

## I vantaggi del trattamento termico a induzione

*In questo articolo vengono esaminati i vantaggi della tempra ad induzione rispetto ai metodi tradizionali nelle applicazioni sugli ingranaggi. Gli ultimi sviluppi tecnologici di questo procedimento permettono ora di ampliare la gamma delle sue applicazioni.*

---

L'induzione elettromagnetica è quel fenomeno per cui in una spira attraversata da un flusso di un campo magnetico variabile si genera una forza elettromotrice.

Se la spira di materiale conduttore fa parte di un circuito elettrico chiuso, sulla spira passa una corrente elettrica.

Il valore della forza elettromotrice è proporzionale alla rapidità della variazione del flusso e, naturalmente, alla intensità del campo magnetico.

Il fenomeno è, in un certo senso, reversibile, perché se si fa passare una corrente elettrica variabile sulla spira essa genera un campo magnetico variabile.

E' questo che appunto avviene nei dispositivi utilizzati nella tempra ad induzione.

Su una spira, variamente sagomata e di rame, viene fatta passare una corrente alternata con una certa frequenza di cui tra breve se ne parlerà, la quale produce un campo magnetico rapidamente variabile che investe il pezzo che si vuol trattare.

Nella massa del pezzo si generano delle forze elettromotrici che, se il pezzo è di materiale conduttore, generano delle correnti che circolano nella massa del pezzo stesso.

Se si tratta di particolari in acciaio, e le correnti sono molto intense, si ha un rapido riscaldamento del materiale per effetto Joule.

La tempra ad induzione è applicata da molti decenni nell'industria meccanica perché presenta una serie di grandi vantaggi rispetto la tempra eseguita con appositi forni.

Il primo è più grande vantaggio è quello che il trattamento può essere fatto direttamente sulla linea di produzione integrando gli apparecchi nella linea stessa.

Questo significa che non è necessario rimuovere i pezzi dalla linea e trasportarli in un altro reparto dove sono installati i forni per il trattamento termico.

Oltre a ciò si ha un grande risparmio di energia perché si riscalda solo la zona interessata minimizzando così l'energia applicata al pezzo ed il dispositivo induttore resta in funzione solo il tempo necessario al riscaldamento del pezzo. Il forno invece è sempre in temperatura anche quando si interrompe il flusso dei pezzi da trattare.

Per questa ragione i trattamenti termici ad induzione sono considerati un tipo di lavorazione più ecologica rispetto ad altri tipi di trattamento.

Poiché non è necessario rimuovere i pezzi dalla linea si possono ridurre gli stock di materiale circolante con una buona riduzione dei costi.

Infine bisogna dire che le distorsioni sono minori e che può essere attuata la rintracciabilità dei pezzi.

La tempra ad induzione può essere applicata senza particolari problemi ad una vasta tipologia di pezzi, con geometrie più o meno complicate, ma per trattare con questa tecnologia gli ingranaggi bisogna affrontare qualche problema che non sempre trova una soluzione ottimale.

Tutto deriva da un particolare fenomeno presente su un conduttore quando è percorso da una corrente elettrica alternata. Si tratta dell'*effetto pelle*.

L'effetto pelle è la tendenza della corrente alternata che percorre un conduttore a concentrarsi nella periferia del conduttore stesso.

Questo fenomeno è tanto più marcato quanto più elevate sono le frequenze della corrente: cioè più la frequenza è alta e più la corrente si concentra verso l'esterno del conduttore.

L'effetto pelle è particolarmente importante nelle alte frequenze perché riduce in pratica la sezione del conduttore utilizzato aumentandone quindi la resistenza e dissipando maggior energia.

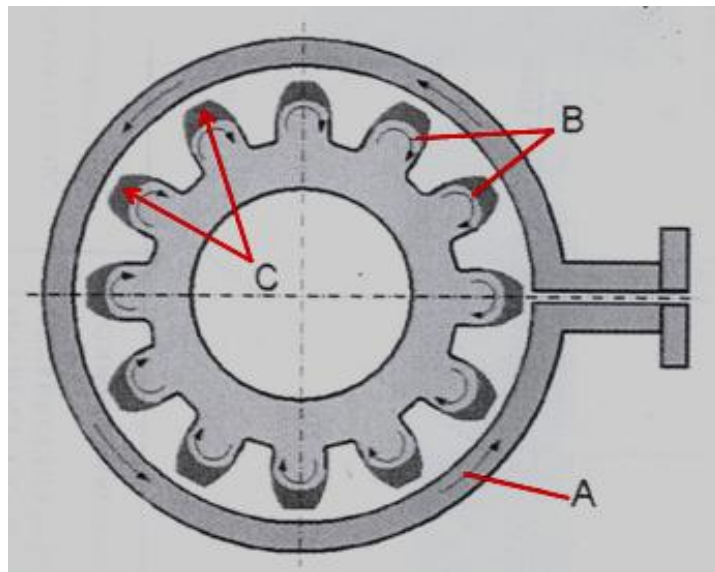
Questo effetto che, normalmente è dannoso e viene contrastato in vari modi nei circuiti elettrici ed elettronici, è invece sfruttato nella tempra ad induzione.

I generatori utilizzati industrialmente si dividono in:

- *Generatori a bassa frequenza*: 5 kHz che interessano gli strati più profondi del pezzo;
- *Generatori a media frequenza*: 5 – 30 kHz che interessano gli strati intermedi del pezzo;
- *Generatori ad alta frequenza*: 200 – 900 kHz che interessano gli strati superficiali del pezzo.

L'alta frequenza viene usata per profondità di indurimento fino a 1 mm, mentre con la media frequenza si può indurire il pezzo a oltre 2 mm di profondità. Mentre non esistono problemi per formati cilindrici o rettilinei, risulta difficile ed a volte impossibile temprare pezzi con contorni non uniformi, quali per esempio i denti degli ingranaggi.

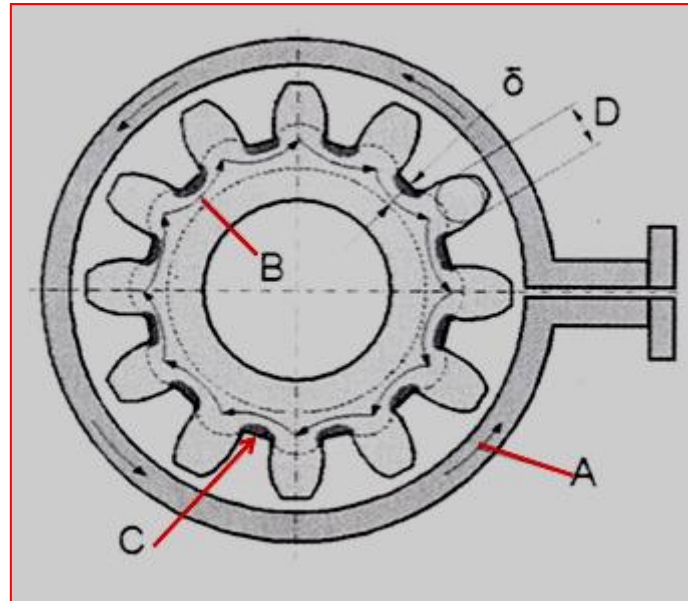
In teoria si potrebbero costruire degli induttori con un profilo che si accoppia a quello dell'ingranaggio in modo che la distanza tra le varie superfici da trattare e quella dell'induttore sia costante, ma questo risulta oltremodo costoso e a volte impossibile da attuare.



**Figura N°1-** Riscaldamento di un ingranaggio con induttore ad alta frequenza. Si noti il senso delle correnti sulla spira (A) e sui denti (B). Si riscalda prevalentemente la testa dei denti.

Il fatto è che se si usano alte frequenze si riscalda prevalentemente la testa dei denti, come indicato in figura N°1, mentre se si usano le basse frequenze si riscalda solo il fondo dei denti (figura N°2) perché sui fianchi, se le correnti hanno una profondità maggiore dello spessore del dente, tenderanno ad annullarsi perché hanno senso contrario.

E' noto d'altra parte che nella quasi totalità dei casi non è ammesso l'indurimento totale del pezzo perché i denti diventerebbero troppo fragili: il dente normalmente deve essere duro in superficie e tenero al cuore.



**Figura N°2-** Riscaldamento di un ingranaggio con induttore ad bassa frequenza. Si noti il senso delle correnti sulla spira (A) e sui denti (B). Si riscalda prevalentemente il fondo dei denti (C).

Tuttavia si può talvolta arrivare ad un buon compromesso che permette di indurire il dente sia verso il fondo che sul fianco e la frequenza da adottare è funzione del modulo  $m$ . La frequenza  $f$  in kHz è data dalla seguente relazione:

$$f = \frac{300 \div 400}{m^2}$$

Oltre alla frequenza i risultati sono fortemente influenzati dalla potenza immessa nel circuito e dal tempo di riscaldamento.

Sono quindi evidenti le difficoltà di gestione di questi parametri per ottenere un ingranaggio correttamente temprato.

Sono disponibili già da tempo tecniche che permettono di usare nello stesso ciclo due frequenze diverse per temprare selettivamente zone diverse della dentatura.

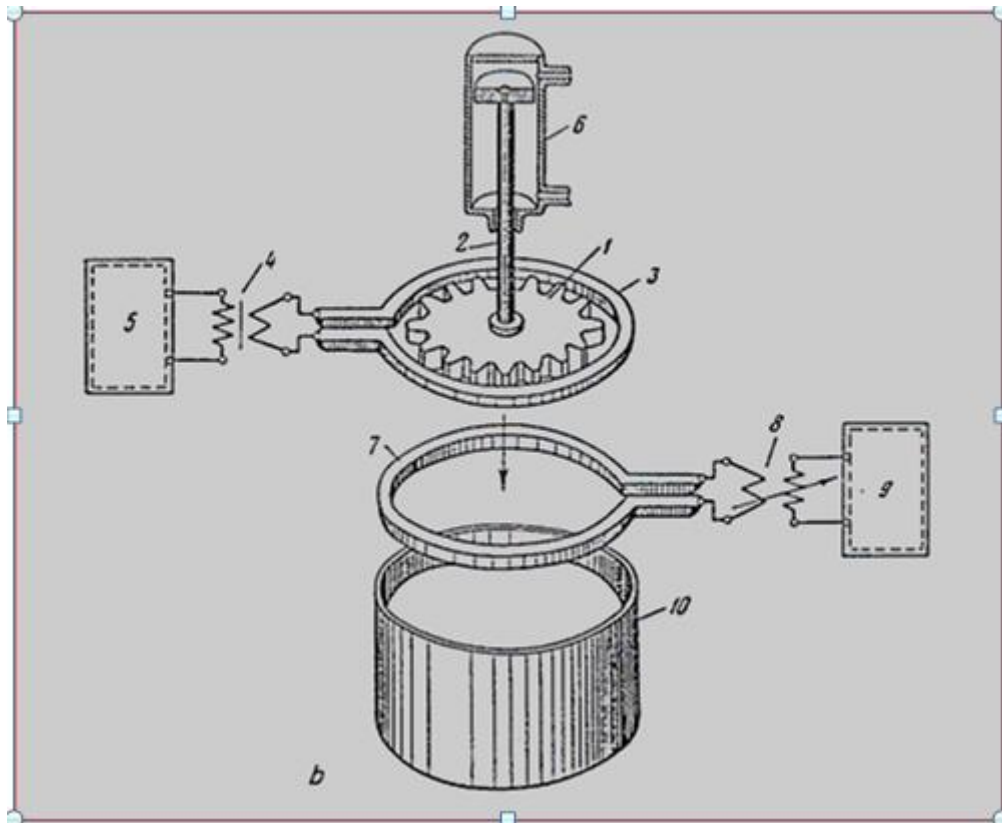
Un esempio è quello illustrato nella figura N°3 in cui si vede che l'ingranaggio viene fatto passare in rapida successione tra due spire di cui una è alimentata con media frequenza e l'altra con alta frequenza.

Usando frequenze intorno a 10 kHz nella prima fase per indurire il fondo dei denti e poi frequenze prossime a 400 kHz per indurire i fianchi si possono ottenere delle buone resistenze dei denti in generale.

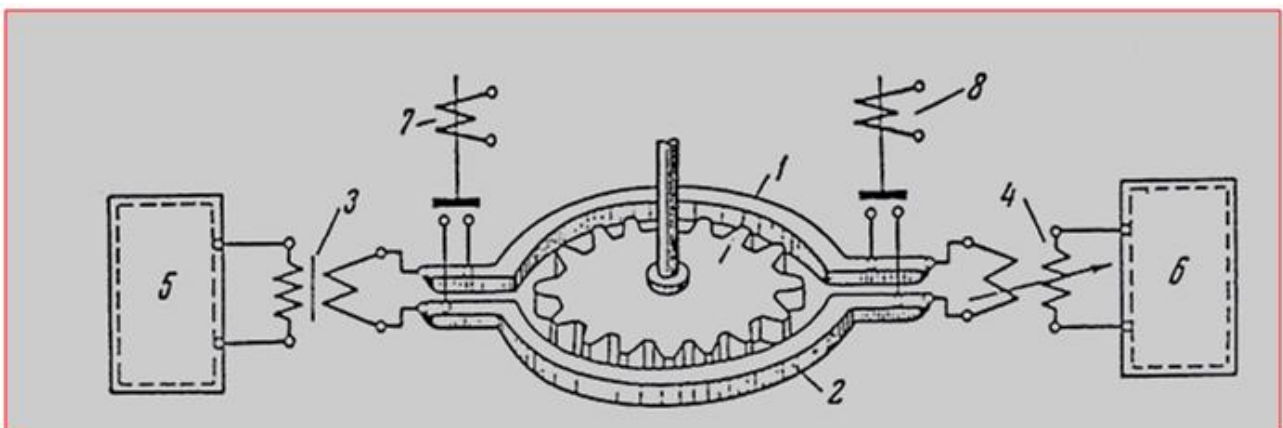
In questo caso si devono usare due generatori separati e il pezzo deve essere spostato da una spira all'altra molto velocemente e, dopo essere scaldato per frazioni di secondo, immerso nella vasca di tempra (raffreddamento).

La gestione dei movimenti meccanici aggiunge qualche difficoltà a questo metodo.

La variante che semplifica in un certo senso il processo è quella di usare un unico induttore che viene alimentato con due frequenze diverse in rapida successione, da due generatori separati, come indicato schematicamente nella figura N°4.



**Figura N°3-** Schema di funzionamento della tempra ad induzione in due fasi successive con spostamento del pezzo

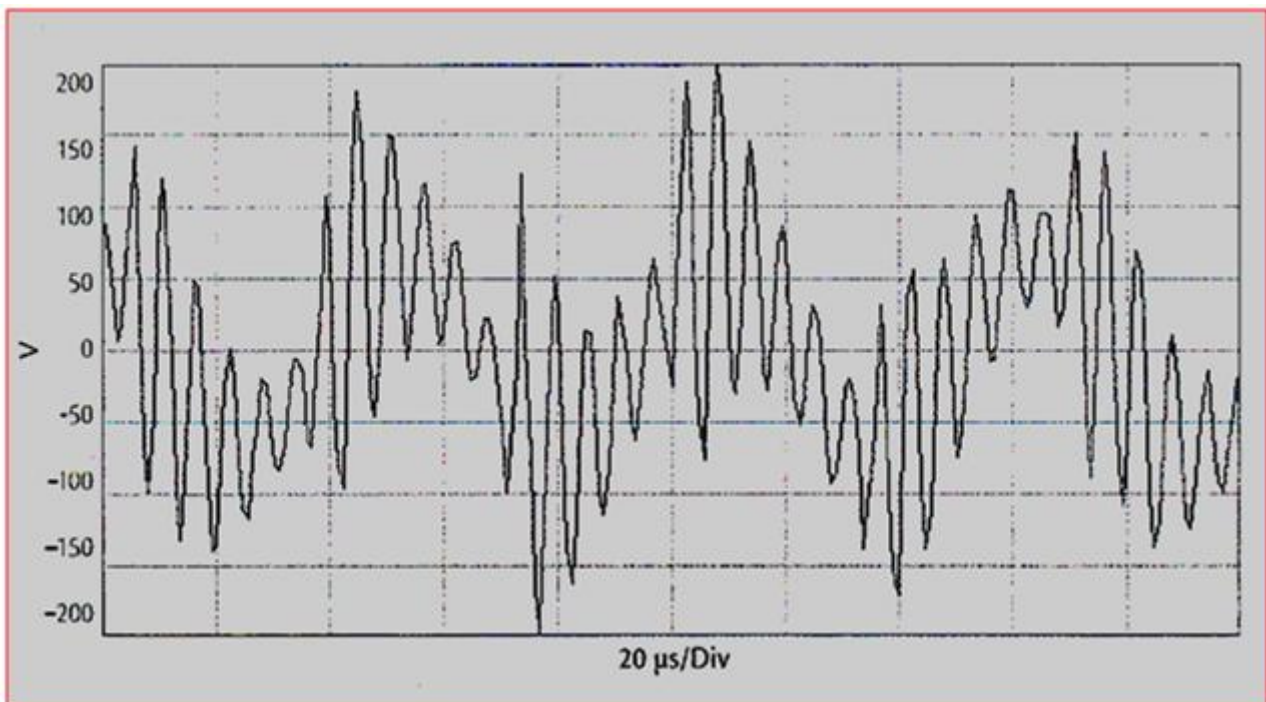


**Figura N°4-** Schema di funzionamento della tempra ad induzione in due fasi successive con cambio di frequenza sullo stesso induttore

Dal punto di vista teorico i metodi di tempra in due fasi successive possono funzionare, ma la messa a punto è molto difficile a causa dei tempi molto ridotti di riscaldamento e delle potenze in gioco che dipendono oltre che dalle frequenze usate anche dal modulo degli ingranaggi e dal materiale con cui sono costruiti.

Per questa ragione queste tecniche non hanno avuto una grande diffusione dal punto di vista industriale.

Un notevole passo avanti è stato fatto con l'introduzione di generatori che possono immettere nello stesso induttore due frequenze contemporaneamente e che si sovrappongono secondo un'onda che è schematizzata nella figura N°5.



**Figura N°5-** Schema dell'onda su un induttore alimentato da due frequenze diverse

L'ampiezza di entrambe le frequenze è controllabile indipendentemente una dall'altra e ciò permette una regolazione della miscela delle potenze di ciascuna frequenza al fine di ottimizzare al meglio il profilo di tempra al contorno del dente.

L'impiego della tempra simultanea a induzione con doppia frequenza è un metodo collaudato per controllare efficacemente la distorsione nella tempra a induzione di ingranaggi di piccole e medie dimensioni con induttori circolari. In molti casi, la tecnologia simultanea a doppia frequenza consente di mantenere la distorsione dopo la tempra a induzione in limiti molto ridotti.

Il cuore di un impianto di tempra a induzione è l'induttore, ma il suo cervello sono il generatore e i controlli. Negli ultimi anni, questi sono i settori nei quali la tecnologia della tempra a induzione è migliorata moltissimo.

I generatori hanno continuato a progredire e forniscono nuove soluzioni per il trattamento termico dei pezzi, compresi gli ingranaggi. Potenza più alta e maggiore flessibilità della frequenza consentono di aumentare la densità di potenza alla frequenza ideale di trattamento, facilitando il trattamento di una gamma più ampia di dimensioni e moduli degli ingranaggi. Inoltre, i progressi nei controlli consentono una migliore tracciatura dell'intero processo di trattamento termico.

Ed infatti sono ora disponibili sul mercato generatori che aumentano notevolmente la flessibilità degli impianti di tempra a induzione, assicurando l'eccezionale capacità di controllare non solo la potenza di uscita del generatore, ma anche la sua frequenza, in modo analogo al controllo delle macchine CNC.

Mentre le precedenti generazioni di generatori avevano flessibilità limitata, i moderni generatori sono in grado di produrre una frequenza massima fino a otto volte superiore

rispetto alla frequenza minima. Ciò consente di ampliare la gamma di ingranaggi da temprare a induzione usando lo stesso generatore e di effettuare il raffreddamento del pezzo con lo stesso impianto usato per il riscaldamento.

I tempi per ottenere profili di tempra superficiali, senza arrivare alla tempra a cuore dei denti, sono dell'ordine di decimi di secondi, le potenze in gioco sono molto alte, dell'ordine di 200 KW di MF e di 100 KW di AF per temprare una corona dentata di 70 mm di diametro.

Ovviamente, come tutte le macchine utensili, le macchine per la tempra a induzione si sono avvalse dei progressi che si sono avuti nella tecnologia di controllo e nel software.

Gli ingranaggi di grandi dimensioni vengono generalmente temprati a induzione con il metodo del dente per dente. Questo processo è stato sviluppato circa 60 anni fa. I più recenti controlli di macchina prevedono programmi che localizzano con precisione il dente dell'ingranaggio ed effettuano movimenti per temprare selettivamente ingranaggi interni ed esterni e a denti diritti ed elicoidali.

Inoltre i controlli e il software forniscono importanti dati per il controllo di qualità.

Questi sistemi raccolgono i dati di trattamento di ogni dente per avere la tracciabilità di ogni ingranaggio temprato a induzione.

Attualmente quindi, grazie alla grande flessibilità dei sistemi è possibile temprare ad induzione con spira unica ingranaggi che vanno da modulo 0,5 mm a modulo 14 – 16 mm con diametri esterni che possono arrivare anche a 2500 mm con fascia 80 mm.

La tecnica di induzione dente per dente è applicabile per moduli superiori a 6 mm fino a 25 – 30 mm e oltre, in pratica senza limiti di diametro.

La ditta Saet Group (Leinì – Torino) è specializzata nella costruzione e distribuzione di impianti di tempra ad induzione per ingranaggi e per altre tipologie di pezzi.



**Figura N°6-** Schematizzazione di un ingranaggio temprato ad induzione in modo corretto

Fra gli svantaggi che la tempra ad induzione comporta c'è la difficoltà della lavorazione meccanica di dentatura perché normalmente si deve partire da uno sgrossato bonificato, anziché da un ricotto isotermico come nel caso della cementazione. Per il vero bisogna dire che anche nel caso della nitrurazione esiste questo problema.



L'esecuzione della dentatura su un acciaio bonificato richiede tempi ciclo più lunghi e costi più elevati rispetto all'analoga operazione su pezzi ricotti isotermicamente e questo, per la produzione di grandi serie costituisce un notevole ostacolo.

Infatti per evitare criccate bisogna usare acciai al carbonio o acciai poco legati come quelli indicati nella tabella seguente, cioè i classici acciai da bonifica.

*Composizione chimica degli acciai temprabili ad induzione allo stato bonificato*

Sigla AISI	% C	% Mn	% Cr	% Mo	% Ni
4140	0,38 – 0,45	0,60 – 0,90	0,90 – 1,20	0,15 – 0,30	--
4340	0,38 – 0,43	0,60 – 0,80	0,70 – 0,90	0,20 – 0,30	1,65 – 2,00
1045	0,43 – 0,50	0,60 – 0,90	--	--	--
4150	0,48 – 0,53	0,71 – 1,00	0,80 – 1,00	0,15 – 0,25	--
1552	0,47 – 0,55	1,20 – 1,50	--	--	--
5150	0,48 – 0,53	0,70 – 0,90	0,70 – 0,90	--	--

Comunque, recenti progressi nei materiali hanno aperto nuove possibilità per la tempra a induzione. Un esempio è la gamma di acciai TSH (*Through Surface Hardening*, indurimento superficiale diretto), fornibili dalla ERS Engineering Corp. (USA), che ha lavorato con i suoi partner europei per sviluppare la metallurgia di questi acciai e il processo che permette alla tempra a induzione di sostituire la carbo-cementazione per una vasta gamma di pezzi, compresi alcuni pezzi che in precedenza si ritenevano impossibili da temprare a induzione con successo.

La tecnologia TSH è una combinazione sinergica tra moderni acciai e speciali tecniche di tempra ad induzione.

Questi nuovi acciai caratterizzati da bassi tenori di componenti di lega e basse percentuali di carbonio (inventati dal dr. K. Shepelyakovskii) presentano una ridotta crescita delle dimensioni del grano nel campo delle temperature usate dal trattamento termico.

In conclusione si possono così riassumere i vantaggi e gli svantaggi della tempra ad induzione applicata agli ingranaggi.

#### Vantaggi

- Esecuzione dell'operazione nella stessa linea di produzione;
- Tempi di esecuzione molto brevi
- Riduzione degli stock di materiale circolante
- Forte riduzione dell'energia utilizzata
- Minori distorsioni sui pezzi
- Tracciabilità dei pezzi trattati

#### Svantaggi

- Tempi di messa a punto molto lunghi. Vantaggi solo per grandi serie.;
- Necessità di usare acciai da bonifica o acciai speciali;

*Si ringrazia la ditta Ferioli e Gianotti (Rivoli – Torino) per le informazioni tecniche e le illustrazioni.*

Bianco Gianfranco  
Maggio 2011