei cavi e favorisce la separazione. Inoltre tale tecnologia riduce al minimo la produzione di polveri e risolve tutti i problemi legati alla produzione di calore come la generazione di sostanze tossiche e l'ossidazione del rame.

Una menzione va fatta per la tecnologia di bioidrometallurgia che, contrariamente alle altre tecniche di tipo chimico, non presenta i problemi ambientali legati ai solventi. Tale tecnica è stata infatti al centro del progetto europeo "Search for a Sustainable way of exploiting black ores using biotechnologies" del consorzio Bioshale che, nonostante abbia avuto ad oggetto l'estrazione di metalli da attività mineraria, ci fa capire le sue possibilità di sviluppo.

3 LAYOUT IMPIANTO

L'oggetto di studio del presente capitolo è un nuovo impianto di smaltimento col quale l'azienda marchigiana ha deciso di rinnovare completamente la linea produttiva con l'obiettivo di ottimizzare il recupero, abbracciando la filosofia dell'Industria 4.0 che prevede la massima automazione e interconnessione tra uomo, macchina, rete aziendale e web. Basandosi su tale filosofia l'azienda ha quindi implementato le nuove linee su macchinari dotati dei seguenti sistemi di gestione e monitoraggio:

- Sistema PLC (Programmable Logic Controller) per la gestione della macchina e dei sistemi di sicurezza operatore
- Interfaccia HMI (Human Machine Interface) per la consultazione dei messaggi riguardanti sicurezza, efficienza e configurazione della macchina
- Sistema di monitoraggio da remoto (internet e rete locale) per diagnostica e/o personalizzazione
- Sistema software di interconnessione con la rete logistica aziendale e tra le macchine dell'unità produttiva (sicurezza e produzione)
- Microcomputer accessibile da remoto per pubblicazione di pagine di monitoraggio, report e warning
- Sistema di ottimizzazione dei consumi energetici

3.1 DESCRIZIONE IMPIANTO

Il layout dell'impianto è costituito da due linee di produzione:

1. Linea 1: macinazione e sorting primario
2. Linea 2: raffinazione e separazione dei materiali

La scelta di avere due linee separate è stata voluta per ottenere maggiore flessibilità dell'impianto, per ottimizzare tempi e produzione. Inoltre, in questo modo, in caso di blocco di una delle linee non è necessario fermare subito l'intero l'impianto.

3.1.1 LINEA 1: MACINAZIONE E SORTING PRIMARIO

La linea 1 è costituita dai seguenti componenti

1. Trituratore primario
2. Nastro trasportatore a L - Separatore magnetico overbelt - Nastro trasportatore pivottante
3. Unità idraulica di potenza

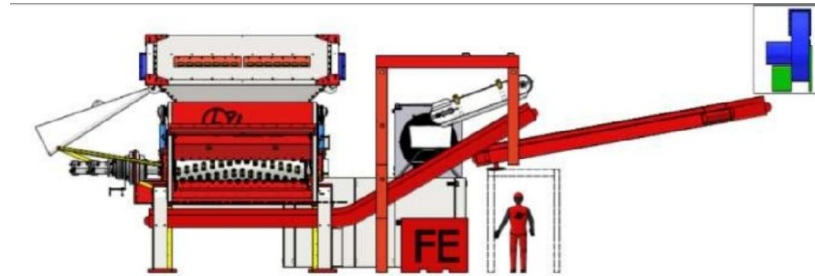


Fig.3.1 Linea 1

3.1.1.1 TRITURATORE PRIMARIO

Il trituratore (Fig.3.2) è un robusto monorotore alimentato da una unità di potenza mediante trasmissione idraulica che permette una regolazione continua di velocità e coppia in funzione della resistenza del materiale alla macinazione.



Fig.3.2 Trituratore primario

Il materiale viene immesso per mezzo di una tramoggia e uno spintore idraulico orizzontale alimenta il rotore in modo continuo. Nel caso di materiale non triturabile la combinazione di trasmissione idrostatica, che riduce la velocità del rotore fino ad invertire il moto, e dello spintore, che arretra e non alimenta più la camera di taglio, evita sovraccarichi di potenza. L'inversione del moto viene effettuata per 4 volte consecutive. Se il rotore ancora non si sblocca la macchina si ferma e l'anomalia viene segnalata sul pannello di controllo.

Il sistema di taglio è dato da lame poste sul rotore (Fig.3.3a) e controlame fisse (Fig.3.3b). Entrambe sono imbullonate su supporti immersi in tasche fresate. Lame e controlame presentano due superfici taglienti. Per questo motivo possono essere utilizzate due volte. Per far ciò è sufficiente svitare la lama e ruotarla di 180°.



Fig.3.3 Lama(a) e contro lama(b) con supporti

All'uscita della camera di taglio è posizionato un vaglio (Fig.3.4) costituito da una griglia con fori di diametro 70 mm che assicura omogeneità del prodotto. La griglia è smontabile e può essere sostituita con altre aventi fori di dimensioni differenti. E' divisa in settori e ciò favorisce la sostituzione in quanto risultano più facilmente movimentabili.



Fig.3.4 Movimentazione Vaglio

La camera del rotore è dotata di un sistema di apertura idraulico che permette una veloce sostituzione sia dei taglienti che del vaglio. La macchina possiede un sistema automatico di pulizia “Auto rotor clean system” che non fa cadere detriti tra il rotore e la spalla della macchina e evita di

danneggiare i cuscinetti. Questi ultimi sono dotati di reggispinta, sono ad ingrassaggio manuale e sono dotati di sensori per il controllo della temperatura.

E' disponibile un pannello di controllo PLC con tutte le informazioni di funzionamento e la possibilità di personalizzare il comportamento in base al materiale trattato. La macchina è dotata di controllo da remoto e possibilità di teleassistenza in attuazione degli obiettivi dell'industria 4.0.

3.1.1.2 SEPARATORE MAGNETICO OVERBELT

Il trituratore scarica, attraverso il vaglio, il materiale su nastro trasportatore a L. Alla fine di questo nastro, trasversalmente ad esso, è sospeso mediante struttura di supporto un separatore magnetico overbelt a magneti permanenti al Neodimio. Questo raccoglie tutti i materiali ferrosi e li scarica lateralmente al nastro ad L. E' possibile regolare la distanza del nastro overbelt in funzione della pezzatura del materiale in uscita dal trituratore.

Il resto del materiale viene scaricato su un nastro pivottante che permette di dividere prodotti diversi in base alla destinazione: stoccaggio o linea 2.

Come prodotto finale della linea 1 otteniamo materiale tritato con pezzatura dipendente dal vaglio scelto dal quale è stata eliminata la gran parte della componente ferrosa.

Le condizioni ambientali che permettono un corretto funzionamento del dispositivo prevedono:

1. temperatura di esercizio: min. -10°C max. +40°C. •
2. umidità max. 80%
3. altitudine max. 1000 s.l.m.[22]

3.1.1.3 UNITA' IDRAULICA DI POTENZA

La centralina idraulica (Fig.3.5) è costituita da un motore di potenza pari a 355kW e dotato di 4 poli con una velocità di rotazione di 1450 rpm realizzata nel rispetto della Direttiva Macchine 2006/42/CE.

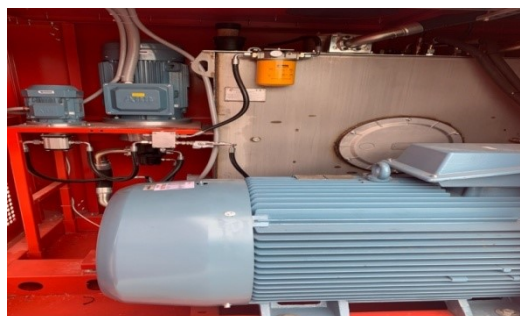


Fig.3.5 Unità di potenza

La parte più importante di questa unità di potenza è il fluido oleodinamico. La scelta dipende dal tipo di apparecchio, dalle pressioni di lavoro dell'impianto e deve essere tale da permettere un uso duraturo, efficiente, sicuro e una corretta manutenzione. Una scelta errata può aumentare il livello di usura e il consumo di energia. L'olio minerale raffinato è ancora il più usato nella maggior parte delle applicazioni. Ha buone proprietà di lubrificazione e può essere additivato con sostanze che migliorano la sua resistenza nel tempo e la sua capacità di protezione contro corrosione e usura. Inoltre il suo uso è favorito anche dal basso costo. Se è olio contenente acqua si devono rispettare al meglio le indicazioni del produttore riguardo acidità, percentuale e tipologia di acqua.

In alcune applicazioni, per motivi di biodegradabilità, lunga durata o alte temperature di esercizio, l'olio minerale viene sostituito con sostanze sintetiche come esteri fosforici e poliglicoli che però hanno un costo maggiore.

Altre volte si scelgono fluidi con elevata resistenza al fuoco per garantire maggiore sicurezza nel caso ci sia il rischio di perdite e contatto con superfici calde.

Qualsiasi sia la scelta del fluido inserito nel sistema, questo deve essere curato il più possibile, in modo da mantenere elevati i livelli prestazionali dell'unità idraulica. L'olio deve essere tenuto sempre al livello massimo di riempimento ed è importante far sì che la temperatura di funzionamento sia quella raccomandata perché è in questa situazione che viene garantito il miglior rendimento. A riguardo è importante la scelta di un olio con indice di viscosità (VI) elevato, perché tale valore ci indica che la viscosità del fluido varia poco con la temperatura e che le sue prestazioni si mantengono costanti.

Altro aspetto che gioca un ruolo decisivo è la pulizia dei filtri: il controllo del loro intasamento e la loro sostituzione sono attività fondamentali. E' importante controllare che funzionino anche a bassi carichi di lavoro, minimizzando l'introduzione di particelle nel sistema.

Per questa unità viene utilizzato olio ISO VG 46. La classificazione ISO VG definisce la classe di viscosità dove il grado (46), si riferisce alla diffusività cinematica a 40°C. Più è alto il valore maggiore è la viscosità. Per questo olio i limiti di viscosità a 40°C sono dati da 41.4 e 50.6 cSt. Tra gli oli proposti dall'azienda produttrice c'è per esempio il Mobil DTE 25 che presenta un indice di viscosità molto alto, pari a 98(il massimo è 100)[23].

Per l'olio di questa centrale è previsto un ciclo di manutenzione standard che prevede:

- Controllo livello e perdite giornaliero ogni 8-10 ore
- Pulizia scambiatori settimanale ogni 50 ore
- Controllo chimico ogni 1000 ore
- Sostituzione dopo 5000 ore di funzionamento

L'olio esausto va smaltito seguendo la normativa in quanto molto inquinante e a tale scopo è nato il CONOU, il Consorzio Nazionale per Oli Usati[24].

3.1.2 LINEA 2: RAFFINAZIONE E SEPARAZIONE MATERIALI

La nuova linea di raffinazione implementata dall'azienda marchigiana ha due obiettivi:

1. alta qualità del prodotto finale. Questa, come vedremo, si basa sulla migliore preparazione del materiale per la separazione, che viene ottenuta attraverso una lavorazione a 3 stadi mediante turbine raffinatrici;
2. ottimizzazione dell'impianto. Grazie all'uso delle turbine al posto dei tradizionali mulini a lame si può ottenere una riduzione dei fermi macchina. Questo perché le turbine lavorano il materiale per frizione ed impatto e non sono quindi soggette all'usura dei taglienti.

L'assenza di lame permette di lavorare anche materiale con residui di ferro e acciaio inox.

Di seguito vedremo in dettaglio il processo di lavorazione e i suoi componenti principali.

3.1.2.1 DESCRIZIONE PROCESSO LINEA 2

Vediamo la linea nel dettaglio:

- Come visibile dallo schema dell'impianto(Fig.3.6) il materiale premacinato nella linea 1 alimenta una turbina verticale(3) mediante un dosatore tricoclea(1) e un nastro trasportatore(2). Il passaggio nella turbina verticale dotata di palette Hardox mobili riduce la taglia aiutando la separazione dei materiali.

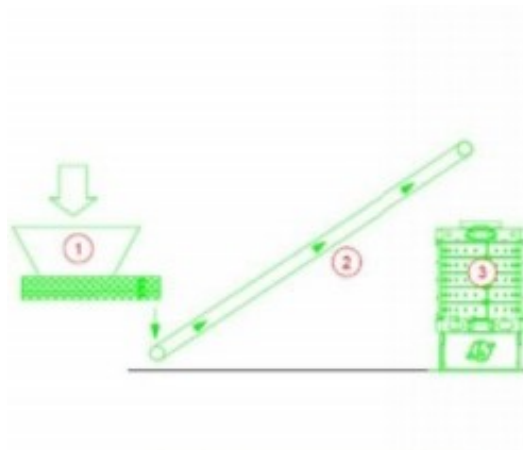


Fig.3.6 Bunker e turbina verticale

- Il materiale in uscita dalla turbina (Fig.3.7) viene inviato mediante trasporto pneumatico ad un ciclone decantatore collegato per mezzo di una valvola stellare ad un sistema di separazione a zig-zag(4).

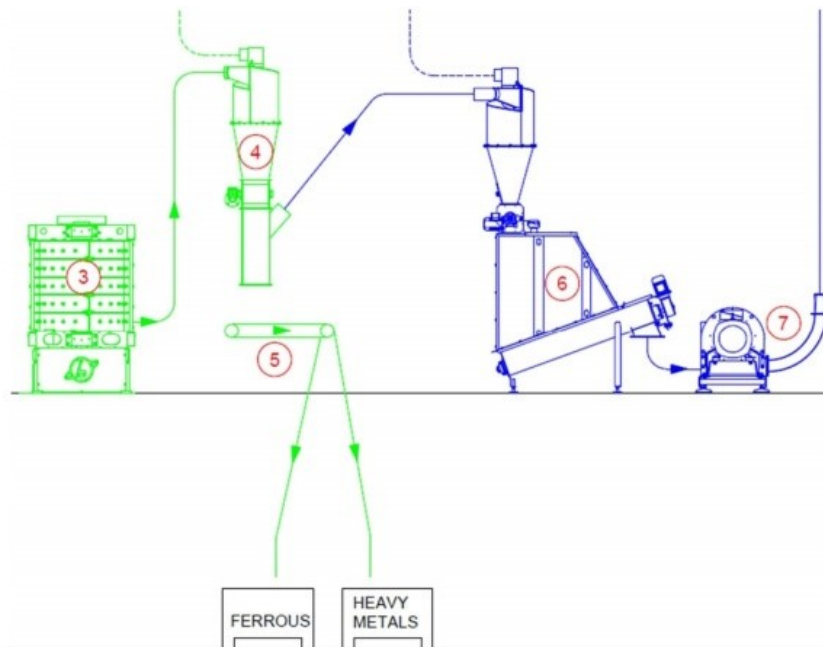


Fig.3.7 Bi-coclea e turbina orizzontale

- Nel ciclone le polveri più sottili vengono catturate dal sistema di aspirazione che le conduce al filtro a maniche. La parte pesante giunge al separatore zig-zag nel quale residui ferrosi e metalli pesanti (zorba) vengono raccolti per gravità in nastro separatore a supermagnete(5) che divide i metalli ferrosi dai metalli pesanti (Cu e Al). La zorba ottenuta può essere ulteriormente raffinata o immessa sul mercato come prodotto semifinito.
- La frazione più leggera passa dal separatore zig-zag ad un secondo ciclone decantatore(Fig3.7) collegato con valvola stellare ad un dosatore bicoclea(6) che alimenta una turbina orizzontale(7) a placchette fisse, all'uscita della quale il materiale ha grani con diametro inferiore a 3 mm.
 - Ora il materiale è pronto per la separazione con tavole densimetriche. Ci sono due tavole per l'elevata quantità di materiale da trattare(9)(10).

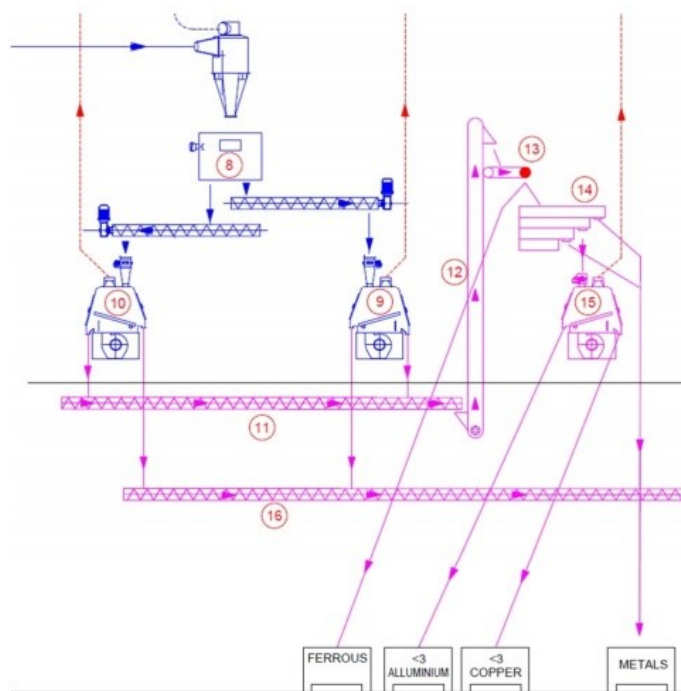


Fig.3.8 Separatori densimetrici

Il materiale passando attraverso un ciclone decantatore, un dosatore bicoclea e due coclee giunge alle tavole densimetriche dove avviene la separazione tra metalli e plastiche(Fig.3.8):

- a) I metalli raccolti da una coclea(11) giungono ad un nastro con supermagnete(13) per mezzo di un elevatore a tazze(12) dove viene eliminato il residuo ferroso. I metalli non ferrosi vengono fatti passare attraverso un vibrovaglio(14) a 3 stadi. Quelli con granulometria intermedia vengono inviati ad un'altra tavola densimetrica(15) per separare Al e Cu.
- b) Le plastiche vengono raccolte da una seconda coclea(16) e inviate ad un'altra turbina(17) per ottenere materiale plastico ancora più puro, libero da micro metalli. C'è poi un ulteriore passaggio(Fig.3.9) in ciclone decantatore(18) che alimenta un vibrovaglio a due uscite(19). I grani più piccoli vengono inviati ad un'altra tavola densimetrica(20) per la separazione dei micrograni di plastica dai micro metalli liberatisi dopo l'ultimo passaggio in turbina. I micrograni di plastica e il materiale plastico con granulometria maggiore in uscita da primo stadio del vaglio vengono inviati al deposito della plastica(22) con un ciclone decantatore(21).

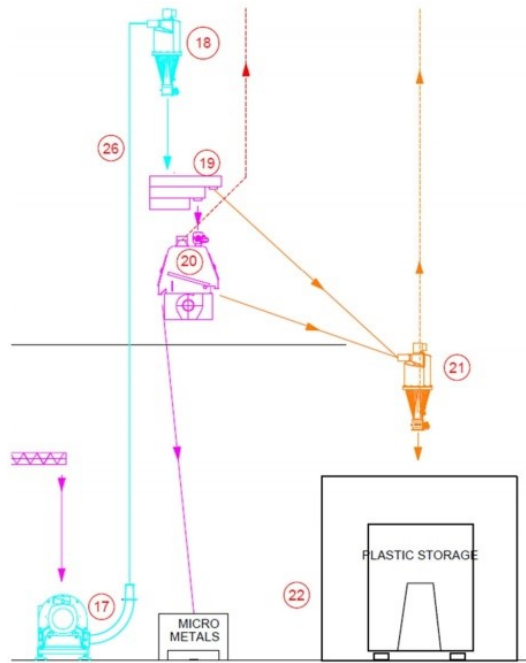


Fig.3.9 turbina orizzontale e deposito plastica

3.1.2.2 TURBINA VERTICALE

La turbina verticale Bano Recycling (Fig.3.10) consente di realizzare elevata raffinazione dei metalli mediante urto e attrito. La macchina si basa su di un sistema che, ruotando a forte velocità, lancia il materiale contro le pareti corazzate mediante martelli. La macchina ha un motore elettrico con potenza nominale di 315 kW, tensione di 400 V e frequenza di 50 Hz capace di portare il rotore a 993 giri/minuto con velocità regolabile mediante un inverter.

Il gruppo di trasmissione è composto da 2 pulegge e multicinghia trapezoidale protetta da carter.

La camera di taglio è data da una struttura apribile rivestita da corazze in Hardox con un rotore, stelle e martelli che spingono il materiale contro la corazza. Lavora su due livelli più quello di scarico. È configurabile aggiungendo o togliendo livelli di lavoro e regolando la distanza tra stelle e corazze. All'uscita della camera è posto un vaglio (opzionale) smontabile e intercambiabile. Ha una apertura facilitata per la manutenzione e la sostituzione rapida dei vari componenti (martelli, stele e corazze).

Il quadro elettrico è dotato di PCL e touchscreen di controllo Siemens e componenti Schneider electric.



Fig.3.10 Turbina verticale

Questa turbina aumenta la densità e la purezza del materiale ferroso e completa la separazione dei metalli nobili non ferrosi. La densità del prodotto finale raggiunge le 3.5 t/m^3 in conformità con gli standard di qualità più elevati del settore siderurgico.

3.1.2.3 SISTEMA DI SEPARAZIONE ZIG-ZAG

Il sistema zig-zag che vediamo in figura è un altro componente importante della linea. Esso è collegato a due cicloni decantatori ed elimina la parte pesante del materiale (zorba) preparandolo per i successivi stadi di raffinazione come descritto nel capitolo precedente.

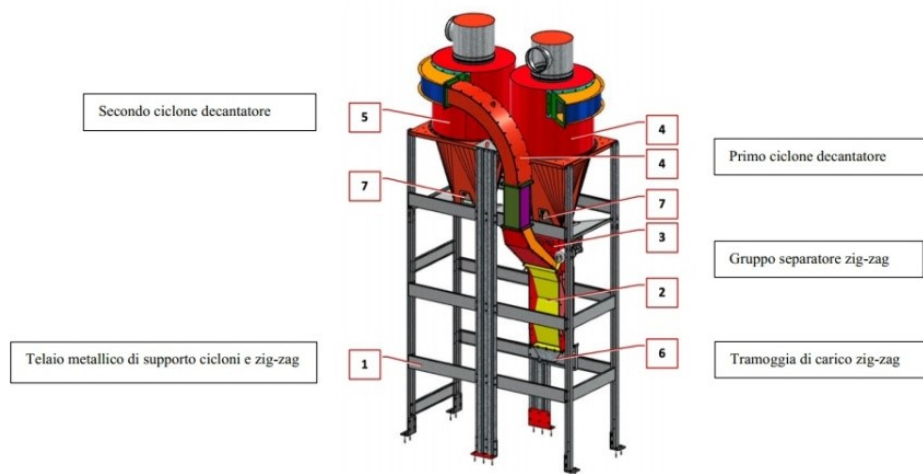


Fig.3.11 Separatore Zig Zag

3.1.2.4 TURBINA ORIZZONTALE

Nella linea di raffinazione ci sono due turbine orizzontali Bano della serie TU (Fig.3.12). Queste turbine sono macchine progettate per completare il processo di granulazione dei materiali metallici e non. Vengono utilizzate con successo negli impianti di riciclo cavi poiché hanno elevata capacità di liberare i metalli dalle plastiche aumentandone la densità. Questo viene fatto grazie ad un'azione di sfregamento ad alta velocità. Riducono lo stress degli stadi precedenti permettendo l'uso di griglie con maglie più grandi e preparano il materiale per il trattamento mediante tavole densimetriche ad aria.

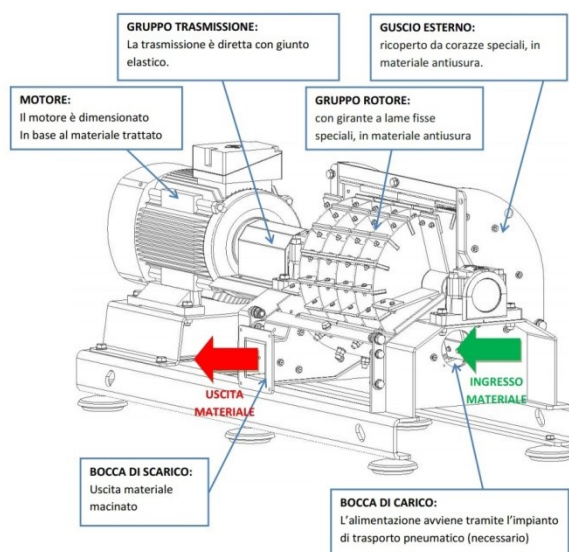


Fig.3.12 Turbina Bano TU 65-75

Lungo la linea di raffinazione vi sono la turbina Bano TU 110-125 e successivamente la turbina TU 65-75.

La turbina Tu 110-125 è dotata di un motore di potenza di 160kW con trasmissione a giunto elastico. La velocità del rotore è di 1200 rpm che viene controllata mediante inverter. La camera di taglio è costituita da un rotore in Hardox a 4 stadi di macinazione con lame fisse in materiale antiusura. Il rotore ruota su cuscinetti radiali. La camera è dotata di apertura idraulica per rapida manutenzione e pulizia.

La turbina TU 65-75 ha una potenza installata di 75 kW con trasmissione a giunto elastico e velocità di rotazione di 1400 rpm con camera di raffinazione a 3 stadi. Entrambe possono lavorare materiale con diametro inferiore al mm.

3.1.2.5 SEPARATORI DENSIMETRICI

I separatori densimetrici (Fig.3.13) vengono posizionati dopo le macchine raffinatrici perché trattano materiale con granulometria fine ed omogenea. Servono a separare i materiali metallici dalle plastiche e il rame dall'alluminio, ovvero materiali con peso specifico differente ma con uguali dimensioni.

I separatori densimetrici SD Bano Recycling sono costituiti da due telai tubolari, uno fisso e uno oscillante. Quest'ultimo è comandato da un albero eccentrico ed è fissato su boccole antivibranti in modo da non trasmettere vibrazioni alla carrozzeria.

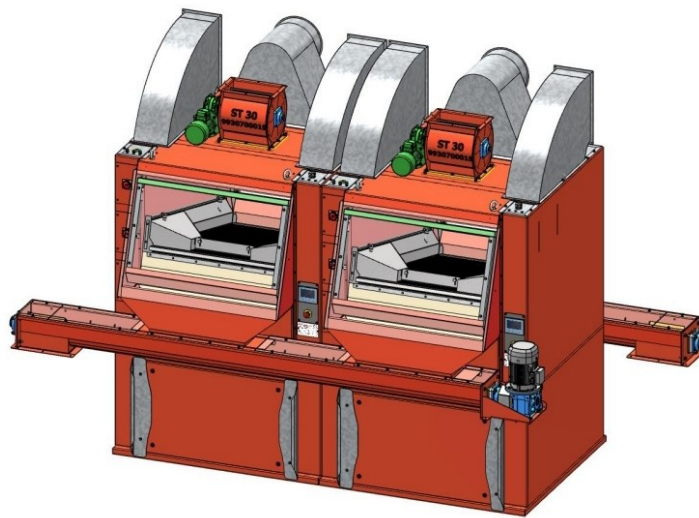


Fig.3.13 Separatore densimetrico doppio

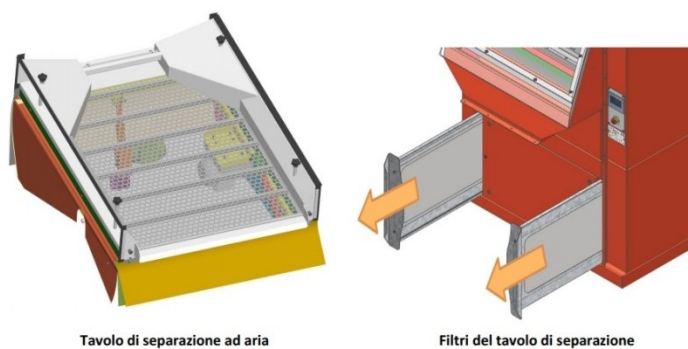


Fig.3.14 Dettaglio tavola di separazione e filtri

3.1.2.6 CICLONE DECANTATORE

Il ciclone decantatore installato permette un'efficienza di abbattimento del particolato che varia tra il 60 e l'80% a seconda delle sue dimensioni. L'efficienza di separazione delle polveri più piccole può aumentare nel caso in cui la polvere stessa abbia una buona capacità flocculante, cioè la capacità di aggregarsi in piccoli agglomerati o nel caso in cui vengano trattati flussi inquinanti con alte concentrazioni di polvere (230g/mc). Per tali motivi il ciclone viene spesso adottato come stadio iniziale in un sistema che prevede una filtrazione più fine utilizzando, ad esempio, filtri a maniche o a cartucce.

3.1.2.7 IMPIANTO FILTRANTE

L'impianto è dotato di un filtro a maniche(Fig.3.15). L'aria polverosa viene aspirata dal filtro messo in depressione da un elettroventilatore. L'aria attraversa le maniche filtranti dall'esterno depositando nel tessuto la componente leggera delle particelle di polvere ed esce filtrata nel plenum superiore. La parte più pesante della polvere decanta già all'entrata del filtro nella tramoggia sottostante senza raggiungere il tessuto filtrante. La parte depositatasi sulle maniche viene staccata mediante soffi d'aria in controcorrente. Per facilitare la pulizia il filtro è diviso a compartimenti che vengono esclusi con delle serrande, impedendo così all'aria polverosa di attraversare le maniche filtranti e migliorando la pulizia in controcorrente del getto di aria compressa. La sequenza di queste fasi è controllata da una centralina elettronica. L'estrazione delle polveri depositate nella tramoggia avviene in continuo con una coclea che le convoglia allo scarico chiuso da una valvola rotativa a tenuta o da altri sistemi. I flussi d'aria compressa sono generati del sistema di pulizia ad intervalli prestabiliti, o quando il filtro raggiunge la soglia d'intasamento impostata nel pannello elettronico con deprimometro (opzionale). In funzione del tipo di polvere e inquinante viene scelto il tipo di tessuto, per limitare a quanto previsto dalle normative vigenti la quantità di polvere residua nelle emissioni.

La rumorosità dei filtri, ad 0,4 m dalla carcassa e ad 1,6 m di altezza dal piano di lavoro (come previsto dalla norma UNI 9432: 2011), è inferiore a 70 dB, fatto salvo la specifica misurazione fatta all'interno del luogo di lavoro[6].



Fig.3.15 Filtro impianto

4 SISTEMA DI CONTROLLO E GESTIONE IMPIANTO

4.1 PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER (PLC)

L'interconnessione uomo-macchina è garantita da un sistema PCL touchscreen con software Siemens che consente la gestione e il monitoraggio della produzione dell'impianto secondo i dettami dell'Industria 4.0.

Nella Fig.4.1 possiamo vedere una schermata HMI del PCL in dotazione.

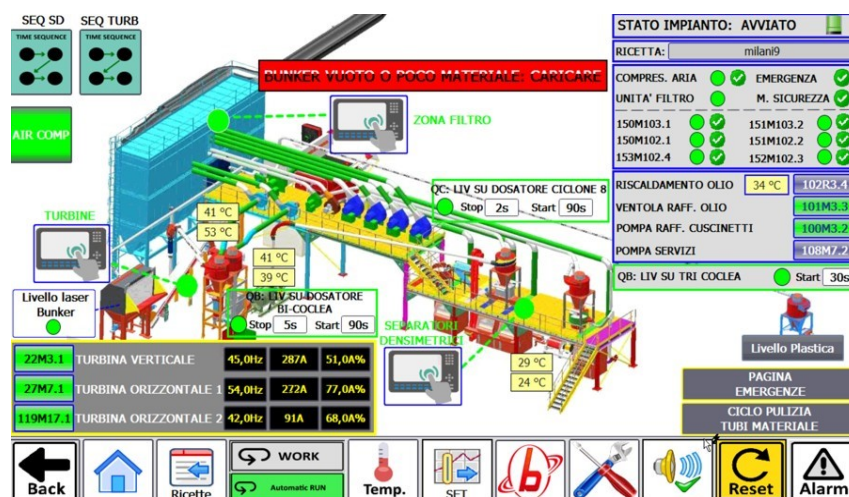


Fig.4.1 Schermata principale HMI

Ora andremo a vedere le diverse funzionalità di gestione e monitoraggio che tale sistema ci mette a disposizione partendo dall'avviamento dell'impianto.

4.2 AVVIAMENTO IMPIANTO

Nell'armadio elettrico insieme al PLC touchscreen sono presenti i selettori in figura. Il selettore con chiave può essere nello stato di “zero” cioè spento, in quello di “service” che ci permette di impostare l'impianto in manuale o “work” cioè in modalità automatica. Se siamo in modalità “service” è possibile accendere un motore alla volta. Se il motore è sotto inverter l'indicatore diventa giallo indicando che è in avviamento, verde quando è avviato e rosso nel caso in cui ci sia un problema. Selezionando “work” si azionano il filtro e l'impianto di aspirazione, mentre sull'indicatore del compressore e sull'unità filtro del display compare il verde.



Fig.4.2 Selettore avviamento

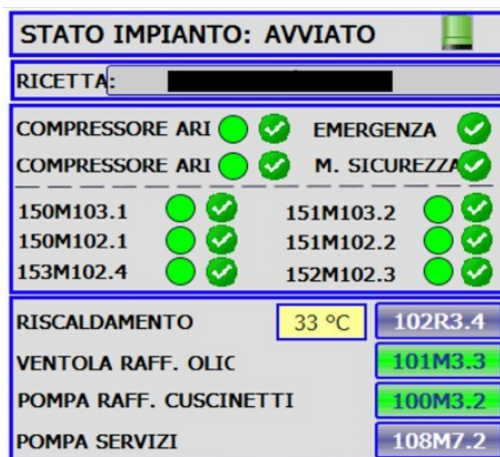


Fig.4.3 Finestra impianto avviato

Il sistema di gestione, oltre ad avviare l'intero impianto, permette di far partire separatamente la linea delle turbine (verticale 22M e orizzontale 27M) e la linea dei separatori densimetrici (111M E 112M). A tale scopo sarà sufficiente entrare nelle rispettive sequenze e premere START(Fig.4.4)

4.2.1 AVVIAMENTO LINEA TURBINE

Andando sulla sequenza turbine e premendo il tasto start la linea si accende partendo dal ventilatore della turbina orizzontale (30M). Dopo 5 secondi dall'attivazione del ventilatore parte la turbina e dopo 90 secondi, a causa dell'inerzia della stessa, si aziona il dosatore bi-coclea. La procedura di accensione continua fino ad arrivare al bunker (Fig.4.4). Contemporaneamente parte anche il ciclone 8 (110M) per evitare intasamento all'uscita della linea e inizia il caricamento del bunker(1).

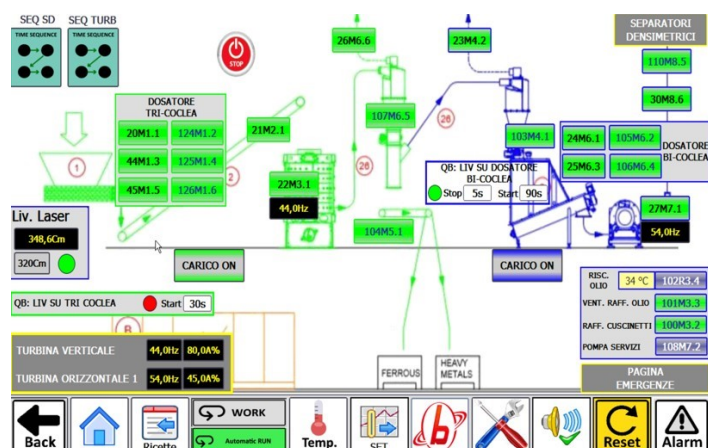


Fig.4.4 Schermata avviamento linea turbine

Il materiale fluisce attraverso la linea come descritto nel precedente capitolo fino al ciclone decantatore 8 (110M) per essere raccolto o essere avviato alla linea dei separatori. In figura è possibile osservare un avviso che mostra che il dosatore bi-coclea si è fermato dopo 5 secondi perché troppo pieno ed è rimasto fermo per 90 secondi prima di ripartire.

4.2.2 AVVIAMENTO LINEA SEPARATORI

Se voglio attivare la linea dei separatori densimetrici (Fig.4.5) il primo ad avviarsi sarà il motore 43M del sistema di aspirazione del ciclone decantatore posto sopra il deposito della plastica. L'accensione seguirà il percorso a ritroso della linea sino alla coclea dei separatori densimetrici(28M e 29M).

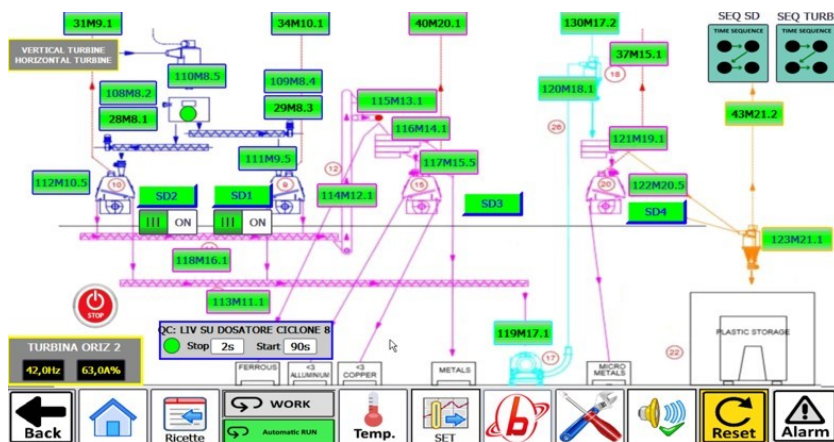


Fig.4.5 Linea dei separatori densimetrici

La sequenza di lavorazione della linea è già stata descritta nel capitolo precedente. Ricordiamo solo che grazie ai separatori densimetrici si ottiene la separazione della gran parte del materiale plastico da quello metallico. Questi ultimi subiscono una separazione in base alla granulometria, mentre le plastiche vengono inviate ad una seconda turbina che elimina i residui micro metallici.

Se l'operatore comprende che si sta andando troppo velocemente con la lavorazione alle tavole densimetriche può intervenire manualmente il processo arrestando il carico di materiale sulla bi-coclea e sulla tri-colea senza variare gli altri parametri di lavorazione.

4.3 SETTING E MONITORAGGIO PARAMETRI

4.3.1 PARAMETRI DI LAVORO

Il sistema HMI ci permette di entrare e visualizzare i parametri relativi ad ogni singolo componente. Se entriamo in uno dei motori, per esempio quello della turbina verticale(22M), possiamo visualizzare alcuni suoi parametri di funzionamento(Fig.4.5).

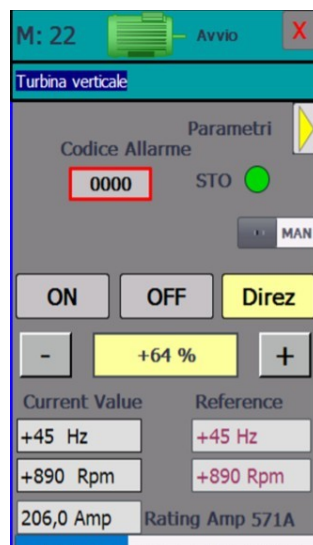


Fig.4.5 Parametri di funzionamento del motore Turbina verticale

Si possono osservare lo stato STOP/RUN, gli allarmi, la velocità espressa in percentuale della corrente assorbita (in figura è impostata al 64%), i valori di riferimento e i valori in tempo reale della corrente e del numero di giri espresso in rpm. Per qualsiasi motore della linea è possibile visualizzare anche altri parametri tra cui sequenza, rampa di avviamento e arresto (Fig.4.6). Tali parametri non vengono toccati a meno che non si debba variare la lavorazione. Mediante PCL è possibile variare la velocità della turbina, ma solamente in modalità manuale.



Fig.4.6 Altri parametri motore bi-coclea

Non è invece possibile variare la velocità preimpostata di carico della bi-coclea in modalità automatica, ma soltanto entrando nel “set turbine” (Fig.4.7).

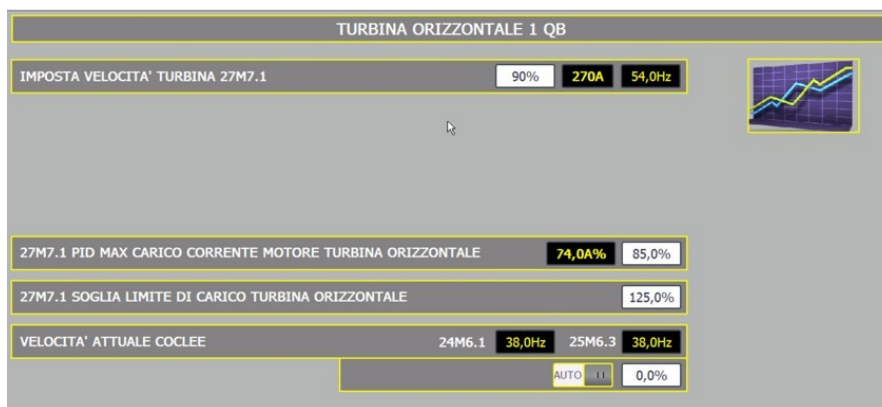


Fig.4.7 Parametri turbina orizzontale

Dalla schermata possiamo osservare i valori correnti e impostare quelli desiderati di:

- Velocità della turbina
- Il PID di massimo carico che è il valore massimo di assorbimento desiderato
- La soglia limite di carico oltre la quale la turbina rallenta bruscamente e le coclee si fermano a caricare
- La velocità corrente delle coclee

4.3.2 MONITORAGGIO TEMPERATURE

Nella Fig.4.8 è possibile osservare la finestra delle temperature dove sono visualizzate le temperature dei cuscinetti delle turbine e i parametri del sistema di raffreddamento della turbina verticale. Vengono visualizzate le temperature in tempo reale, il valore di temperatura di preallarme e quello di allarme. Se viene raggiunta la temperatura di preallarme (85°C) la linea di lavorazione non si arresta né rallenta.

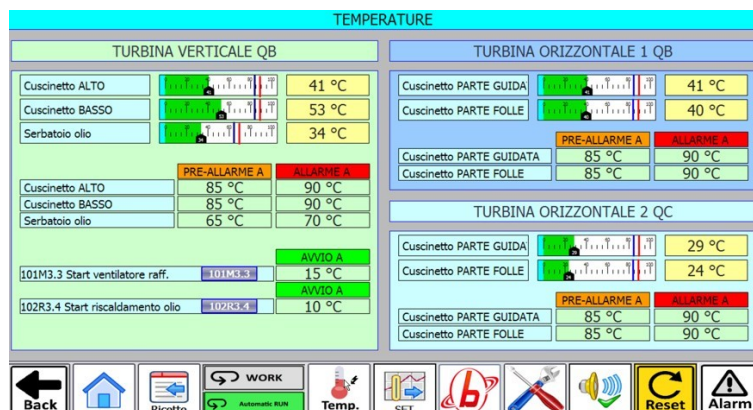


Fig.4.8 Finestra temperature

Questo avviso dà il tempo all'operatore di poter effettuare le verifiche e decidere cosa fare. E' possibile che la temperatura raggiunga i 90°C (temperatura di allarme) e che il sistema si arresti da solo, ma se ciò non accade e vengono modificati i parametri di lavoro (rallentando o fermando la linea) si rischia di intasare la linea e di compromettere la qualità del prodotto finale.

Nella schermata è possibile visualizzare la temperatura (10°C) a cui si attiva la resistenza di riscaldamento dell'olio della centralina della turbina verticale (102R corrispondente ad una resistenza $R=102\Omega$) e la temperatura (15°C) sopra la quale viene azionata la ventola di raffreddamento dell'olio. In Fig.4.9 è possibile vedere il display della centralina e la temperatura in tempo reale.

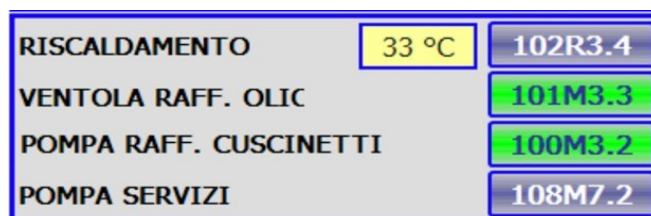


Fig.4.9 Parametri centralina olio

4.3.3 ALLARMI E AVVISI

Allarmi e avvisi sono indicati rispettivamente in rosso e giallo (Fig.4.11). Nel caso di allarmi si deve subito intervenire sull'impianto per evitare possibili blocchi. Gli avvisi, invece, rappresentano segnalazioni da analizzare, ma che non vanno a bloccare la produzione.

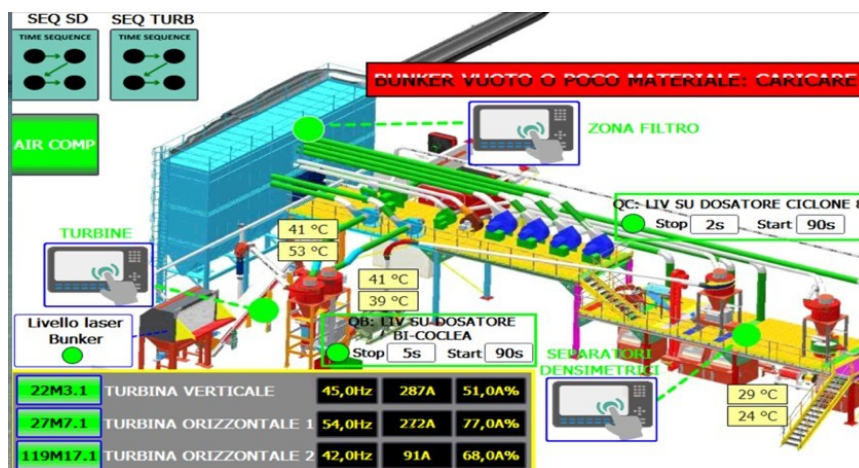


Fig.4.10 Linea 2

Gli allarmi sono indicati con QB se riguardano la produzione (turbine e separatori densimetrici) mentre sono indicati con QC se riguardano il quadro elettrico.

Gli avvisi sono relativi al livello di materiale in vari punti dell'impianto. Questi avvisi fermano il carico del prodotto ma non la linea di produzione. Possiamo avere le seguenti segnalazioni (Fig.4.1):

- Livello bunker
 1. Laser level
 2. Livello intasamento
- Livello dosatore bi-coclea
- Livello dosatore ciclone 8
- Livello plastica



Fig.4.11 Indicatori allarmi e avvisi

Il livello bunker ha quindi 2 avvisi: il “Laser level” che controlla la quantità di materiale presente nella tramoggia di carico e il “livello anti-intasamento”, che ferma la tri-coclea per 30 secondi nel

caso in cui il bunker continui a funzionare nonostante qualche anomalia abbia fermato tutta la linea. In Fig.4.12a possiamo vedere la finestra del laser level che ci indica che il livello di carico del bunker deve restare al di sopra di 3.20m.

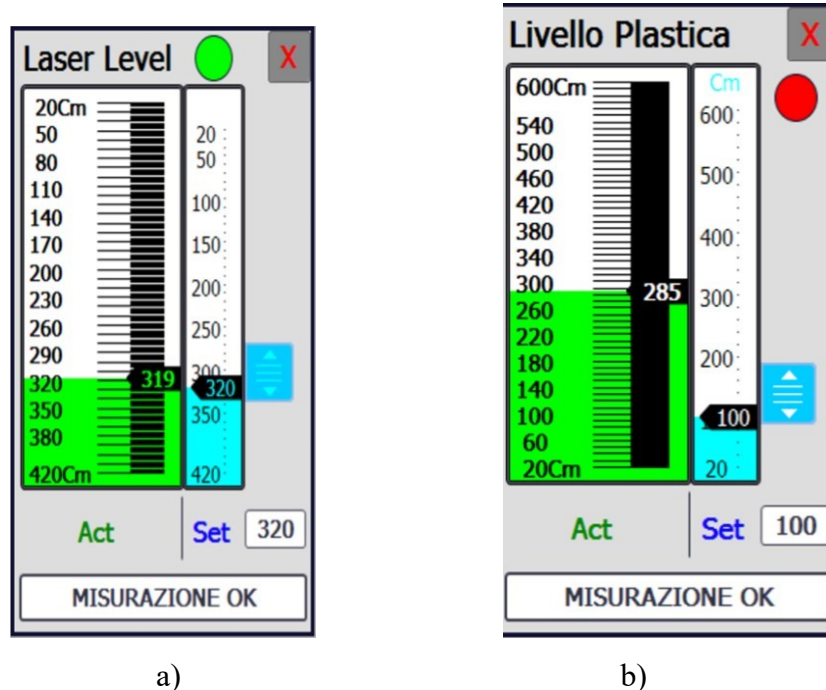


Fig.4.12 Laser level(a) e Livello plastica(b)

La funzione anti intasamento viene svolta anche dal livello del dosatore bi-coclea e dal dosatore ciclone 8. Ovviamente se si ferma il dosatore bi-coclea si ferma anche il tri-coclea, invece fermando il tri-coclea il bi-coclea continua a funzionare.

Troviamo inoltre il livello plastica nel plastic-storage finale (Fig.4.12b) segnalato mediante un sensore laser. Se il magazzino di raccolta plastica è più pieno (2,85 metri) rispetto al valore impostato(1 metro) il livello plastica è rosso, come possiamo osservare in figura.

Tutti gli allarmi e avvisi vengono memorizzati e sono disponibili per la consultazione in ogni momento. Nella schermata di Fig.4.13 è possibile osservare un'immagine dello storico degli avvisi.

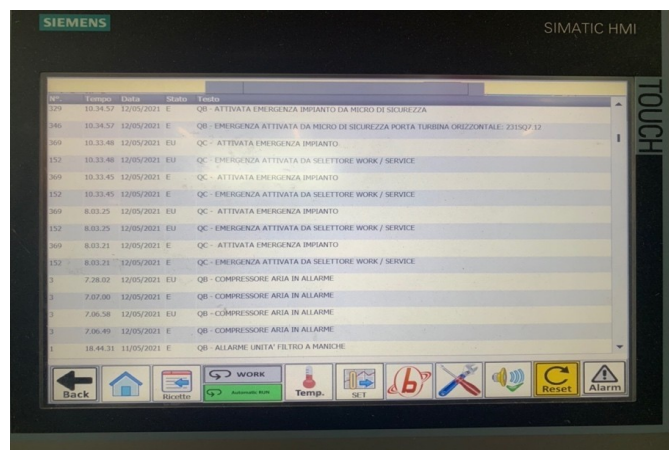


Fig.4.13 Storico Avvisi

4.3.4 ANALISI ALLARMI E AVVISI

E' stato effettuato un monitoraggio trimestrale degli allarmi e avvisi al fine di verificare possibili criticità dell'impianto. I dati rilevati sono mostrati nel grafico in funzione della frequenza.

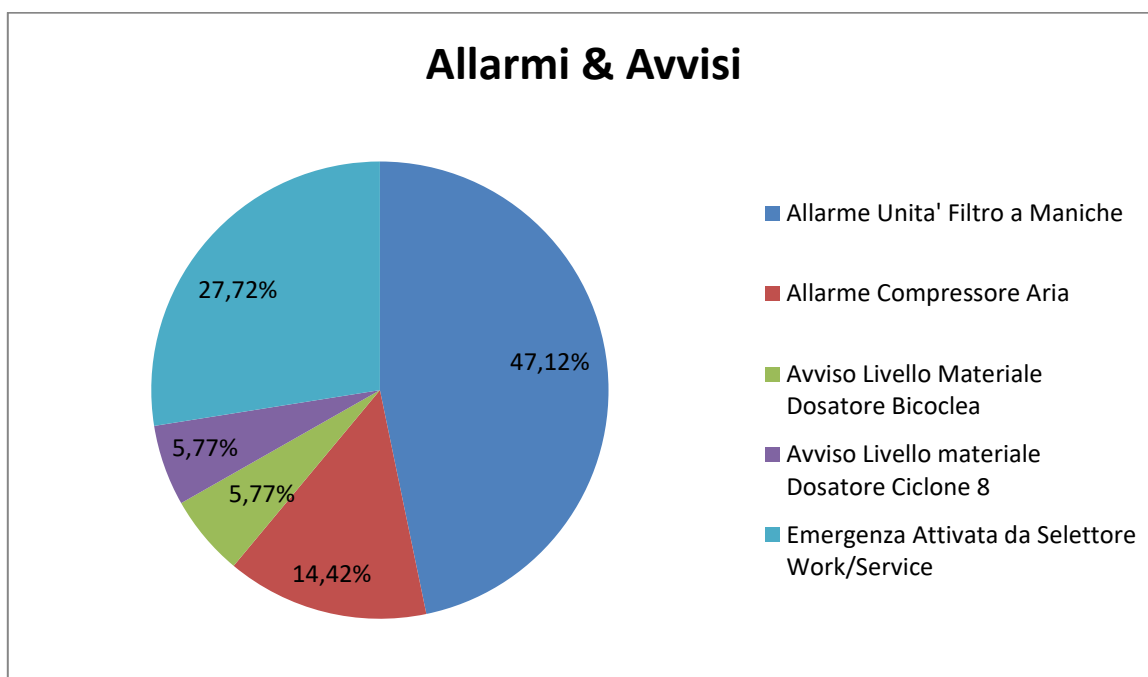


Grafico 4.1 Allarmi & Avvisi

Si può notare che il sistema del filtro a maniche rappresenta una notevole criticità, dal momento che il suo malfunzionamento può portare al fermo dell'intero impianto. Il filtro è dotato di sistema programmato di pulizia. Questi allarmi ripetuti possono essere dovuti ad un eccessivo intasamento di polvere nelle maniche causati da un non corretto ciclo di pulizia. Tramite la centralina è possibile regolare la frequenza del ciclo di pulizia, mentre mediante il tempo di sparo si agisce sulla

profondità, consentendo una migliore pulizia nelle zone lontane. L'aumento della frequenza pone limiti al tempo di sparo e viceversa (con un tempo di sparo $>$ di 1s il tempo minimo di pausa non può essere $<$ di 5s). Il sistema di aspirazione è fondamentale per la corretta uscita del materiale dalle turbine: bisognerebbe andare a verificare se la sua non corretta regolazione durante i cicli di lavorazione di determinati materiali possa rappresentare una delle cause dei frequenti allarmi che possono bloccare l'impianto. La criticità dell'impianto di aspirazione è ulteriormente aggravata dal fatto che ci sono stati allarmi anche al compressore che sommati a quelli del filtro a maniche raggiungono il 61,54% . Se guardiamo gli allarmi che possono bloccare le linee di produzione, l'impianto di aspirazione nel complesso (filtro a maniche + compressore) raggiunge quasi il 70%.

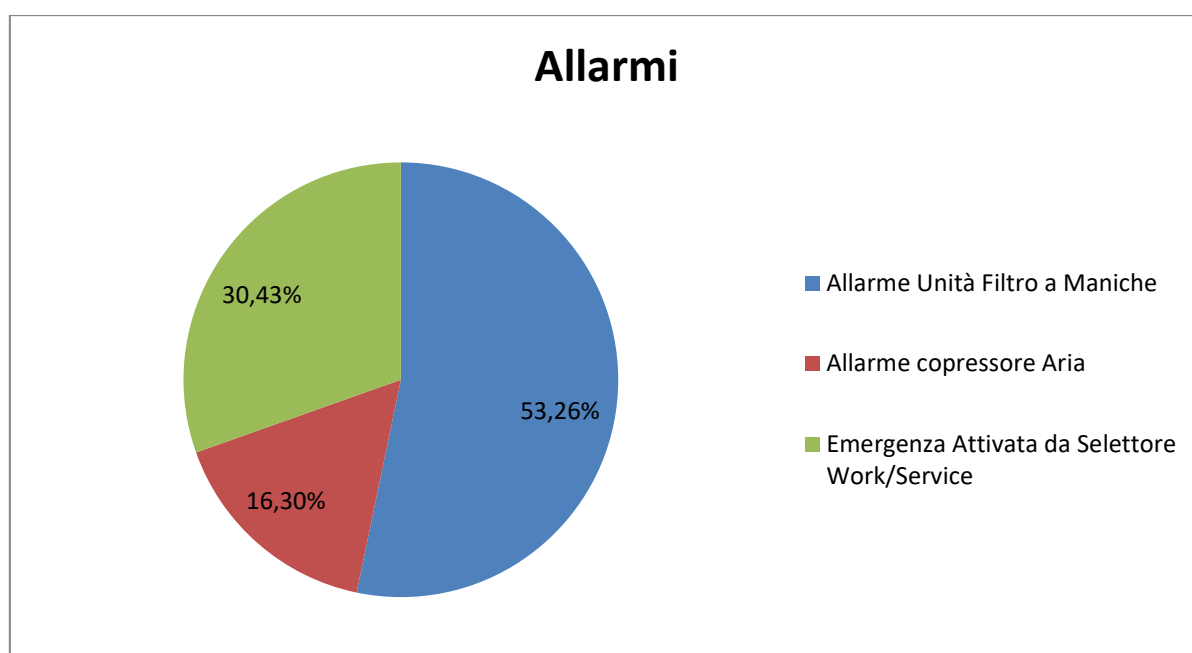


Grafico 4.2 Allarmi

Dal grafico 4.1 si evince anche che, nel periodo considerato, la frequenza degli avvisi di intasamento dei dosatori è stata bassa, segnale che in generale si è scelta una corretta ricetta di lavorazione per i materiali trattati.

4.3.5 MONITORAGGIO PRESSIONE TRITURATORE

Tra i parametri fondamentali che il sistema di controllo ci permette di monitorare c'è l'andamento della pressione del rotore del tritatore. In figura possiamo osservare una schermata del PCL in cui viene visualizzata la pressione in tempo reale mentre la linea rossa rappresenta la pressione di blocco pari a 320 bar.

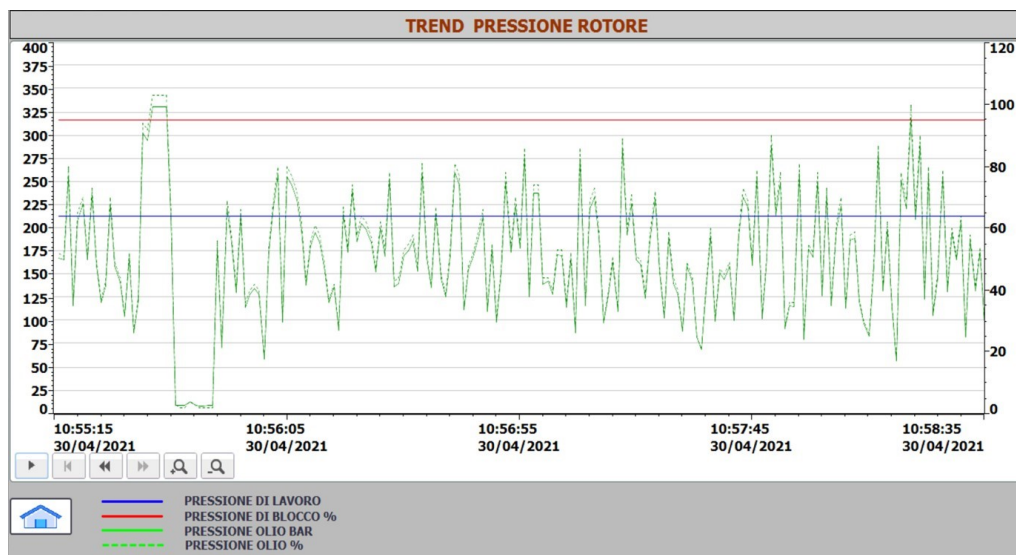


Fig.4.14 Andamento pressione rotore

I dati vengono rilevati a intervalli di 60 secondi e memorizzati in un file Excel Log come quello mostrato in figura.

95947	DB_MACS_PanOp_SP_PRS_WORK	08/04/21 16:22	20	1	44294682498
95948	DB_MACS_PanOp_SP_PRS_BLOCK %	08/04/21 16:22	95	1	44294682498
95949	DB_MACS_PanOp_SP_PRS_BLOCK	08/04/21 16:22	320	1	44294682498
95950	DB_MACS_PanOp_PRS_oil tank bar	08/04/21 16:22	124	1	44294682498
95951	DB_MACS_PanOp_PRS_oil tank %	08/04/21 16:22	38	1	44294682498
95952	DB_MACS_PRS_LOW_OIL_bar	08/04/21 16:22	7	1	44294682556
95953	DB_MACS_PanOp_SP_PRS_WORK	08/04/21 16:22	20	1	44294682556
95954	DB_MACS_PanOp_SP_PRS_BLOCK %	08/04/21 16:22	95	1	44294682556
95955	DB_MACS_PanOp_SP_PRS_BLOCK	08/04/21 16:22	320	1	44294682556
95956	DB_MACS_PanOp_PRS_oil tank bar	08/04/21 16:22	24	1	44294682556
95957	DB_MACS_PanOp_PRS_oil tank %	08/04/21 16:22	7	1	44294682556
95958	DB_MACS_PRS_LOW_OIL_bar	08/04/21 16:22	6	1	44294682614
95959	DB_MACS_PanOp_SP_PRS_WORK	08/04/21 16:22	20	1	44294682614
95960	DB_MACS_PanOp_SP_PRS_BLOCK %	08/04/21 16:22	95	1	44294682614
95961	DB_MACS_PanOp_SP_PRS_BLOCK	08/04/21 16:22	320	1	44294682614
95962	DB_MACS_PanOp_PRS_oil tank bar	08/04/21 16:22	111	1	44294682614
95963	DB_MACS_PanOp_PRS_oil tank %	08/04/21 16:22	34	1	44294682614
95964	DB_MACS_PRS_LOW_OIL_bar	08/04/21 16:23	3	1	44294682672
95965	DB_MACS_PanOp_SP_PRS_WORK	08/04/21 16:23	20	1	44294682672
95966	DB_MACS_PanOp_SP_PRS_BLOCK %	08/04/21 16:23	95	1	44294682672
95967	DB_MACS_PanOp_SP_PRS_BLOCK	08/04/21 16:23	320	1	44294682672

Fig.4.15 File Excel log pressione rotore

La schermata del PCL selezionata mostra che tra i minuti 55 e 56 la pressione è improvvisamente salita e ha superato la pressione di blocco di 320bar. Di colpo la pressione è andata a 0 bar, perché l'eccesso di materiale ha bloccato il rotore che, nel tentativo di sbloccarsi, ha invertito il moto. Durante la contro rotazione la pressione resta a 0 bar, in quanto il sistema non rileva valori negativi rispetto al normale verso di lavoro. Dal grafico si evince che pochi secondi dopo l'inversione la pressione è risalita segnalando l'avvenuto sblocco. Ricordiamo che se lo sblocco non avviene dopo quattro controrotazioni il rotore si ferma. Va sempre controllato il livello minimo dell'olio nella trasmissione idraulica (low oil tank) per scongiurare il pericolo di perdite e fermo macchina.

4.3.6 MONITORAGGIO TURBINE

4.3.6.1 TURBINA VERTICALE 22M

Il parametro fondamentale per il controllo del corretto funzionamento delle turbine è dato dal carico di corrente assorbita. Nella schermata in Fig.4.16 del PCL possiamo osservare l'andamento della corrente della turbina verticale 22M contrassegnata dalla linea blu, mentre la linea rossa ci dà la soglia limite di carico.

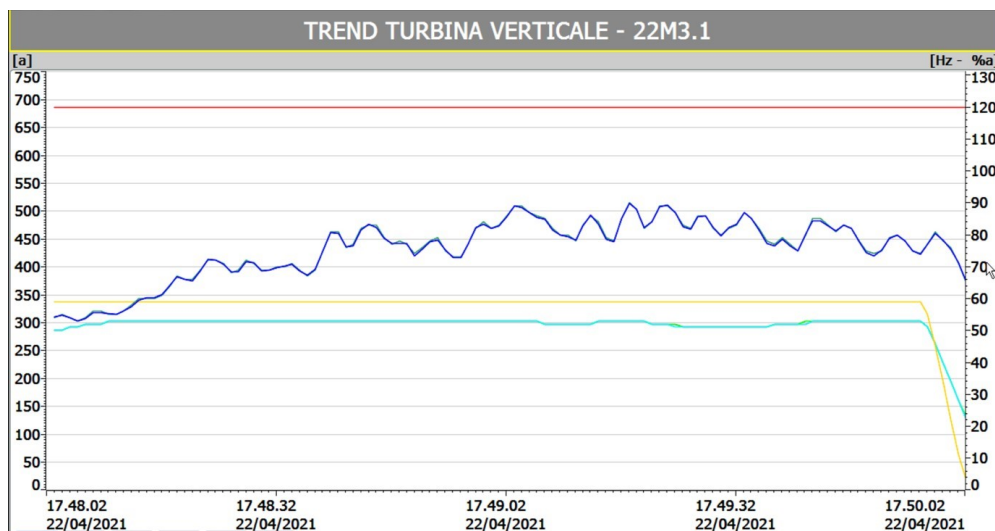


Fig.4.16 Assorbimento turbina verticale 22M

Dal grafico si può osservare che inizialmente la turbina sta assorbendo corrente tra i 300-350°, pari a circa il 60% di assorbimento. Ciò fa sì che anche la velocità delle coclee sia ridotta (linea celeste), ma tale situazione non è opportuna dal momento che sta sottosfruttando le potenzialità della macchina. Entrando nel set della turbina è possibile variare il livello di assorbimento desiderato (PID).

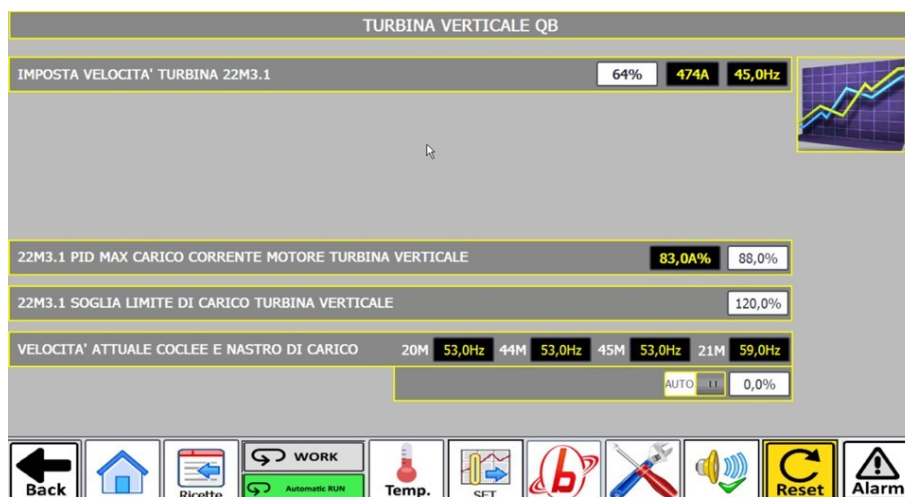


Fig.4.17 Set Turbina verticale 22M

Impostando il PID di carico massimo all'88% la macchina cerca di mantenere costante questo valore, perciò l'assorbimento di corrente cresce e consente di avere una maggiore produzione. Dal grafico vediamo che la corrente assorbita cresce e arriva a valori prossimi a quello desiderato anche se l'andamento è incostante. La situazione ideale sarebbe avere la linea blu di assorbimento orizzontale. L'incremento di velocità della turbina fa incrementare la velocità delle coclee che superano i 50Hz come osservabile in Fig4.17. Nel set è possibile anche impostare la soglia limite di carico (linea rossa) oltre la quale interviene l'inverter rallentando bruscamente la macchina e fermando le coclee. I dati di corrente della macchina vengono memorizzati in un file Exel log.

4.3.6.1 TURBINE ORIZZONTALI

La Fig.4.18 mostra il setting della turbina orizzontale 27M, indicando che il carico di corrente desiderato è pari all'85%.

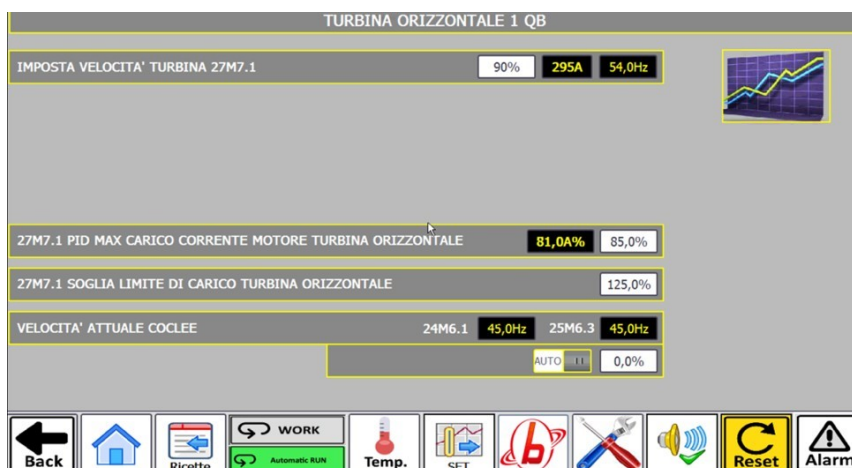


Fig.4.18 Set turbina orizzontale 27M

Dalla schermata di Fig.4.19 si può osservare, però, un comportamento molto irregolare della macchina che ha elevate fluttuazioni nell'assorbimento di corrente al quale segue un andamento analogo della velocità delle coclee.

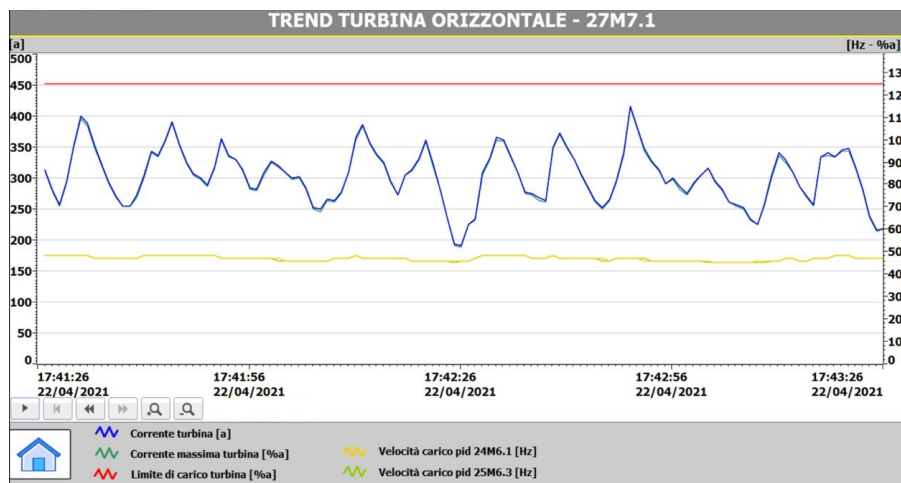


Fig.4.19 Assorbimento corrente Turbina orizzontale 27M

La Fig.4.20 mostra il grafico di assorbimento della corrente della turbina orizzontale 119M. Si può notare che la soglia limite di carico di corrente delle turbina (linea rossa) è stata posta all'80% e il pid di massimo carico è stato posto al 60%, perché nel caso di materiale molto leggero si ha un funzionamento della turbina più regolare.

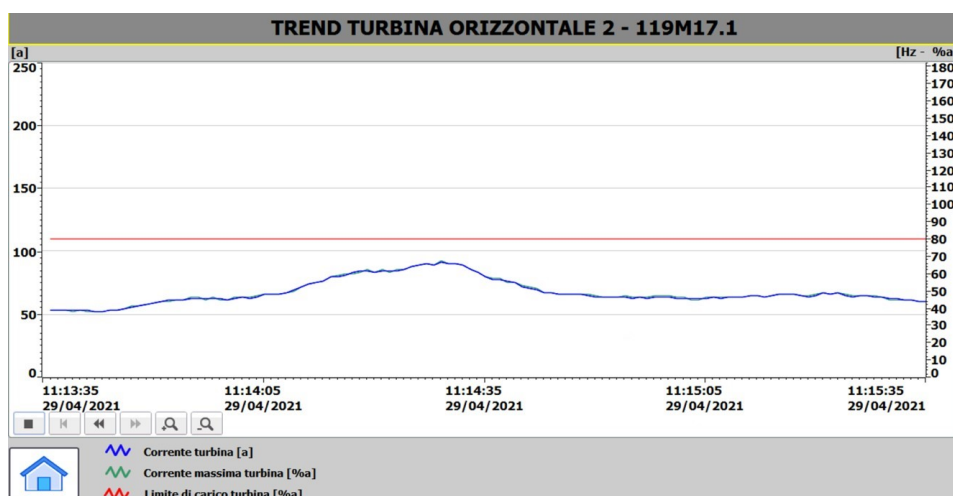


Fig.4.20 Assorbimento corrente Turbina orizzontale 119M

4.4 PRODOTTO IN USCITA

Durante le lavorazioni si è visto che è necessario valutare bene la velocità delle turbine in base al tipo di materiale in ingresso, in modo tale da avere un prodotto in uscita ottimale. Differenti tipi di cavo hanno bisogno di velocità differenti di lavorazione.

Se il materiale in input è sottile per aver un buon prodotto si deve far lavorare le turbine ad alta velocità con frequenze oltre i 70Hz, mentre usando materiale di grande pezzature la velocità

dovrebbe essere al massimo sui 50Hz, poiché a velocità superiori l'elevata produzione di calore per attrito ossiderebbe il rame.

Se il materiale in ingresso è di buona qualità, ovvero composto soltanto di cavi con nucleo metallico e guaina di plastica, il prodotto ottenuto dalla lavorazione è di ottima qualità. Ciò non accade se si immettono cavi comprensivi di connettori contenenti altri materiali come l'ottone. La qualità del prodotto, infatti, scende e in uscita troviamo questi materiali nel granulato di rame.



Fig.4.21 Prodotto input-output

4.5 MULTIMETRO

Tutte le misure elettriche sono visualizzabili dal PCL. I valori vengono visualizzati in tempo reale e sono disposti su quattro colonne. Le prime tre sono riferite alle fasi V1N, V2N, V3N mentre la quarta è la colonna riassuntiva. Il valore Psys corrisponde alla potenza richiesta dalla linea di separazione(Fig4.22).

REAL TIME			
V1N= 236.0 V	V2N= 232.4 V	V3N= 232.6 V	AN= 125.5 A
V12= 405.1 V	V23= 405.2 V	V31= 403.9 V	Vsys= 404.7 V
A1= 628.2 A	A2= 649.4 A	A3= 637.8 A	Asys= 638.5 A
P1= 132.3 kW	P2= 135.6 kW	P3= 131.6 kW	Psys= 399.6 kW
S1= 148.3 kVA	S2= 150.9 kVA	S3= 148.3 kVA	Ssys= 447.6 kVA
Q1= 039.5 kvar	Q2= 038.1 kvar	Q3= 042.5 kvar	Qsys= 120.1 kvar
TPF1= 0.892	TPF2= 0.898	TPF3= 0.887	TPFsys= 0.892
TAN1= 0.298	TAN2= 0.280	TAN3= 0.321	TANsys= 0.300
THD-V1N= 3.953 %	THD-V2N= 4.251 %	THD-V3N= 4.295 %	f= 50.00 Hz

Fig.4.22 Misure elettriche

4.6 CICLO DI PULIZIA

Nella Fig.4.23 troviamo la schermata del ciclo di pulizia. Un ciclo di pulizia può essere utile se si cambia produzione o nel caso di intasamento della linea.

E' possibile scegliere la durata del ciclo e programmare un tempo per la pulizia automatica. Nell'esempio in figura sono impostati 5 minuti di durata del ciclo da effettuare ogni 50 ore. Quando lo si attiva i ventilatori vanno al massimo della potenza in modo che turbine lavorino a vuoto.



Fig.4.23 Ciclo pulizia

4.7 CONSUMO ENERGIA

Nel sistema di controllo PLC è possibile consultare i consumi energetici. Nella finestra in Fig.4.24 vengono mostrati i consumi di tutta la linea e del tritratore della linea 1.



Fig.4.24 Consumo energia

Tali valori sono relativi a tutta l'energia consumata dall'accensione dell'impianto. Per ottenere il consumo in tempo reale è sufficiente premere il tasto reset.

4.8 CABINA MT

L'impianto, come detto, è dotato di una cabina di media tensione progettata secondo i dettami dell'industria 4.0, dotata anch'essa di un sistema PLC modello PM556 EM che consiste in un motore di acquisizione ed elaborazione dati.

Il PLC all'interno della cabina è dotato di uno schermo che garantisce l'interfaccia uomo macchina per l'accesso alle misure in tempo reale e alle misure storiche di tutte le macchine connesse. Inoltre

permette di ottenere informazioni sullo stato I/O, sugli allarmi e i grafici delle varie misure. Qui è anche possibile consultare gli assorbimenti di potenza e l'energia consumata (Fig.4.25)

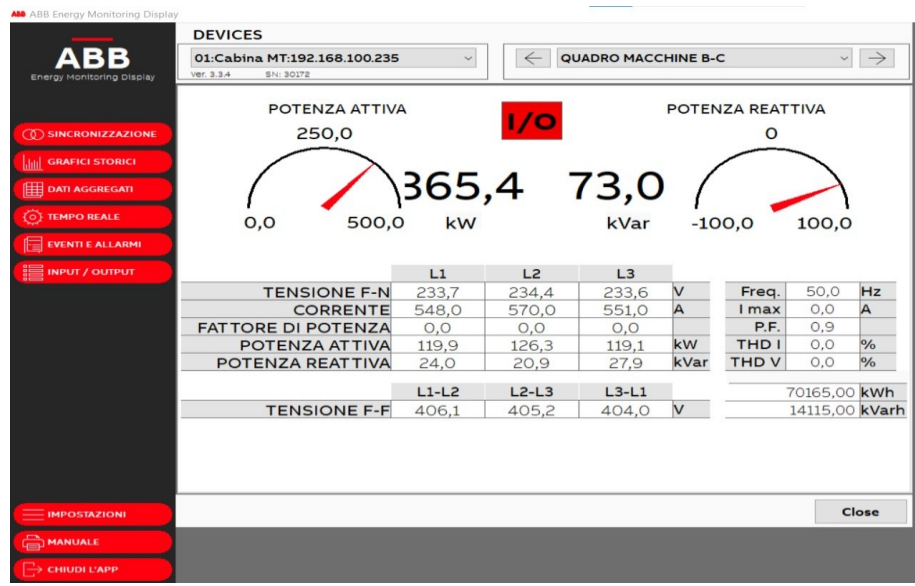


Fig.4.25 Finestra PLC cabina MT

BIBLIOGRAFIA

- [1] <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circolare-definizione-importanza-e-vantaggi>
- [2] <https://www.ecoage.it/petrolio-club-roma.htm>
- [3] <https://www.overshootday.org>
- [4] <https://www.isprambiente.gov.it/it/archivio/notizie-e-novita-normative/notizie-ispra/2020/0>
- [5] Del Fabbro, Roberto: *L'economia del girotondo: Dalla plastica ai satelliti: il futuro è nei rifiuti*, Milano, Tecniche Nuove, 2017, pp. 161-163
- [6] <https://www.sfridoo.com/economia-circolare>
- [7] <http://www.bestup.it/new/images/stories/news/pdf/dalla%20culla%20alla%20culla.pdf>
- [8] <https://economiecircolare.com/certificazione-cradle-to-cradle-moda-fashion-edilizia/>
- [9] <https://economiecircolare.com/glossario/paradigma-delle-r/>
- [10] www.miniambiente.it
- [11] www.sviluppoeconomico.gov.it
- [12] www.circulareconomynetwork.it
- [13] <https://sciencedirect.com>
- [14] <https://guidettisrl.com>
- [15] <https://www.stokkermill.com>

[16] <https://www.eldan-recycling.com>

[17] <https://www.buntingmagnetics.it>

[18] www.calamit.it

[19] www.gaussmagneti.it

[20] <https://it.wikipedia.org/wiki/Lisciviazione>

[21] <https://microbewiki.kenyon.edu/>

[22] Bano Recycling S.r.l. Manuale separatore magnetico overbelt

[23] <https://mobil.it>

[24] <https://conou.it>