**PHARE TWINNING PROJECT RO2004/IB/EN-07**
Implementation and enforcement
of the environmental Acquis
focussed on industrial waste management

# 8

# LINEE GUIDA SUI RIFIUTI SPECIALI

# PCB

2007

*A cura di*:

Sabrina Sicher e Donatella Grimaldi: ***Short Term Experts ARPA Liguria***

Stefania Balzamo: ***Short Term Experts APAT***

*Alla stesura di questa linea guida, hanno collaborato*:

Fica Boldea, Mirela Ghimpau: REPA della Regione Sud Est

Aurelio Coppola: Resident Twinning Adviser

Clara Oprea e Irinel Oprea: Twinning Office

# INDICE

1. INTRODUZIONE ---------- 2
2. GLOSSARIO ---------- 2
3. INQUADRAMENTO NORMATIVO ---------- 3
*3.1 Inquadramento normativo europeo* ---------- 3
*3.2 Inquadramento normativo romeno* ---------- 3
4. LA PROBLEMATICA DI SETTORE ---------- 4
*4.1 Uso dei PCB nei trasformatori* ---------- 7
*4.2 Uso dei PCB nei condensatori* ---------- 8
*4.3 Uso dei PCB, come liquido idraulico e diatermico* ---------- 9
5. SPECIFICITÀ DEL SETTORE IN ROMANIA/REGIONE SUD-EST ---------- 10
*5.1 Tipologia di apparecchi contenenti PCB presenti in Romania e nella Regione Sud-Est* ---------- 10
*5.2 Impianti di trattamento/smaltimento apparecchi contenenti PCB in Romania e nella Regione Sud-Est* ---------- 10
*5.3 Adempimenti dei detentori di apparecchi contenenti PCB* ---------- 11
6. MODALITÀ DI GESTIONE E SMALTIMENTO - LINEE GUIDA OPERATIVE ---------- 11
*6.1 Tecniche di stoccaggio degli apparecchi contenenti PCB* ---------- 12
6.1.1 Tecniche da tenere presente nello stoccaggio di rifiuti contenuti in fusti e altre tipologie di contenitori ---------- 15
6.1.2 Tecniche per migliorare la manutenzione dei depositi di rifiuti ---------- 17
6.1.3 Tecniche per ottimizzare il controllo delle giacenze nei depositi di rifiuti ---------- 18
6.1.4 Tecniche di movimentazione dei rifiuti negli impianti di stoccaggio ---------- 19
6.1.5 Attività di movimentazione connesse con il travaso dei rifiuti ---------- 20
*6.2 Tecniche di decontaminazione* ---------- 21
6.2.1 Generalità e classificazione ---------- 21
6.2.2 Sostituzione del liquido isolante contaminato (refilling o retrofilling) ---------- 23
6.2.3 Processi di tipo chimico basati sulla dealogenazione dei PCB nel liquido isolante ---------- 24
6.2.4 Individuazione di possibili tecniche alternative innovative ---------- 30
7. VALUTAZIONE ECONOMICHE ---------- 35
8. BIBLIOGRAFIA ---------- 37

# 1. INTRODUZIONE

La problematica relativa ai PCB emerse in seguito a gravi incidenti derivanti da perdite di tale sostanza verificatesi nel 1968 in Giappone.
A seguito di tali episodi si ravvisò la necessità di una specifica regolamentazione normativa in materia, mirante al controllo della produzione, dell'utilizzo e dello smaltimento dei PCB.

A livello europeo tale processo di regolamentazione fu avviato a partire dagli anni '70 con la direttiva 76/403/CEE del 6 aprile 1976 che mise in evidenza, per la prima volta, i rischi per la salute e per l'ambiente dovuti all'abbandono e al deposito incontrollato di PCB.
Qualche mese più tardi, il 27 luglio 1976 venne emanata un'ulteriore direttiva (dir. 76/769/CEE) che pose restrizioni all'immissione sul mercato e all'uso di sostanze e preparati pericolosi tra cui i PCB a cui seguirono una serie di modifiche tra cui la dir. 85/467/CEE.
Le basi per una regolamentazione più organica dell'intera problematica PCB furono poste dalla sopra citata direttiva 96/59/CE del 16 settembre 1996. Tale normativa ha portato ad un totale riesame dell'intera materia. Si prese atto che lo smaltimento dei PCB costituiva un problema per quegli Stati Membri che non avevano autonoma capacità di smaltimento. Conseguentemente venne delineato un meccanismo valutativo che consentisse la predisposizione per ogni Stato membro di un inventario degli apparecchi presenti sul proprio territorio con l'indicazione dei quantitativi da gestire.

Il presente documento si rivolge sia ai soggetti pubblici, che hanno l'obbligo di fare applicare la direttiva 76/769/CEE, sia ai detentori di apparecchi contenenti PCB che devono valutare quale sistema di trattamento o smaltimento è più consono per le loro esigenze tecniche ed economiche.
Nel seguito dopo un breve inquadramento del problema PCB, vengono dettagliate le diverse tecnologie attualmente esistenti per il trattamento o lo smaltimento degli oli contenenti PCB.

# 2. GLOSSARIO

PCB:

1.i policlorodifenili;
2. i policlorotrifenili;
3. il monometiltetraclorodifenilmetano, il monometildiclorofenilmetano, monometildibromodifenilmetano;
4. ogni miscela che presenti una concentrazione complessiva di qualsiasi delle suddette sostanze superiore allo 0,005% in peso.

DECONTAMINAZIONE - l'insieme delle operazioni che rendono riutilizzabili o riciclabili o eliminabili nelle migliori condizioni gli apparecchi, gli oggetti, le sostanze o i fluidi contaminati da PCB e che possono comprendere la sostituzione, cioè l'insieme delle operazioni che consistono nel sostituire ai PCB un fluido adeguato che non contiene PCB.

SMALTIMENTO - le operazioni D8, D9, D10, D12 (limitatamente al deposito sotterraneo sicuro e situato in profondità localizzato in una formazione rocciosa asciutta e esclusivamente per apparecchi contenenti PCB e PCB usati che non possono essere decontaminati) e D15 di cui all'allegato IIA della Direttiva 75/442/CEE e s.m.i.

ASKAREL - è il termine generico con cui è identificata una categoria di liquidi isolanti resistenti al fuoco. Essi sono tipicamente costituiti da policlorobifenili con o senza aggiunta di policlorobenzene. I nomi commerciali degli Askarel variano a seconda del paese di origine, della società produttrice, e della quantità di PCB presente: Aroclor (Stati Uniti), Fenclor e Apirolio (Italia), Clophen (Germania) Pyralene e Phenoclor (Francia), Kanechlor (Giappone), Sovtel (ex URSS), Delor e Delorene (Cecoslovacchia), Orophene (ex Repubblica Democratica Tedesca).

CEI – Comitato Elettrotecnico Italiano

CEN - European Committee for Normalization

CENELEC - Ente normatore europeo per il settore elettrotecnico ed elettronico. L'Italia è rappresentata presso il CENELEC dal CEI

DEALOGENAZIONE - Processo chimico in cui viene modificata la struttura chimica del PCB mediante la rimozione della molecola di cloro e conversione in sali inerti.

# 3. INQUADRAMENTO NORMATIVO

## *3.1 Inquadramento normativo europeo*

- Direttiva 96/59/CE Smaltimento de policlorodifenili e dei policloro trifenili – PCB/PCT
- CENELEC BTTF 116-1 (Draft 2004): "*Fluids for electrotechnical applications – Standard for the inventory control, handling, decontamination and/or disposal of electrical equipment and insulating fluids containing PCBs*".

## *3.2 Inquadramento normativo romeno*

- Decisione del Governo Romeno n. 173 del 13 marzo 2000

- Planul Regional de eliminare a materialeror si echipamentelor cu continut de PCB/PCT – Galati 2005
- Piano Nazionale della Romania per lo smaltimento degli apparecchi contenenti PCB.

## 4. LA PROBLEMATICA DI SETTORE

Con il termine generico di PCB (policlorobifenile) si intende una famiglia di 209 composti chimici, chiamati cogeneri e aventi formula generica C12H10-nCln con n≤10.

Tali sostanze sono classificate come sostanze pericolose (N. CAS: 1336-36-3, N. CE: 215-648-1, N. EINECS: 602-039-00-4, Xn “nocivo”, N “ecotossico”, Frasi R: 33 “Pericolo di effetti cumulativi”, 50/53 “Altamente tossico per gli organismi acquatici, puo’ provocare a lungo termine effetti negativi per l’ambiente acquatico”, Frasi S: 2 “Conservare fuori della portata dei bambini”, 35 “Non disfarsi del prodotto e del recipiente se non con le dovute precauzioni”, 60 “Questo materiale e il suo contenitore devono essere smaltiti come rifiuti pericolosi”, 61 “Non disperdere nell’ambiente. Riferirsi alle istruzioni speciali/schede informative in materia di sicurezza”). Tali sostanze sono, inoltre, caratterizate da forte persistenza nell’ambiente a causa della bioaccumulabilità lungo la catena alimentare.

Ogni congenere si differenzia dagli altri sia per numero di atomi di cloro sia per la loro diversa collocazione nella molecola: in questo modo si determina la classificazione e nomenclatura, nonché il peso molecolare di ciascun congenere.
I PCB si presentano a temperatura ambiente sotto forma di cristalli incolore ed inodore e sono chimicamente molto stabili: fino alla temperatura di 170°C non possono essere ossidati anche in presenza di metalli o di umidità, sono resistenti agli alcali ed agli acidi; non attaccano i metalli, sono poco biodegradabili, e poco volatili.
Sebbene insolubili in acqua, sono solubili in solventi organici ed in idrocarburi, in questa forma si possono spandere su grandi superfici formando film sottilissimi.

Sul mercato i PCB sono stati commercializzati sotto forma di miscele formate da un complesso mix di congeneri a cui venivano addizionati solventi clorurati, identificate da svariate sigle commerciali, tra le quali vanno ricordate quelle della famiglia Aroclor, il cui marchio fu registrato dalla Monsanto.
Queste miscele si presentano come liquidi viscosi di colore chiaro e possono avere un lieve odore aromatico e pungente, simile a lubrificante bruciato, poiché ad essi vengono addizionati solventi clorurati.

A seconda della composizione chimica delle diverse miscele, i PCB vennero utilizzati in una vasta gamma di applicazioni, da plastificante per carte speciali, a pitture, carte carbone, plastiche, carta "NCR", grazie alle loro comuni caratteristiche di stabilità chimica, bassa infiammabilità; ma l'utilizzo maggiore di questi prodotti è stato tuttavia nell'industria elettrica.
Infatti più di qualsiasi altro fattore, le proprietà dielettriche e termiche hanno creato il successo di questi composti, chimicamente non reattivi.
Essi, infatti, sono altobollenti, con punti di ebollizione intorno ai 300°C a pressione ambiente e, a seconda del grado di clorurazione[1], il punto di fiamma è compreso tra i 170 e 200°C, ossia molto più alto rispetto a quello degli oli minerali; inoltre, allontanando la sorgente di accensione, la fiamma si spegne. Il pericolo di esplosioni è molto limitato poiché questa loro peculiare caratteristica rende i PCB praticamente incombustibili.
Tali sostanze sono capaci di resistere alle alte temperature senza subire significativi degradi poiché iniziano a decomporsi in acido cloridrico ed anidride carbonica solo oltre 800-1000°C.
Hanno una bassa tensione di vapore, cioè a temperatura ambiente (25°C) e pressione atmosferica non tendono ad evaporare facilmente, riducendo la probabilità di esposizioni anche con concentrazioni di diverse migliaia di parti per milione.
Questo spiega il motivo per cui le miscele a base di PCB sono state utilizzate in modo particolare come fluidi dielettrici isolanti all'interno di trasformatori, condensatori ed altre apparecchiature elettriche.

In generale, gli utilizzi collegati alle diverse applicazioni, sono stati catalogati dalla Direttiva CEE 76/769/CEE in:

- Sistemi aperti dissipativi
- Sistemi chiusi controllabili

Questa classificazione ha origine dalla potenzialità di propagazione nell'ambiente connessa al loro uso ed è utile poiché indica le modalità in cui il PCB può essere rilasciato, in modo intenzionale o non intenzionale, e quindi creare problemi di contaminazione ambientale.
Grazie alla scoperta dell'elevata pericolosità dei PCB, il loro utilizzo sia puro, sia in liquidi a base di miscele di PCB si è notevolmente ridotto fin dagli anni '70, grazie agli sforzi di conversione delle

[1] il grado di clorurazione aumenta aumentando il numero di atomi di cloruri sostituiti all'interno della formula bruta $C_{12}H_{10-n}Cl_n$ con $n \leq 10$.

industrie produttrici ed ai limiti imposti dagli organismi legislativi: le uniche applicazioni attualmente in uso sono quelle correlate ai sistemi chiusi, soprattutto come fluidi dielettrici all'interno dei trasformatori e condensatori.

Si considerano "chiusi" quei sistemi che non permettono la dispersione dei PCB nell'ambiente e dai quali possano essere recuperati.
In questo modo i PCB rimangono all'interno di una sede sicura fino alla fine della vita operativa delle apparecchiature in cui sono rinchiusi, a meno che non occorrano incidenti quali incendi o guasti meccanici.
Nella tabella C.1 si riassumono, a titolo indicativo di massima, le principali applicazioni che fanno parte di questa categoria.

| SISTEMI CHIUSI | |
|---|---|
| LIQUIDO ISOLANTE IN TRASFORMATORI | CENTRALI TERMOELETTRICHE, NUCLEARI<br>NAVI, ALCUNE INSTALLAZIONI ELETTRICHE FERROVIARIE<br>GENERATORI, EDIFICI, TELEVISORI |
| LIQUIDO ISOLANTE PER CONDENSATORI | CENTRALI, INDUSTRIE, ALCUNE INSTALLAZIONI ELETTRICHE FERROVIARIE, MEZZI DI TRAZIONE ELETTRICA<br>MOTORI, APPARECCHI TELEGRAFICI, LAMPADE A MERCURIO E FLUORESCENTI<br>TELEVISORI, FRIGORIFERI, LAVATRICI, CONDIZIONATORI |
| CONDUTTORE DI CALORE | APPARECCHI PER RISCALDAMENTO E RAFFREDDAMENTO |
| ALTRI USI | CAVI ELETTRICI, LIQUIDO IDRAULICO |

**Tabella 1:** principali applicazioni di PCB nei Sistemi Chiusi

Alcune di queste applicazioni sono tuttora permesse dalla legislazione vigente, e meritano per tanto di essere approfondite.

## *4.1 Uso dei PCB nei trasformatori*

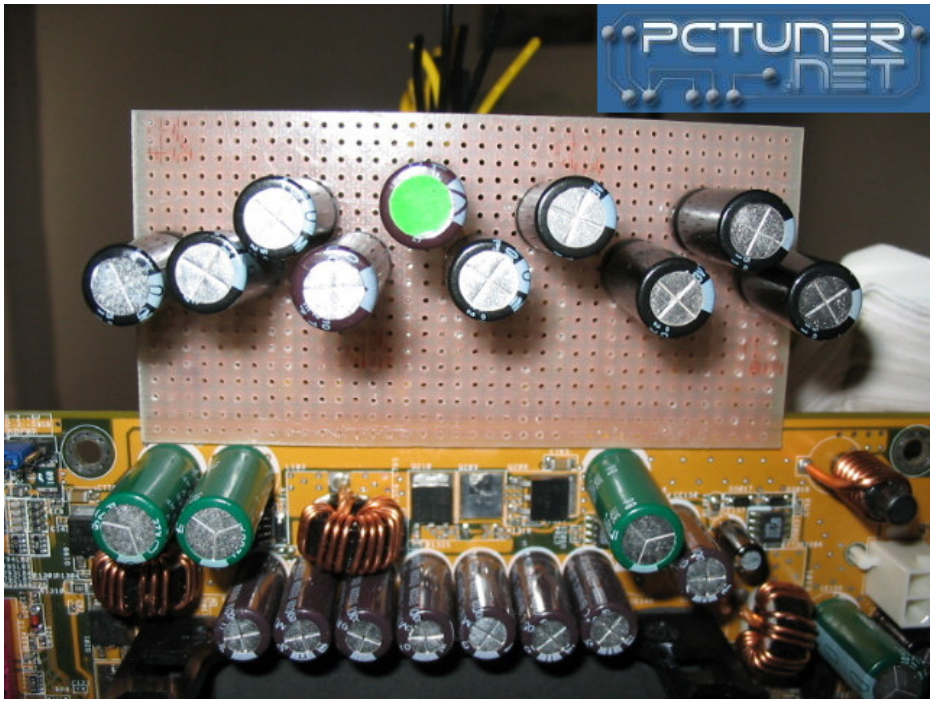
I trasformatori sono componenti fondamentali del processo di generazione, trasmissione e distribuzione di energia elettrica. Per rispondere ad esigenze di efficienza ed economicità, il trasporto e l'utilizzo dell'energia elettrica richiede che alcuni parametri vengano modificati, in generale corrente e tensione.
L'impiego del trasformatore, mutando secondo convenienza i valori dei parametri della potenza, consente infatti di minimizzare quelle perdite che avvengono nel trasporto dell'energia elettrica.

Un trasformatore, in genere, è composto da una cassa metallica chiusa contenente due set di conduttori elettrici (avvolgimenti) tipicamente di rame calettati su un nucleo magnetico.
Il nucleo utilizzato per la costruzione di trasformatori di solito è di del tipo a tre colonne ed è composto da lamierini magnetici di ferro al silicio a grani orientati isolati su entrambi i lati con vernice inorganica resistente al calore (Carlite) per evitare lo stabilirsi di correnti parassite (Foucault). Esso è sostenuto da armature metalliche (a volte in legno per piccoli trasformatori).
Gli avvolgimenti sono fatti tipicamente di conduttori di rame isolati con vernice o con carta isolante Kraft. Per permettere un adeguato raffreddamento, secondo bisogno, all'interno degli avvolgimenti vengono posti canali totali o parziali.
La cassa è riempita di liquido che funge da isolante elettrico e da scambiatore di calore e che rappresenta tipicamente il 25 – 30% in peso del trasformatore.
Il PCB, in miscela tipica con tri-clorobenzene in rapporto di circa 45/50%, è un ottimo isolante con eccezionali caratteristiche termiche ed è commercialmente conosciuto con il nome Askarel[2] .

[2] ASTM D 901-56 "liquido isolante di tipo ininfiammabile, che per decomposizione da arco elettrico sviluppa soltanto miscele gassose, non esplosive".

Nei trasformatori i PCB hanno avuto applicazioni molto estese a partire dagli anni ’50 poiché difficilmente possono incendiarsi ed anche in caso d’incendio esterno non lo alimentano; questa garanzia di sicurezza ne ha favorito la diffusione nelle reti di distribuzione dell'energia elettrica, vicino ai punti di consumo, soprattutto in luoghi di potenziale pericolo d’incendio, come industria petrolchimica grandi magazzini, sale per riunioni, uffici ed in genere luoghi con pericolo d’incendio.
Tuttavia è noto da tempo che i PCB possono formare, in caso di sviluppo di un incendio o di termossidazione incontrollata, (a temperature superiori ai 300°C), prodotti altamente pericolosi per l'uomo e l'ambiente, quali i poli-cloro-dibenzo-diossine (PCDD – 75 congenri possibili) e i poli-cloro-dibenzo-furani (PCDF – 135 congeneri possibili).
Poiché la durata di vita di queste apparecchiature è pari a circa 30-40 anni con uso continuato, il problema della presenza di PCB è ancora oggi rilevante per la capillare diffusione nel territorio associata alla generazione, trasporto, distruzione ed utilizzo di energia.

## *4.2 Uso dei PCB nei condensatori*




Le caratteristiche chimiche e fisiche dei liquidi a base di PCB ne fanno un fluido dielettrico pressoché ideale per condensatori. Anche i condensatori sono formati da una cassa metallica chiusa ermeticamente e contenente una parte attiva formata da elementi capacitivi.

Ogni elemento capacitivo è costituito da fogli di alluminio, tra i quali si inseriscono come materiale isolante fogli di plastica e/o di carta impregnata, ad esempio, di PCB.

I settori di applicazione dei condensatori con tali liquidi isolanti sono:

- Rifasamento di reti elettriche AT MT e BT
- Rifasamento di impianti industriali
- Sale prova.
- Laboratori di ricerca
- Rifasamento di lampade a scarica elettrica nei gas
- Avviamento di motori elettrici
- Rifasamento di motori elettrici, forni ad arco e ad induzione

Nel settore dell'illuminazione sono molte diffusi nelle lampade fluorescenti: nelle abitazioni, ogni lampada è necessariamente equipaggiata con un piccolo condensatore, mentre nei grandi edifici commerciali ed industriali è possibile la compensazione di interi gruppi di lampade con un unico condensatore

I motori elettrici monofase, nonché i motori trifase collegati ad una rete monofase, richiedono l'uso di condensatori. Questi apparecchi sono molto diffusi nei settori degli elettrodomestici (televisori, radio), dei bruciatori di olio combustibile, delle pompe e delle macchine per ufficio, nei computer e nelle autovetture (nei sistemi di accensione, autoradio ecc).

Infine gli impianti per il riscaldamento elettrico ad induzione ed altri impianti che consumano grandi quantità di energia elettrica, come trasformatori, raddrizzatori, saldatrici, forni ad arco voltaico, richiedono condensatori con una grossa potenza di compensazione.

Negli anni '60, l'uso di PCB nei condensatori si era affermato in misura ancora maggiore che nei trasformatori, arrivando a coprire il 90% di tutto il mercato. Ma negli anni '70 in questo settore il consumo di PCB si è dimezzato.

## *4.3 Uso dei PCB, come liquido idraulico e diatermico*

L'uso di liquidi sintetici a base di PCB come liquido idraulico e diatermico ad alto tasso di clorurazione per il funzionamento di varie apparecchiature, si è diffuso per tutti gli anni '70 senza flessioni, anche grazie alle disposizioni CEE che prevedevano la sostituzione degli oli minerali, vista la loro pericolosità nel caso di incendi. Tuttavia negli anni '80 è iniziata la loro sostituzione con altri prodotti.

# 5. SPECIFICITÀ DEL SETTORE IN ROMANIA/REGIONE SUD-EST

La norma di riferimento è rappresentata dalla Decisione del Governo n. 173 del 13 marzo 2000 che regolamenta il regime speciale relativo alla gestione e al controllo dei PCB e dei composti simili.

La decisione recepisce integralmente la direttiva del Consiglio europeo n. 59 del 16 settembre 1996 concernente lo smaltimento dei policlorodifenili e policlorotrifenili (PCB/PCT).

La norma si applica, quindi, a tutte le apparecchiature con volume superiore ai 5 $dm^3$ contenenti PCB in concentrazione superiore ai 50 ppm.

## *5.1 Tipologia di apparecchi contenenti PCB presenti in Romania e nella Regione Sud-Est*

Il Piano regionale di Galati per lo smaltimento degli apparecchi contenenti PCB riporta l'elenco delle apparecchiature presenti sul territorio regionale, suddividendoli tra trasformatori e condensatori. In particolare il numero di apparecchi presenti nella Regione è riportato nella tabella sottostante, in cui vengono differenziati tra apparecchi funzionanti e non.

| DATI PIANO REGIONALE DI SMALTIMENTO | | | |
|---|---|---|---|
| Condensatori non funz. | Condensatori funz. | Trasformatori non funz | Trasformatori funz |
| **9812** | 6972 | 31 | 128 |

Si evidenzia che per lo più gli apparecchi sono condensatori.

Il piano riporta anche le tempistiche di smaltimento di tali apparecchi, con scadenze entro il 2010 per gli apparecchi fuori uso e al 2020 per tutti gli altri.

## *5.2 Impianti di trattamento/smaltimento apparecchi contenenti PCB in Romania e nella Regione Sud-Est*

Il Piano Regionale di Galati per lo smaltimento degli apparecchi contenenti PCB evidenzia come, in generale, le tecnologie per l'eliminazione dei PCB sono troppo costose. L'incenerimento, infatti, richiede una temperatura approssimativamente di 1200 ºC che necessita di specifici sistemi di purificazione delle emissioni e di una efficacia di distruzione del 99%. L'incenerimento nei forni rotativi dei cementifici non e' possibile proprio per l'impossibilita' di abbattimento degli inquinanti atmosferici. La migliore tecnologia sarebbe la dealogenazione che pero' ha costi troppo elevati.

Attualmente in Romania è autorizzato un solo impianto di incenerimento di PCB a Timisoara, mentre nella Regione di Galati è autorizzato un impianto che effettua l'operazione di estrazione dell'olio che poi viene inviato a smaltimento fuori nazione.

## *5.3 Adempimenti dei detentori di apparecchi contenenti PCB*

La norma rumena prevede che:

- Gli agenti economici che detengono apparecchi contenenti **sono obbligati a notificarle** alle LEPA della provincia in cui si trova l'apparecchiatura, utilizzando la modulistica prevista dall'allegato 2 alla Decisione di Governo. La prima notifica era obbligatoria entro il 31 dicembre 2001. Sulla base di tali informazioni le LEPA hanno istituito gli inventari che devono trasmettere annualmente al Segretariato per i PCB. Qualora i detentori di apparecchi non riescano ad effettuare le analisi per verificare la concentrazione di PCB all'interno delle apparecchiature è necessario applicare la normativa considerando l'apparecchiatura contaminata.

- Tutti gli agenti economici dovevano inviare alla LEPA entro il 31/12/2002 i piani di smaltimento degli apparecchi contenenti PCB detenuti, utilizzando il modello riportato nell'allegato 7 alla Decisione di Governo.

- Tutte le apparecchiature **devono essere munite di apposite etichette** in confromità a quanto previsto negli allegati 3, 4 e 5 alla Decisione di Governo.

- Qualora un apparecchio contenente PCB debba essere trasferito da uno stabilimento ad un altro è necessario informare la LEPA utilizzando il formulario previsto nell'allegato 6 alla Decisione di Governo e una copia del formulario stesso deve essere inviata ai Vigili del Fuoco.

- Tutti gli apparecchi contenenti PCB non in funzione devono essere smaltiti entro il 31/12/2010, mentre tutti gli altri possono essere smaltiti alla fine della loro vita operativa.

# 6. MODALITÀ DI GESTIONE E SMALTIMENTO - LINEE GUIDA OPERATIVE

Nella presente sezione sono trattate separatamente le tecnologie di decontaminazione da quelle di stoccaggio.

Con riferimento alle attività di decontaminazione di trasformatori e di apparecchiature elettriche e di liquidi isolanti contaminati da PCB ci è basati sul principio della "buona regola dell'arte" in conformità alle direttive europee, alle leggi italiane ed alle norme tecniche di riferimento (IEC, CEN, CENELEC, CEI). Di particolare rilevanza su tale tema risulta la Norma CEI 10-38 (Edizione 2002) "Guida tecnica per l'inventario, il controllo, la gestione, la decontaminazione e/o lo smaltimento di

apparecchiature elettriche e liquidi isolanti contenenti PCB".
Inoltre, si evidenzia che il Bref "BAT per le industrie di trattamento dei rifiuti" (bozza gennaio 2004) tratta molto marginalmente e in modo poco approfondito le tecnologie di decontaminazione dal PCB, mentre nelle sezioni 2.1.2 e 4.1.4 approfondisce le tecniche di stoccaggio dei rifiuti. Pertanto le tecnologie di stoccaggio riportate nel presente capitolo si riferiscono solo agli apparecchi contenenti PCB, ai contenitori ed ai liquidi isolanti giunti a fine vita operativa e classificati come rifiuti ai sensi della direttiva sui rifiuti, nonché a tutti gli altri rifiuti (p. es. materiali contaminati) classificabili come "PCB". Le stesse tecnologie non si applicano e non risultano applicabili per apparati elettrici in esercizio contenenti PCB, in temporaneo fermo tecnico e/o soggetti ad operazioni di manutenzione ordinarie e straordinaria (Norme CEI 10-38) ed ai siti di dislocazione di tali apparati e a quelli ove si effettuano le predette operazioni manutentive (sia "on-site" che in centri attrezzati).

## *6.1 Tecniche di stoccaggio degli apparecchi contenenti PCB*

Di seguito vengono individuate le migliori tecniche applicabili agli impianti di stoccaggio dei rifiuti, in particolare di quelli pericolosi. Tra queste tipologie di impianti rientrano anche quelle che effettuano lo stoccaggio di trasformatori e rifiuti contenenti PCB. Le tecniche generali individuate, quelle di manutenzione, movimentazione, separazione e controllo hanno una valenza generale e risultano applicabili a tutti gli impianti di stoccaggio di rifiuti pericolosi e non.

La prima fase dello stoccaggio di rifiuti comune a tutte le tipologie di impianto è quella del controllo dei materiali, degli apparecchi e dei rifiuti in ingresso che prevede la messa a punto di:

1. procedure di pre-accettazione, consistenti, in particolare, nella verifica della presenza e della corretta compilazione dei documenti di trasporto e di accompagnamento dei rifiuti, oltre che della corrispondenza tra documentazione di accompagnamento e i contenitori o rifiuti conferiti mediante controllo visivo;
2. procedure per l'ammissione allo stoccaggio finalizzate ad accertare le caratteristiche dei materiali, degli apparecchi e del rifiuto in ingresso in relazione al tipo di autorizzazione e ai requisiti richiesti per i materiali in uscita da avviare successivamente alla decontaminazione o allo smaltimento.

L'operatore qualificato ed autorizzato che gestisce l'impianto di stoccaggio dei rifiuti deve, anche, sorvegliare il rispetto da parte del trasportatore autorizzato delle norme di sicurezza, la conformità dei requisiti ADR/RID e la presenza delle misure specifiche adottate per prevenire e/o mitigare irragionevoli rischi per i lavoratori, per la salute pubblica e per l'ambiente derivanti da anomalie, guasti o perdite accidentali dagli apparecchi e contenitori contenenti prodotti pericolosi e persistenti.

Ai fini dell'individuazione delle aree idonee alla localizzazione degli impianti dovrà essere garantito che:

a. le aree di localizzazione degli impianti siano scelte secondo criteri che privilegiano zone per insediamenti industriali ed artigianali, zone industriali o di servizi dismesse individuate dalle regioni, in accordo ai requisiti di compatibilità ambientale e in base alla disponibilità di raccordi e/o scali ferroviari e di reti stradali di scorrimento con facilità di accesso da parte di carri ferroviari e automezzi pesanti;
b. il centro sia delimitato con idonea recinzione lungo tutto il suo perimetro. Norme di buona pratica ambientale suggeriscono la predisposizione di un'adeguata barriera esterna di protezione, in genere realizzata con siepi, alberature e schermi mobili, atti a minimizzare l'impatto visivo dell'impianto. Dovrebbe inoltre essere garantita la manutenzione nel tempo di detta barriera di protezione ambientale;
c. l'impianto deve garantire la presenza di personale qualificato ed adeguatamente addestrato nel gestire gli specifici rifiuti, evitando rilasci nell'ambiente, nonché sulla sicurezza e sulle procedure di emergenza in caso di incidenti;
d. a chiusura dell'impianto sia previsto un piano di ripristino al fine di garantire la fruibilità del sito in coerenza con la destinazione urbanistica dell'area;
e. l'autorizzazione concessa all'impianto indichi la capacità di stoccaggio, in particolare per quanto riguarda i PCB, in modo da garantire che essa non venga superata, e richieda esplicitamente che i rischi per l'ambiente o per la salute siano minimizzati.

Modalità di stoccaggio dei rifiuti appropriate e realizzate in condizioni di sicurezza contribuiscono a ridurre la generazione di emissioni indesiderate ed i rischi di sversamenti. Uno stoccaggio separato per tipologie di rifiuti omogenee è necessario per evitare incidenti dovuti alla reazione di sostanze tra loro incompatibili e come misura per prevenire l'aggravarsi di eventuali eventi accidentali.

Lo stoccaggio dei rifiuti, all'interno dell'impianto di trattamento, pertanto, deve essere effettuato nel rispetto di alcuni principi di carattere generale quali:

a. devono essere definite adeguate procedure di stoccaggio nel caso in cui i mezzi di trasporto dei rifiuti debbano essere parcheggiati nel sito durante la notte o in giorni festivi, qualora l'insediamento non sia presidiato in tali periodi;
b. le aree di stoccaggio devono essere ubicate lontano da corsi d'acqua e da altre aree sensibili e realizzate in modo tale da eliminare o minimizzare la necessità di frequenti movimentazioni dei rifiuti all'interno dell'insediamento;
c. tutte le aree di stoccaggio devono essere dotate di un opportuno sistema di copertura;
d. le aree di stoccaggio devono essere adeguatamente protette, mediante apposito sistema di canalizzazione, dalle acque meteoriche esterne;

e. deve essere previsto un adeguato sistema di raccolta ed allontanamento delle acque meteoriche, con pozzetti di raccolta muniti di separatori per oli e vasca di raccolta delle acque di prima pioggia;
f. le aree di stoccaggio devono essere chiaramente identificate e munite dell'Elenco Europeo dei rifiuti, di cartellonistica, ben visibile per dimensioni e collocazione, indicante le quantità, i codici, lo stato fisico e le caratteristiche di pericolosità dei rifiuti stoccati nonché le norme di comportamento per la manipolazione dei rifiuti e per il contenimento dei rischi per la salute dell'uomo e per l'ambiente;
g. deve essere definita in modo chiaro e non ambiguo la massima capacità di stoccaggio dell'insediamento e devono essere specificati i metodi utilizzati per calcolare il volume di stoccaggio raggiunto, rispetto al volume massimo ammissibile. La capacità massima autorizzata per le aree di stoccaggio non deve mai essere superata;
h. deve essere assicurato che le infrastrutture di drenaggio delle aree di stoccaggio siano dimensionate in modo tale da poter contenere ogni possibile spandimento di materiale contaminato e che rifiuti con caratteristiche fra loro incompatibili non possano venire in contatto gli uni con gli altri, anche in caso di sversamenti accidentali;
i. deve essere prevista la presenza di sostanze adsorbenti, appositamente stoccate nella zona adibita ai servizi dell'impianto, da utilizzare in caso di perdite accidentali di liquidi dalle aree di conferimento e stoccaggio; deve essere inoltre garantita la presenza di detersivi-sgrassanti;
j. gli accessi a tutte le aree di stoccaggio (p.es. accessi pedonali e per i carrelli elevatori) devono sempre essere mantenuti sgomberi, in modo tale che la movimentazione dei contenitori non renda necessaria lo spostamento di altri contenitori che bloccano le vie di accesso (con l'ovvia eccezione dei fusti facenti parte della medesima fila);
k. deve essere predisposto un piano di emergenza che contempli l'eventuale necessità di evacuazione del sito;
l. le aree di immagazzinamento devono avere un sistema di allarme antincendio. Le aree di immagazzinamento all'interno degli edifici devono avere un sistema antincendio preferibilmente non ad acqua. Se il sistema antincendio è ad acqua, il pavimento del locale di immagazzinamento dovrà essere limitato da un cordolo ed il sistema di drenaggio del pavimento non dovrà portare all'impianto di raccolta delle acque nere o bianche, ma dovrà avere un sistema di raccolta proprio (per es. dotato di pompa);
m. deve essere identificato attentamente il lay-out ottimale di serbatoi, tenendo sempre presente la tipologia di rifiuto da stoccare, il tempo di stoccaggio, lo schema d'impianto dei serbatoi ed i sistemi di miscelazione, in modo da evitare l'accumulo di sedimenti e rendere agevole la loro rimozione. I serbatoi di stoccaggio devono essere periodicamente puliti dai sedimenti;
n. i serbatoi devono essere dotati di idonei sistemi di abbattimento, così come di misuratori di livello ed allarmi acustico-visivi. Questi sistemi devono essere sufficientemente robusti e

sottoposti a regolare manutenzione in modo da evitare che schiume e sedimenti affioranti compromettano l'affidabilità del campo di misura;

o. le cisterne contenenti rifiuti infiammabili o altamente infiammabili devono rispettare specifici requisiti;
p. le tubazioni dovranno essere realizzate preferibilmente al di sopra del terreno; se, peraltro, le tubazioni dovessero essere interrate, esse dovranno essere contenute all'interno di idonee condotte ispezionabili;
q. i serbatoi interrati o parzialmente interrati, sprovvisti di un sistema di contenimento secondario (p.es. doppia camicia con sistema di rilevazione delle perdite) dovranno essere sostituiti da serbatoi fuori terra;
r. i serbatoi dovranno essere equipaggiati con sistemi di controllo, quali spie di livello e sistemi di allarme;
s. i serbatoi di stoccaggio dovranno essere collocati su di una superficie impermeabile, resistente al materiale da stoccare. I serbatoi dovranno essere dotati di giunzioni a tenuta ed essere contenuti all'interno di bacini di contenimento di capacità pari almeno al 30% della capacità complessiva di stoccaggio e, comunque, almeno pari al 110% della capacità del serbatoio di maggiore capacità;
t. dovrà essere assicurato che le strutture di supporto dei serbatoi, le tubazioni, le manichette flessibili e le guarnizioni siano resistenti alle sostanze (e alle miscele di sostanze) che devono essere stoccate. Le manichette ed i tubi flessibili utilizzati per il travaso dei PCB non dovranno essere utilizzati per il travaso di altre tipologie di rifiuti liquidi;
u. non devono essere utilizzati serbatoi che abbiano superato il tempo massimo di utilizzo previsto in progetto, a meno che gli stessi non siano ispezionati ad intervalli regolari e che, di tali ispezioni, sia mantenuta traccia scritta, la quale dimostri che essi continuano ad essere idonei all'utilizzo e che la loro struttura si mantiene integra;
v. dovrà essere prestata particolare cura allo scopo di evitare perdite e spandimenti sul terreno, che potrebbero contaminare il suolo e le acque sotterranee o permettere che i rifiuti defluiscano in corsi d'acqua.

### 6.1.1 Tecniche da tenere presente nello stoccaggio di rifiuti contenuti in fusti e altre tipologie di contenitori

Lo stoccaggio al coperto dei rifiuti contenuti all'interno di contenitori ha il vantaggio di evitare che le acque meteoriche che dilavano le aree di stoccaggio si contaminino a causa di sversamenti accidentali, anche pregressi, e di aumentare la vita utile dei contenitori. Tale tecnica evita, inoltre, la formazione di emissioni causate dallo stoccare assieme sostanze tra loro incompatibili, che potrebbero reagire tra loro.

Va tuttavia rilevato che la manipolazione dei rifiuti è di norma più complessa all'interno di aree coperte di quanto non lo sia in aree non coperte.

Lo stoccaggio dei rifiuti in fusti o in altre tipologie di contenitori deve essere effettuato avendo cura che:

a. i rifiuti contenuti in contenitori siano immagazzinati al coperto.Gli ambienti chiusi devono essere ventilati con aria esterna per evitare l'esposizione ai vapori di coloro che lavorano all'interno; un'adeguata ventilazione assicura che l'aria all'interno sia respirabile e con una concentrazione di contaminanti al disotto dei limiti ammessi per la salute umana. La ventilazione delle aree coperte potrà essere effettuata mediante aeratori a soffitto o a parete o prevedendo, in fase di progettazione, opportune aperture;
b. le aree di immagazzinamento dedicate ed i container (in generale quelli utilizzati per le spedizioni) siano ubicati all'interno di recinti lucchettabili;
c. gli edifici adibiti a magazzino e i container siano in buone condizioni e costruiti con plastica dura o metallo, non in legno o in laminato plastico, e con muri a secco o in gesso;
d. il tetto degli edifici adibiti a magazzino o dei container e il terreno circostante abbia una pendenza tale da permettere sempre un drenaggio;
e. il pavimento delle aree di immagazzinamento all'interno degli edifici sia in cemento o in foglio di plastica di adeguato spessore e robustezza. La superficie di cemento deve essere verniciata con vernice epossidica resistente;
f. le aree dedicate allo stoccaggio di sostanze sensibili al calore e alla luce siano coperte e protette dal calore e dalla luce diretta del sole;
g. i rifiuti infiammabili siano stoccati in conformità con quanto previsto dalla normativa vigente in materia;
h. i contenitori con coperchi e tappi siano immagazzinati ben chiusi e/o siano dotati di valvole a tenuta;
i. i contenitori siano movimentati seguendo istruzioni scritte. Tali istruzioni devono indicare quale lotto deve essere utilizzato nelle successive fasi di trattamento e quale tipo di contenitore deve essere utilizzato per i residui;
j. siano adottati sistemi di ventilazione di tipo positivo o che l'area di stoccaggio sia mantenuta in leggera depressione;
k. sia utilizzato un sistema di illuminazione antideflagrante (laddove necessario);
l. i fusti non siano immagazzinati su più di 2 livelli e che sia assicurato sempre uno spazio di accesso sufficiente per effettuare ispezioni su tutti i lati;
m. i contenitori siano immagazzinati in modo tale che perdite e sversamenti non possano fuoriuscire dai bacini di contenimento e dalle apposite aree di drenaggio impermeabilizzate (p.es. sopra bacinelle o su aree delimitate da un cordolo a tenuta). I cordoli di contenimento

devono essere sufficientemente alti per evitare che le eventuali perdite dai fusti/contenitori causino la tracimazione dal cordolo stesso;

n. i materiali solidi contaminati (p.es. ballast, piccoli condensatori, altri piccoli apparecchi, detriti, indumenti di lavoro, materiali di pulizia e terreno) siano immagazzinati all'interno di fusti, secchi metallici, vassoi o altri contenitori metallici appositamente costruiti.

### 6.1.2 Tecniche per migliorare la manutenzione dei depositi di rifiuti

Particolare importanza, all'interno dell'impianto di stoccaggio, assume la manutenzione dell'impianto stesso che può essere più facilmente realizzata attraverso la messa a punto dei seguenti sistemi:

a. attivare procedure per una regolare ispezione e manutenzione delle aree di stoccaggio – inclusi fusti, serbatoi, pavimentazioni e bacini di contenimento. Le ispezioni devono essere effettuate prestando particolare attenzione ad ogni segno di danneggiamento, deterioramento e perdita. Nelle registrazioni devono essere annotate dettagliatamente le azioni correttive attuate. I difetti devono essere riparati con la massima tempestività. Se la capacità di contenimento o l'idoneità dei bacini di contenimento, dei pozzetti o delle pavimentazioni dovesse risultare compromessa, i rifiuti devono essere spostati sino a quando gli interventi di riparazione non siano stati completati;
b. devono esser effettuate ispezioni periodiche delle condizioni dei contenitori e dei bancali. Se un contenitore risulta essere danneggiato, presenta perdite o si trova in uno stato deteriorato, devono essere presi provvedimenti quali l'infustamento del contenitore in un contenitore di maggiori dimensioni o il trasferimento del contenuto in un altro contenitore. Bancali danneggiati in modo tale che la stabilità dei contenitori è, o potrebbe essere, compromessa devono essere sostituiti. Regge in materiale plastico devono essere utilizzate solo per assicurare una stabilità di tipo secondario per lo stoccaggio di fusti/contenitori, in aggiunta all'utilizzo di bancali in uno stato di conservazione appropriato;
c. deve essere programmata ed osservata un'ispezione di routine dei serbatoi, incluse periodiche verifiche dello spessore delle membrature. Qualora si sospettino danni o sia stato accertato un deterioramento, il contenuto dei serbatoi deve essere trasferito in uno stoccaggio alternativo appropriato. Queste ispezioni dovrebbero essere preferibilmente effettuate da personale esperto indipendente e dovrebbe essere mantenuta traccia scritta sia delle ispezioni effettuate che di ogni azione correttiva adottata.

### 6.1.3 Tecniche per ottimizzare il controllo delle giacenze nei depositi di rifiuti

La corretta gestione delle giacenze consente una migliore conduzione dell'impianto di stoccaggio e un migliore monitoraggio del flusso dei rifiuti all'interno dell'intero impianto. Il sistema più corretto di gestione prevede:

a. per i rifiuti liquidi sfusi, il controllo delle giacenze comporta che si mantenga traccia dei flussi di materiale in tutto il processo. Per rifiuti contenuti in fusti, il controllo necessita che ogni fusto sia etichettato singolarmente, in modo da poter registrare la sua ubicazione fisica e la durata dello stoccaggio;
b. è necessario disporre di un'idonea capacità di stoccaggio di emergenza. Ciò è di particolare importanza nel caso in cui si renda necessario trasferire un rifiuto da un automezzo a causa di un suo guasto o a causa di un potenziale danneggiamento della capacità di contenimento del veicolo stesso. Tali situazioni non sono rare e la disponibilità di capacità di stoccaggio nel sito può costituire un fattore limitante;
c. tutti i contenitori devono essere chiaramente etichettati con la data di arrivo, i codici dell' Elenco Europeo dei rifiuti ed i codici di pericolo significativi ed un numero di riferimento od un codice identificativo univoco che permetta la loro identificazione nelle operazioni di controllo delle giacenze ed il loro abbinamento alle registrazioni di pre-accettazione e di accettazione. Ogni etichetta deve essere sufficientemente resistente per restare attaccata al contenitore ed essere leggibile per tutto il tempo di stoccaggio nel sito;
d. fare ricorso all'infustamento dei fusti in maxi-fusti solo come misura di emergenza. Tutte le informazioni necessarie devono essere riportate sull'etichetta del nuovo contenitore. La movimentazione di rilevanti quantità di rifiuti contenuti in maxi-fusti deve essere evitata, prevedendo il reinfustamento dei rifiuti una volta che l'incidente che ha reso necessario tale operazione è stato risolto;
e. prevedere un monitoraggio automatico del livello dei serbatoi di stoccaggio per mezzo di appositi indicatori di livello;
f. deve essere effettuato il controllo delle emissioni provenienti dai serbatoi in fase di miscelazione o di carico/scarico (con sistemi di compensazione degli sfiati o con filtri a carbone attivo);
g. limitare la permanenza dei rifiuti nelle aree di stoccaggio destinate al ricevimento dei materiali ad un massimo di una settimana.

### 6.1.4 Tecniche di movimentazione dei rifiuti negli impianti di stoccaggio

Alcune tecniche da tenere presente per gli impianti di stoccaggio dei rifiuti sono:

a. mettere in atto sistemi e procedure tali da assicurare che i rifiuti siano trasferiti alle appropriate aree di stoccaggio in modo sicuro;
b. mantenere attivo il sistema di rintracciabilità dei rifiuti, che ha avuto inizio nella fase di pre-accettazione -con riferimento alla fase di accettazione-, per tutto il tempo nel quale i rifiuti sono detenuti nel sito;
c. mantenere attivo un sistema di gestione per le attività di presa in carico dei rifiuti nel sito e di successivo conferimento ad altri soggetti, considerando anche ogni rischio che tale attività può comportare (p.es. nel trasferimento dei rifiuti liquidi sfusi dalle auto/ferro-cisterne ai serbatoi di stoccaggio). Ciò può rendere necessario:
   - mettere in atto sistemi per prevenire la fuoriuscita di liquidi dalle auto/ferro-cisterne;
   - la predisposizione di sistemi per assicurare che i collegamenti siano realizzati correttamente. I collegamenti per la movimentazione dei rifiuti liquidi devono essere realizzati tenendo in considerazione i seguenti aspetti:
     - utilizzare adeguate tubazioni flessibili e provvedere alla loro corretta manutenzione può aiutare a garantire l'integrità e l'idoneità dei collegamenti;
     - utilizzare materiali che garantiscano un collegamento che sia in grado di reggere alla massima pressione della valvola di chiusura della pompa di trasferimento;
     - la protezione delle tubazioni flessibili per il trasferimento dei rifiuti potrebbe non essere necessaria nel caso in cui il trasferimento dei liquidi avvenga per gravità. In ogni caso è comunque necessario mantenere un collegamento efficace ad ogni estremità del flessibile stesso;
     - potenziali perdite dovute ai dispositivi di collegamento possono essere controllate per mezzo di sistemi abbastanza semplici, quali vaschette di gocciolamento o aree adibite allo scopo all'interno del sistema di contenimento. L'acqua meteorica che cade sui supporti del bacino di contenimento, se non contaminata, deve essere convogliata in un pozzetto e può essere pompata nella rete fognaria dell'insediamento e scaricata. Le varie aree del bacino di contenimento devono essere ispezionate, sottoposte a manutenzione e pulite regolarmente. La contaminazione delle acque meteoriche è un evento che può capitare ma deve essere minimizzata ricorrendo ad idonee scelte progettuali e di gestione;
     - buone pratiche di gestione richiedono costante attenzione e pulizia;

   - prevedere una manutenzione programmata in modo che un'eventuale grave situazione incidentale non si verifichi a causa di guasti dell'impianto o delle apparecchiature. Ciò può

includere il guasto di una tenuta di una pompa o l'intasamento di un filtro a cestello, comunemente utilizzati nelle postazioni di travaso;

- disporre di uno stoccaggio di emergenza per automezzi che presentano perdite, in modo da minimizzare gli effetti di gravi incidenti dovuti al guasto delle tenute delle autocisterne;
- compensare gli sfiati durante le operazioni di carico delle autocisterne;
- mettere in atto misure tali da garantire che i rifiuti siano scaricati nei corretti punti di trasferimento e che gli stessi siano trasferiti nel corretto punto di stoccaggio. Allo scopo di evitare scarichi non autorizzati, lungo le tubazioni di carico deve essere inserita una valvola di intercettazione; questa deve essere mantenuta bloccata nei periodi in cui non vi è un controllo diretto dei punti di carico/scarico;

d. nel registro dell'impianto deve essere annotato ogni sversamento verificatosi. Gli sversamenti devono essere trattenuti dai bacini di contenimento e successivamente raccolti usando materiali assorbenti;
e. mettere in atto misure tali da garantire che venga sempre usato il corretto punto di scarico o la corretta area di stoccaggio. Alcune possibili soluzioni per realizzare ciò comprendono l'utilizzo di cartellini, controlli da parte del personale dell'impianto, chiavi, punti di scarico e bacini di contenimento colorati o aree di dimensioni particolari;
f. utilizzare superfici impermeabili con idonee pendenze per il drenaggio, in modo da evitare che eventuali spandimenti possano defluire nelle aree di stoccaggio o fuoriuscire dal sito dai punti di scarico e di quarantena;
g. garantire che i bacini di contenimento e le tubazioni danneggiate non vengano utilizzati;
h. utilizzare pompe volumetriche dotate di un sistema di controllo della pressione e valvole di sicurezza;
i. collettare le emissioni gassose provenienti dai serbatoi quanto si movimentano rifiuti liquidi;
j. assicurare che lo svuotamento di grandi equipaggiamenti (trasformatori e grandi condensatori) o fusti sia effettuato solo da personale esperto;
k. assicurare che tutti i rifiuti creati trasferendo i PCB o i rifiuti generati dalla pulizia di sversamenti di PCB diventino rifiuti che vengono immagazzinati come rifiuti contaminati da PCB.

### 6.1.5 Attività di movimentazione connesse con il travaso dei rifiuti

Al fine di evitare lo sviluppo di emissioni e di minimizzare la fuoriuscita di perdite, fumi e odori nonché le problematiche di sicurezza e igiene industriale, le operazioni di travaso di rifiuti contenuti in fusti, serbatoi, cisterne o cisternette devono essere svolte nel rispetto dei seguenti principi:

a. effettuare l'accumulo di materiali odorigeni solamente in modo controllato (cioè non all'aria aperta) per evitare la generazione di odori molesti;
b. mantenere i contenitori con il coperchio chiuso e/o sigillati, per quanto possibile;

c. trasferire i rifiuti dai loro contenitori ai serbatoi di stoccaggio utilizzando tubature "sotto battente";
d. nelle operazioni di riempimento delle cisterne, utilizzare una linea di compensazione degli sfiati collegata ad un idoneo sistema di abbattimento;
e. garantire che le operazioni di trasferimento dei rifiuti da fusti ad autocisterne (e viceversa) siano effettuate da almeno due persone, in modo che nel corso dell'operazione sia sempre possibile controllare tubazioni e valvole;
f. movimentare i fusti usando mezzi meccanici quali carrelli elevatori muniti di un dispositivo per il ribaltamento dei fusti;
g. fissare tra loro i fusti con regge;
h. addestrare il personale che impiega i carrelli elevatori nella movimentazione delle merci pallettizzate, in modo da evitare quanto più possibile di danneggiare i fusti con le forche dei carrelli;
i. usare bancali in buone condizioni e non danneggiati;
j. sostituire tutti i bancali che, all'arrivo, dovessero risultare danneggiati e non utilizzarli nelle aree di stoccaggio;
k. garantire che, nelle aree di stoccaggio dei fusti, gli spazi disponibili siano adeguati alle necessità di stoccaggio e movimentazione;
l. spostare i fusti e gli altri contenitori mobili da un'ubicazione all'altra (o per il carico finalizzato al loro conferimento all'esterno del sito) solamente dietro disposizione di un responsabile; assicurare inoltre che il sistema di rintracciabilità dei rifiuti venga aggiornato e registri il cambiamento.

## *6.2 Tecniche di decontaminazione*

### 6.2.1 Generalità e classificazione

L'approccio metodologico generale cui devono far riferimento le tecnologie di decontaminazione deve soddisfare i seguenti requisiti:

- la riduzione del rischio per i lavoratori, la salute pubblica e l'ambiente, derivante da anomalie o guasti degli apparecchi che possono originare incendio o perdita di prodotti pericolosi e persistenti;
- l'applicazione a "regola d'arte" delle migliori tecniche e metodologie di sicurezza disponibili, privilegiando criteri di prossimità, autosufficienza e recupero funzionale;
- la fattibilità tecnica ed economica delle attività suggerite o imposte dalla normativa e dalla legislazione vigente, nel tempo previsto.

La prima classificazione delle tecnologie e processi di decontaminazione utilizzati per apparecchi

contenenti liquidi isolanti contaminati da PCB riguarda la capacità o meno di recupero funzionale del liquido isolante e permette di distinguere tra:

a **sostituzione del liquido isolante contaminato** (**refilling o retrofilling**) con altri non contaminati, aventi equivalenti o migliori caratteristiche funzionali e ambientali e successivo trasporto e smaltimento del PCB;

b **decontaminazione mediante dealogenazione chimica** mirata alla detossificazione dei composti pericolosi e persistenti ed al recupero funzionale del liquido isolante e anche dell'apparecchiatura;

Una ulteriore classificazione delle tecnologie di decontaminazione può essere basata sulla modalità operative di circolazione e/o produzione nel processo:

a **processi a ciclo aperto**, che prevedono lo svuotamento degli apparecchi e la manipolazione e trasferimento del liquido contenete PCB in altri contenitori per il trattamento o lo smaltimento;

b **processi a ciclo chiuso**, operanti senza svuotamento dell'apparecchio, mediante collegamento diretto dell'apparecchiatura utilizzata per la decontaminazione all'apparecchio contenente il PCB;

c **processi discontinui (batch)**, nei quali volumi costanti (lotti) del liquido contenente PCB vengono svuotati dall'apparecchio e sottoposti ad una serie di processi chimici o fisici non contemporanei, ma che avvengono in fasi successive, ben distinte tra loro;

d **processi continui per circolazione**: nei quali il liquido contenente PCB viene sottoposto ad una serie di processi chimici e fisici contemporanei mediante circolazione attraverso l'apparecchio di decontaminazione. Tale condizione non prevede lo svuotamento neanche parziale dell'apparecchio e/o l'utilizzo di serbatoi esterni con funzione di compensazione e capacità aggiuntive di liquidi isolanti esterni.

Per ovviare a possibili problemi di interruzione dei servizi nel settore dell'energia elettrica e in quello dell'industria produttiva e dei servizi essenziali, è possibile utilizzare alcune delle suddette tecnologie sia "*on site*" che presso centri specializzati. Per questa ragione è possibile, ancora, classificare le tecnologie di decontaminazione in tre categorie:

a. interventi in centro attrezzato (off site) che prevedono lo smontaggio e il trasporto del l'apparato e del liquido isolante contenuto;

b. interventi sul posto (on site) con messa "fuori servizio" dell'apparato;

c. interventi sul posto (on site) con mantenimento "in servizio" dell'apparato.

La scelta delle migliori tecnologie e/o modalità operative devono essere eseguite in funzione delle caratteristiche dell'apparecchiatura e delle esigenze di continuità di servizio. In genere, sono da privilegiare le tecniche in grado di operare "on site" con l'apparecchio in funzione (per gli apparati elettrici: sotto tensione e sotto carico). Tale tecnica evita, inoltre, i rischi e i costi relativi alle operazioni di disinstallazione e trasporto di apparecchi e liquidi pericolosi, particolarmente elevati e inaccettabili per i trasformatori di grande potenza e dimensione. Tale tecniche, inoltre, comportano apprezzabili vantaggi economici.

Indipendentemente dalla tecnologia utilizzata e dalle modalità operative impiegate, l'espletamento di un intervento di decontaminazione deve prevedere:

- definizione dei requisiti di continuità di esercizio, delle condizioni operative, dei rischi e delle condizioni di sicurezza, delle competenze e dei tempi di attuazione;
- verifiche analitiche preliminari e valutazione del degrado funzionale del liquido isolante e dell'apparecchiatura;
- trasporto, installazione e predisposizione degli impianti e dei materiali necessari per realizzare l'intervento;
- operazioni di decontaminazione secondo le tecniche e modalità scelte, eseguite a cura di imprese autorizzate e personale qualificato in possesso di specifica formazione e addestramento;
- verifiche analitiche finali e controlli degli esiti dell'intervento, ripetute a distanza di un congruo periodo di tempo dalla data di decontaminazione;
- riclassificazione "NO PCB" degli apparecchi in conformità alla norme e specifiche richieste;
- smaltimento dei rifiuti prodotti durante le operazioni del ciclo.

### 6.2.2 Sostituzione del liquido isolante contaminato (refilling o retrofilling)

La tecnologia del refilling rappresenta una soluzione di tipo semplice; inoltre, la stessa è stata una delle prime adottata per la decontaminazione di apparecchi contenenti PCB, in assenza di tecnologie operanti mediante azione chimica sugli inquinanti.

Essa è un processo di tipo aperto "confinato", discontinuo, che comprende le seguenti fasi operative:

- svuotamento completo del liquido isolante contaminato e trasferimento dello stesso in serbatoi o cisterne idonee al contenimento di rifiuti pericolosi per l'invio allo smaltimento;
- drenaggio e gocciolamento dell'apparecchio allo scopo di rimuovere la maggiore quantità

possibile di liquido contaminato da PCB;

- lavaggio dell'apparecchio con solventi (tipicamente clorurati quali, ad esempio, il percloroetilene) o liquido isolante nuovo non contenete PCB allo scopo di decontaminare i materiali solidi porosi;
- riempimento completo degli apparecchi con liquido isolante nuovo non contenente PCB, avente caratteristiche conformi alle norme tecniche applicabili;
- trasporto e stoccaggio preliminare del liquido isolante PCB rimosso dall'apparecchio e di tutti i liquidi e solventi di risulta dalle operazioni di cui alle precedenti operazioni in conformità alle norme e leggi nazionali e internazionali (in caso di trasporto transfrontaliero dei rifiuti);
- smaltimento mediante incenerimento del liquido isolante PCB rimosso dall'apparecchio e di tutti i liquidi e solventi di risulta in impianti idonei ed autorizzati.

L'efficacia di questa tecnica in termini di riduzione della concentrazione di PCB al di sotto della soglia richiesta (tipicamente 0,005% in peso) è fortemente dipendente dalla concentrazione iniziale di inquinante.

L'azione di svuotamento e lavaggio infatti non è in grado di rimuovere in maniera completa il liquido isolante contaminato presente nell'apparecchio e, pertanto, si riscontrano incrementi nel tempo della concentrazione di PCB nel liquido isolante nuovo, dovuti alla cessione di contaminante da parte dei materiali porosi impregnati.

L'esperienza dimostra che, in caso di semplice sostituzione del liquido isolante, la concentrazione residua di PCB nel liquido isolante nuovo, misurata dopo 90 giorni di servizio dell'apparecchio dopo la fase di decontaminazione, è compresa tra il 10 e 15% del valore della concentrazione iniziale (rendimento del 85-90%).

Ne deriva che in caso di concentrazioni iniziali superiori a 0,05% in peso (500 mg/kg) la concentrazione di PCB misurata a distanza di 90 giorni dal termine della decontaminazione iniziale può risultare superiore alla soglia richiesta (tipicamente 50 mg/kg), originando la necessità di ripetere il ciclo.

Da un punto di vista dell'ecobilancio il metodo ha un elevato consumo di risorse non rinnovabili (120-150% di olio per ciclo di lavaggio) e produce elevate quantità di CO2 equivalente (trasporto e incenerimento).

### 6.2.3 Processi di tipo chimico basati sulla dealogenazione dei PCB nel liquido isolante

I processi chimici e chimico-fisici di decontaminazione di apparecchiature e liquidi isolanti contaminati da PCB hanno generalmente per obiettivo la rimozione del cloro presente nelle molecole del bifenile (PCB, PCT) e di altri composti alogenati (ad esempio il PCBT) e la

conversione in composti maggiormente biodegradabili e non pericolosi. Pertanto, tali processi consentono la detossificazione dei PCB ed il recupero funzionale del liquido isolante stesso e dell'apparecchio stesso, che pertanto può rimanere in esercizio.

Nel seguito vengono illustrati i principali processi chimico-fisici attualmente disponibili.

**Processi di dealogenazione con sodio, litio e derivati**

Diversi sono i processi che utilizzano la tecnica di dealogenazione con sodio, litio e derivati, tra questi si citano:

- il processo "GoodyearTyre & Company" (USA);
- il processo "Pytlewski" (USA);
- una variante del predetto processo, sviluppata a livello industriale dalla compagnia SunOhio (USA) che utilizza una miscela liquida di sodio-naftalene (processo "PCBX");
- il processo FLUIDEX (Sud Africa) che utilizza polveri di sodio metallico finemente suddivise;
- il processo a base di sodio metallico sviluppato da BC HYDRO & ONTARIO HYDRO nei primi anni ottanta ed adottato da ENERVAC CORPORATION (Canada);
- il processo sviluppato nel 2002 dalla KIOSHI (Argentina) per applicazione su oli isolanti da destinarsi principalmente all'impiego come combustibile.

Le tecniche di dealogenazione al sodio, litio e derivati sono processi discontinui, in quanto necessitano di serbatoi esterni con funzione di compensazione e capacità aggiuntive di liquidi isolanti esterni. Tali processi sono applicabili a ciclo chiuso o aperto, e utilizzano reagenti miscibili con l'olio, a base di sodio metallico, idruro di sodio, idruro di litio ed additivi per la declorurazione del PCB negli oli isolanti.

L'olio ottenuto al termine delle suddette fasi non è idoneo per il riutilizzo immediato in apparecchi elettrici in esercizio; a tal fine deve essere sottoposto ad ulteriori fasi di purificazione/rigenerazione:

- filtrazione e adsorbimento su terre o argille attive;
- degasaggio, deumidificazione sotto vuoto e microfiltrazione;

Le suddette fasi possono essere applicate sul luogo di installazione degli apparecchi (on-site) mediante impianti mobili o presso impianto fisso dedicato.

Normalmente la capacità di tali impianti permette la decontaminazione di volumi fissi di olio di circa 1.500-2.000 litri alla volta, che vengono prelevati dagli apparecchi e sottoposti alle varie operazioni, realizzate in successione.

Per quanto riguarda la capacità di riduzione della concentrazione di PCB a valori inferiori alla soglia limite richiesta, questi processi sono caratterizzati da una elevata efficienza funzionale, indipendentemente dal valore di concentrazione di partenza.

La stabilità nel tempo dei valori ottenuti, in caso di riutilizzo degli oli e degli apparecchi decontaminati, è soggetta alle stesse limitazioni e ad alcune criticità operative individuate per il refilling, in quanto il processo di decontaminazione viene effettuato sull'olio svuotato dall'apparecchio, quindi ha minore efficacia per la decontaminazione dell'apparecchio stesso (soprattutto se la contaminazione iniziale è particolarmente elevata).

Per molti aspetti, questa modalità operativa è equivalente alla sostituzione del liquido isolante (refilling) con la differenza che l'olio, invece di essere trasportato ed incenerito, viene decontaminato al fine di possibile reimpiego nell'apparecchio.

Per quanto riguarda la possibilità di recupero delle proprietà dielettriche e chimiche del liquido isolante, al fine di permetterne il riutilizzo, questi processi richiedono trattamenti supplementari di rigenerazione e purificazione degli oli.

In ogni caso, per le elevate temperature e condizioni di reazione, alcune caratteristiche chimico-fisiche dell'olio possono subire alterazioni anche tali da comprometterne la rispondenza ai requisiti normativi (Norma IEC 60422, in via di revisione) anche a causa della volatilizzazione della frazione più leggera e della desolforazione dell'olio, ovvero per la rimozione degli inibitori naturali all'ossidazione (composti dello zolfo e aromatici).

Ancora questi processi di trattamento generano una dispersione nell'olio di composti ionici e polari che possono degradare le proprietà isolanti dei materiali interni (carte isolanti) generando condizioni favorevoli per l'insorgenza di scariche parziali con possibili incidenze negative anche tali da provocare una riduzione della vita utile degli apparecchi.

Le condizioni estreme di processo, nella zona in cui inizia la pirolisi e cracking dell'olio, possono favorire anche la formazione di policiclici aromatici che sono classificati cancerogeni per l'uomo.

Per tali specifici motivi questi processi non sono particolarmente raccomandati per l'impiego su apparecchi e oli isolanti destinati a proseguire l'esercizio a valle della decontaminazione, in particolare su macchine strategiche e su siti sensibili.

La criticità prioritaria di questa tecnica è identificata nell'elevato rischio di esplosione e/o incendio a causa dell'utilizzazione di sodio, litio e derivati che hanno una elevatissima reattività con l'umidità e

con altri composti ossidati presenti negli oli in esercizio (alcoli, acidi, CO2, etc.).

Ulteriore criticità è legata all'impiego del metodo su trasformatori di piccole dimensioni dove si ha la necessità di svuotare completamente la macchina senza la possibilità di ottimizzare il processo di decontaminazione di liquido e apparecchio.

**Processo di dealogenazione con polietilenglicole e idrossido di potassio (KPEG)**

Questi processi (Brevetti USA N.4.353.793 del 12/10/1982, N.4.410.422 del 18/10/1983, N.4.352.718 del 28/09/1982 General Electric Company – Brunelle D.J; N.4.781.826 del 01/11/1988 General Electric Company – Mendiratta) sviluppati per superare gli inconvenienti legati all'impiego di sodio metallico, utilizzano un reagente liquido miscibile con l'olio, formato da polietilenglicole (PEG) e idrossido di un metallo alcalino (tipicamente KOH) per la declorurazione del PCB negli oli isolanti.

Questo tipo di processo, industrializzato da S.D.MYERS (USA), generalmente viene impiegato in maniera discontinua (batch), presso il luogo di installazione degli apparecchi o presso centro dedicato.

Sono processi discontinui, in quanto necessitano di serbatoi esterni con funzione di compensazione e capacità aggiuntive di liquidi isolanti esterni.

Le fasi operative che si possono individuare sono le seguenti:

- svuotamento completo o parziale di una aliquota di olio isolante di circa 1.000-2.000 kg;
- riscaldamento dell'olio ad una temperatura tipicamente compresa tra 110 e 140 °C per attivare la reazione del poliglicolato liquido;
- reazione tra l'olio e la miscela di PEG e KOH per la dealogenazione dei PCB;
- separazione dei reagenti liquidi e dei sottoprodotti di reazione dall'olio mediante decantazione e/o centrifugazione;
- filtrazione e adsorbimento su terre o argille attive;
- degasaggio e deumidificazione sotto vuoto e microfiltrazione.

Per quanto riguarda la capacità di riduzione della concentrazione di PCB a valori inferiori alla soglia limite richiesta, questo processo presenta una efficienza funzionale soddisfacente, indipendentemente dal valore di concentrazione di partenza, pur avendo maggiori difficoltà nella decontaminazione dei Bifenili a basso contenuto di Cloro (Aroclor 1242).

Per quanto riguarda la possibilità di recupero delle proprietà dielettriche e chimiche del liquido isolante, la tecnologia non presenta le criticità tipiche dei processi al sodio, litio e derivati, in quanto opera a temperature inferiori al punto di infiammabilità degli oli minerali (140°C).

Esso tuttavia può comportare difficoltà di separazione dall'olio del reagente liquido e dei sottoprodotti di reazione al termine della dealogenazione.

Ulteriore criticità è legata all'impiego del metodo su trasformatori di piccole dimensioni dove si ha la necessità di svuotare completamente la macchina senza la possibilità di ottimizzare il processo di decontaminazione di liquido e apparecchio.

**Processo di dealogenazione in continuo ed a circuito chiuso**

Questo processo, sviluppato da Sea Marconi Technologies a partire dal 1982 e denominato CDP PROCESS (ultimi Brevetti CEE n. 0675748 del 04/06/1997; USA 5.663.7479 etc) rappresenta una innovazione tecnologica innovativa e migliorativa dei processi KPEG e Niagara Mohawk Power Corporation – USA (Brevetto Peterson 4.532028 variante KPEG + DMS.) e risolve le maggiori criticità operative dei precedenti processi.

L'innovazione è nell'impiego di un reagente solido granulare non miscibile con l'olio, formato da miscele di polietilenglicoli e polipropileneglicoli solidi ad alto peso molecolare, un miscuglio di basi e un iniziatore radicalico o altri catalizzatori che vengono posti in colonna per declorurare a bassa temperatura (80-100°C) progressivamente gli alogenuri aromatici anche particolarmente stabili (PCB, PCT, PCBT, PCDD, PCDF) e contestualmente operano la depolarizzazione dell'olio e la decontaminazione dagli altri inquinanti.

Questo tipo di processo multifunzionale viene realizzato in maniera continua mediante circolazione chiusa dell'olio senza svuotamento dell'apparecchio contaminato; quest'ultimo viene semplicemente collegato ad unità mobile di decontaminazione, ad una portata variabile da 700 a 2.000 l/h. Queste unità mobili sono sistemi modulari di compatte dimensioni dotate di sistemi automatici di sicurezza e controllo di processo in grado di operare in tutte le condizioni operative (centrali, cabine primarie e di trasformazione, cabine sotterranee, etc.). Le unità mobili sono inoltre provviste di sistemi di protezione delle perdite (Spill Guard), di sistemi di autopulizia (Self Cleaning) anche in grado di eliminare le emissioni in atmosfera (Emx-Clean) e di sistemi automatici di supervisione e controllo per tutti i parametri di sicurezza del processo al fine di evitare l'insorgenze di possibili incidenti.

Durante la circolazione continua, il liquido isolante viene sottoposto alle operazioni di decontaminazione che procedono simultaneamente come di seguito descritto:

- riscaldamento dell'olio ad una temperatura compresa tra 80 e 100 °C;
- dealogenazione chimica mediante percolazione sotto pressione sul reagente solido, preconfezionato in cartucce filtranti contenute in idonei recipienti (colonne);
- depolarizzazione mediante percolazione sotto pressione su supporti adsorbenti particellari ad

elevata superficie;

- degasaggio, deumidificazione sotto vuoto e microfiltrazione.

Per quanto riguarda la capacità di riduzione della concentrazione di PCB a valori inferiori alla soglia limite richiesta, questo processo presenta una efficienza funzionale soddisfacente, indipendentemente dal valore di concentrazione di partenza. L'esperienza operativa dimostra che generalmente è sufficiente un singolo intervento per garantire il raggiungimento della soglia limite richiesta partendo anche da concentrazioni iniziali di 500-1000 mg/kg di PCB. A concentrazioni maggiori, fino a 50.000 mg/kg di PCB si è dimostrato che sono necessari più interventi nel tempo.

La stabilità nel tempo dei valori ottenuti, in caso di riutilizzo degli oli e degli apparecchi decontaminati è assicurata dalla circolazione dell'olio stesso, che agisce da solvente per l'estrazione progressiva dei PCB dai materiali porosi all'interno degli apparecchi. Il rendimento tipico di un singolo intervento è del 93-97%.

Le casistiche note hanno dimostrato che la concentrazione di PCB misurata su una grande popolazione di trasformatori di potenza in esercizio a distanza di 12 mesi dall'esecuzione della decontaminazione si mantiene stabilmente a valori pari al 3-5% della concentrazione iniziale, anche in caso di valori di partenza superiori a 500 – 1.000 mg/kg.

Per quanto riguarda la possibilità di recupero funzionale delle proprietà dielettriche e chimiche del liquido isolante, il processo è sicuramente il più vantaggioso, assicurando l'ottenimento di caratteristiche degli oli conformi ai più restrittivi requisiti raccomandati dalle norme (IEC 60422).

Lo stesso processo, non svuotando l'apparecchio, è in grado di garantire lo stand by di 2-4 ore e la fattibilità tecnica dell'esecuzione delle operazioni sotto tensione e sotto carico anche su trasformatori di grande potenza.

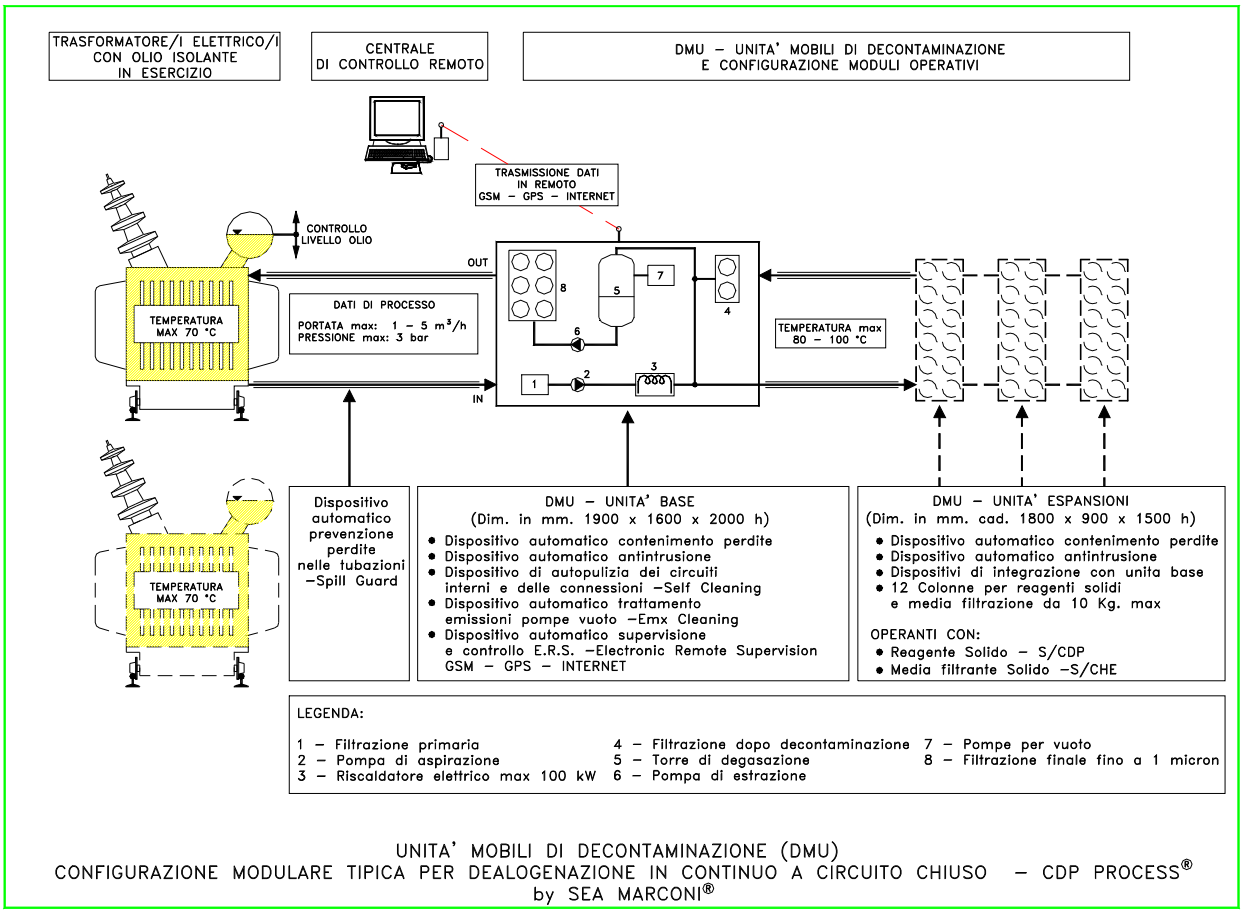
Su trasformatori da distribuzione, tipicamente della potenza di 250 kVA (circa 800 kg quale peso complessivo della macchina con 200 kg di olio), il processo viene implementato in continuo e a ciclo chiuso provvedendo alla contemporanea decontaminazione di 4-6 o più trasformatori opportunamente raggruppati in lotti in una Unità a Connessione Multipla specifica.

La tecnologia CDP PROCESS, per la sua speciale configurazione e procedure operative è attualmente considerata la risposta più efficace e flessibile per la implementazione della Direttiva 76/769/CE del 26 luglio 1976 nel settore delle attività di controllo e decontaminazione di PCB in continuo e a circuito chiuso senza svuotamento di trasformatori elettrici e liquidi isolanti in esercizio; in Francia è normalmente prevista tale tecnica di manutenzione con impianti mobili DMU (Rif. Prefecture de Meurthe et Moselle, Direction des Action Interministerielles, Bureau de l'Environment, Arrete n. 2002/01 del 17/01/02, SEA MARCONI TECHNOLOGIES France, Nancy).

Il CDP PROCESS è utilizzato da anni, anche su grandi parchi di trasformatori, senza aver mai

provocato incidenti.

Sotto gli aspetti della sicurezza di processo, questa tecnologia è quella che attualmente determina il minor rischio per i lavoratori, la salute pubblica e l'ambiente ed è altresì ritenuta la più sicura ed affidabile in termini di prestazioni funzionali senza indurre incidenze critiche durante il Ciclo di Vita successivo del trasformatore e/o apparecchio contenente liquido isolante in esercizio.




### 6.2.4 Individuazione di possibili tecniche alternative innovative

Qualora l'apparato elettrico contaminato da PCB risulti "*a fine vita operativa*" e ne è richiesto lo smaltimento, nella comunità dei casi si ricorre alla termodistruzione. In questo caso, le più alte precauzioni devono essere adottate affinché l'originario Detentore abbia le dovute garanzie circa l'effettiva eliminazione del rifiuto e, a tal fine, è raccomandata la richiesta agli Operatori autorizzati di rilasciare schede individuali relative all'esito di ogni unità funzionale.

Sempre per apparati "*a fine vita operativa*", sono note e/o disponibili tecniche alternative alla termodistruzione che permettono la decontaminazione del fluido isolante e un più efficace recupero di materiali.

**La tecnologia LTR2 per riciclare le apparecchiature elettriche contenenti PCB**

La tecnologia LTR2 (Low Temperature Rinsing and Re-Use/Recovery) è stata sviluppata dall'ABB basandosi sul know-how di un grande costruttore di apparecchiature elettriche a livello mondiale. Le singole fasi del processo vengono adattate di volta in volta alle specificità delle apparecchiature da decontaminare. Nello schema fornito sono presentate, come esempio, le fasi di decontaminazione di un trasformatore fortemente contaminatola PCB (contenuto di PCB > 100.000 ppm).

L'olio contenente PCB, drenato dal trasformatore, viene avviato ad incenerimento per la distruzione finale. Il secondo passaggio del ciclo avviene all'interno di camere chiuse ermeticamente, dove i trasformatori vengono puliti dai PCB usando un solvente ad alta solubilità. Il solvente viene fatto passare attraverso l'intero volume del trasformatore più volte finché non viene raggiunto il grado di decontaminazione richiesto (< 2ppm). Il solvente viene quindi drenato e il trasformatore viene asciugato. Usando le camere di lavaggio in modalità a cascata, si ottimizza l'uso del solvente. Incrementare la temperatura del solvente, inoltre, migliora i risultati, in particolare ne migliora la penetrazione fra le intercapedini. La qualità del processo di pulizia è continuamente controllata da sensori situati nel flusso di solvente in uscita da ogni camera di lavaggio.La successiva estrazione di PCB dalla parte attiva del trasformatore dipende dalla sua diffusione e quindi dal tempo di trattamento.

La seconda fase della decontaminazione consiste in un progressivo disassemblaggio. Il nucleo di metallo, i sistemi di fissaggio, gli isolatori di ceramica, le bobine e il legno sono separati; la cassa e il coperchio del trasformatore sono pronti per la fase di fusione

Il nucleo di metallo, i sistemi di fissaggio e gli isolatori di ceramica sono purificati intensivamente, con solvente a temperatura maggiore di quella ambiente, in una "macchina di lavaggio" e successivamente asciugati. Regolarmente vengono presi dei campioni dalle parti pulite. Analisi eseguite in laboratori indipendenti e autorizzati verificano e confermano la qualità del processo di lavaggio.

Il nucleo di metallo decontaminato è riutilizzato dai produttori di piccoli trasformatori a basso voltaggio. I sistemi di fissaggio sono suddivisi a seconda del materiale e sono mandati alla fusione. Gli isolatori di ceramica sono riutilizzati nella costruzione di strade

Nell'ultimo passaggio, le bobine sono frantumate al fine di separare il rame dalla carta. Si ottengono così da una parte rame non contaminato da PCB e dall'altra pezzetti di carta contaminati.

La carta e il legno altamente contaminati, che ammontano a circa il 4% del peso totale del trasformatore, possono essere riciclati termicamente.

Con tale tecnologia i trasformatori contaminati da PCB possono essere riciclati fino al 95% del

peso del trasformatore. Il residuo di contaminazione da PCB sulle materie seconde ottenute è inferiore a 2 ppm. Il solvente è trattato in un ciclo completamente chiuso in modo da evitare le emissioni, ed è recuperato per il riutilizzo tramite distillazione continua.

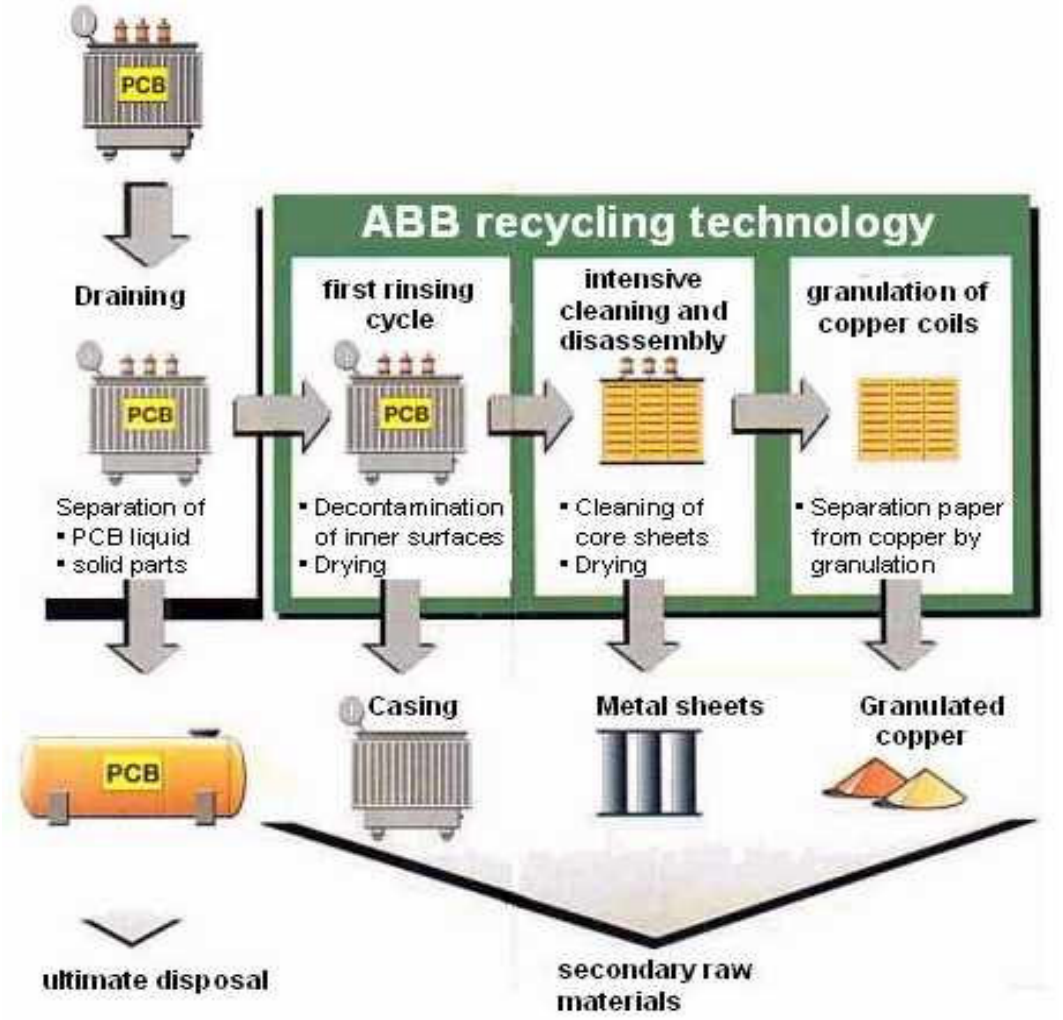



**Figura 6.1:** Processo LTR2 di riciclaggio di un trasformatore contaminato da PCB con concentrazione maggiore di 100.000

**<u>Processo "HALOCLEAN" con recupero di metalli nobili e strageci e materiali da apparecchiature elettriche ed elettroniche (WEEE)</u>**

Il processo Haloclean è stato implementato per affrontare e contenere la problematica della produzione di rifiuti. La ricerca per lo sviluppo di un tale processo è stata supportata dalla Commissione Europea a partire dal 1999 con l'obiettivo di arrivare a svilupparne un prototipo in Germania e/o Italia (capacità di trattamento di 400/ora) entro l'anno 2005.

Il processo Haloclean mira a fornire una risposta industriale alla attuazione delle Direttive Europee 2002/95/CE *sulla restrizione d'uso di sostanze pericolose nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche* e 2002/96/CE *sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE)*.

Haloclean è un brevetto della Sea Marconi (a livello internazionale il PCT WO 02/50484 A1, in Europa CEE 01271523/CE, etc.).

Haloclean è un metodo innovativo di trattamento dei rifiuti elettrici ed elettronici (WEEE) e di materiali polimerici in grado di decontaminarli dal PCB e permettere nel contempo il recupero di metalli nobili (oro, argento, palladio, etc.), altri metalli non ferrosi (rame, alluminio, etc.), materiali ed energia pulita. Il processo è basato su una pirolisi controllata a bassa temperatura (350-500°C).

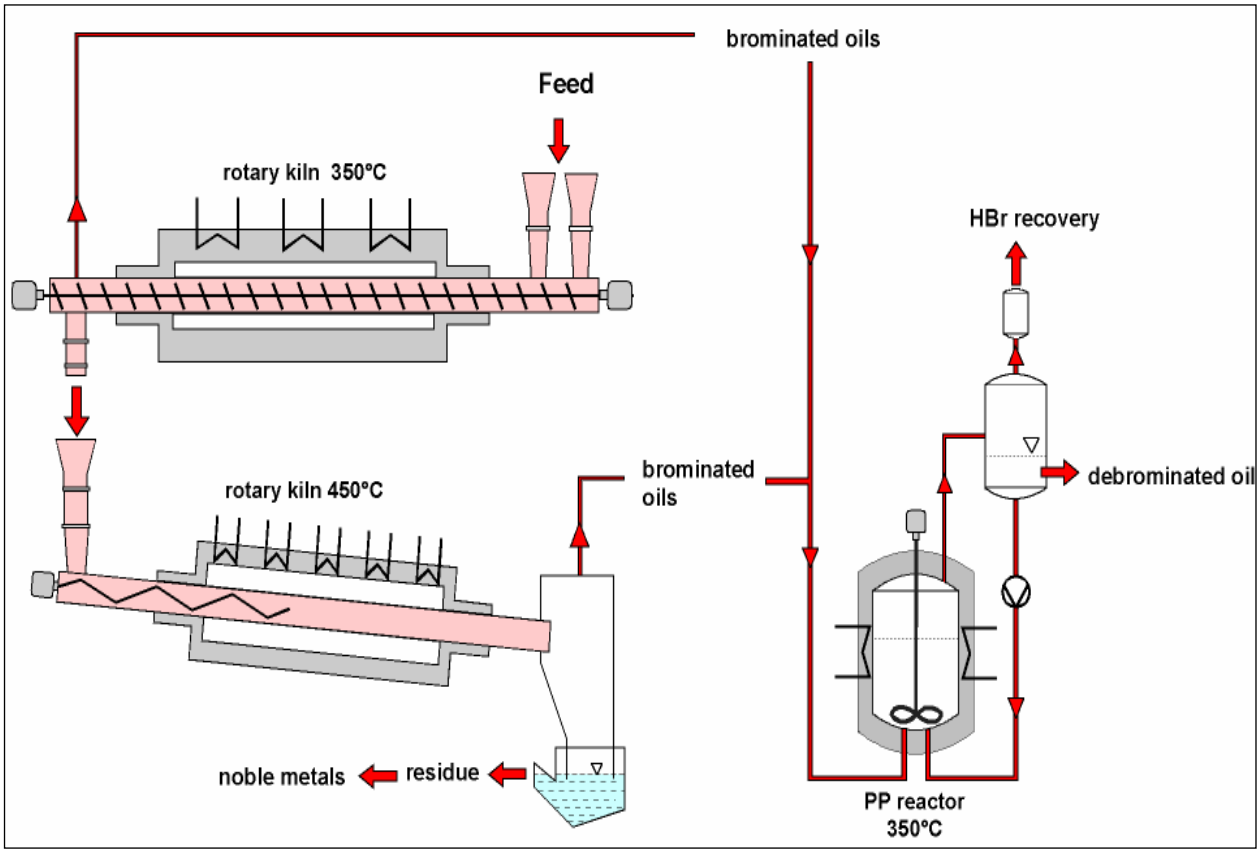



**Figura 6.2:** schema di principio del processo HALOCLEAN

## Processi di idrogenazione catalitica

Un processo molto vantaggioso per la distruzione dei composti clorurati è la idrogenazione catalitica in ambiente riducente di idrogeno ed in presenza di un catalizzatore resistente ai cloruri in quanto non dà origine alla formazione di specie ossigenate come diossine, furani, ossidi di zolfo e di azoto. Il calore sviluppato nella reazione esotermica viene asportato ed in parte riutilizzato per preriscaldare la corrente in ingresso.

L'acido cloridrico, formatosi durante la reazione, viene abbattuto con produzione di un refluo acquoso acido. Le tracce di acido, non bloccate in tale sezione vengono eliminate in una successiva sezione di neutralizzazione, con produzione di una soluzione acquosa e di una fase idrocarburica. L'idrogeno in eccesso, che non ha reagito, può essere riciclato nella corrente in ingresso al reattore. Nelle linee generali i processi di idrogenazione catalitica seguono tutti questo schema.

Due di queste tecnologie hanno avuto sviluppo industriale, una creata dalla KTI conosciuta come Processo Chioroff, l'altra messa a punto da Manion.

La idrodeclorazione dei PCB nel Processo Chioroff avviene alle alte pressioni di 50-60 bar e alla temperatura di 250-300°C, in presenza di un catalizzatore, mentre nel processo di idrogenazione di Manion la reazione avviene a pressione più bassa e a temperatura più alta (circa 900°C), impiegando un catalizzatore simile a quello del processo precedente.

Entrambi i processi si sono rivelati efficaci, raggiungendo efficienze di distruzione e rimozione del 99, 9% per i PCB.
I due processi presentano però i seguenti elementi critici: richiedono entrambi catalizzatori, ed inoltre il Processo Chioroff, impiegando reattori ad alta pressione, ha associati rischi dovuti ad esplosioni. Presentano inoltre una certa complessità impiantistica, che comporta elevati costi d'investimento

**Fotodistruzione di policlorobifenili mediante laser ad eccimeri**

In alternativa ai processi precedenti esistono processi di distruzione dei PCB basati su trattamenti fotochimici via laser UV Questo processo è possibile grazie alla monocromaticità e l'accordabilità della radiazione del dispositivo laser (tipicamente laser ad eccimeri), che permette di eccitare selettivamente legami chimici e guidare la dissociazione verso la formazione di prodotti non inquinanti.
Gli esperimenti di fotodistruzione dei PCB, diluiti in soluzione di metanolo e n-esano, hanno mostrato che la radiazione del laser a KrF è efficace per la loro fotodistruzione. Infatti gli idrocarburi aromatici derivanti dal benzene e dal bifenile presentano la banda di assorbimento $\pi \rightarrow \pi^*$ piccata rispettivamente a 254 nm e 249 nm, e quindi vicino alla lunghezza d'onda d'emissione del laser a KrF (248 nm).
Gli esperimenti eseguiti con l'Aroclor 1254 hanno mostrato che la fotodissociazione comporta l'assorbimento di un solo fotone UV per molecola con conseguente rottura sia del legame C-Cl (86-97 Kcal/mol) che del legame C-C bifenilico (116 Kcal/mol); in questo modo il PCB risulta

distrutto e la concentrazione di esso rimasta risulta inferiore al limite di rilevabilità dello strumento misuratore.

Inoltre in questi esperimenti, in seguito all'irraggiamento con il laser a KrF, i campioni sono stati sottoposti ad analisi gas cromatografiche per analizzare i prodotti dell'irraggiamento; infatti, le specie ossidate formate, se da una parte possono provenire da prodotti di fotoframmentazione più piccoli del PCB originario, dall'altra possono anche essere grosse molecole ad anelli condensati quali le policlorodiossine ed i policlorofurani. Dall'analisi dei gas cromatogrammi dei campioni in n-esano, prima e dopo l'irraggiamento con KrF, è risultato che:

Si ha la distruzione della miscela di policlorobifenili

Non si hanno evidenze sui cromatogrammi della formazione di specie pesanti come policlorobenzodiossine e policlorodibenzofurani.

Si formano soltanto specie non clorurate più leggere.

Il processo di distruzione, inoltre, avviene anche in tempi rapidi; con una energia del laser di 40 mJ (non focalizzata) è stato misurato un tempo di dimezzamento di 5 minuti per una soluzione di 0,2 g/l.

Quindi attraverso questa tecnica di fotodistruzione si è riuscito a guidare la dissociazione verso la formazione di prodotti non inquinanti. Questa tecnica, inoltre, presenta anche dei vantaggi legati alle peculiari caratteristiche della radiazione laser, come la sua direzionalità e coerenza che permettono la possibilità di trattamenti remoti in ambienti ostili. Inoltre, essendo questo un processo tipicamente ad un fotone, è possibile utilizzare semplici lampade UV efficienti intorno a 250 nm, ed operanti o in regime continuo o ad alta frequenza di ripetizione, per decontaminare rifiuti contenenti PCB.

Questa tecnica, quindi, permette di trattare gas di scarico ed effluenti, e si pone come valida alternativa alle camere di post-combustione nel trattamento finale di scarichi di inceneritori.

# 7. VALUTAZIONE ECONOMICHE

Il costo per la decontaminazione e/o lo smaltimento dei PCB o degli apparecchi contenenti PCB dipende da molti fattori che vanno dalla tipologia dell'apparecchio da decontaminare e/o smaltire alla concentrazione di PCB nell'olio. Lo stesso costo è fortemente condizionato dalle condizioni di mercato, dal rapporto tra domanda e offerta, dal tipo di apparecchio (età, degrado, quantità, durata, etc.), dalle distanze, dalle condizioni operative e logistiche, dagli obiettivi, dalle garanzie richieste, etc.

Nel seguito vengono riportate le valutazioni effettuate in Italia.

- **Trasformatori da distribuzione MT/BT (media tensione/bassa tensione)**

Valori di riferimento per questi trasformatori sono:

Potenza media: 250 kVA;

Peso medio trasformatore: 1.000 kg;
Peso medio olio: 230 kg.
Si può ragionevolmente attendere che i trasformatori da distribuzione rappresentino il 99 % della popolazione di macchine contaminate
Questo tipo di trasformatori possono essere trattati in modi differenti a seconda del contenuto iniziale di PCB nell'olio, dalla vita utile residua e della loro importanza di esercizio (decontaminazione on site o in centri specializzati o rottamazione).

Come detto, i costi di decontaminazione per tale categoria di trasformatori dipendono da molteplici fattori, per cui nel seguito si farà riferimento ad un range tipico. Si ha pertanto:
Trasformatori da distribuzione contaminati da PCB tra 50 e 500 mg/kg: 0,7 ÷ 0,8 €/kg macchina;
Trasformatori da distribuzione contaminati da PCB tra 500 e 1.000 mg/kg: 0,8 ÷ 1,0 €/kg macchina;
Trasformatori da distribuzione contaminati da PCB oltre 1.000 mg/kg: 1,0 ÷1,5 €/kg macchina.

Il costo per la rottamazione con incenerimento del PCB può essere assunto pari a circa 0,7 - 0,8 €/kg macchina, al lordo del recupero del ferro e del rame che incide per un valore di 0,15 – 0,2 €/kg (dati variabili in funzione della borsa dei rottami ferrosi e non ferrosi).Ovviamente a tale costo vanno aggiunti quelli di trasporto (fortemente variabili), assicurazioni, logistica, utili d'impresa, etc.

- **Trasformatori di potenza AT/MT (alta tensione/media tensione)**

Valori di riferimento per questi trasformatori sono:
Potenza media: 25 MVA (da 16 MVA a 400 MVA);
Peso medio trasformatore: 62.000 kg (fino a 380.000 kg);
Peso medio olio: 25.000 kg (fino a 85.000 kg).
Si può ragionevolmente attendere che i trasformatori di potenza rappresentino circa l'1 ÷ 2 % della popolazione di macchine contaminate
Questo tipo di trasformatori possono essere trattati in due modi differenti a seconda del contenuto iniziale di PCB nell'olio ed altri molteplici fattori (decontaminazione on site o refilling).

Come detto, i costi di decontaminazione per tale categoria di trasformatori dipende da molteplici fattori, per cui nel seguito si farà riferimento ad un range tipico. Si ha pertanto:
Trasformatori di potenza contaminati da PCB tra 50 e 500 mg/kg: 1,7 – 2,5 €/kg olio;
Trasformatori di potenza contaminati da PCB tra 500 e 1.000 mg/kg: 2,5 – 3,5 €/kg olio;
Trasformatori di potenza contaminati da PCB tra 1.000 e 2.000 mg/kg: 3,5 – 4,5 €/kg olio;
Trasformatori di potenza contaminati da PCB oltre 2.000 mg/kg: variabile da caso a caso.

# 8. BIBLIOGRAFIA


- Linee guida recanti i criteri per l'individuazione e l'utilizzazione delle migliori tecniche disponibili – Linee guida relative ad impianti esistenti per le attivita' rientranti nelle categorie IPPC 5 – Gestione dei rifiuti "Trattamento dei PCB, degli apparati e dei rifiuti contenenti PCB e per gli impianti di stoccaggio"

- Norma tecnica italiana CEI 10-38 Guida tecnica per l'inventario, il controllo, la gestione, la decontaminazione e/o lo smaltimento di apparecchiature elettriche e liquidi isolanti contenenti PCB

- UNEP – PCB Transformer and Capacitors from management to reclassification and disposal – First Issue, May 2002