Università degli Studi di Padova
Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in Ingegneria Elettrotecnica

Tesi di Laurea Specialistica:

Metodi di progettazione automatica di impianti ad induzione per la ricottura dei cordoni di saldatura di tubi

di

Federico Boldrin

Relatore :
Ch.mo Prof. Fabrizio Dughiero
Dipartimento di Ingegneria Elettrica

Correlatori:
Ing. Marcello Zerbetto e Ing. Alessandro Candeo
Inova Lab srl

A.A. 2010-2011

Ringrazio tutta la mia famiglia:
i miei genitori, Giorgio e Paola,
mio fratello mia cognata e mio nipote, Michele Rossana e Tommaso
per avermi sostenuto e retto in tutto il percorso fin qui fatto,
per aver pazientemente atteso che mi laureassi,
per aver sostenuto le spese per avermi incoraggiato e appoggiato moralmente,

Ringrazio poi tutti gli amici e compagni di "giochi" che hanno sicuramente contribuito a distrarmi nei momenti in cui sono stato particolarmente impegnato o giù di corda.

Ringrazio per la stesura della tesi Alessandro che è stato enormemente paziente,
per la realizzazione della stessa ringrazio Marcello, Cristian, Francesco di Inova Lab che mi hanno accompagno nei giorni in cui sono stati impegnato nello stage,
per la possibilità che mi è stata data ringrazio il prof. Dughiero che ha formato e continua a dirigere un più che mai disponibile e brillante gruppo.

Un ringraziamento a tutti.

Indice

Tabella simboli....7

1. Sommario....9

2. Introduzione....11

3. Il processo produttivo dei tubi....13
   3.1. Prove di controllo e processi di rifinitura....17
   3.2. L'uso dell'induzione nel riscaldamento....19
      3.2.1. Effetto pelle ed Effetto di Prossimità....23
   3.3. La saldatura ad induzione nei tubi....25
      3.3.1. Cosa succede nel materiale....27
         3.3.1.1. Profilo della temperatura nel tubo....29
   3.4. La ricottura....31
      3.4.1. Seam Annealing....33
         3.4.1.1. Risultati sperimentali ottenuti nei tubi con la ricottura ad induzione....35

4. Software utilizzati....41
   4.1. Python....41
   4.2. Flux....43
      4.2.1. Il metodo agli elementi finiti....45

5. Formulazioni relative ai problemi elettromagnetici....51
   5.1. Le equazioni di Maxwell....51
   5.2. Problema magnetico time harmonic accoppiato ad un transitorio termico....53
   5.3. Multiphysics....57
      5.3.1. Principio di risoluzione....57
      5.3.2. Multiphysics: scambio dati e sincronizzazione....59
      5.3.3. Diagramma logico....61

6. Presentazione generale del problema....65
   6.1. Il tubo....65
   6.2. Modelli geometrici....67
   6.3. Sorgenti e Circuito elettrico accoppiato....69
   6.4. Osservazioni riguardo il processo e la simulazione....71
      6.4.1 Scelta dell'induttore di tipo affiancato e del concentratore di flusso....71
      6.4.2. Scelta del materiale lineare-magnetico....73
      6.4.3. Scelta della frequenza a 3000 Hz....75

7. Ottimizzazione del processo....77
   7.1. Algoritmi di ottimizzazione....79
   7.2. Funzione obiettivo....81
   7.3. 1°STEP....83
   7.4. 2°STEP....87
   7.5. 3°STEP....89

8. Conclusioni.....91

Appendice 1.....93

Appendice 2.....109

Appendice 3.....135

Bibliografia.....149

Tabella simboli

Simbolo	Descrizione	U.d.m. (eventuale)
T1	Temperatura in P1	°C
ΔT12	Differenza di temperatura tra P1 e P2	°C
TMAX	Temperatura massima del cordone di saldatura durante tutto il periodo di riscaldamento	°C
P1	Punto del cordone di saldatura a più alta temperatura (vedi fig.)	
P2	Punto del cordone di saldatura a più bassa temperatura (vedi fig.)	
LH	Lunghezza della stazione di riscaldamento	m
LC	Distanza tra le stazioni di riscaldamento	m
E	Campo elettrico	V/m
V	Potenziale elettrico scalare	V
ε	Costante dielettrica	F/m
D	Spostamento elettrico	C/m^2
μ	Permeabilità magnetica	H/m
H	Campo magnetico	A/m
J	Densità di corrente	A/m^2
B	Induzione magnetico	T
ϱ	Densità di carica	C/m^3
ω	pulsazione	Rad/s
A	Potenziale magnetico vettore	Wb/m
σ	Conducibilità	S/m
δ	Spessore di penetrazione	mm
k	Conduttività termica	W/m°C
ϱcP	Capacità termica volumetrica	J/m^3C

1. Sommario

L'argomento trattato in questa tesi riguarda la ricottura ad induzione del cordone di saldatura di tubi. Ci si occupa della determinazione di alcuni parametri riguardanti il trattamento termico in modo tale che esso sia qualitativamente accettabile e in particolare della determinazione delle correnti circolanti negli induttori e della massima velocità di avanzamento del tubo.

A tale scopo, si utilizzerà un programma di simulazione di tipo commerciale agli elementi finiti, Flux2d, con il quale sarà possibile simulare un riscaldamento a più stazioni distinte e distanziate tra loro in modo da ottenere un profilo di temperatura il più possibile uniforme sul cordone di saldatura. I parametri di processo che vengono presi in considerazione sono due: la massima temperatura raggiunta sul cordone nel corso del processo di riscaldamento (T_{MAX}) e la massima differenza di temperatura lungo il suo spessore alla fine del processo (ΔT_{12}). Mediante un controllo step-by-step durante tutto il processo di riscaldamento o mediante l'uso di un algoritmo di ottimizzazione, si cercherà la miglior combinazione dei suddetti parametri che soddisfi i vincoli tecnologici del processo in esame.

Il problema è stato risolto affrontando tre casi diversi , sotto elencati in ordine di complessità crescente:

1- Per più stazioni di riscaldamento si ottimizzano la velocità e la potenza elettrica fornita dagli induttori mediante la regolazione di alcuni dei parametri durante il processo. La qualità del processo sarà valutata mediante il controllo della massima temperatura T_{MAX}.

2- Utilizzo di un algoritmo di ottimizzazione per ottenere i valori ottimi di velocità e corrente che soddisfino gli obiettivi su T_{MAX} e ΔT_{12}per una singola stazione di riscaldo.

3- Utilizzo di un algoritmo di ottimizzazione per ottenere i valori ottimi di velocità e corrente che soddisfino gli obiettivi su T_{MAX} e ΔT_{12} per ciascuna stazione riscaldo.

Riassumendo, l'obbiettivo di questo lavoro sarà la realizzazione di uno strumento che permetta di simulare in maniera automatica il riscaldamento di un oggetto tubolare e quindi di determinare automaticamente la velocità massima di avanzamento del tubo e le correnti negli induttori che caratterizzano il processo di ricottura.

Nell'elaborato saranno a tal proposito inseriti degli esempi applicativi.

2. Introduzione

Il trattamento termico di ricottura costituisce una fase del processo di produzione di tubi in acciaio. Al giorno d'oggi il riscaldamento mediante induzione è la tecnologia più diffusa per ottenere questo tipo di oggetti realizzati in materiale metallico. Dopo l'introduzione dell'induzione nei processi produttivi ci sono voluti vent'anni per far maturare questa tecnologia, fino a farla diventare una delle tecniche di riferimento nel campo dei trattamenti termici; ciò è stato possibile grazie ad un forte miglioramento delle conoscenze teoriche e delle possibilità di calcolo per la realizzazione di nuovi induttori, la possibilità di automazione degli impianti mediante microprocessori, l'integrazione nei cicli di produzione e lo sviluppo di convertitori di elevata frequenza e potenza.

Lo scopo di questo elaborato è quello di sviluppare una procedura automatica per la scelta di alcuni parametri del processo in modo tale da renderlo altamente produttivo. Con l'avvento dei software di simulazione e con le risorse elettroniche oggi disponibili è possibile ottenere dei risultati che fino a pochi anni fa era impensabile immaginare. Infatti solo con una profonda conoscenza del processo specifico era possibile scegliere dei parametri di lavorazione adeguati e comunque non specifici per il singolo trattamento termico in esame. Diversamente con l'analisi FEM è possibile studiare i singoli casi in maniera automatica e per ognuno trovare la configurazione ottimale. Qui si cercherà di realizzare uno strumento che permetta di simulare il riscaldamento completo del pezzo per poterne elaborare le grandezze termiche e trovare dei parametri che consentano una alta produttività del processo.

La presente tesi è stata realizzata grazie ad uno stage svolto in una azienda specializzata nel campo del riscaldamento ad induzione, *Inova Lab*. Inova Lab è uno spin-off dell'Università di Padova che si occupa di innovazione e trasferimento tecnologico e che fornisce servizi e consulenze ad aziende del settore elettromeccanico o che fanno uso nei loro processi produttivi di apparecchiature elettromeccaniche (motori elettrici, attuatori e sensori elettromeccanici, trasformatori, forni elettrici). Inova Lab inoltre realizza e studia nuovi prodotti per ottimizzare i processi produttivi con particolare riferimento alle tecnologie elettrotermiche.

I dati di partenza del progetto sono stati forniti dal tutor aziendale e da queste informazioni è stato possibile creare un tool che permette l'analisi e la scelta di alcuni fra i più importanti parametri del processo di ricottura.
Lo strumento realizzato potrà in seguito essere migliorato includendo altre variabili tipiche del processo, come ad esempio geometria e disposizione degli induttori.

Nei capitoli a seguire si farà una breve introduzione descrivendo il processo di produzione dei tubi e l'uso dell'induzione nel riscaldamento; si illustrerà poi la saldatura e i motivi che rendono necessaria la ricottura, una sua descrizione, il caso specifico di ricottura del cordone di saldatura del tubo e i suoi effetti documentati da risultati sperimentali.
Si passerà poi alla descrizione dei software utilizzati, ad una breve trattazione del problema specifico ovvero al problema multi fisico magneto-termico con lo schema a blocchi di come viene implementata la logica di risoluzione.
Infine sarà descritto il modello di simulazione nella sua parte geometria e fisica e quindi una breve presentazione degli algoritmi di ottimizzazione utilizzati, in particolare del tipo "evolution-strategy".

3. Il processo produttivo dei tubi

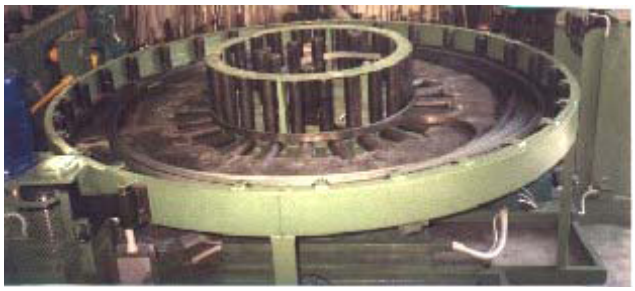
Per la realizzazione dei tubi la materia prima è rappresentata da rulli in acciaio al carbonio che vengono tagliati longitudinalmente su apposite linee di taglio per ottenere dei nastri di larghezza corrispondente allo sviluppo del diametro del tubo che si vuole ottenere.

I nastri, caricati sulle linee di profilatura e saldatura longitudinale, vengono svolti e attraverso una serie di coppie di rulli progressivamente curvati in senso trasversale fino ad assumere un profilo vicino ad una sezione circolare semichiusa, con i due lembi in contatto. Tramite un sistema ad induzione denominato HF o HFW (High Frequency Welding) viene eseguita la saldatura in continuo che per spessori del decimo di millimetro può raggiungere velocità anche superiori ai 100 m/min.

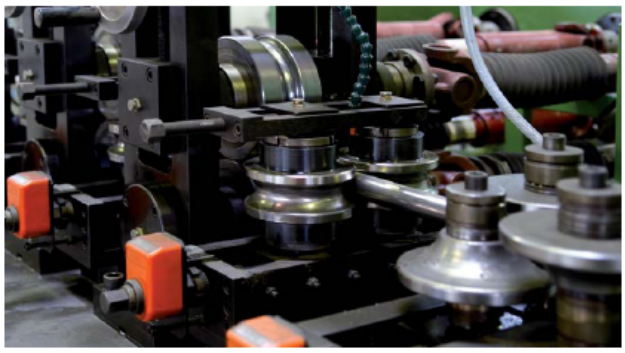
Nel dettaglio vediamo le varie fasi del ciclo tecnologico [1]:

- Il rotolo di nastro proveniente dal magazzino viene avvolto sull'aspo devolgitore doppio

- I vari nastri vengono saldati testa a testa
- Mediante un accumulatore orizzontale si crea una riserva di nastro che evita di dover arrestare la linea per sostituire il rotolo

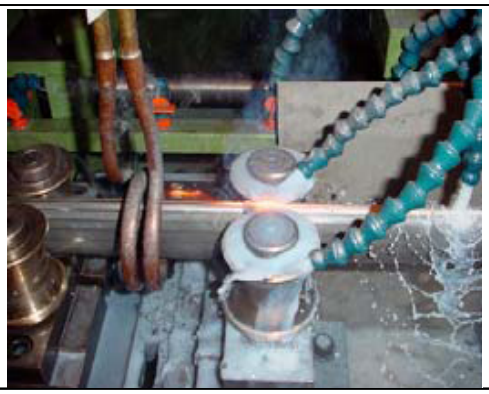


- Il nastro viene pulito con acqua compressa
- La macchina profilatrice forma il tubo



- Il tubo viene saldato longitudinalmente mediante saldatrice ad alta frequenza (centinaia di kHz)

Vedi "3.3_La saldatura ad induzione nei tubi"



- Dopo la saldatura il **dispositivo eddy current** controlla il cordone di saldatura

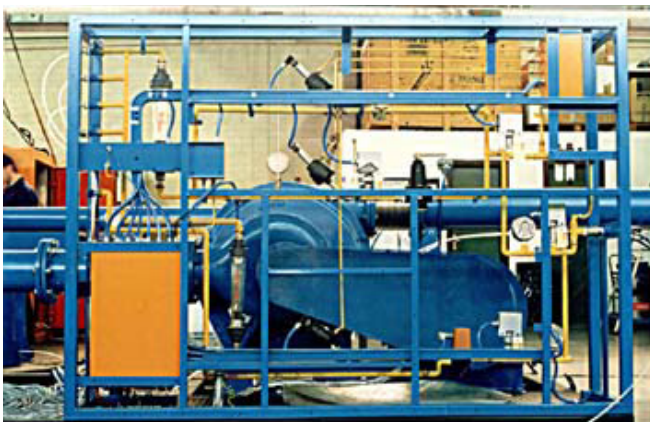
Vedi "3.1_Prove di controllo e processi di rifinitura"

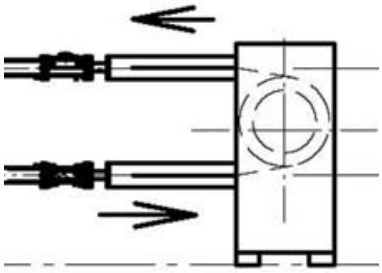
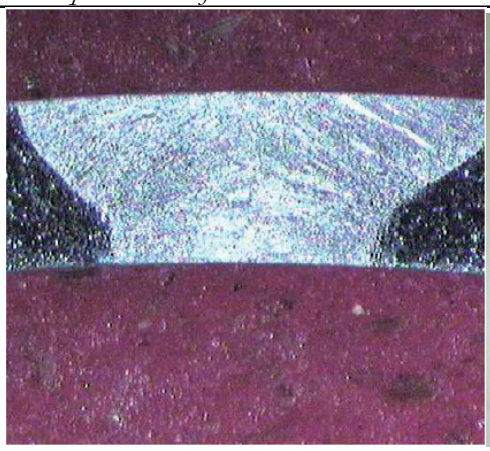
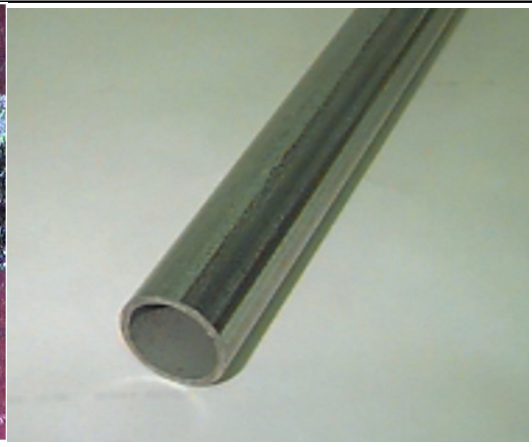
- Raffreddamento del tubo
- Il diametro del tubo saldato viene ridotto alla misura desiderata mediante trafilatura
- Pulizia del tubo
- Il tubo viene **ricotto** in atmosfera inerte per mezzo dell'unità di riscaldo ad induzione

- Il tubo viene fatto transitare in un tunnel dove si raffredda in atmosfera controllata senza ossidarsi

Nel caso sia richiesta la zincatura il raffreddamento viene limitato a 420°C

Attenzione alla dinamica di raffreddamento, se eseguita troppo velocemente deteriora le proprietà meccaniche e se questo accade nell'intervallo critico di temperatura da 800°C a 680°C la resistenza meccanica risulta elevata e la duttilità non è accettabile.



• Al fine di contenere la lunghezza della linea, viene installata una ruota di rinvio al termine della prima sezione di raffreddamento che permette al tubo di ritornare verso l'inizio linea pur rimanendo in atmosfera protetta 
• Il tubo è mantenuto in atmosfera inerte sino all'unità di zincatura
• Se richiesto il tubo viene **zincato a caldo** *Vedi "3.1_Prove di controllo e processi di rifinitura"*
• Il tubo viene raffreddato e nuovamente controllato con il **dispositivo eddy current** *Vedi "3.1_Prove di controllo e processi di rifinitura"*
• Il tubo viene **testato con acqua in pressione** *Vedi "3.1_Prove di controllo e processi di rifinitura"*
• Il prodotto è finalmente pronto  

Prodotti di questo tipo trovano impieghi in più settori:

- Automotive (alberi a camme, piantoni dello sterzo, barre stabilizzatrici, leve del cambio, silent block,airbag, impianti di scarico e body car).
- Tubi per impieghi meccanici e per ancoraggi di rinforzo per gallerie e miniere
- Tubi termici e per scambiatori (caldaie industriali, scambiatori di calore, boiler per acqua calda con smaltatura ad una o due facce).
- Tubi per condotte, teleriscaldamento, API (per acquedotti e condotte di fluidi combustibili che possono essere grezzi di laminazione o rivestiti in bitume o polietilene).
- Tubi per impieghi idrotermosanitari (non vi è traccia di piombo e zinco; tubi preverniciati per impianti antincendio, per il gas, per l'aria compressa o per l'impiantistica generale quindi impianti radianti, di aspirazione, agroalimentari, di irrigazione e impianti antincendio).
- Tubi strutturali destinati alle costruzioni (a sezione tonda, quadrata e rettangolare destinati all'impiego nelle strutture metalliche civili, industriali e pubbliche, tubi di arredamento domestico ed industriale).

3.1 Prove di controllo e processi di rifinitura

A valle delle linee di produzione per caratterizzare il tubo stesso, renderlo adatto all'uso finale che se ne deve fare e rispettoso delle normative si possono/devono eseguire altri processi [2]:

- **Prova di tenuta idraulica in pressione** nella quale ogni tubo deve resistere al test senza perdite o deformazioni visibili; si riempie il tubo con acqua additivata a liquidi coloranti fluorescenti che tracciano eventuali perdite e deformazioni

- **Prova ad ultrasuoni** nella quale un fascio di onde investendo il tubo mette in evidenzia i difetti interni come le cricche che interrompono e riflettono gli ultrasuoni . L'entità dell'energia riflessa e il tempo di propagazione permette di localizzare con precisione i difetti nel pezzo. L'ispezione viene ripetuta a varie frequenze comprese fra 1 e 25 MHz.

- **Prova con dispositivo eddy current**: si tratta di una prova non distruttiva che sfrutta il principio di induzione elettromagnetica. Il cordone viene posto nelle vicinanze di un induttore attraversato da una corrente alternata con frequenza variabile fra i 6 MHz e i 60 MHz. Detta corrente induce delle correnti nel pezzo che subiranno delle deviazioni in presenza di difetti e causeranno delle variazione di campo magnetico che vengono rilevate nell'induttore di eccitazione mediante misure di tensione .

- **Zincatura a caldo** che protegge l'acciaio dalla corrosione. Si immerge il pezzo in un bagno di metallo fuso che si depositerà sulla superficie del pezzo in un film protettivo dallo spessore che può variare tra 0,0025-0,2 mm di lunghezza ovvero 150-900 g/m2 di peso e assieme alle caratteristiche dell'ambiente incide sulla la vita del trattamento. Il pezzo da rivestire deve essere preventivamente spazzolato, sgrassato, ripulito da eventuali ossidazioni superficiali per assicurare massima aderenza al rivestimento di zinco.

  La funzione del film di zinco è duplice:

  - in primo luogo protegge da ossidazioni alle basse temperature grazie allo strato superficiale di ossido e

  - considerato che lo zinco ha un'elettronegatività molto più bassa dell'acciaio protegge elettrochimicamente dalla corrosione in caso di danneggiamento dello strato superficiale (cioè quando il metallo del pezzo viene a contatto con l'ambiente per graffi o butterazioni) corrodendosi al posto del metallo comportandosi da anodo.

- **Normalizzazione** in forni nei quali il tubo viene portato a temperature tali da trasformare la propria struttura cristallina in austenite. Il risultato è un tubo più duro e meno duttile rispetto alla ricottura e ciò serve per ottenere una struttura fine e uniforme (omogenizzazione) e ridurre lo stress residuo.

- **Taglio** su misura.

- Operazioni di **finitura** come la spazzolatura e la lucidatura.

3.2 L'uso dell'induzione nel riscaldamento [3]

Il riscaldamento ad induzione è uno dei processi oggi maggiormente utilizzati per il riscaldamento di corpi elettricamente conduttori e nella maggior parte dei casi costituiti da materiali metallici.

- ✓ *I principali fattori che hanno portato alla grande diffusione di questa tecnologia per le particolari caratteristiche che la rendono praticamente insostituibile in molti processi industriali sono sostanzialmente i seguenti:*
  - lo sviluppo di calore direttamente nel materiale da riscaldare;
  - la possibilità di localizzare detto calore in zone determinate del corpo da riscaldare a seconda delle esigenze applicative;
  - la razionale utilizzazione dell'energia elettrica spesa per la produzione di calore, anche nei procedimenti in cui essa sostituisce i combustibili;
  - una rigorosa ripetibilità dei trattamenti termici e quindi la costanza delle caratteristiche del prodotto finito con conseguente riduzione degli scarti;
  - l'aumento della produzione per la possibilità di mettere in gioco potenze specifiche elevate e quindi realizzare riscaldamenti in tempi brevissimi, con una notevole riduzione del costo della manodopera;
  - la possibilità di ottenere in alcuni casi risultati non conseguibili con altre tecniche;
  - una rapida entrata in regime dei cicli di riscaldamento per l'assenza di componenti termicamente inerti;
  - la bassa perdita di calore verso l'ambiente, con conseguente elevato rendimento e grande miglioramento delle condizioni di lavoro degli operatori;
  - il miglioramento del rendimento degli induttori grazie a nuove conoscenze teoriche e nuove possibilità di calcolo;
  - l'utilizzazione di nuovi componenti allo stato solido che ha consentito lo sviluppo di convertitori di frequenza di elevata potenza in tutti i campi di frequenza che interessano le applicazioni industriali;
  - la completa automatizzazione degli impianti resa possibile dall'impiego di sistemi di programmazione, regolazione e controllo a microprocessori e la conseguente possibilità di inserimento in cicli di produzione continua;
  - grande affidabilità degli impianti che riduce al minimo le interruzioni per guasti e manutenzioni;
  - eliminazione quasi totale delle cause dell'inquinamento ambientale.

- ✓ *I settori tradizionali di impiego sono*
  - la tempra totale o localizzata;
  - le lavorazioni a caldo dei metalli (laminazione, forgiatura e stampaggio);
  - saldatura e brasatura;
  - fusione dei metalli.

✓ *I principi su cui si basa il riscaldamento ad induzione si possono riassumere in pochi punti* :

- la produzione di calore nel pezzo sfrutta il fenomeno dell'induzione elettromagnetica (Legge di Faraday Neumann) secondo la quale una forza elettromotrice indotta si instaura in un corpo sottoposto all'azione di un campo magnetico variabile nel tempo;
- le correnti indotte danno luogo a perdite per effetto Joule direttamente nel materiale da riscaldare e costituiscono le sorgenti di calore necessarie ad aumentare la temperatura del corpo;
- la distribuzione delle correnti indotte e delle sorgenti di calore risulta sempre disuniforme a causa dell'effetto pelle e dell'effetto di prossimità (vedi "3.2.1. Effetto pelle ed Effetto di Prossimità");
- l'aumento delle temperature nel corpo in riscaldamento è determinata dalle leggi della conduzione termica (Leggi di Fourier).

✓ *Pertanto le caratteristiche del riscaldamento sono:*

- il trasferimento di energia dalla bobina induttrice al corpo da riscaldare per via elettromagnetica e quindi senza contatto meccanico;
- la distribuzione delle correnti indotte e delle sorgenti di calore sono via via di valore decrescente dalla superficie verso l'interno del corpo;
- la possibilità di concentrare le sorgenti di calore in porzioni limitate del corpo o di distribuirle nella totalità del corpo stesso regolando la frequenza, la potenza e la geometria dell'induttore.

Il campo magnetico di eccitazione si ottiene facendo circolare una corrente di intensità e frequenza opportune entro una bobina induttrice realizzata solitamente in un tubo di rame cavo raffreddato internamente con circolazione d'acqua. A seconda della configurazione geometrica del corpo da riscaldare e del tipo di riscaldamento da realizzare, si utilizzano degli induttori di forma opportuna considerando che qualsiasi conduttore attraversato da corrente dà luogo ad una campo magnetico nello spazio circostante e quindi a correnti indotte nei corpi conduttori situati in vicinanza.

Tenuto conto che la distribuzione delle correnti indotte dipende dalla frequenza del campo di eccitazione, a seconda delle esigenze imposte dalle diverse applicazioni l'alimentazione della bobina induttrice viene effettuata a frequenza industriale o a frequenze più elevate, che vengono ottenute oggi mediante tiristori IGBT e MOSFET nei campi di potenza e frequenza indicati in figura 3.1.

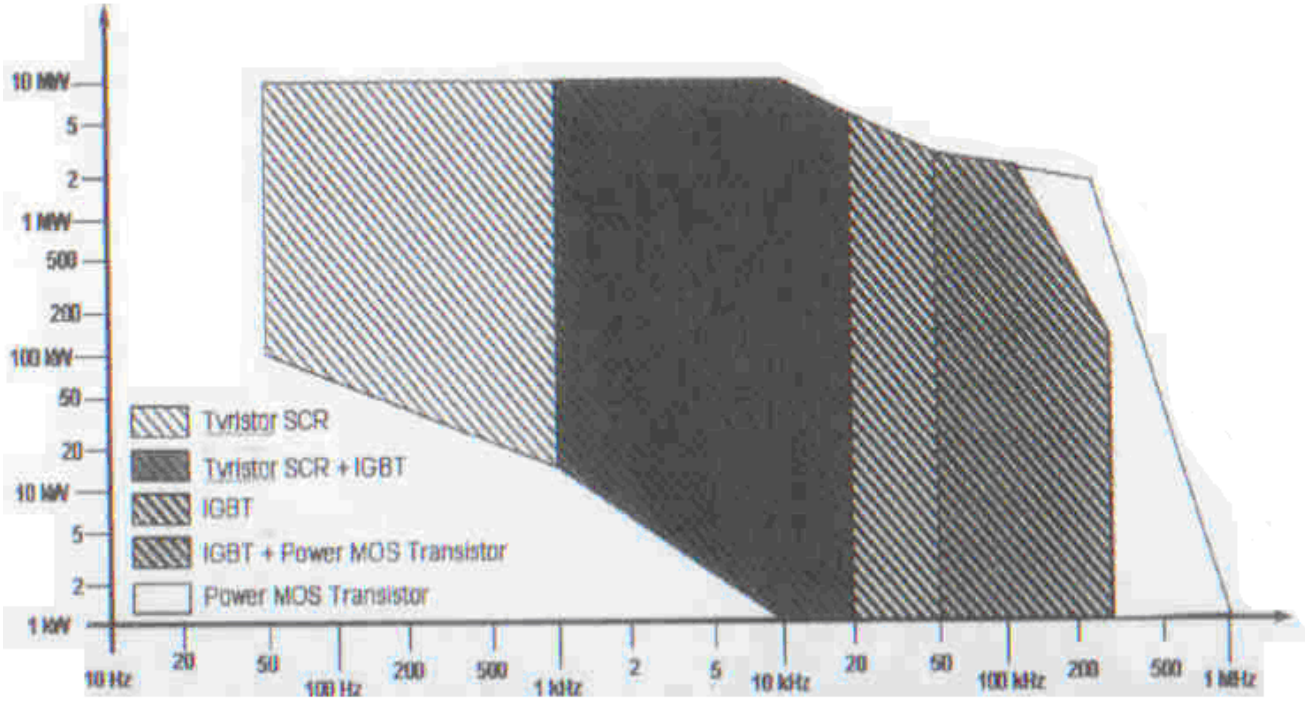


Figura 3.1*- Frequenze e potenze di generatori commerciali allo stato solido*

Senza entrare nel dettaglio gli IGBT presentano i vantaggi dei BJT e dei MOSFET, quindi basse perdite di conduzione ed elevate velocità di switching;
grazie all'alta impedenza di ingresso dei transistor MOS e alla bassa tensione di saturazione dei BJT consente di operare con livelli di potenza piuttosto elevati (10 MW) ossia di lavorare con alti livelli di corrente e tensione (migliaia di Volt e Ampere).

Per le frequenze di qualche kHz, peculiari dei processi di ricottura, gli IGBT rientrano in pieno nel campo di utilizzo; se si pensa invece ad altri processi legati alla produzione di tubi ed in particolare alla saldatura occorrerebbero transistor in grado di operare senza difficoltà a frequenze ben più alte, anche di 400-500 kHz, come i MOSFET.

Un impianto di riscaldamento ad induzione risulta pertanto schematicamente costituito

- dall'induttore(c),
- dal convertitore di frequenza (a),
- dal corpo da riscaldare (d) e
- dalla batteria di condensatori (b)
  che risulta sempre necessaria per la compensazione del basso fattore di potenza del sistema induttore-carico. La batteria dei condensatori sarà il più vicino possibile all'induttore così da abbattere da subito le correnti reattive.

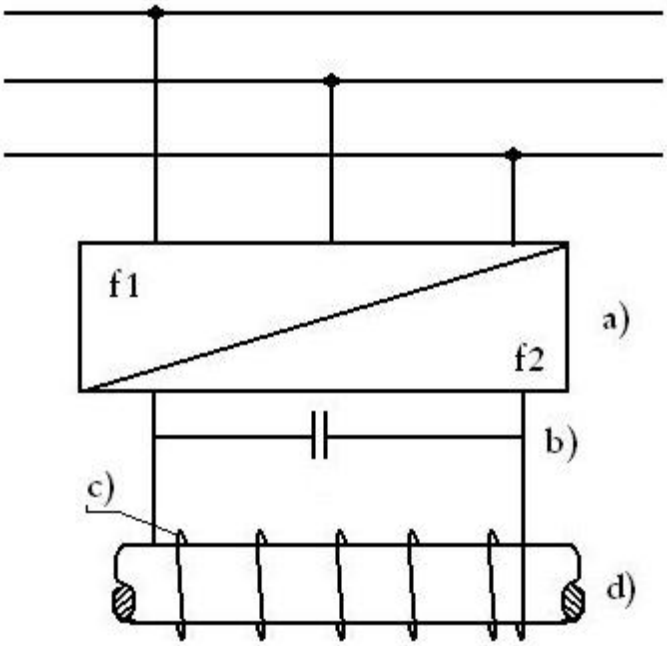


Figura 3.2- *Elementi principali di un impianto di riscaldamento ad induzione*

3.2.1 Effetto Pelle ed Effetto di Prossimità [4]

Per effetto pelle si intende quel fenomeno che si presenta nei conduttori attraversati da corrente elettrica variabile, per il quale la distribuzione della corrente non è uniforme a causa della variazioni del flusso magnetico al suo interno.

Si consideri un conduttore cilindrico filiforme sottoposto ad una tensione applicata fra due sue sezioni normali: esso è percorso da una corrente secondo il proprio asse.
Si verifica che la parte interna del conduttore è caratterizzata da una autoinduttanza maggiore rispetto a quella esterna. Se la tensione ai capi del conduttore è variabile nel tempo, in particolare con legge sinusoidale, si avrà una impedenza maggiore nella parte interna e inversamente la densità di corrente è maggiore in periferia che non all'interno; in opportune condizioni il fenomeno può essere talmente notevole da limitare il passaggio della corrente esclusivamente ad un sottile strato superficiale di conduttore, da cui il nome dell'effetto.

Globalmente ne consegue un aumento della resistenza elettrica effettiva e una riduzione dell'autoinduttanza interna del conduttore. Sull'entità di queste variazioni influiscono la frequenza della corrente, la resistività e la permeabilità del materiale conduttore e la sua forma e dimensioni come vedremo di seguito.

Prendiamo ad esempio l'effetto pelle in un semispazio riempito di materiale conduttore: sia esso rappresentato dalla figura 3.3 e corrisponde al semiasse z positivo (verso il basso) è sottoposto ad un campo elettrico variabile sinusoidalmente nel tempo e diretto secondo x in modo che i piani x = k con k costante qualsiasi , siano equipotenziali.

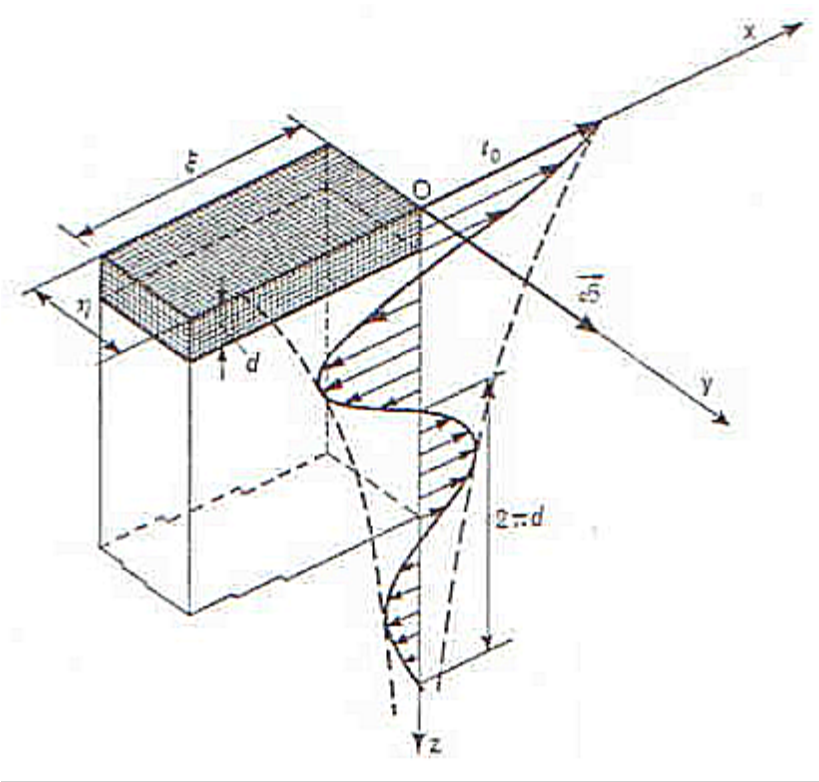


Figura 3.3- *Effetto pellicolare piano*

L'intensità della densità di corrente *i* alle varie profondità ha sempre direzione x, ma il suo valore ed il suo verso variano con legge di un'onda sinusoidale nel tempo t e migrante e smorzata nello spazio come in figura 3.3. Per i punti che si trovano lungo il semiasse z e per $t = \pi/(2\omega)$, è:

$$i = i_0 \cdot e^{-z/d} \cdot \sin\left(\omega t - z/d\right) \tag{3-1}$$

con:

- $d = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$ spessore di penetrazione che nel caso di materiali magnetici dipende dalla densità di corrente data la permeabilità variabile;
- i_0 = valor massimo della densità di corrente in superficie ;
- ω = pulsazione del campo elettrico applicato;
- ρ = resistività elettrica del conduttore
- $\mu = \mu_r * \mu_0$ = permeabilità magnetica assoluta del conduttore.

Dall'equazione della densità di corrente risulta che gli strati profondi del conduttore contribuiscono in misura sempre minore al trasporto della corrente, quindi la resistenza elettrica del conduttore per la corrente alternata risulta maggiore di quella per la corrente continua;
una porzione prismatica di conduttore (figura3.3), indefinita secondo z positivo e dalle dimensioni di ξ per η, ha una resistenza nulla per la corrente costante; invece in corrente alternata sinusoidale ha una resistenza effettiva (agli effetti della potenza dissipata) pari a

$$r = \rho \cdot \frac{\xi}{\eta d} \tag{3-2}$$

cioè il conduttore si comporta come se fosse limitato ad uno strato superficiale di profondità d.
Un esempio di applicazione dell'effetto pelle può essere la tempra superficiale di pezzi di acciaio:

Il pezzo da trattare viene disposto entro una bobina percorsa da corrente a frequenza elevata (centinaia di kHz) ed è sede di correnti indotte che in opportune condizioni hanno andamento esclusivamente superficiale con conseguente produzione locale di energia sotto forma di calore. La potenza immessa deve essere sufficientemente elevata in modo che la parte esterna arrivi a temperatura di tempra senza che il calore abbia avuto il tempo di propagarsi alla parte interna; in concreto per raggiungere tale temperatura si richiedono appena alcuni secondi dopo di che il pezzo viene immerso in un liquido di raffreddamento. L'effetto è una elevata durezza superficiale senza che la parte interna diventi fragile

<u>Effetto di Prossimità:</u>

L'effetto di prossimità corrisponde ad una alterazione della distribuzione di corrente (e di campo magnetico) rispetto a quello che si verificherebbe per semplice effetto pelle nella sezione del conduttore, quando esso si trovasse da solo nello spazio. Tale alterazione deriva dalla vicinanza di uno o più conduttori percorsi da corrente della medesima frequenza.
Nel caso più semplice l'effetto pelle e l'effetto di prossimità sono caratteristici dei conduttori aventi asse rettilineo e posizionati parallelamente nello spazio (non sghembi). Nel caso di due conduttori circolari pieni uguali e paralleli, percorsi da correnti in fase, l'effetto di prossimità si manifesta con maggior addensamento della corrente rispetto all'effetto pelle sulle superfici non affacciate dei conduttori, mentre nel casi dei medesimi conduttori percorsi da correnti in opposizione di fase, l'effetto di prossimità si manifesta con maggior addensamento rispetto all'effetto pelle della corrente sulle superfici affacciate dei conduttori.

3.3 La saldatura ad induzione dei tubi[5]

Molti dei tubi in acciaio in commercio sono realizzati a partire da una lamiera piana, deformata lungo la direzione assiale fino a modellare una sorta di cilindro che poi verrà saldato nelle due giunzioni poste in contatto come illustrato in figura 3.4.

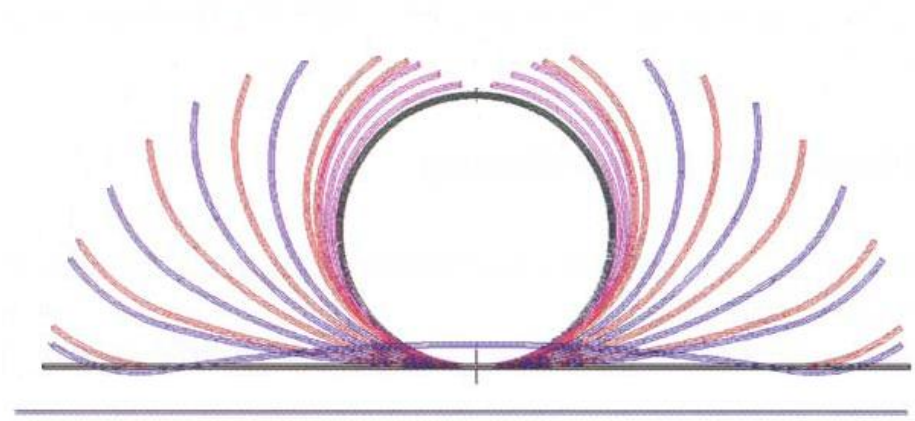
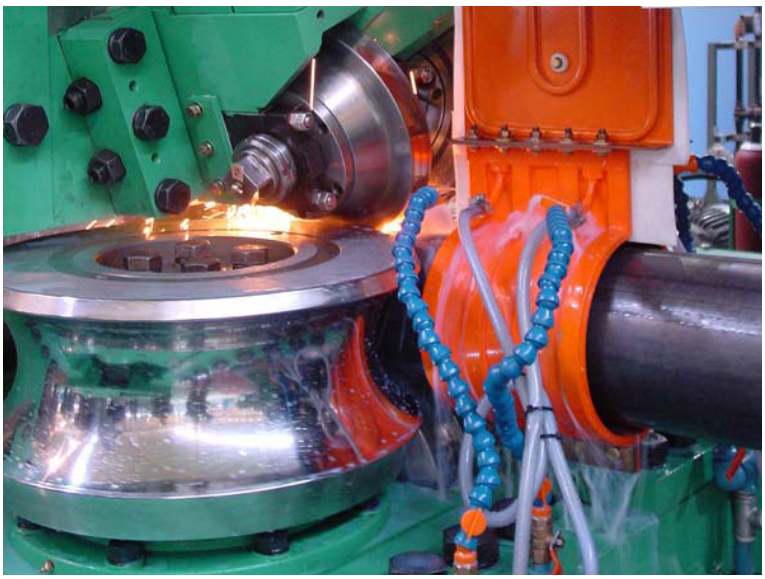


Figura 3.4- *Formatura del tubo mediante macchina profilatrice*

La saldatura tra i due bordi della lamiera può avvenire con degli elettrodi oppure mediante un induttore che induce una corrente elettrica ad alta frequenza (100 kHz – 400 kHz) nel tubo stesso e in particolare nella zona interessata; grazie all'effetto prossimità precedentemente esposto, il passaggio di corrente viene forzato proprio lungo i lembi di lamiera che in questo modo raggiungono temperature tali da fondere localmente il materiale; come illustrato in figura 2, l'unione delle due parti sarà agevolata da dei rulli che metteranno in compressione le due estremità.



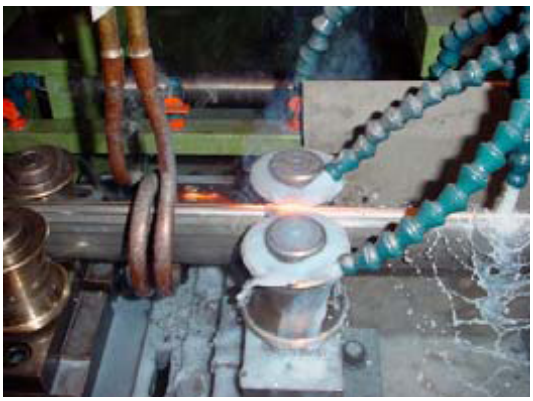


Figura 3.5 a e b - *Saldatura del tubo*

La saldatura sarà poi lasciata raffreddare piuttosto velocemente per garantire l'integrità della giunzione; per questo motivo il tubo presenterà delle differenti proprietà metallurgico-meccaniche, in particolare nella zone portata ad alte temperature.

3.3.1 Cosa succede in dettaglio nel materiale

La temperatura nelle vicinanze del cordone nel momento della saldatura è intorno ai 1500°C (valore che varia in funzione del tipo di acciaio che si considera). Da questo valore massimo la temperatura cala descrivendo delle linee di isotemperatura che, se osservate lungo la sezione trasversale del tubo descrivono degli archi di circonferenza (figura 3.6). Un esempio pratico della dinamica dell'andamento delle linee di isotemperatura è riportato nel paragrafo che segue.

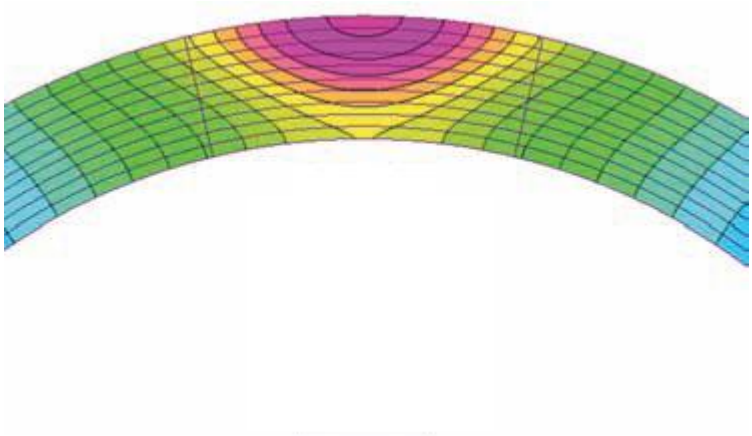


Figura 3.6 - *Andamento delle linee di isotemperatura nel tubo*

Una volta terminata la saldatura, l'acciaio raffreddandosi passa per certi valori di temperatura per i quali la struttura molecolare viene completamente stravolta; come si vede in figura 3.7, il reticolo cristallino del materiale si trasforma da Austenite a Ferrite ovvero il suo reticolo cristallino cambia da CFC (cubico a faccie centrate) a CCC (cubico a corpo centrato).

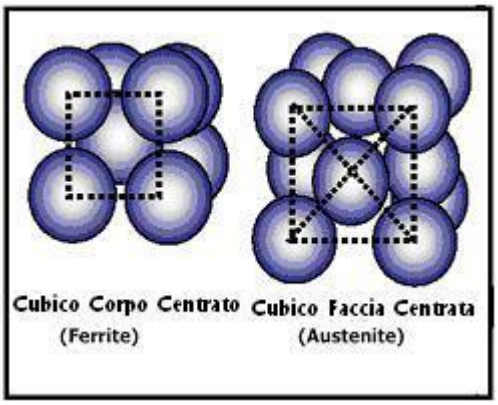


Figura 3.7 – *Reticolo cristallino della Ferrite e della Austenite*

In realtà il processo è un po' più articolato e coinvolge una fase dell'acciaio di non equilibrio, ovvero la martensite: col raffreddamento rapido dell'austenite si forza la trasformazione del reticolo del ferro da CFC a CCC che avviene con estrema rapidità, tanto da impedire al carbonio (più piccolo degli atomi di ferro), presente in soluzione solida interstiziale nell' austenite, di diffondere ed andare a formare il carburo di ferro, come previsto dal diagramma di stato di figura 3.14.

Gli atomi di carbonio rimangono quindi "intrappolati" nel reticolo tipo CCC, come quello del ferro alfa, nel quale sono praticamente insolubili. Si forma quindi una nuova soluzione solida interstiziale, non di equilibrio, metastabile, la martensite avente struttura cristallina a corpo centrato tetragonale.

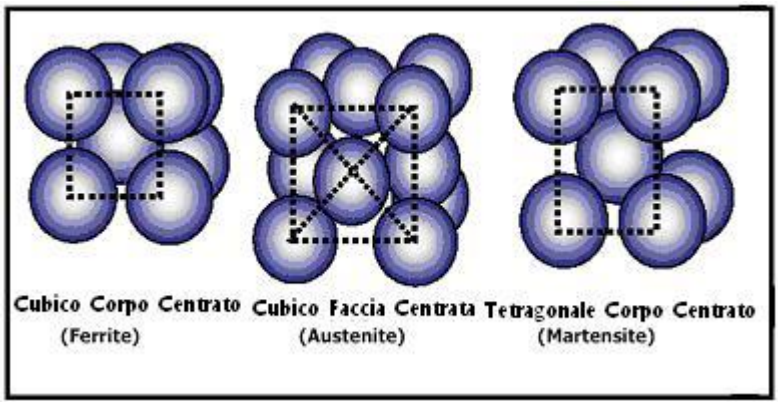


Figura 3.8 – *Reticolo cristallino della Ferrite,della Austenite e della Martensite*

Gli atomi di carbonio intrappolati tra quelli di ferro determinano nel reticolo cristallino un alto stress interno alla struttura stessa, rendendo l'acciaio del cordone duro e fragile. Con particolari cicli di trattamento termico è possibile modificare la forma e le dimensioni dei cristalli presenti nelle strutture degli acciai, dando luogo alla formazione di microstrutture formate da due o più tipi di cristalli, che assumono forme tipiche e particolari, facilmente riconoscibili all'esame micrografico. Ad esempio, i carburi possono assumere forma lamellare, come nella *perlite*, formata da cristalli lamellari alternati di carburi e ferrite, che si forma negli acciai al carbonio, per raffreddamenti abbastanza lenti dell'austenite. In altri casi i carburi assumono forme più tondeggianti, come nella *sorbite*, microstruttura ottenuta per riscaldamento della martensite.
Anche nel caso particolare della saldatura per la produzione di tubi, la locale condizione martensitica del cordone è indesiderata e in seguito alla saldatura viene eseguito un processo termico che ha lo scopo di eliminare o comunque ridurre in maniera esaustiva il suo effetto. Si tratta della ricottura del cordone.

3.3.1.1 Profilo della temperatura nel tubo

L'energia di riscaldamento sappiamo benissimo essere localizzata nella parte superficiale del tubo ed in particolare vicino all'induttore. A tal proposito è stata riportata in figura 3.9 un'immagine dell'andamento qualitativo dell'induzione magnetica e si nota come i valori più alti siano localizzati in uno spessore molo ristretto.

Infatti lo spessore di penetrazione

- per frequenze di 3kHz,
- permeabilità relative di 200 e
- resistività di 0.2 $\mu\Omega$m

è di 0.3 mm.

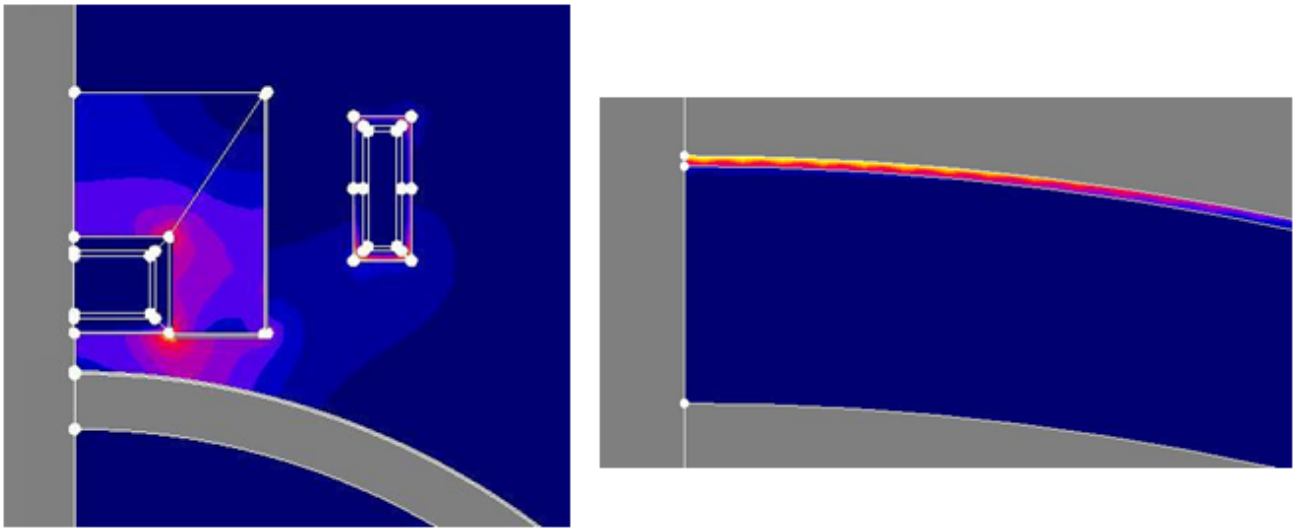


Figura 3.9 – *Andamento qualitativo dell'induzione magnetica. Si noti l'alta densità vicino al cordone di saldatura*

Data una generica simulazione l'andamento della temperatura nel tempo è raffigurata nelle immagini a pagina seguente.

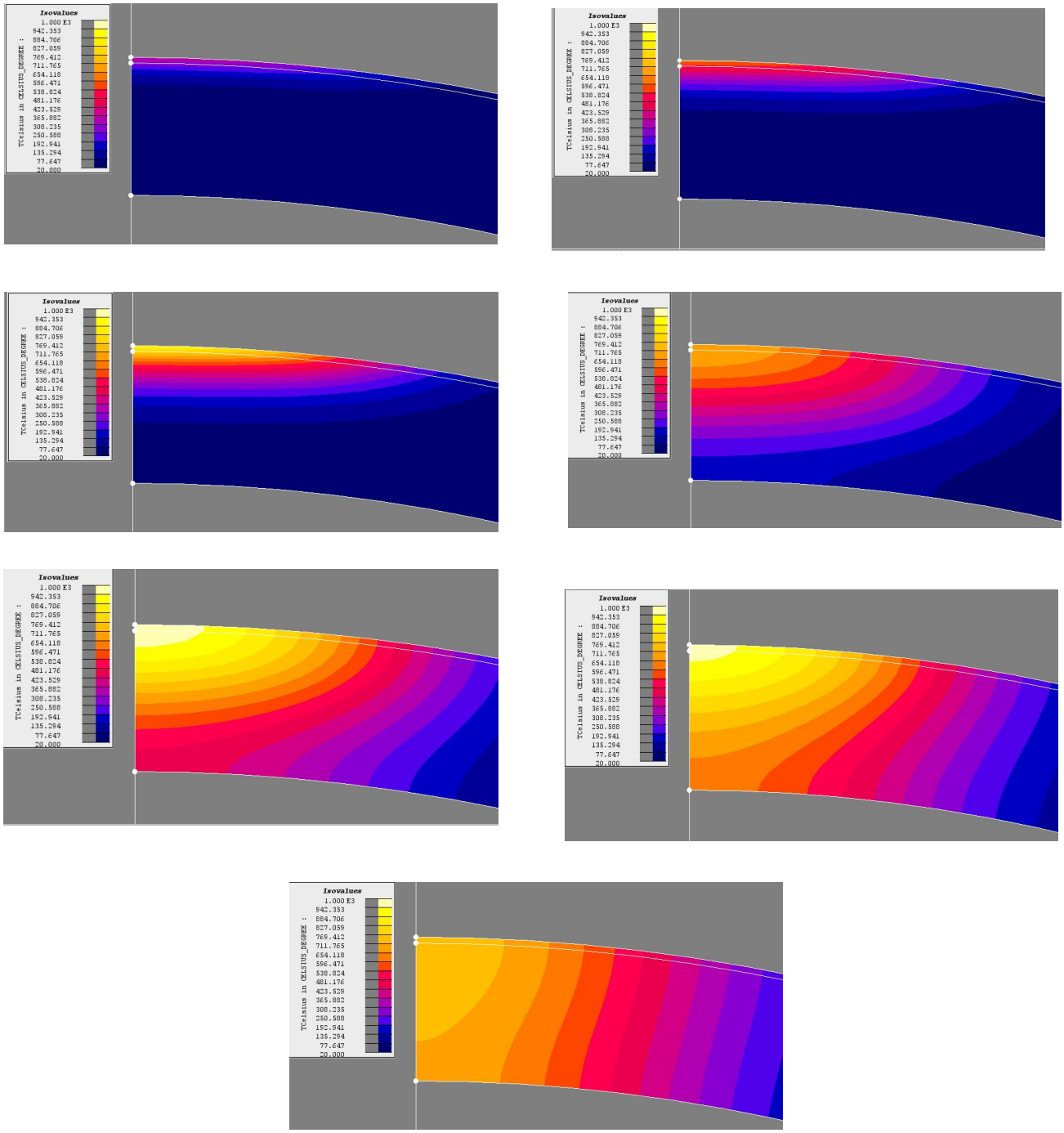


Figura 3.10 – *Andamento qualitativo della temperatura nel tubo durante il riscaldamento*

Visto che spessore di penetrazione e distribuzione di corrente vanno di pari passo, è comprensibile che sul tubo, nelle vicinanze del cordone, la temperatura sia estremamente sensibile alla variazione della corrente di alimentazione della bobina; nei primi istanti in cui essa è alimentata, la temperatura assumerà fin da subito valori crescenti.

Grazie alla conduttività dell'acciaio il calore sarà poi trasferito nelle zone più interne del tubo e raggiungerà anche il punto P_2. La propagazione del calore seguirà un andamento radiale dal punto P_1 e le linee di isotemperatura descriveranno delle curve simili ad archi di circonferenza con centro P_1.

3.4 La ricottura

Prima di iniziare qualsiasi tipo di disquisizione su un qualunque processo termico è bene prendere in considerazione i punti critici dell'acciaio e le curve TTT.

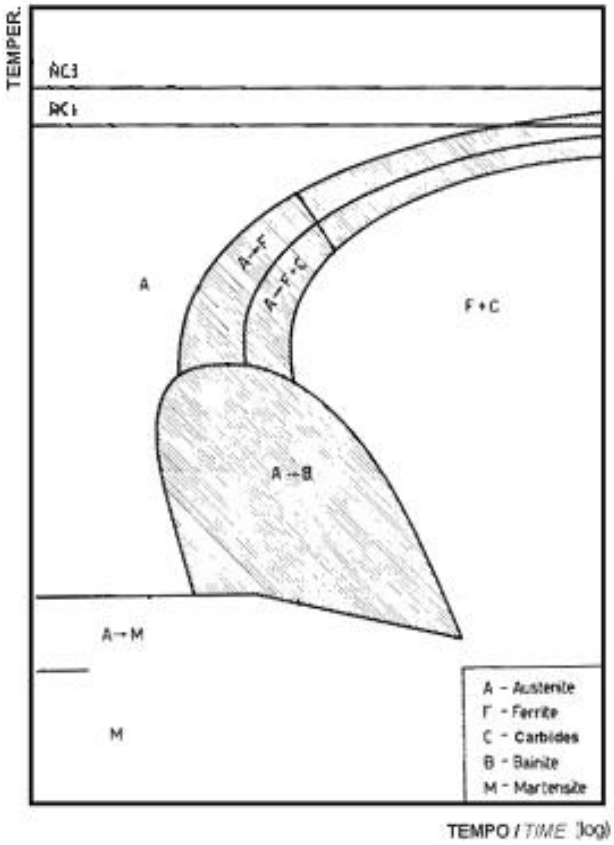


Figura 3.11 – *Diagramma TTT dell'acciaio (Temperatura –Tempo – Trasformatione, TTT)*

Per punto critico si intende la temperatura alla quale si produce nel corso del riscaldo e del raffreddamento dell'acciaio un cambiamento di fase: I punti critici sono:

- **AC1** = temperatura alla quale, durante il riscaldo, inizia la formazione di austenite;
- **AC3** = temperatura alla quale, durante il riscaldo, termina la trasformazione della ferrite in austenite;
- **AR3** = temperatura alla quale, durante il raffreddamento, inizia la trasformazione dell'austenite in ferrite;
- **AR1** = temperatura alla quale, durante il raffreddamento, termina la trasformazione dell'austenite in ferrite + cementite;
- **MS** = temperatura alla quale, durante il raffreddamento, inizia la trasformazione dell'austenite in martensite;
- **MF** = temperatura alla quale, durante il raffreddamento, termina la trasformazione dell'austenite in martensite.

Per meglio seguire l'effetto della variazione delle velocità di raffreddamento sul comportamento di un determinato acciaio durante i vari cicli di trattamento, si farà riferimento al diagramma di trasformazione dell'austenite **T**emperatura - **T**empo – **T**rasformazione o TTT.

Detto ciò ci sarà una breve descrizione di carattere generale della ricottura; nel prossimo paragrafo ci si concentrerà sul cordone di saldatura.
Lo scopo è quello di rendere il materiale lavorabile e diminuirne la durezza e la resistenza, si tratta quindi di addolcirlo per eliminare le tensioni residue e di distruggere gli effetti di una deformazione plastica, di una saldatura o di un trattamento termico precedente.

Esistono vari cicli di ricottura:

- completa;
- di ricristillazione;
- di lavorabilità;
- di coalescenza;
- isotermica;
- subcritica.

Alcuni esempi di ricottura:

- per <u>ricottura</u> in senso stretto, detta anche <u>completa</u> si intende un riscaldo al di sopra dell'intervallo critico AC3 di circa 50 °C, una permanenza per permettere di raggiungere l'equilibrio termico strutturale e un successivo raffreddamento lento nell'intervallo critico tra AC3 e AC1 al punto da ottenere perlite. Una volta raggiunto AC1 il raffreddamento può avvenire anche in ambiente
- per <u>ricottura isotermica</u> si intende un riscaldo a temperatura sopra AC3, permanenza a tale temperatura per un tempo sufficiente ad ottenere nella zona d'interesse l'equilibrio strutturale, raffreddamento ad una velocità relativamente elevata fino ad una temperatura leggermente inferiore ad AC1 ovvero ad una conveniente temperatura del campo perlitico alla quale si permane per il tempo sufficiente a completare la trasformazione in una struttura relativamente dolce di ferrite e carburi.

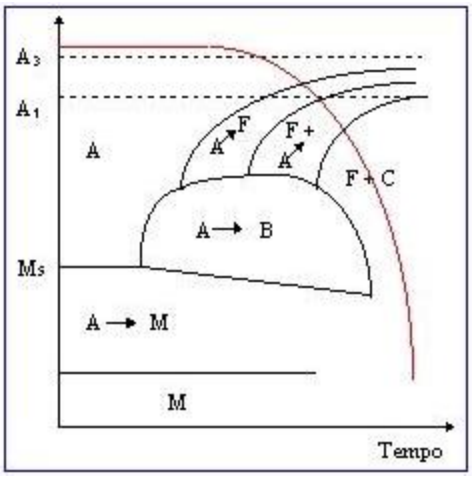


Figura 3.12– *Diagramma TTT dell'acciaio nel trattamento di ricottura completa*

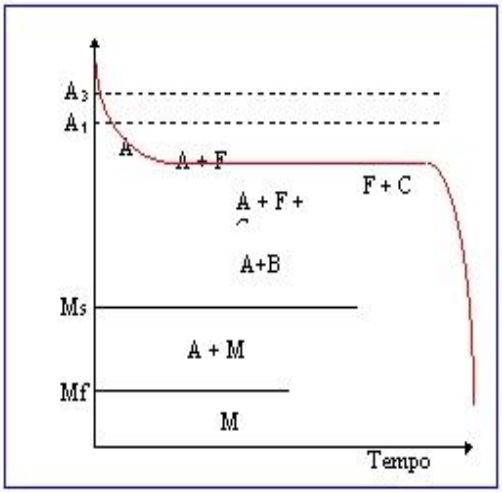


Figura 3.13 – *Diagramma TTT dell'acciaio nel trattamento di ricottura isotermica*

Il raffreddamento finale, fino a temperatura ambiente, può essere condotto velocemente con notevole guadagno di tempo.
In generale il tempo di ricottura dipende da molti fattori fra cui:

- la conduttività del materiale;
- la forma e le dimensioni del pezzo;
- la composizione chimica del materiale;
- la tendenza all'ingrossamento del grano.

3.4.1 Seam Anneailng [1]

L'obbiettivo del "seam annealing", ovvero ricottura del cordone di saldatura, è quello di raggiungere determinati standard qualitativi nella struttura dell'acciaio;per far ciò si devono liberare gli atomi di carbonio dal reticolo cristallino del ferro e quindi svincolare il materiale dalla struttura martensitica.

Ci sono tre processi di ricottura fruibili:

1) ricottura in forno a camera;
2) ricottura in forno continuo (riscaldo a resistenza o gas);
3) ricottura ad induzione.

I risultati conseguibili mediante i forni tradizionali sono eccellenti ma i costi di produzione sono alti se paragonati con i processi in linea.
La ricottura in forni continui richiede impianti grandi e onerosi e tale tecnologia non è applicabile alla produzione dei tubi.
Il trattamento ad induzione consente ai costruttori di aumentare la velocità di linea e di produrre un tubo di qualità accettabile.

1) e 2) La ricottura in forno a camera o in continuo dei nastri d'acciaio a basso carbonio comporta un lungo riscaldo (ordine di grandezza: diverse ore – un giorno) a causa della notevole massa da portare in temperatura. La ricottura di per sé è effettuata vicino al punto critico inferiore AC1, intorno a 690 – 730 °C . Durante il mantenimento, avvengono fenomeni di ricristallizzazione e parziale crescita del grano. In aggiunta, i carburi che si sono formati durante il raffreddamento dell'acciaio dopo la laminazione a caldo (eseguita prima della laminazione a freddo), possono ridissolvere. In ogni caso, il raffreddamento controllato in forno (20 °C/h) dei nastri dopo il mantenimento promuove la ri-precipitazione di questi carburi. Poiché l'acciaio è stato raffreddato dalla temperatura di ricottura e tutto il carbonio è rimosso dalla soluzione, i problemi maggiori dati dall'invecchiamento degli acciai dolci, l'aumento della durezza e la diminuzione della duttilità a distanza di tempo dal trattamento, vengono evitati. L'invecchiamento, che avviene a temperatura ambiente, è legato alla precipitazione dei carburi ed è un procedimento ben noto nella pratica della ricottura dei nastri in forno continuo.

Durante tale trattamento termico, il nastro srotolato passa in un forno a due stadi:

- ✓ nel primo stadio l'acciaio è portato a 750 – 850 °C per effettuare la ricristallizzazione e la temperatura massima è mantenuta per 40 – 60 secondi;
- ✓ il secondo stadio riscalda il nastro ad una temperatura inferiore (350 – 400°C) per invecchiare l'acciaio e rimuovere tutto il carbonio dalla soluzione. Senza tale passaggio, il nastro sottile si raffredderebbe troppo velocemente trattenendo il carbonio in soluzione; il carbonio provocherebbe deformazioni, l'invecchiamento e ridurrebbe la formabilità del nastro.

3)Contrariamente alla ricottura in forno, il trattamento ad induzione degli acciai a basso tenore di carbonio con propositi di ricristallizzazione di solito consiste nel riscaldo rapido sino alla temperatura massima, mantenimento minimo o nullo, e raffreddamento a temperatura ambiente. Alcuni studi hanno dimostrato che un mantenimento compreso tra 1 e 20 secondi è necessario per completare la ricristallizzazione a temperature poco sopra il punto AC1. Altri studi sostengono che il mantenimento non è necessario, a patto di raggiungere temperature sufficientemente alte alla fine del riscaldo.

Se l'acciaio contiene almeno 0.15% di carbonio ed è raffreddato rapidamente dall'intervallo critico di temperature (A1 < T < A3), le isole di austenite si trasformano in martensite. Se l'acciaio è raffreddato lentamente (<10 °C/sec) dalla temperatura di ricottura ad AC1, non c'è ragione di tipo metallurgico per raffreddare lentamente dopo che la trasformazione dell'austenite si è completata; comunque, il raffreddamento controllato (5 – 8 °C/s) nell'intervallo 510 – 420 °C è necessario per limitare le conseguenze dell'invecchiamento.

Oltre alla ricottura esistono altri processi termici che hanno il medesimo scopo ovvero ridurre le tensioni e ripristinare una struttura cristallina regolare dopo saldatura e laminazione dei tubi; tra questi troviamo il rinvenimento e la normalizzazione.

Il rinvenimento è un processo funzione sia della temperatura che del tempo: più alta è la temperatura dell'acciaio, più velocemente gli atomi di carbonio usciranno dal reticolo. Il rinvenimento si verifica a temperature inferiori della temperatura di transizione tra ferrite e austenite AC1 e sperimentalmente viene eseguita tra i 540 °C e 700 °C.

Nella normalizzazione invece il cordone di saldatura viene portato ad una temperatura che lo ritrasforma in austenite e poi raffreddato molto lentamente in modo che si costituisca in forma ferritica; ciò si traduce in un riscaldamento ad una temperatura compresa tra 950 °C e 1100 °C in funzione del tipo di acciaio. È importante notare che per alte temperature nella zona di saldatura aumenta la grossolanità dei grani di metallo creando una zona debole e sensibile alla corrosione.

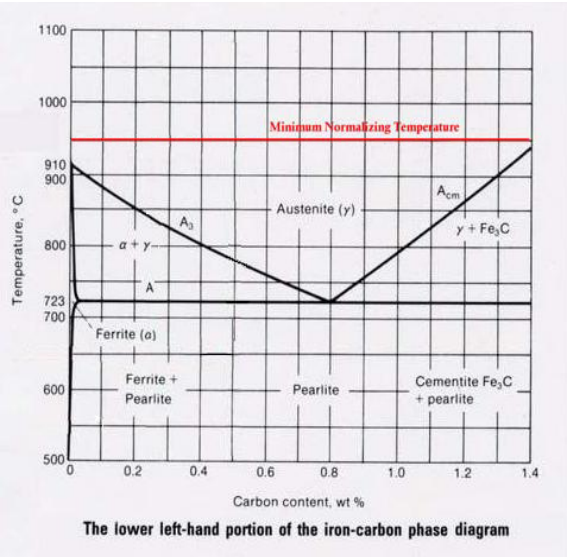


Figura 3.14– *Diagramma di fase dell'acciaio*

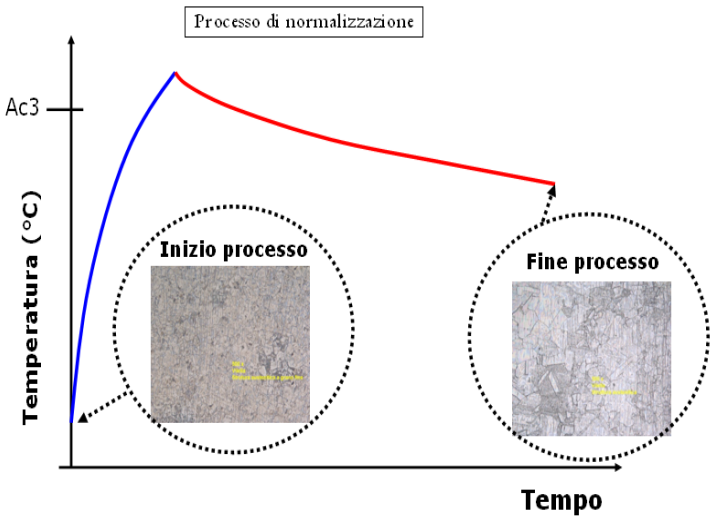


Figura 3.15– *Diagramma della temperatura durante la normalizzazione*

3.4.1.1 Risultati sperimentali ottenuti nei tubi con la ricottura ad induzione[1]

Ecco i principali effetti positivi portati dalla ricottura nel processo di formazione dei tubi:

La trattazione seguente riporta le principali proprietà meccaniche degli acciai per nastri e tubi utilizzati da alcune affermate aziende produttrici.
I tubi sono prodotti utilizzando nastri in Fe P04 (DIN St 14), SAE 1008 e DIN RSt 34-2 saldati ad induzione ad alta frequenza e successivamente ricotti da un impianto in linea della Termomacchine.

Tabella 3.1– *Composizione degli acciai che costituiscono i tubi in esame*

COMPOSIZIONE DEGLI ACCIAI

Standard No.	Simbolo DIN	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
1.0034 (*)	RSt 34 – 2	≤ 0.17	-	-	≤ 0.045	≤ 0.045
1.0338	St 14	≤ 0.08	(**)	(**)	≤ 0.045	≤ 0.045

(*****) grado SAE 1013
(**) Il Fe P04 in Italia è classificato come un acciaio extra dolce al carbonio.

Tabella 3.2– *Proprietà meccaniche dei nastri d'acciaio che costituiranno i tubi*

PROPRIETÀ MECCANICHE DEI NASTRI D'ACCIAIO

Composizione acciaio	R_e (N/mm^2)	R_m (N/mm^2)	A (%)	Durezza (HR 30T)
St 14 (Fe P04)	<210	270 – 350	> 38	38 – 50
RSt 34 – 2		>300	> 28	

Dove :

Re = Snervamento
Rm = Resistenza alla trazione
A% = Allungamento alla rottura
HR = Durezza Rockwell, nella scala 30T

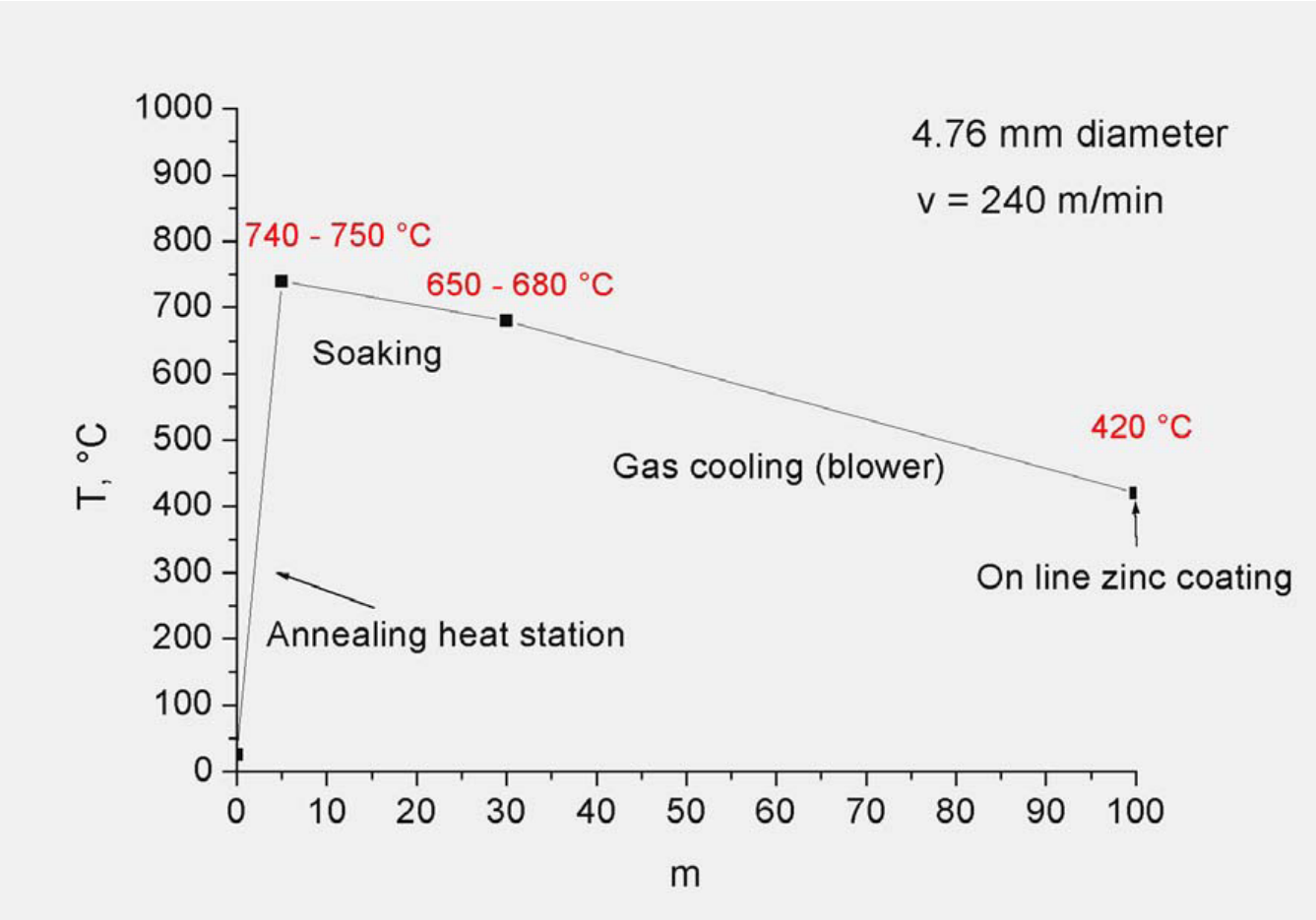


Figura 3.16 – *Qui sopra la figura di un impianto per il trattamento ad induzione di tubi in Fe P04. Tubo saldato 10.3 x 0.68 mm ridotto a 4.76 x 0.7 mm attraverso tre passaggi di laminazione a freddo.*

Tabella 3.3– *Proprietà meccaniche dei tubi trattati*

PROPRIETÀ MECCANICHE DEI TUBI IN FE P04 TRATTATI A 740 °C

Ø (mm)	R_e (N/mm^2)	R_m (N/mm^2)	A (%), 0 giorni	A (%), 30 giorni	durezza(HR 30T), 0 giorni	durezza(HR 30T), 30 giorni
4.76	225 178/283	341 298/411	33 26/38	26 20/36	51(*) 46/56	56 (**) 51/62
8.00	194 158/250	321 273/379	39 30/44	32 22/36	49 44/55	54 49/62
Condizioni generalis	> 173	> 290	> 25	> 25	< 55	< 55

(*) 90 – 100 HV0.2; (**) 100 – 120 HV0.2 (conversione approssimata nella scala Vickers)

Differenza tra le caratteristiche dei nastri e dei tubi:

• I valori minimi di durezza dei tubi trattati ad induzione sono piuttosto alti rispetto al nastro di partenza.
• Il materiale è soggetto ad un processo d'invecchiamento a temperatura ambiente, con conseguente deperimento della duttilità;
• I dati delle prove meccaniche mostrano che la condizione di massimo addolcimento dell'acciaio è solitamente raggiunta trattando i tubi ϕ 8 mm (a parità di parametri di trattamento per entrambi i diametri). Tale comportamento può essere spiegato considerando la struttura e le tensioni residue dopo la lavorazione a freddo: ϕ 8 mm è meno incrudito rispetto ϕ 4.76 mm, il successivo trattamento ad induzione è più efficace sui diametri maggiori.

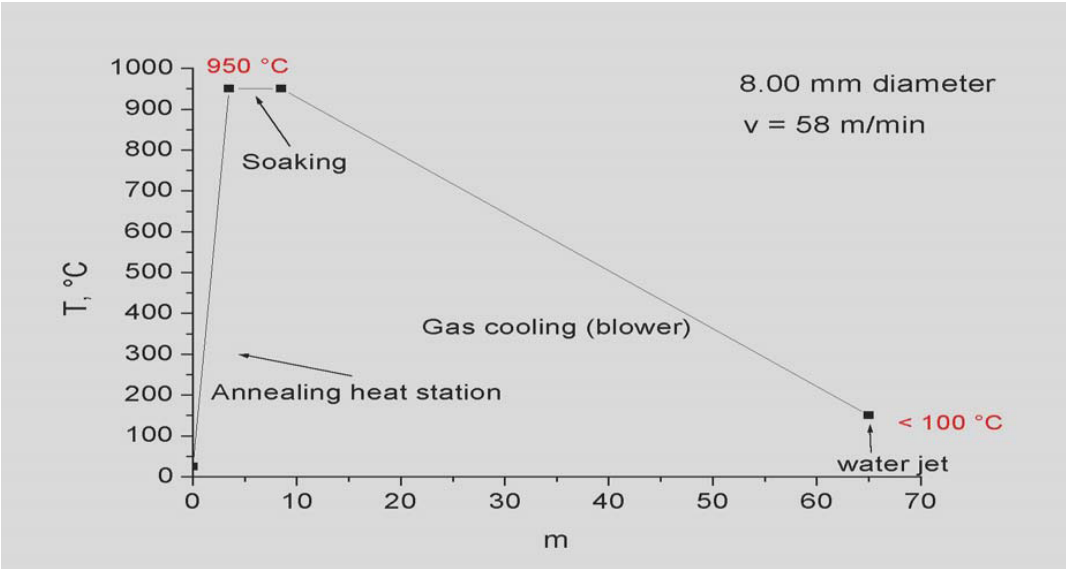


Figura 3.17 – *Figura di un impianto per il trattamento ad induzione di tubi in RSt 34. Tubo saldato 10.3 x 0.68 mm ridotto a 8.0 x 0.7 mm attraverso un passaggio dilaminazione a freddo.*

Tabella 3.4 – *Proprietà meccaniche dei tubi nont rattati*

PROPRIETÀ MECCANICHE PRIMA DEL TRATTAMENTO AD INDUZIONE (ACCIAIO INCRUDITO)

Ø tubo, (mm)	R_s (N/mm^2) (*)	R_m (N/mm^2) (*)	A (%), (*)	Durezza HV0.2, zona saldatura	Durezza HV0.2, zona non alterata
4.76	714	724	0.7	261 → 215	201 → 177
8.00	-	-	-	170 → 144	152 → 130

(*) Dati del produttore

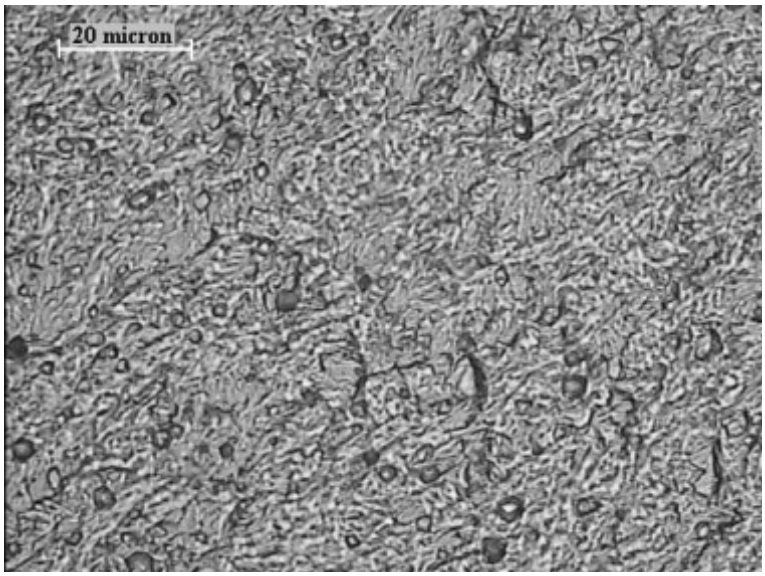


Figura 3.18 – *Qui sopra il caso del tubo di diametro 4.76 mm. Si nota la microstruttura con ingrandimento originale 1.000 x. I grani originali di ferrite sono stati pesantemente deformati dalla riduzione di diametro*

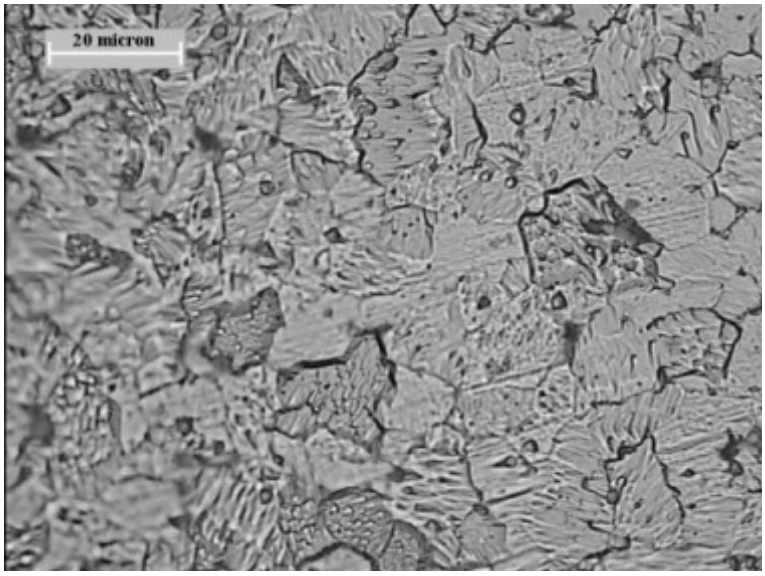


Figura 3.19 – *Qui sopra il caso del tubo di diametro 8 mm. Microstruttura, x1000. Tubo dopo saldatura e riduzione di diametro. Grani di ferrite con tracce di cementite*

Tabella 3.5 – *Proprietà meccaniche dei tubi trattati*

PROPRIETA' MECCANICHE DEI TUBI IN RST 34-2
TRATTATI AD INDUZIONE A 900 – 930°C; DIAMETRO 4.76 MM

Vel. (m/min)	Blower, potenza (%)	R_e (N/mm^2) (*)	R_m (N/mm^2) (*)	A (%), 0 days (*)	Durezza HV0.2, weld area, (**)	Durezza HV0.2, base metal, (**)
42	20	408	486	39	177 → 156	163 → 152
52	56	431	486	38	181 → 158	188 → 158
62.5	60	420	486	39	184 → 160	175 → 154

(*) Dati forniti dal produttore, valori medi a 0 giorni. (**) Microdurezza sulla sezione trasversale, dall'interno all'esterno, dati Termomacchine.
Specifiche per tubi ricotti (DIN EN 10002): 310 < Rm < 410; A% > 28

Tabella 3.6 – *Proprietà meccaniche dei tubi trattati*

PROPRIETA' MECCANICHE DEI TUBI IN RST 34-2
TRATTATI AD INDUZIONE A DIVERSE TEMPERATURE; Ø 4.76 MM

Temperatura, (°C)	Velocità, (m/min)	R_e (N/mm^2)	R_m (N/mm^2)	A (%)
730	65	458	475	38
860	65	424	465	42
910	65	440	469	41
950	65	451	474	41

Nota: al variare della temperature di trattamento le proprietà meccaniche non variano in modo lineare o prevedibile

Tabella 3.7 *– Tabella riassuntiva, valori prima e dopo ricottura*

Diametro tubo 4.76 mm, temperatura massima 930°C					
Rispetto al trattamento	Re(N/mm2)	Rm(N/mm2)	A (%),	Durezza HV0.2, zona saldatura	Durezza HV0.2, zona
Prima	714	724	0.7	261-215	201-177
Dopo	420	486	39	177-156	163-152

Ricordo :

Re = Snervamento
Rm = Resistenza alla trazione
A% = Allungamento alla rottura
HV = Durezza Vickers

4. Software utilizzati

4.1 Python[6]

"Cos'è Python:

Python è un **linguaggio di programmazione ad alto livello**, rilasciato pubblicamente per la prima volta nel 1991 dal suo creatore Guido van Rossum, programmatore olandese attualmente operativo in Google. Deriva il suo nome dalla commedia *Monty Python's Flying Circus* dei celebri Monty Python, in onda sulla BBC nel corso degli anni 70. Attualmente, lo sviluppo di Python (grazie e soprattutto all'enorme e dinamica comunità internazionale di sviluppatori) viene gestito dall'organizzazione no-profit Python Software Foundation.
Python supporta **diversi paradigmi di programmazione**, come quello object-oriented (con supporto all'ereditarietà multipla), quello imperativo e quello funzionale, ed offre una tipizzazione dinamica forte. È fornito di una libreria built-in estremamente ricca, che unitamente alla gestione automatica della memoria e a robusti costrutti per la gestione delle eccezioni fa di Python uno dei linguaggi più ricchi e comodi da usare.
Comodo, ma anche **semplice** da usare e imparare. Python, nelle intenzioni di Guido van Rossum, è nato per essere un linguaggio immediatamente intuibile. La sua sintassi è pulita e snella così come i suoi costrutti, decisamente chiari e non ambigui. I bocchi logici vengono costruiti semplicemente allineando le righe allo stesso modo, incrementando la leggibilità e l'uniformità del codice anche se vi lavorano diversi autori.
Python è un linguaggio **pseudocompilato**: un interprete si occupa di analizzare il codice sorgente (semplici file testuali con estensione .py) e, se sintatticamente corretto, di eseguirlo. In Python, non esiste una fase di compilazione separata (come avviene in C, per esempio) che generi un file eseguibile partendo dal sorgente.
L'esser pseudointerpretato rende Python un linguaggio **portabile**. Una volta scritto un sorgente, esso può essere interpretato ed eseguito sulla gran parte delle piattaforme attualmente utilizzate, siano esse di casa Apple (Mac) che PC (Microsoft Windows e GNU/Linux). Semplicemente, basta la presenza della versione corretta dell'interprete.
Infine, Python è **free software**: non solo il download dell'interprete per la propria piattaforma, così come l'uso di Python nelle proprie applicazioni, è completamente gratuito; ma oltre a questo Python può essere liberamente modificato e così ridistribuito, secondo le regole di una licenza pienamente open-source.
Queste caratteristiche hanno fatto di Python il protagonista di un enorme diffusione in tutto il mondo, e anche in Italia, negli ultimi anni. Questo perché garantisce lo sviluppo rapido (e divertente) di applicazioni di qualsiasi complessità in tutti i contesti: dal desktop al web, passando dallo sviluppo di videogiochi e dallo scripting di sistema."

Estremamente utile è stato il tutorial del sito da cui sono state prese queste righe.

4.2 Flux[7]

Figura 4.1 – *Loghi del software Flux di Cedrat*

Flux è un software agli elementi finiti per simulazioni di problemi elettromagnetici e termici sia 2d che 3d, è in grado di gestire la simulazione e l'analisi di qualsiasi tipo di dispositivo elettromagnetico,

Flux può contare su 30 anni di esperienza quindi è affidabile e preciso, è dotato di un gran numero di funzionalità, tra cui analisi multi-parametrica, accoppiamenti con circuiti elettrici e cinematici;
è inoltre adatto per l'analisi di problemi :

- statici
- armonici e
- transient

Flux può essere impiegato per progettare, analizzare e ottimizzare una varietà di dispositivi e applicazioni quali:

- Macchine rotanti
- Attuatori lineari
- Compatibilità elettromagnetica
- Dispositivi di riscaldamento a induzione
- Sensori
- Dispositivi HV
- Cavi
- Valutazioni non distruttive
- Trasformatori

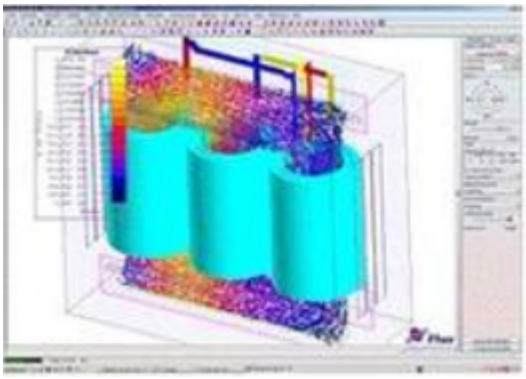


Figura 4.2 – *Schermata tipica di controllo di Flux*

Nel caso qui trattato è stato utilizzato il Flux2d per l'analisi di un problema multiphysics ovvero armonico Magnetico accoppiato ad un transitorio Termico (Magnetic Steady State AC coupled with Thermal Transient)

4.2.1 Il metodo agli elementi finiti [8]

I metodi di risoluzione delle equazioni differenziali di campo possono essere analitici o numerici;

- i primi sono applicabili su domini 2D caratterizzati da una geometria semplice, con materiali uniformi (omogenei, isotropi e lineari). Forniscono una soluzione chiusa, ovvero una equazione parametrica che permette di studiare più configurazioni con la stessa equazione. Sono adatti per studiare fenomeni fisici di campo;

- i metodi numerici si applicano a qualsiasi geometria, anche tridimensionale e a materiali non lineari e anisotropi, sono quindi adatti a modelli che più si avvicinano al caso reale. Diversamente dai modelli analitici forniscono una unica soluzione per ogni configurazione da trattare.
Esempi di metodi numerici sono:
- metodo delle differenze finite (FDM);
- metodo degli elementi finiti (FEM);
- boundary element method (BEM);
- metodo dei momenti (MoM).

Veniamo ad una descrizione non troppo dettagliata del metodo di risoluzione utilizzato dal solver Flux2d ovvero il metodo agli elementi finiti:

Uno dei concetti fondamentali su cui si basa è la discretizzazione cioè una descrizione del dominio mediante un numero finito di punti. Come si vedrà si andranno a descrivere le variabili di stato di un sistema continuo mediante funzioni dette funzioni di forma (shape function), definite in piccole regioni del modello. Le soluzioni sono formulate per ciascuna unità e se combinate tra loro permettono di ottenere una soluzione sul modello originale di partenza.

Per descrivere generalmente il FEM ci si rifà ad un problema elettromagnetico quasi-elettrostatico:
L'equazione di Laplace per un sistema bidimensionale è del tipo:

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \tag{4-1}$$

Sarà possibile esprimere il campo elettrico come:

$$\overline{E} = -\nabla V = -\left(\frac{\partial V}{\partial x}\hat{x} + \frac{\partial V}{\partial y}\hat{y} \right) = 0 \tag{4-2}$$

La soluzione dell'equazione differenziale può essere risolta con il metodo variazionale, ovvero risolvendo un problema di minimo: per il principio di equilibrio la distribuzione del potenziale è tale da minimizzare l'energia immagazzinata, nel nostro caso:

$$W = \int_\Omega \frac{1}{2}\overline{E}\cdot\overline{D}\,d\Omega = \int_\Omega \frac{1}{2}\varepsilon\overline{E}^2 d\Omega = \frac{1}{2}\int_\Omega \varepsilon\left\{\left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2\right\}d\Omega = \frac{1}{2}\int_\Omega \varepsilon\,|\nabla V|^2\,d\Omega \tag{4-3}$$

Per quanto detto sopra, risolvere l'equazione differenziale di partenza e trovare il minimo dell' energia porta alla medesima soluzione; ci sono più metodi per minimizzare questa funzione in tutto il dominio. Trovare la soluzione in tutto il dominio non è però agevole e anzi risulta essere complicato, ecco che si pensa di suddividere il dominio Ω in tanti sottodomini più piccoli e di forma semplice (triangoli, quadrati). I più semplici elementi che si possono usare vengono detti semplici e sono il segmento in 1D, il triangolo in 2D e il tetraedro in 3D. Ecco un esempio di semplificazione di una certa regione:

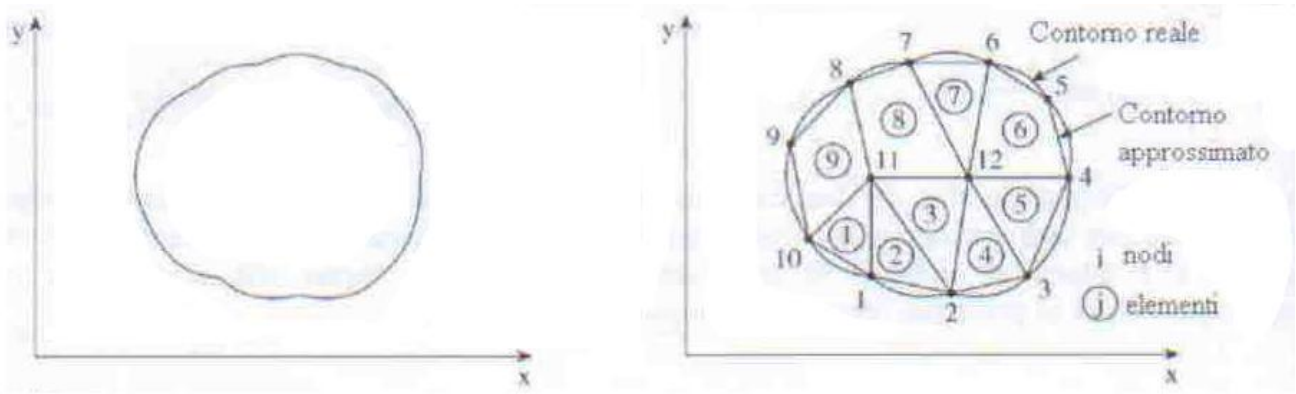


Figura 4.3 – *Divisione del dominio in n elementi finiti*

Per ogni elemento, che sommato agli altri costituisce la mesh del dominio, si approssima la funzione potenziale con una funzione più semplice del tipo:

$$V = a + bx + cy + dxy + ex^2 + fy^2 + \ldots. \qquad (4\text{-}4)$$

A seconda del numero di nodi dell'elemento, tale espressione sarà diversa, infatti essa sarà:

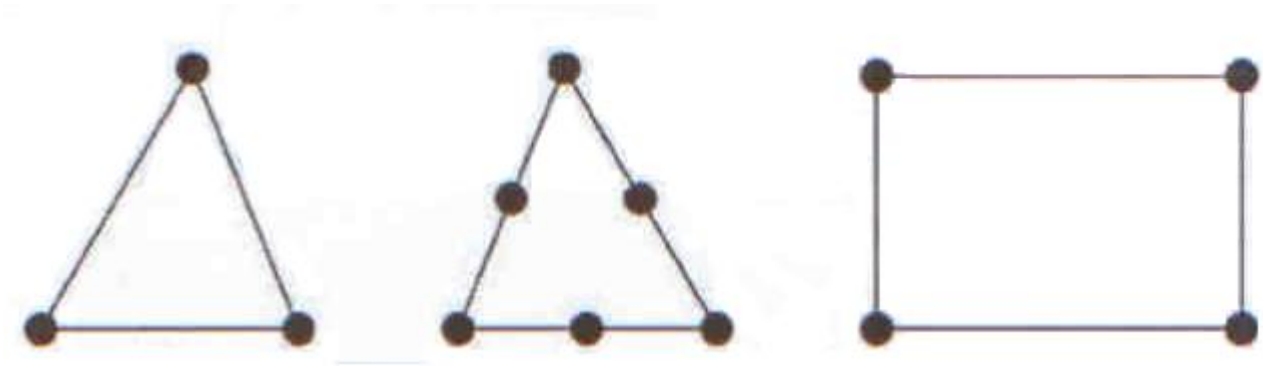


Figura 4.4 – *Esempi di elementi finiti da usare nella divisione del dominio di ricerca*

- per l'elemento triangolare del primo ordine $V = a + bx + cy$ (4-5)
- per l'elemento triangolare del secondo ordine $V = a + bx + cy + dxy + ex^2 + fy^2$ (4-6)
- per l'elemento rettangolare (o brick) del primo ordine $V = a + bx + cy + dxy$ (4-7)

Assumiamo che la discretizzazione di Ω avvenga mediante elementi triangolari del primo ordine. L'energia elettrostatica del sistema può essere vista come somma delle energie di ogni elemento. La minimizzazione dell'energia dell'intero dominio passerà quindi per la minimizzazione su ogni singolo elemento.

Il potenziale nei tre nodi dell'elemento di figura 4.5 assume i seguenti valori:

$$\begin{cases} V_1 = a + bx_1 + cy_1 \\ V_2 = a + bx_2 + cy_2 \\ V_3 = a + bx_3 + cy_3 \end{cases} \tag{4-8}$$

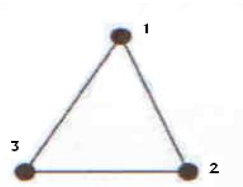


Figura 4.5 – *Triangolo utilizzato come elemento di discretizzazione del generico dominio* Ω

Dove x_i e y_i sono noti perché rappresentano le coordinate spaziali del vertice i-esimo.
Il sistema sopra scritto può essere esplicitato in forma matriciale:

$$\begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} a \\ b \\ c \end{vmatrix} \tag{4-9}$$

La matrice 3x3 è nota essendo che deriva dalla geometria. I coefficienti a,b,c si determinano dalla:

$$\begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{vmatrix} \tag{4-10}$$

Il potenziale per ogni punto del dominio si può così esplicitare nella forma:

$$V = \begin{vmatrix} 1 & x & y \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} a \\ b \\ c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & x & y \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{vmatrix} \tag{4-11}$$

oppure $$V = \sum_{i=1}^{3} V_i \alpha_i(x, y) \tag{4-12}$$

Dove V_i è il potenziale nel nodo i-esimo e $\alpha_i(x, y)$ è la funzione di forma.

La shape function si ricava dal seguente sistema:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \dfrac{1}{2A}\{(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y\} \\ \alpha_2 = \dfrac{1}{2A}\{(x_3 y_1 - x_1 y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y\} \\ \alpha_3 = \dfrac{1}{2A}\{(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y\} \end{cases} \tag{4-13}$$

Dove A è l'area dell'elemento; tali funzioni di forma si ottengono per permutazione dei pedici, queste funzioni hanno la caratteristica di essere pari a 1 nel vertice considerato e 0 negli altri 2:

$$\begin{cases} \alpha_1(x_1, y_1) = 1 \\ \alpha_2(x_2, y_2) = 0 \\ \alpha_3(x_3, y_3) = 0 \end{cases} \tag{4-14}$$

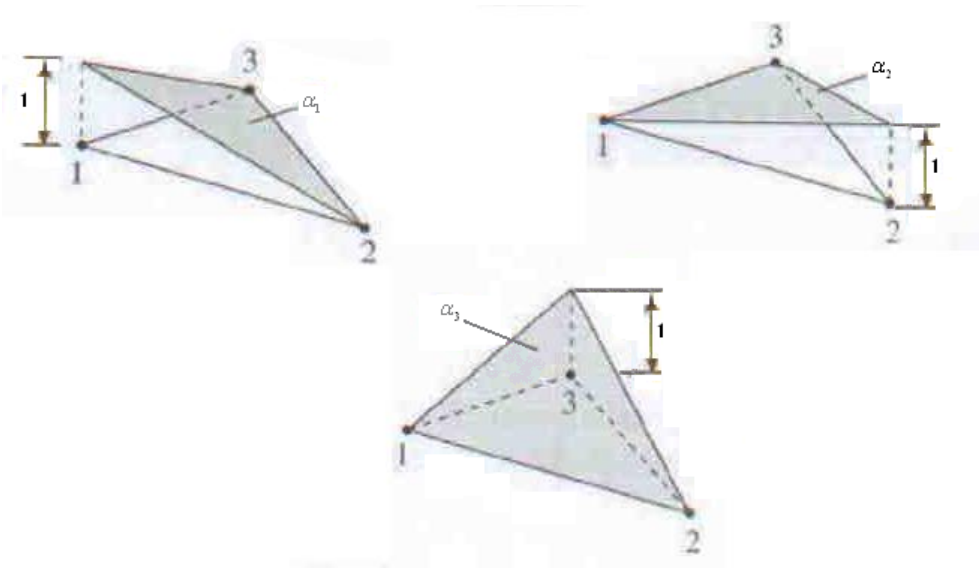


Figura 4.6– *Shape function riferite alla (4-14)*

Cioè, nel caso generale:

- $\alpha_i(x_j, y_j) = 1$ se $i = j$
- $\alpha_i(x_i, y_i) = 0$ se $i \neq j$

Una volta definita la modalità con la quale si esprime il potenziale su ogni elemento e quindi poi per estensione su tutto il dominio, si può esplicitare l'energia W del singolo elemento come:

$$W = \frac{1}{2}\int_S \varepsilon \,|\nabla V|^2 \, dS \tag{4-15}$$

dove S è la superficie dell'elemento; scrivendo il gradiente del potenziale entro l'elemento considerato nella forma

$$\nabla V = \sum_{i=1}^{3} V_i \nabla \alpha_i(x,y) \tag{4-16}$$

l'energia del singolo elemento diventa:

$$W = \frac{1}{2}\varepsilon \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=1}^{3} V_i \left(\int \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j d\Omega_e \right) V_j \tag{4-17}$$

che in forma matriciale diventa:

$$W = \frac{1}{2}\varepsilon [V]^{Te} [N]^e [V]^e$$

dove $[N]^e$ è la matrice 3x3 dei rigidezza del singolo elemento che vale $N_{i,j} = \int_{\Omega e} \nabla \alpha_i \nabla \alpha_j d\Omega_e$ (4-18)

e [V] è la matrice dei valori del potenziale ai vertici dell'elemento. Si calcolano ora i gradienti delle funzioni di forma:

$$\begin{aligned}
\nabla \alpha_1 &= \frac{\partial \alpha_1}{\partial x}\hat{x} + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y}\hat{y} = \frac{1}{2A}\left[(y_2 - y_3)\hat{x} + (x_3 - x_2)\hat{y}\right] \\
\nabla \alpha_2 &= \frac{\partial \alpha_2}{\partial x}\hat{x} + \frac{\partial \alpha_2}{\partial y}\hat{y} = \frac{1}{2A}\left[(y_3 - y_1)\hat{x} + (x_1 - x_3)\hat{y}\right] \\
\nabla \alpha_3 &= \frac{\partial \alpha_3}{\partial x}\hat{x} + \frac{\partial \alpha_3}{\partial y}\hat{y} = \frac{1}{2A}\left[(y_1 - y_2)\hat{x} + (x_2 - x_1)\hat{y}\right]
\end{aligned} \tag{4-19}$$

Essi danno luogo a delle costanti o meglio, in conseguenza all'approssimazione del potenziale con una equazione del primo ordine i gradienti delle shape function risultano essere costanti su ciascun elemento. Sapendo che il prodotto scalare è definito come $\bar{a} \cdot \bar{b} = a_x b_x + a_y b_y$, il calcolo dei coefficienti della matrice di rigidezza è:

$$N^e{}_{1,1} = \frac{1}{4A}\left[(y_2 - y_3)^2 + (x_3 - x_2)^2\right] \tag{4-20}$$

$$N^e{}_{1,2} = \frac{1}{4A}\left[(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3)\right] \tag{4-21}$$

$$N^e{}_{1,3} = \frac{1}{4A}\left[(y_1 - y_2)(y_2 - y_3) + (x_2 - x_1)(x_3 - x_2)\right] \tag{4-22}$$

Gli altri coefficienti della matrice si ottengono per libera permutazione dei pedici. Con ciò si riesce a minimizzare l'energia sul singolo elemento e l'energia totale minima sarà la somma delle energie dei singoli elementi e si scrive come:

$$W = \sum^{Ne} W_e \tag{4-23}$$

5. Formulazioni relative ai problemi elettromagnetici

5.1 Le equazioni di Maxwell

Affrontare e risolvere un problema fisico significa innanzitutto formulare il problema in termini di relazioni e leggi matematiche e poi risolverlo con tecniche opportune, siano esse equazioni algebriche o differenziali. Nel caso dei problemi di campo elettromagnetico le relazioni di riferimento sono le equazioni di Maxwell:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \dfrac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E} = -\dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \end{cases} \tag{5-1}$$

Di solito alle quattro equazioni appena scritte se ne aggiunge una quinta, nota come legge di continuità, che esprime la relazione tra le sorgenti di campo elettromagnetico, ovvero la densità di corrente e la densità di carica libera.

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \tag{5-2}$$

Le prime due equazioni di Maxwell costituiscono un sistema di due equazioni vettoriali, quindi sei equazioni scalari, contenenti cinque incognite vettoriali equivalenti a quindici incognite scalari. Mancano quindi nove equazioni scalari per ottenere una soluzione.
Queste nove equazioni sono date da relazioni di tipo causa effetto, ovvero dalle relazioni costitutive dei materiali:

$$\begin{cases} \vec{J} = \sigma \vec{E} \\ \vec{D} = \varepsilon \vec{E} \\ \vec{B} = \mu \vec{H} \end{cases} \tag{5-3}$$

Per risolvere un problema di campo elettromagnetico si deve quindi fare riferimento a cinque equazioni, le prime due equazioni di Maxwell e le tre relazioni costitutive.

Le proprietà generali dei mezzi materiali influenzano la natura matematica delle relazioni costitutive, ad esempio:
- il considerare un materiale lineare ci consente di utilizzare il principio di sovrapposizione degli effetti;
- il considerare un materiale omogeneo o invariante nello spazio, ci consente di pensare al materiale come non dipendente dal punto dello spazio considerato;
- il considerare isotropo un materiale significa che in esso c'è indipendenza dalla direzione ovvero che il

vettore effetto è parallelo al vettore causa (un caso tipico di anisotropia, è rappresentato dai cristalli, per la presenza di direzioni privilegiate).

In particolare possiamo riassumere le caratteristiche dei mezzi nel modo seguente:

- MEZZO OMOGENO: la caratteristica non dipende dal punto del dominio di definizione del problema;
- MEZZO ISOTROPO: il vettore effetto ha la stessa direzione del vettore causa; se così non fosse si parlerebbe di mezzo anisotropo;
- MEZZO LINEARE: le caratteristiche di conducibilità, permeabilità e/o permettività sono costanti rispetto alla causa.

Come si vedrà nel seguito, le equazioni di Maxwell assumono forme particolari nel caso in cui si faccia riferimento a
particolari andamenti nel tempo delle sorgenti del campo.

5.2 Problema magnetico time-harmonic accoppiato ad un transitorio termico

Il riscaldamento ad induzione rende necessario lo studio accoppiato dei problemi elettromagnetici e termici:
il fenomeno della formazione delle correnti indotte nel pezzo da riscaldare è descritto dalle equazioni di Maxwell mentre il transitorio termico è descritto dalle equazioni di Fourier; se è vero che le proprietà elettromagnetiche (resistività elettrica e permeabilità magnetica) e le proprietà termiche (conducibilità termica e capacità termica) sono entrambi dipendenti dalla temperatura, ecco che la diffusione del campo elettromagnetico e la diffusione del calore sono fenomeni dipendenti l'uno dall'altro.

Campi variabili con legge sinosuidale:

I campi variabili nel tempo con legge sinusoidale vengono trattati a parte rispetto ai campi variabili nel tempo con legge qualsiasi. Il motivo fondamentale è la possibilità di rappresentare tali grandezze, che ovviamente devono essere variabili nel tempo con la stessa frequenza, attraverso fasori derivati dalla trasformata di Steinmetz:

Detto quindi

$$\overline{H}(P,t) = \overline{H}_{x,y,z}\sin(\omega t + \alpha) = \overline{H}(P)\sin(\omega t + \alpha) \tag{5-4}$$

il generico vettore campo magnetico variabile con legge sinuosoidale, esso può essere rappresentato dal suo fasore:

$$\dot{\overline{H}} = \dot{\overline{H}}e^{j\alpha} \tag{5-5}$$

le equazioni di Maxwell per la risoluzione del problema elettromagnetico, con notazione fasoriale, vengono scritte:

$$\begin{cases} \nabla \times \dot{\overline{H}} = \dot{\overline{J}} + j\omega\dot{\overline{D}} \\ \nabla \times \dot{\overline{E}} = -j\omega\dot{\overline{B}} \\ \nabla \cdot \dot{\overline{J}} = -j\omega\dot{\rho} \end{cases} \tag{5-6}$$

Spesso per questo tipo di problemi si parla anche di ***regime time-harmonic***.
Nel caso di campi variabili nel tempo con legge qualsiasi, il problema si definisce di tipo transient.
Risolvere in questo caso, ma anche nel caso appena visto, le equazioni di Maxwell significa risolvere un sistema di equazioni differenziali del primo ordine nelle incognite vettori H,B, J ,D ed E e questo spesso non è molto agevole. Esiste la possibilità di introdurre delle funzioni particolari, detti potenziali, che consentono di ridurre la complessità del problema.

Teorema di Clebsch-Helmholtz

Un campo vettoriale F continuo, con derivate prime e seconde continue, definito in R^3, è univocamente determinato se:

$$\lim rF(r) = l \text{ con } r \to \infty \text{ e } |l| \leq \infty \tag{5-7}$$

E se sono noti:

$$\nabla \times \overline{F} = \overline{d} \tag{5-8}$$

e

$$\nabla \cdot \overline{F} = dw \tag{5-9}$$

ovvero le sorgenti del rotore e della divergenza del campo tale campo F può essere decomposto in modo univoco nella somma di un campo F_s solenoidale e di un campo F_i irrotazionale, che soddisfano la stessa condizione al contorno all'infinito.
I vettori F_s e F_i della decomposizione di Helmholtz in R^3 si possono scrivere, rispettivamente come rotore di un potenziale vettore A e come gradiente di un potenziale scalare Φ. Quindi l'espressione del campo vettoriale F sarà:

$$\overline{F} = -\nabla\phi + \nabla \times \overline{A} \tag{5-10}$$

Di solito Φ viene detto *potenziale elettrico* scalare e A *potenziale magnetico vettore*.
Per verificare l'indipendenza delle due componenti si hanno a disposizione le relazioni:

$$\nabla \cdot \nabla \times \overline{A} = 0 \tag{5-11}$$

e

$$\nabla \times \nabla\phi = 0 \tag{5-12}$$

Note le sorgenti della divergenza e del rotore del campo vettoriale F, si può scrivere:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \nabla \times \phi = -w \\ \nabla \times \nabla \times \overline{A} = \overline{d} \end{cases} \tag{5-13}$$

Le relazioni sopra scritte mettono in evidenza un'importante conseguenza del teorema di Clebsch-Helmholtz, ovvero la possibilità di determinare un campo vettoriale dalla soluzione di due sole equazioni differenziali indipendenti, una nel potenziale scalare e l'altra nel potenziale vettore. Una volta noti questi due potenziali è facile, tramite l'equazione (5-10) , costruire il campo vettoriale F.
Basandosi sul teorema appena descritto si può ora formulare il problema di campo d'interesse in termini di potenziali.

Problemi di campo variabile con legge sinosuidale

Un'ultima osservazione riguarda le densità di carica e di corrente che compaiono nelle equazioni viste. In genere nei problemi elettromagnetici si considerano come sorgenti del campo le correnti e le cariche, ma esistono spesso anche dei problemi che presentano delle correnti indotte dal campo sui materiali conduttori.
Nel primo caso tali grandezze si considerano note, e quindi costituiscono il termine noto di un sistema di equazioni differenziali non omogenee. Nel secondo caso le grandezze sono ovviamente incognite, in quanto dipendenti dal campo elettromagnetico incognito.

È chiaro che le sorgenti in realtà ci saranno sempre, ma magari la regione in cui si cerca la soluzione non le comprende. Si va ora a distinguere il contributo delle cariche e delle correnti in una componente impressa e in una componente dipendente dal campo:

$$\dot{\bar{J}} = \sigma\dot{\bar{E}} + \dot{\bar{J}}_s \tag{5-14}$$

dove $\dot{\bar{J}}_s$ è la corrente impressa mentre il termine $\sigma\dot{\bar{E}}$ è la corrente indotta.
Se tale equazione viene sostituita nelle equazioni di Maxwell espresse in termini fasoriali si ottiene:

$$\begin{cases} \nabla \times \dot{\bar{H}} = (\sigma + j\omega\varepsilon)\dot{\bar{E}} + \bar{J}_s \\ \nabla \times \dot{\bar{E}} = -j\omega\mu\dot{\bar{H}} \end{cases} . \tag{5-15}$$

Imponendo ora:

$$\dot{\bar{B}} = \nabla \times \dot{\bar{A}} \text{ e} \tag{5-16}$$

$$\dot{\bar{E}} = -j\omega\dot{\bar{A}} - \nabla\dot{\phi} \tag{5-17}$$

si ottiene sostituendo nella prima equazione di Maxwell:

$$\nabla \times \nabla \times \dot{\bar{A}} = \mu(\sigma + j\omega\varepsilon)\dot{\bar{E}} + \mu\dot{\bar{J}}_s . \tag{5-18}$$

Tale equazione esplicitata diviene:

$$\nabla\nabla \cdot \dot{\bar{A}} - \nabla^2\dot{\bar{A}} = -j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)\dot{\bar{A}} - \mu(\sigma + j\omega\varepsilon)\nabla\dot{\phi} + \mu\dot{\bar{J}}_s . \tag{5-19}$$

Si esprime ora la divergenza di A attraverso la gauge di Lorentz scritta in termini fasoriali:

$$\nabla \cdot \dot{\bar{A}} = -\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)\dot{\phi} \tag{5-20}$$

e chiamando $k^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)$ (5-21)
si ottengono due equazioni, una scritta in termini di potenziale scalare ed una scritta in termini di potenziale vettore:

$$\begin{cases} \nabla^2\dot{\bar{A}} - k^2\dot{\bar{A}} = -\mu\dot{\bar{J}}s \\ \nabla^2\dot{\phi} - k^2\dot{\phi} = -\dfrac{\rho}{\varepsilon} \end{cases} . \tag{5-22}$$

Tali equazioni sono dette *equazioni di Helmholtz non omogenee.*

Le prime due equazioni di Maxwell, insieme alle relazioni costitutive appena viste, possono essere risolte, ma avranno in generale una pluralità di soluzioni (una volta assegnate le grandezze impresse).
Tra tutte le soluzioni possibili bisognerà ricercare quella che soddisfa particolari requisiti, ovvero quella che soddisfa delle opportune condizioni iniziali e al contorno. Le condizioni iniziali fissano la distribuzione del campo elettromagnetico in un certo istante, nel dominio di definizione del problema; le condizioni al contorno fissano il valore del campo su particolari superfici o linee.
Ad esempio è noto che sulla superficie di un conduttore perfetto (cioè un mezzo avente conducibilità infinita), occorrerà imporre la condizione di annullamento del campo elettrico tangenziale. Su domini illimitati e poi fondamentale fissare il valore del campo all'infinito.
Come si è già potuto vedere l'uso dei potenziali consente di passare dal sistema di equazioni differenziali del primo ordine rappresentato dalle equazioni di Maxwell, ad un'unica equazione differenziale espressa nella variabile potenziale (scalare o vettore) che a seconda del problema da affrontare, assumerà la forma di equazione di Poisson o Helmholtz.
Tali equazioni sono scritte facendo riferimento a mezzi di caratteristiche omogenee. Nel caso generale non sempre il dominio di definizione sarà costituito da un unico mezzo omogeneo, ma spesso sarà costituito da un mezzo per cosi dire "omogeneo a zone", cioè formato da mezzi omogenei e tra loro contigui attraverso delle regioni (punti, linee, superfici) di interfaccia.
Quello che si usa come normale procedura di soluzione del problema, è risolvere in ciascuna delle regioni l'equazione di riferimento, per poi andare ad imporre delle condizioni di raccordo alle interfacce fra mezzi diversi. Tali condizioni cosiddette d'interfaccia o di continuità sono anch'esse degli esempi di condizioni al contorno.
La soluzione di problemi di campo sotto opportune condizioni al contorno viene definita soluzione di Boundary Values Problems (BVP).

Ricapitolando possiamo definire tre tipi di condizioni al contorno.

1) Condizioni che vengono imposte alla frontiera del dominio (sono informazioni aggiuntive sulla variabile del problema che si sta risolvendo, o sul suo valore o sulle sue derivate).
2) Condizioni espresse all'interfaccia (ad esempio tra mezzi con caratteristiche diverse).
3) Condizioni iniziali, imposte sulla variabile indipendente tempo anziché sulle variabili spaziali (fondamentale ad esempio nella soluzione dell'equazione di diffusione).

<u>Modello matematico di un transitorio termico:</u>

Le valutazioni sul campo di temperature in una regione conduttiva sono caratterizzate dalla conduzione termica e in particolare dalla conduttività termica k (W/m°C) e dalla capacità termica volumetrica ρc_p (J/m^{3}C),
Se le sorgenti di calore sono espresse dalla densità di volume p (W/m^3)si ha la seguente equazione di Fourier:

$$\rho c_p(\partial T/\partial t) = div(kgradT) + p \qquad (5\text{-}23)$$

La condizioni al contorno:

$$k\vec{n}gradT = h(T - Ta) + \varepsilon C_n(T^4 - T^4{}_a) + p_s \qquad (5\text{-}24)$$

Esprime lo scambio termico per convezione (coefficiente h) e per radiazione (ε) della superficie conduttiva con la regione a temperatura T_a. Il flusso termico di densità p può essere inserito nelle condizioni al contorno. La condizione iniziale del campo di temperatura è nota e pari in questo caso a 20°C.

5.3 Multiphysics [9]

5.3.1 Principio di risoluzione

Il trattamento termico della ricottura è un problema di accoppiamento forte tra gli aspetti elettromagnetici e termici, infatti le proprietà fisiche dei problemi in esame sono entrambi dipendenti dalla temperatura: resistenza elettrica, permeabilità magnetica, conduttività termica e capacità termica volumetrica sono tutte grandezze interdipendenti.

Ciò significa che occorre calcolare entrambi i campi di soluzione dei due problemi in tempo reale e occorre risolvere in ogni istante sia l'equazione magnetica che l'equazione del transitorio termico.
Per simulare la risoluzione istantanea di entrambi i processi si discretizza il tempo continuo dividendolo in tanti time-step (t_0,t_1,…..t_f). Dopo ciò, per lo stesso time step t_i, si eseguono i calcoli dei problemi elettromagnetico e termico iterando più volte il calcolo aggiornando le proprietà "temperatura-dipendenti" fino a che si arriva a convergenza.

Qui sotto si riporta uno schema dell'algoritmo di risoluzione:

Tabella 5.1 – *Logica di risoluzione del problema multiphysics*

Fase	Descrizione
0	Si parte dalle condizione iniziale di temperatura T = 20°C su tutto il dominio
1	Dato il campo di Temperatura si i calcolano (aggiornandoli alla nuova T) i valori delle proprietà elettromagnetiche, si risolve l'equazione di Maxwell e si calcola p_S (densità superficiale di potenza generata dalle correnti indotte per effetto Joule)
2	Con il nuovo campo p_S si risolve l'equazione di Fourier per calcolare il campo di Temperatura T aggioranto
3	Con il nuovo campo di temperatura T si calcolano nuovi valori delle propietà elettromagnetiche e poi si risolve nuovamente l'equzione di Maxwell per il calcolo di p_S aggiornato
4	Si ripete 2 e 3 ovvero l'aggiornamento di T e p_S cioè del campo di temperatura e della sorgente di potenza fino a convergenza ovvero fino a che le soluzioni dei calcoli in 2 e 3 (campi T e pS) si discostano di un valore più piccolo di un errore preventivamente scelto
5	Ritorno alla fase 1 con T aggiornato dalla fase 4
6	Ritorno alla fase 1 con T aggiornato per il calcolo della soluzione per il time step successivo.

Il tempo di risoluzione del problema ad accoppiamento multiphysics è piuttosto elevato e cresce rapidamente se il problema magnetico non è lineare a causa del grande numero di iterazioni richieste per ogni singola soluzione magnetostatica

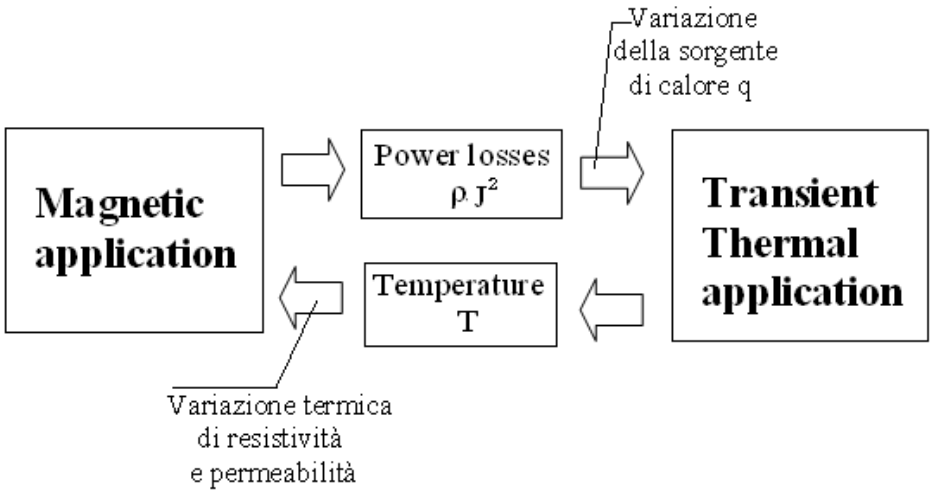


Figura 5.1 – *Dinamica del Multiphysics:*
in tempo reale vi è uno scambio di informazioni tra il problema magnetico e termico proprio per la interdipendenza delle proprietà fisiche dei due processi. Non è possibile calcolare la soluzione di un processo senza tener conto dell'altro.

5.3.2 Multiphysics: scambio dati e sincronizzazione

Per accoppiamento multiphysics si intende l'esecuzione in parallelo dei due processi con scambio di dati e gli strumenti software di Flux2d che permettono ciò devono essere in grado di gestire la sincronizzare del processo e lo scambio dati.

1) Scambio dati: multipoint support

In questo caso abbiamo lo scambio di dati bidirezionale:

- ◊ densità di potenza (M=>T)
- ◊ temperatura (T=>M)

Le grandezze da scambiare sono spaziali (***spatial quantity***) e richiedono pertanto un supporto di scambio (***Exchange support***). Nel caso in cui i due problemi accoppiati abbiano mesh diverse (caso generico), le coordinate dei nodi vengono trasferite da un problema all'altro mediante un'entità di Flux detta ***multipoint support***.
Dunque per lo scambio dati nel caso dei due problemi con mesh diverse si avrà la necessità di utilizzare due multipoint support e durante il trasferimento delle grandezze (temperature e potenze) ci sarà una interpolazione dei parametri sui punti che non coincideranno con i nodi della mesh.

2) Scambio dati: multiphysics spatial quantity

Nel punto 1 è stato ribadito che le grandezze scambiate sono spaziali (*spatial quantity*). Oltre al supporto di scambio (*Exchange support*), si richiede la definizione di un struttura di immagazzinamento dati (***storage structure***) che in Flux si chiama ***multiphysics spatial quantity***. Come per il multipoint support se ne useranno due, una per ogni grandezza da memorizzare.

3) Multiphysics coupling:

L'esecuzione in parallelo dei due processi è possibile grazie ai ***file*** di scambio ***DEX*** **(**Data EXchange) e ai file di sincronizzazione. Quindi in un primo tempo le due applicazioni si scambiano le coordinate dei nodi attraverso il multipoint support e, solo successivamente, le grandezze. In entrambi i casi si usano i file DEX, due per i nodi e due per le grandezze, nel caso specifico:

- NODES_M.DEX
- NODES_T.DEX
- VALUES_DSOURCE.DEX
- VALUES_TKELVIN.DEX

I primi due file saranno costituiti dall'elenco delle coordinate dei nodi, nel nostro caso si avranno le prime due colonne rappresentanti le coordinate x e y e una terza colonna di zeri che rappresenta la terza coordinate che per il caso 2D è ovviamente nulla.

Gli ultimi due file sono un'elenco dei nodi e per ogniuno il valore del campo di soluzione corrispondente.

Sarà costituito da 4 colonne di numeri, i primi tre rappresentano le coordinate del nodo e l'ultimo il valore di potenza volumetrica o temperatura.

4) Scambio dati: temperature e materiali

É già stato detto che le proprietà dei materiali dipendono dalla temperatuta. Si ricoda a tal proposito:

- B(H,T) o μ(H,T)
- J(E,T) o σ(E,T)
- k(T)
- $\varrho c_p(T)$

Flux è in grado di aggiornare automaticamente le grandezze nell'applicazione magnetica se i valori di temperatura vengono salvati nella spatial quantity predefinita ***TKELVIN***.

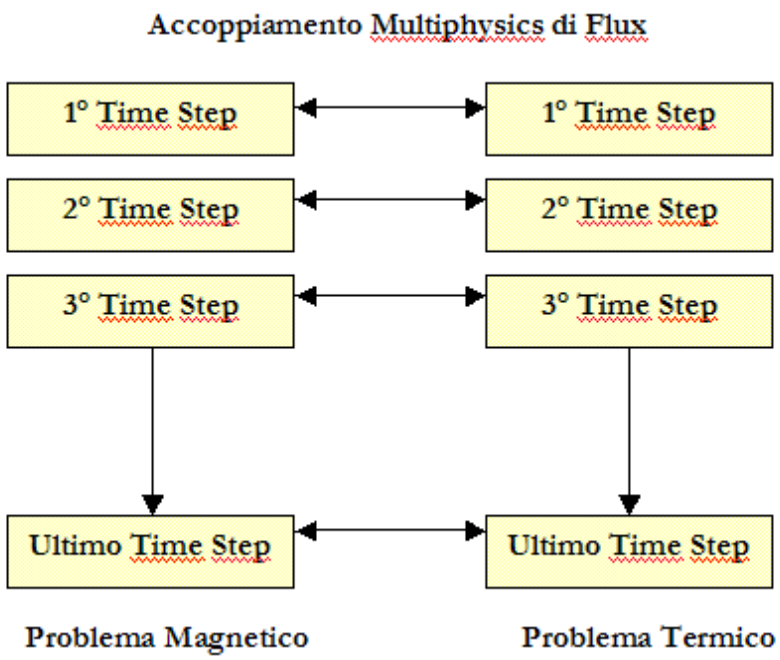


Figura 5.2 – *Dinamica del Multiphysics: in tempo reale attraverso i file DEX si scambiano le temperature e le sorgenti termiche come spiegato nel punto 3 del paragrafo 5.3.2*

5.3.3 Diagramma logico

Ecco nel dettaglio la logica per l'implementazione della simulazione di un processo di riscaldamento.

Partendo dai due progetti realizzati in FLUX, nei quali sono specificate la geometria, la mesh e la parte fisica, la trattazione del riscaldo può essere implementata mediante delle procedure di calcolo scritte in Python. Si rimanda all'appendice per il listato e qui sotto è riportato un diagramma esplicativo a blocchi logici.

La dinamica del riscaldamento si può riassumere mediante questi due diagrammi di flusso che "collaborano tra loro"

Creazione di un tool di scambio dati:

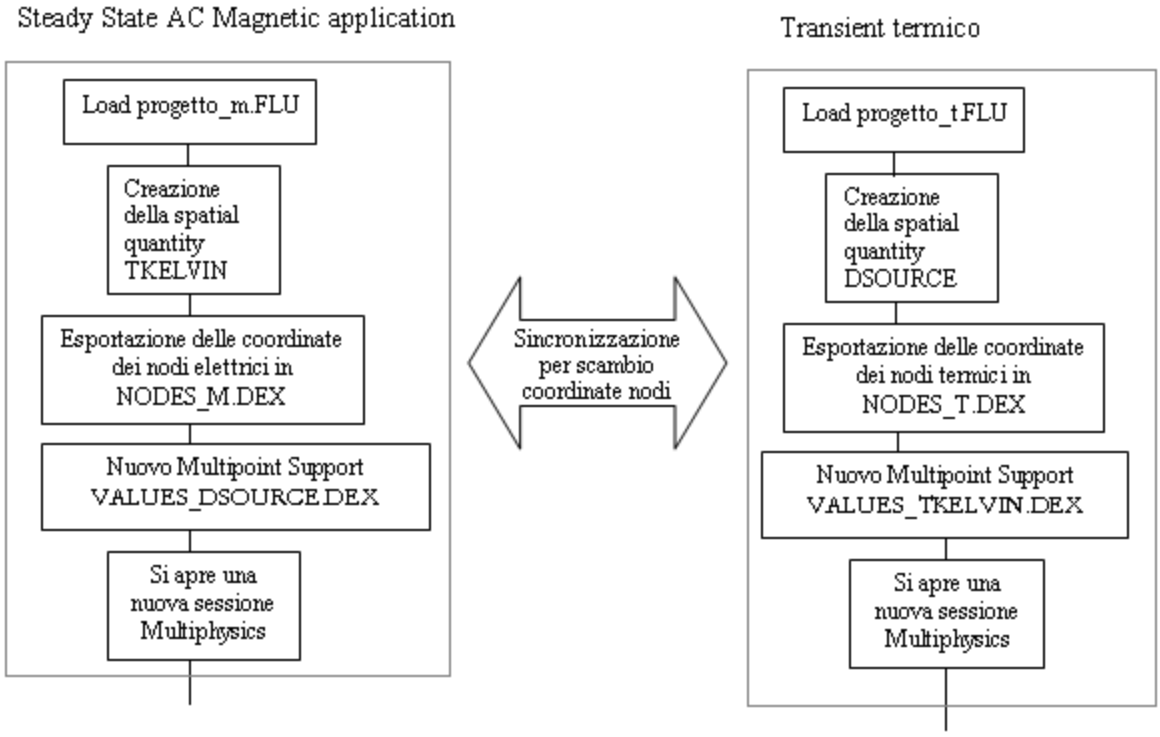


Figura 5.3 – *Prima parte dello schema esplicativo per la simoluzione del problema Multiphysics*

Risoluzione multiphysics e scambio dati

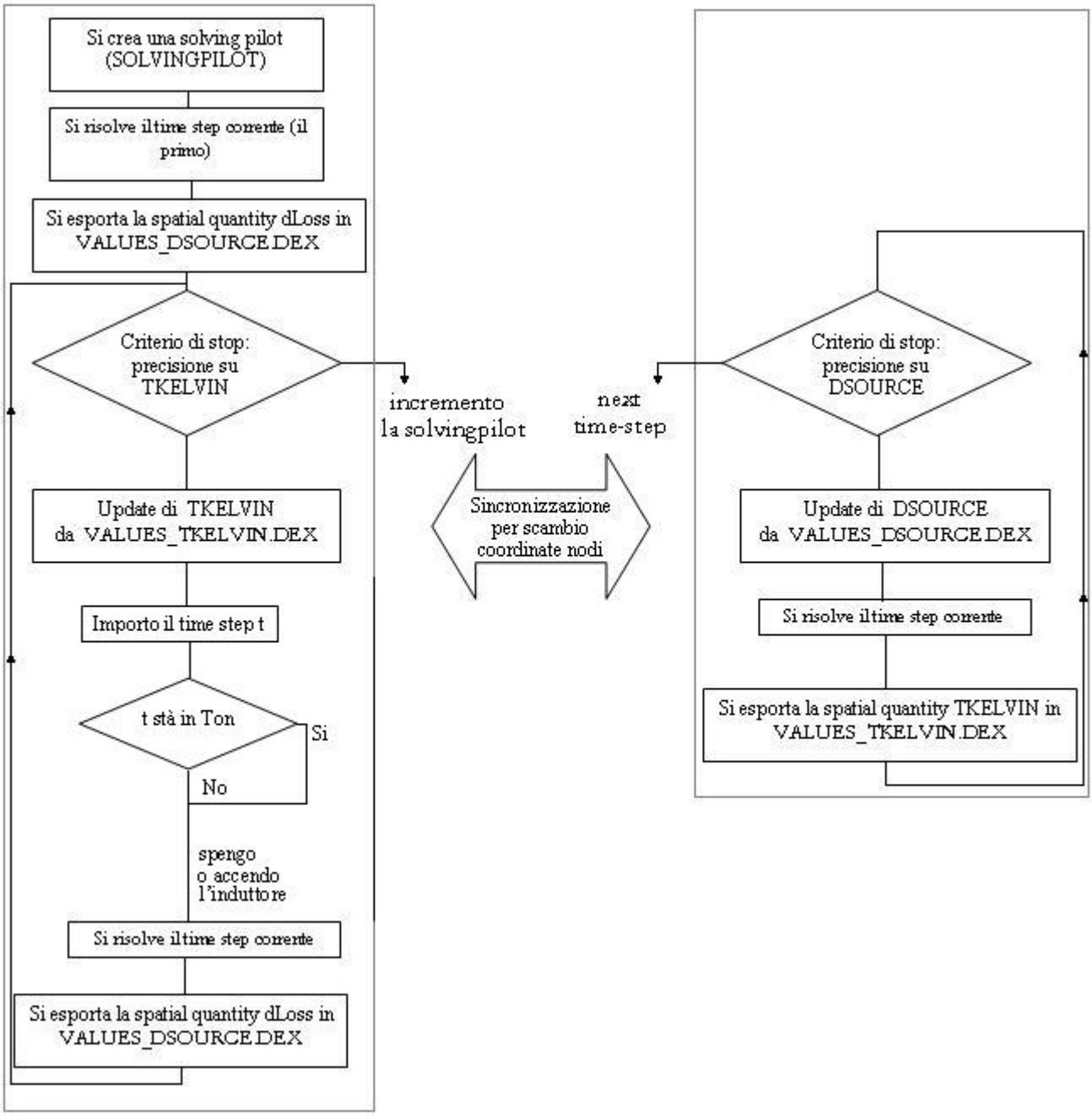


Figura 5.4 – *Seconda parte dello schema esplicativo per la simoluzione del problema Multiphysics*

In questa maniera si riesce a simulare la dinamica del riscaldamento e del raffreddamento del corpo.
Il risultato è rappresentato nella figura qui sotto:

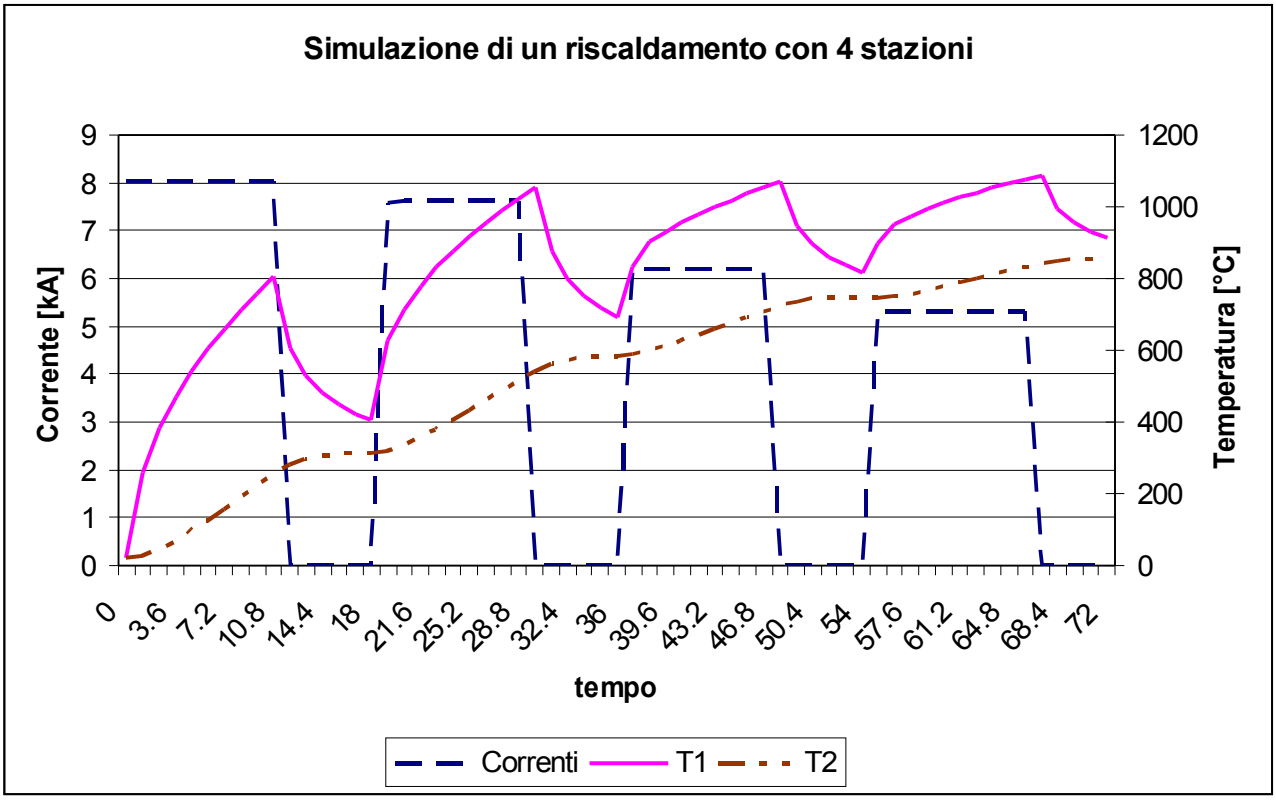


Figura 5.4 – *Grafico temporale della temperatura e della corrente in una simulazione di riscaldamente mediante quattro stazioni;*
T_1 e T_2 sono le temperature dei punti P_1 e P_2 mentre Correnti è il valore della corrente nell'induttore

6. Presentazione generale del problema

6.1 Il tubo

Il dispositivo in esame è un tubo cavo, riscaldato per effetto Joule da correnti indotte.

In questo elaborato saranno analizzate più configurazioni geometriche, ma si tratta di casi strettamente legati fra loro.

Considerando che nel processo di riscaldamento il tubo si muove di moto rettilineo uniforme, cioè avanza a velocità costante, la simulazione può essere eseguita su di un modello 2d a sezione trasversale.
Per simulare il passaggio del tubo sotto la stazione di riscaldamento si accenderà o spegnerà l'alimentazione dell'induttore che sta sopra al tubo ovvero lo si alimenterà con una corrente diversa da zero (on) o nulla (off).
I tempi di funzionamento o non funzionamento dell'induttore (on e off) saranno dettati dalla velocità, dalla lunghezza e dalla distanza fra gli induttori.
Vista la geometria del problema è possibile sfruttare la simmetria assiale (lungo l'asse y con campo magnetico normale e campo elettrico tangente) riducendo così la complessità della simulazione

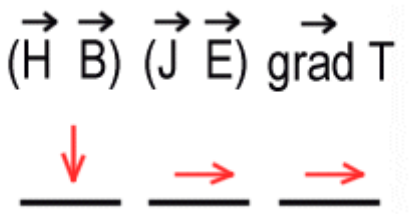
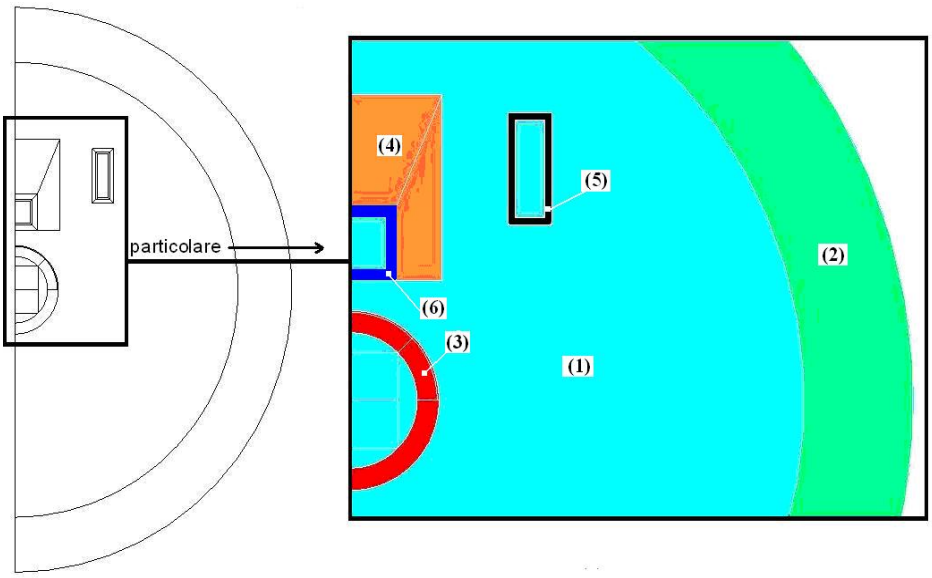


Figura 6.1 – *Rappresentazione delle direzioni di H,B,J,E e graT nella linea di simmetria assiale*

6.2 Modelli geometrici

Qui sotto il modello *dettagliato* per la simulazione del problema reale:



(1) In turchese l'aria
(2) In verdino l'infinite box
(3) In rosso il tubo
(4) In marroncino il concentratore di flusso
(5) In nero il conduttore di ritorno
(6) In blu l'induttore che produce il riscaldamento nel tubo

Figura 6.2– *Rappresentazione del "Modello dettagliato" utilizzato nelle simulazioni*

Tabella 6.1 – *Caratteristiche del tubo in acciaio*

Cilindro cavo in rosso	Diametro esterno 323 mm	Spessore 12mm
Ha una superficie di scambio termico ,con coefficienti di convezione e radiazione pari a 10 e 0.8		
Induzione magnetica [T]	$B(H) = \mu_0 \mu_r H$	μ_r = 200
Densità di corrente [A]	$J(E) = \frac{E}{\rho}$	ρ = 2E-7Ωm
Conduttività termica	K(T)= 50 W/m°C	
Capacità termica volumetrica	ρCp(T) = 3.5E6 J/m^3°C	

Tabella 6.2 – *Caratteristiche degli induttori di andata e ritorno (Rame)*

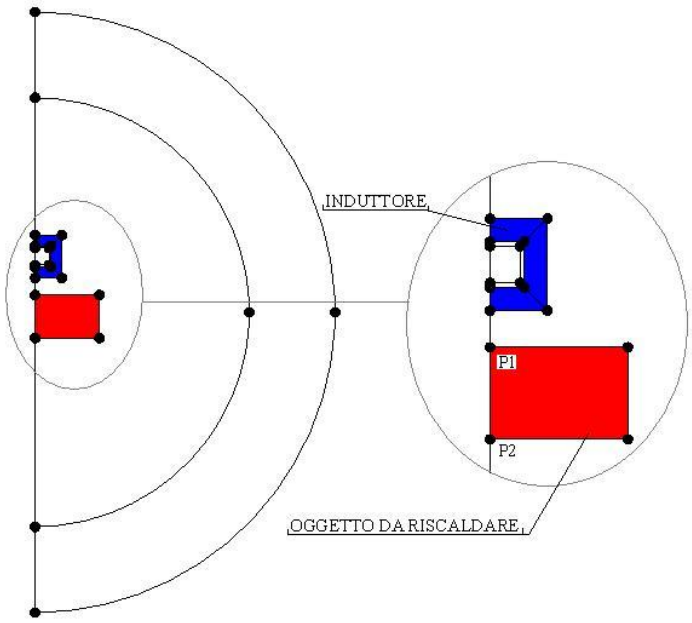
Rettangolo cavo in blu con	larghezza di 25mm	altezza 20 mm	spessore 3 mm
Rettangolo cavo in nero con	larghezza di 12mm	altezza 30 mm	spessore 3 mm
Densità di corrente [A]	$J(E) = \frac{E}{\rho}$	ρ = 2E-8Ωm	
Conduttività termica	K(T)= 394 W/m°C		
Capacità termica volumetrica	ρc_p(T) = 3.518E6 J/m^3°C		

Tabella 6.3 – *Caratteristiche del concentratore di flusso*

In marroncino	larghezza di 80 mm	altezza 50 mm	l'induttore è all'interno
Induzione magnetica [T]	$B(H) = \mu_0 \mu_r H$	μ_r = 5000	

- La lunghezza dell'induttore (in blu nella figura in alto) è di 1000 mm, lo spazio fra stazione e stazione è di 500 mm.
- Distanza tra induttore e oggetto lungo l'asse di simmetria 8mm (traferro)
- Se si prende come riferimento il centro del tubo, il vertice dell'induttore laterale più vicino è in (58;184.5)

Il modello così trattato risulta essere troppo oneroso per la determinazione del processo di ricottura più efficiente e quindi per lo studio del processo di riscaldamento saranno sufficienti una geometria e dei materiali *semplificati*. Una volta ottenuto lo strumento di ottimizzazione la simulazione sarà effettuata sul modello *dettagliato*.



DA OSSERVARE LA POSIZIONE DEL PUNTO 1 E 2.

Come abbiamo visto, durante il riscaldamento del pezzo P1 sarà interessato da un valore di calore più alto mentre P2 da quello più basso.

Figura 6.3– *Rappresentazione del "Modello semplificato" utilizzato nelle simulazioni*

Tabella 6.14– *Caratteristiche del tubo in acciaio*

Rettangolo in rosso con	larghezza 60mm	due valori di altezza 15 e 5 mm
Ha una superficie di scambio termico ,con coefficienti di convezione e radiazione pari a 10 e 0.8		
Induzione magnetica [T]	$B(H) = \mu_0 \mu_r H$	μ_r = 200
Densità di corrente [A]	$J(E) = \frac{E}{\rho}$	ρ = 2E-7Ωm
Conduttività termica	K(T)= 50 W/m°C	
Capacità termica volumetrica	ρCp(T) = 3.5E6 J/m^3°C	

Tabella 6.2 – *Caratteristiche dell'induttore in rame*

Rettangolo cavo in blu con	larghezza di 25mm	altezza 20 mm	spessore 5 mm
Densità di corrente [A]	$J(E) = \frac{E}{\rho}$	ρ = 2E-8Ωm	
Conduttività termica	K(T)= 394 W/m°C		
Capacità termica volumetrica	ρc_p(T) = 3.518E6 J/m^3°C		

6.3 Sorgenti e Circuito elettrico accoppiato

Nel problema magnetico è stato introdotto un circuito che governa le grandezze elettriche, in particolare abbiamo:

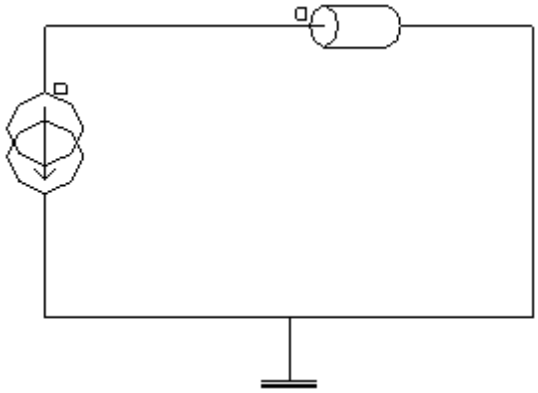


Figura 6.4– Circuito elettrico utilizzato nell'applicazione elettromagnetica di Flux

- un generatore di corrente nel quale il valore efficace viene parametrizzato per poter variarne il valore. Così facendo è possibile simulare il movimento del tubo e in particolare il suo attraversamento sotto le stazioni di riscaldo. In altri termini si spegne o accende l'induttore;

- un solid conductor per gestire l'induttore, il cui settaggio su Flux2d sarà su conductors in parallel: infatti la corrente imposta da circuito è quella che fluisce nel conduttore completo ovvero nel conduttore nella sua interezza. Il settaggio "conduttori in parallelo" impone al software di dividere la corrente del circuito tra tutti i conduttori replicati per simmetria, in questo caso la metà sinistra dell'induttore. In questa maniera la corrente realmente imposta sulle facce del nostro modello (che è metà della faccia trasversale del pezzo) sarà metà di quella imposta nel circuito.

Il problema è fissato ad una frequenza di 3kHz come spiegato nel paragrafo 6.4.3 a pagina 75

6.4 Osservazioni riguardo il processo e la simulazione

6.4.1 Scelta dell'induttore di tipo affiancato e del concentratore di flusso

Come già detto il riscaldamento è localizzato in una zona ben definita del corpo.
Per questo motivo è stato scelto un induttore di tipo "affiancato". Grazie ad esso si riesce a concentrare la generazione di calore in corrispondenza ai conduttori dell'induttore.

La densità di potenza depositata e la sua distribuzione dipendono dalle dimensioni geometriche , spaziatura dal passo delle spire e dalla loro distanza dalla superficie da trattare. Questi elementi non sono stati presi in considerazione in questo lavoro ma potranno essere integrati nelle strategie di ottimizzazione del processo. In ogni caso lo spazio tra induttore e superficie deve essere limitato al fine di garantire un alto rendimento;

Per aumentare ulteriormente il rendimento e migliorare la distribuzione di potenza concentrandola nella sezione più interessante si utilizzano induttori con nuclei ferromagnetici. Nella figura qui sotto vi è un induttore tipicamente usato per il trattamento di superfici piane, l'andamento delle linee di campo magnetico e la distribuzione della potenza specifica indotta nella lastra d'acciaio.

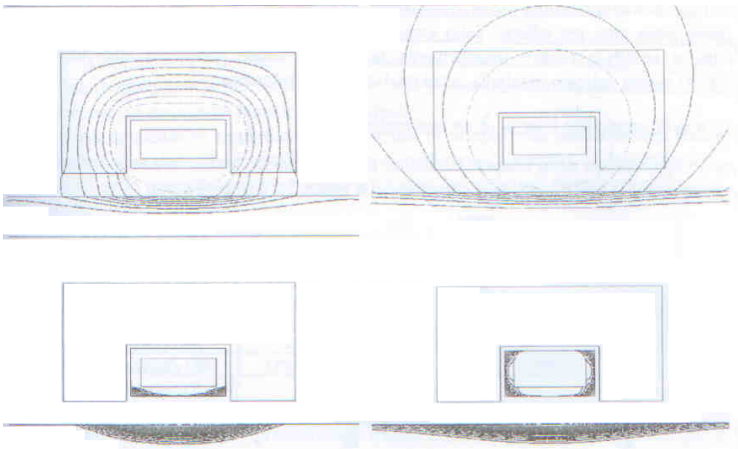


Figura 6.5 – *Induttore affiancato, andamento delle linee di campo magnetico e distribuzione della potenza specifica indotta nella lastra d'acciaio con e senza concentratore di flusso*

6.4.2 Scelta del materiale lineare-magnetico

E già stato scritto in più occasioni che il materiale del modello qui utilizzato è di tipo lineare, e questo per semplificare il calcolo al solver e quindi diminuire i tempi di risposta dell'ottimizzatore.

Ma vediamo che differenze ci sono nei due tipi di materiale:

- Nel caso di materiai lineari, nel nostro caso l'acciaio avente permeabilità relativa costante e pari a 200, le variazioni di resistività con la temperatura sono del tutto simili a quelle per i materiali non magnetici:

$$\rho = \rho(T) = \rho_0(1 + \alpha_0 T) \tag{6.1}$$

Di conseguenza, durante il transitorio di riscaldamento aumenta lo spessore di penetrazione e le correnti indotte e le sorgenti di calore penetrano a maggiore profondità nel campo di riscaldamento.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \qquad 6.2)$$

- Nel caso di materiali magnetici (acciai, ferro, nichel) oltre alle variazioni di resistività con la temperatura, si hanno valori di permeabilità magnetica fortemente dipendenti dall'intensità del campo magnetico e dalla temperatura:

$$\mu = \mu(H, T) \tag{6.3}$$

Negli acciai magnetici la resistività varia in modo non lineare: aumenta di circa 5 volte nell'intervallo 0 e 800°C, mentre a temperature più elevate la crescita è più lenta, arrivando a 1200-1300°C ad un valore di circa 7 volte rispetto a quello di temperatura ambiente

I valori di permeabilità a 20°C variano oltre che con l'intensità del campo magnetico anche con il contenuto di carbonio dell'acciaio, a partire da $\mu = 20$.

La permeabilità magnetica varia molto poco con la temperatura fino a circa 500-600°C, mentre successivamente diminuisce rapidamente fino al valore unitario che viene raggiunto in corrispondenza al punto di Curie (750-780°C).

6.4.3 Scelta della frequenza a 3000 Hz

Il processo di ricottura coinvolge una gamma di frequenze che va da 1 a circa 5 kHz.

In questo caso, per il tipo di geometrie di tubo trattate, si è scelto di mantenerla costante e prossima ad un valore di 3kHz, valore comunemente usato negli impianti commerciali. Ciò non toglie che in futuro si possa pensare di far entrare questo parametro elettrico fra le variabili di ottimizzazione per verificare le ipotesi qui fatte.

7. Ottimizzazione del processo

Per ottimizzazione del processo si intende la realizzazione di uno strumento che utilizzando un solver agli elementi finiti, restituisca il valore di velocità massima di avanzamento del tubo.

Il processo sarà ottimizzato nel rispetto di differenti vincoli che riguardano diversi aspetti:

- Caratteristiche elettriche (potenza, frequenza del sistema di alimentazione,…)
- Caratteristiche geometriche (dimensione induttore, accoppiamento induttore-tubo, numero bobine,…)
- Caratteristiche qualitative del processo (Temperatura massima in P1, differenza di temperatura P1-P2, produttività…)

In questa relazione sono stati presi in considerazione la temperatura massima nel punto P1, ovvero nel punto più caldo del tubo, la differenza di temperatura tra i punti P1 e P2 in uscita dal processo di riscaldamento ed infine la potenza massima disponibile per ogni stazione di riscaldo.

Il problema dell'ottimizzazione è stato qui trattato in tre diverse forme:

- <u>1° STEP</u>:
  Tratta il problema del riscaldamento mediante un numero variabile di stazioni n.
  L'obiettivo da raggiungere è di riscaldare il pezzo portando P1 a 1100°C.
  L'obiettivo secondario è quello di sfruttare appieno le stazioni di riscaldamento ovvero far lavorare ogni stazione ad un valore prossimo al 100% della potenza disponibile.
  ogni Per ogni istante temporale vengono controllate la temperatura e la corrente dell'induttore. Entrambi i valori non devono superare in nessun istante il valore di 1100°C e il valore di corrente per cui si supera il valore di potenza disponibile per ogni stazione.

- <u>2° STEP</u> :
  In questo caso si utilizza un algoritmo di ottimizzazione che minimizza una funzione obiettivo dipendente da due parametri, ovvero la velocità e la corrente della singola stazione in esame.
  I risultati del solver saranno la temperatura massima in P1 e la differenza di temperatura tra i punti P1 e P2 che dovranno rientrare nei limiti richiesti di 1100°C e 100°C

- <u>3° STEP</u> :
  E' stato analizzato il riscaldamento del tubo mediante 4 stazioni. Per le prime due si prevede un funzionamento a regime mentre per le ultime due c'è la possibilità di modulare la potenza;
  Si va a spaziare un campo di velocità a passi discreti e per ogni velocità si trovano i valori di corrente I3 e I4 che permettono di ottenere i risultati ricercati su Tmax e ΔT_{12}, ovvero 1100°C e un ΔT_{12} inferiore ai 100°C.
  Partendo da valori di velocità basse, salendo a quelle più alte ci si aspetta che per le prime simulazioni si arrivi ad avere valori di I3 e I4 legittimi e poi per una data velocità valori di I3 e I4 che causano il superamento di 1100 e 100 °C.

7.1 Algoritmi di ottimizzazione

I metodi sviluppati per risolvere il problema dell'ottimizzazione sono in via di principio raggruppabili in due classi:

- metodi deterministici;
- metodi stocastici.

I metodi deterministici forniscono un'assoluta garanzia di successo utilizzando le informazioni sulla funzione obiettivo ottenute durante l'esecuzione dell'algoritmo, ma inevitabilmente richiedono ipotesi molto restrittive sulla funzione.
I metodi stocastici sono quei metodi in cui il processo di minimizzazione dipende in parte da eventi probabilistici, ossia i risultati forniti sono essi stessi variabili aleatorie. In molti casi la funzione viene valutata su un insieme di punti scelti a caso nel dominio della funzione. Dunque l'elemento di aleatorietà porta ad eventuali diversi punti di ottimo partendo dallo stesso punto nell'esplorazione della funzione. Viceversa i metodi deterministici sono caratterizzati dalla rigidità di ricerca che funziona in maniera precisa e riproducibile e dunque, cominciando dallo stesso punto di ricerca, l'ottimizzazione porta sempre allo stesso minimo.
Ovviamente tutti i metodi, stocastici o deterministici che siano, non possono prescindere dall'assicurare una qualche forma di convergenza. In alcuni casi si può richiedere che un metodo sia competitivo dal punto di vista empirico pur senza fornire garanzie di convergenza (metodo euristico), ma questo non è affatto soddisfacente dal punto di vista numerico. Idealmente si vorrebbe assicurare la possibilità di individuare un'approssimazione del minimo globale in un numero finito di passi e, sotto determinate ipotesi, alcuni metodi deterministici sono in grado di fornire una simile garanzia.
Nella maggioranza dei casi però il massimo che si può pretendere è una convergenza di tipo *asintotico*, ossia con uno sforzo computazionale tendente all'infinito. In generale la convergenza dei metodi stocastici è proprio di questo tipo.

L'algoritmo qui utilizzato è di tipo stocastico evoluzionistico e sarà caratterizzato dai seguenti passi fondamentali:

- la generazione di un numero di campioni nel loro dominio di esistenza attraverso una procedura stocastica;
- il calcolo della funzione per ciascun punto generato;
- la minimizzazione mediante un criterio di ottimizzazione locale per alcuni punti precedentemente creati;
- l'arresto dell'esecuzione quando si verifica una certa condizione di interruzione.

I metodi evoluzionistici sono generali o meglio universali e comuni perché non utilizzano per la soluzione del problema alcuna conoscenza a priori. Capita spesso di imbattersi in problemi in cui non si conosce nessuna indicazione riguardo la bontà di ogni singolo campione da valutare. A questo proposito il metodo evolutivo aggira questo problema attraverso una ricerca adattativa o meglio attraverso la generazione dinamica di punti il più statisticamente vicini a quelli della soluzione finale. Si cerca quindi di generare nuovi campioni nella direzione in cui "si sente" che la funzione stia puntando verso un minimo, migliorando così la generazione dei dati nel loro dominio avvicinandosi alla soluzione.
La generazione dei primi campioni sarà del tutto casuale e si andrà ad affinare riducendo il dominio di creazione secondo criteri evoluzionistici dettati da una legge empirica. Questa viene rappresentata da una funzione che misura l'adeguatezza (funzioni fitness) e quindi esprime la strategia di evoluzione.
In particolare, l'affinamento si realizza cambiando la distribuzione con funzioni di probabilità di tipo gaussiano, dove la deviazione standard agisce da principio di mutazione.

7.2 Funzione obiettivo

L'algoritmo in esame ottimizza una funzione obiettivo di tipo monodimensionale o scalare.
Nel nostro caso abbiamo 2 obiettivi:

- raggiungere in P1 una temperatura massima vicina a 1100°C;
- ottenere il più piccolo salto termico tra i punti P1 e P2 ed in ogni caso avere un ΔT_{12} inferiore ai 100°C.

Le relative funzioni da minimizzare potrebbero essere ad esempio :

$$f_{OBB1} = \left| \frac{T_{MAX} - 1100}{1100} \right| \tag{7.1}$$

$$f_{OBB2} = \Delta T_{12} = T_1 - T_2 \tag{7.2}$$

Ad ogni chiamata il solver Flux restituirà i due valori di temperatura: T_{MAX} in P1 e ΔT_{12}.

Di fatto quello che servirebbe è un ottimizzatore di tipo vettoriale, che sia in grado di analizzare contemporaneamente le due funzioni obiettivo. Una possibile strategia di soluzione consiste nello scalarizzare il problema, implementando cioè una unica funzione obiettivo espressa mediante la combinazione lineare delle due sopra scritte:

$$f_{OBB} = k_1 \cdot f_{OBB1} + k_2 \cdot f_{OBB2} = k_1 \cdot \left| \frac{T_{MAX} - 1100}{1100} \right| + k_2 \cdot \Delta T_{12} \tag{7.3}$$

I coefficienti k_1 e k_2 sono stati calcolati in modo tale che i singoli addendi nei peggiori dei casi che si possono verificare pesino il 50% sulla f_{OBB}.

Nel caso peggiore in cui T_{MAX} si discosta molto da 1100°C => $k_1 \cdot f_{OBB1} = 0.5$,
mentre nel caso in cui ΔT_{12} sia lontano dai 100°C => $k_2 \cdot f_{OBB2} = 0{,}5$.

Ad esempio se si valuta che nel peggiore dei casi TMAX possa valere 2000°C e ΔT_{12} 400°C, k_1 e k_2 si calcolano nel seguente modo:

- $k_1 \cdot \left| \frac{2000 - 1100}{1100} \right| = 0.5$ e k_1 risulta 0.6 (7.4)
- $k_2 \cdot 400 = 0.5$ e k_2 risulta $1.25 \cdot 10^{-3}$ (7.5)

Vediamo nel dettaglio i tre approcci:

7.3 1°STEP

In questo caso si sfrutta la potenzialità del post-processor di calcolare l'energia dissipata per effetto joule nel tubo durante tutto il processo di riscaldamento .

L'iter secondo il quale si arriva al risultato finale consiste di 2 simulazioni.

La prima si esegue con :

- un valore di velocità basso, tale da far raggiungere al punto 1 il valore di temperatura voluto ovvero i 1100°C.
- una corrente di partenza con la quale alimentare l'induttore sufficientemente elevata tale da superare nel tubo la massima potenza diffusa per effetto Joule, P_{MAX}.

Flux calcolerà :

- la corrente massima funzione di P_{MAX} da usare negli induttori;
- l'energia E_1 dissipata per effetto Joule nella tubo durante tutto il ciclo di riscaldamento T, compresi i periodi in cui il tubo non si trova in prossimità della stazione di riscaldamento ma si trova tra una stazione e l'altra;
- la massima velocità per la quale le stazioni sono pienamente sfruttate.

Per calcolare la massima corrente negli induttori si usa uno stratagemma che richiede un calcolo nei primi istanti della prima simulazione; grazie alla valutazione della potenza P_{JOULE} dissipata nel tubo, nota la sua relazione quadratica con la corrente nella bobina e il valore della P_{MAX}, si arriva all'obiettivo, cioè alla massima corrente da imporre negli induttori:

Se si indicano con I* e P* i valori relativi alla simulazione con la corrente volutamente elevata, si ricava dalla relazione qui sotto la grandezza cercata ovvero I_{MAX} :

$$\frac{I^2{}_{MAX}}{I^{*2}} = \frac{P_{MAX}}{P^*} \tag{7.6}$$

Questa corrente sarà utilizzata per riavviare la prima simulazione.

Terminato il lavoro del solver, in fase di post-processing si calcola l'energia E_1. Questa può anche essere definita, con una certa approssimazione, come il prodotto della potenza media dissipata per effetto Joule nel tubo moltiplicata per il tempo di riscaldamento.

Sapendo che si dovrà fornire la stessa quantità di energia E_1 per portare il punto P1 alla stessa temperatura ma in minor tempo (e cioè con una velocità più elevata), nota la massima potenza spendibile nel tubo P_{MAX}, sarà possibile calcolare la massima velocità di avanzamento, per la quale

1. si raggiunge 1100°C in P1 e

2. le stazioni sono alimentate dalle massime correnti.

Data P_{MAX} il suo valor medio nel processo sarà:

$$\overline{P} = P_{MAX} \cdot \frac{L_H}{L_H + L_C} \tag{7.7}$$

Con L_H e L_C si indica la lunghezza dell'induttore e la distanza tra un induttore e l'altro.

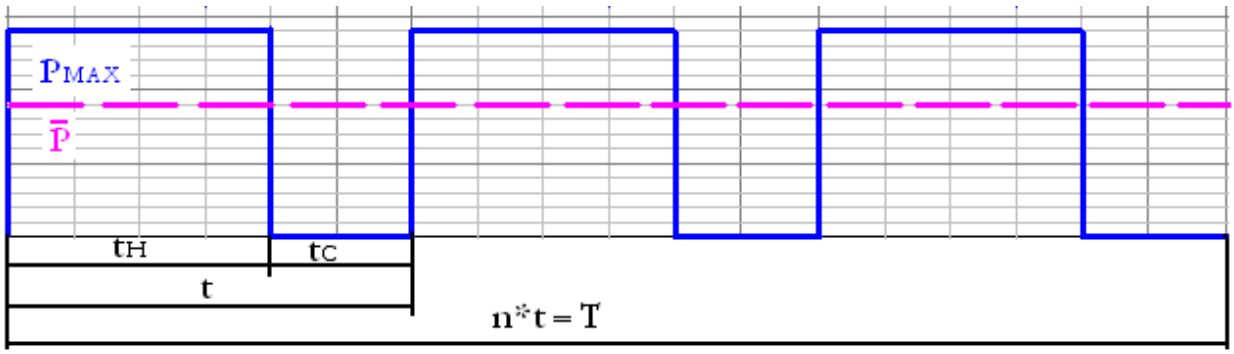


Figura 7.1 – *Schema esplicativo per il calcolo della potenza media di formula (7.7)*

Data l'energia E_1 calcolata nella prima simulazione si perviene al valore della velocità in pochi passi:

T_2 si ricava dalla $$\overline{E}_1 = \overline{P}_1 * n°_{STAZIONI} * t = \overline{P}_1 * T_1 = \overline{P} \cdot T_2 \qquad (7.8)$$

$$T_2 = \frac{\overline{E}_1}{\overline{P}}$$ dove $\overline{P}$ si riferisce alla potenza massima spendibile. (7.9)

La velocità massima per la seconda simulazione si ricava da T_2, il tempo totale di processo appena calcolato, e vale:

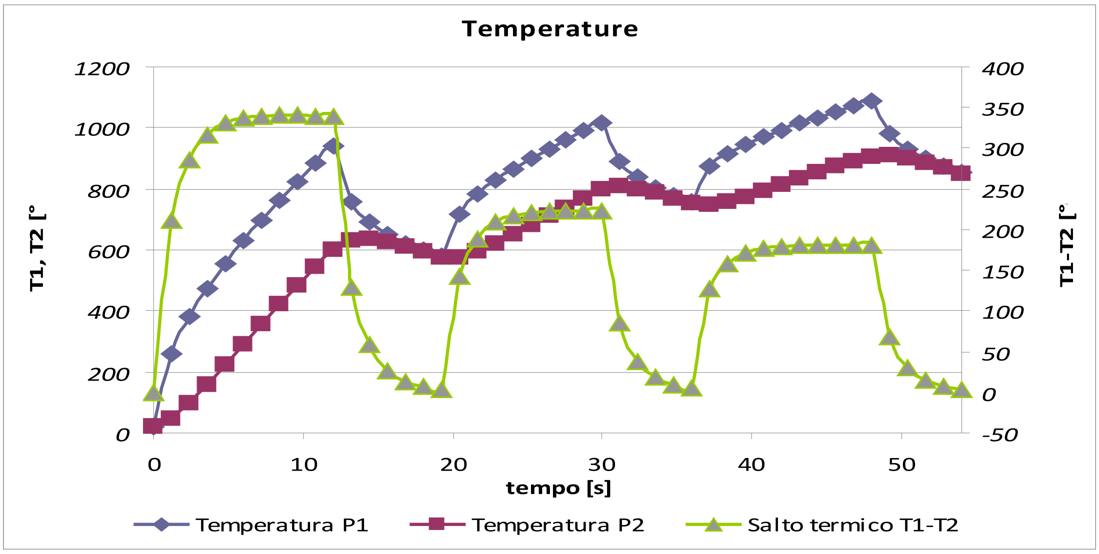
$$v_2 = n°_{STAZIONI} \frac{L_H + L_C}{T_2} \qquad (7.10)$$

Di seguito un esempio pratico eseguito sulla geometria completa di figura 6.2 nel quale si nota come nella seconda simulazione il valore di velocità è piuttosto vicino a quello ottimo; dal risultato si nota come l'ultima stazione non è pienamente sfruttata e dunque il tool realizzato ha stimato una velocità massima leggermente inferiore.

Nella pagina che segue i risultati numerici e grafici.

Tabella 7.1 – *Tabella riassuntiva della prima parte della risoluzione del 1°Step (paragrafo7.3)*

Prima Simulazione		
Pmax= 60000kW	n°$_{STAZIONI}$=3	Velocità=5m/min

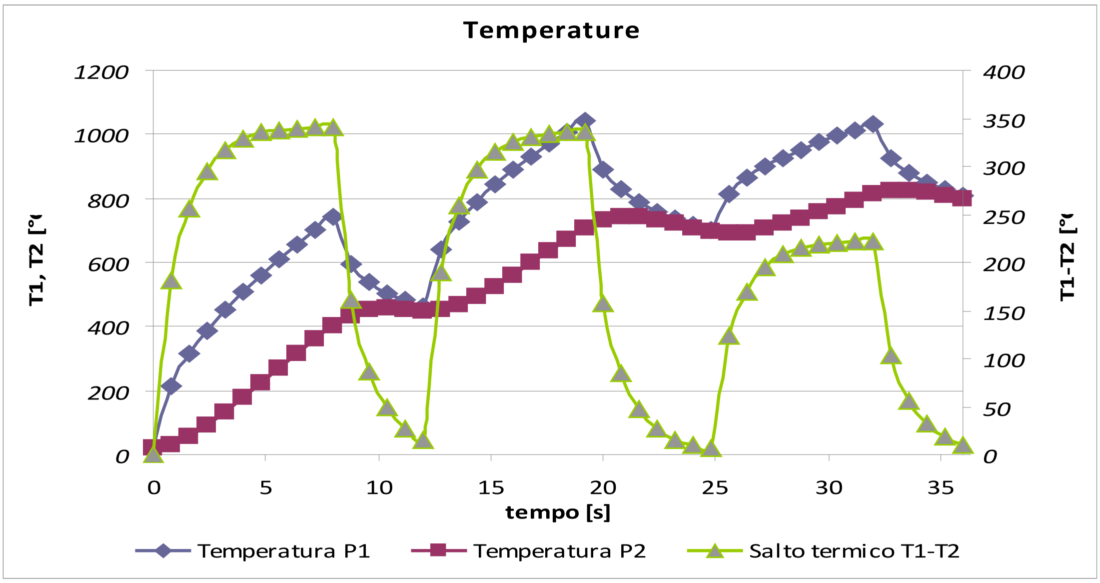


Corrente di prima simulazione I=20000 A Dal controllo di potenza la massima corrente risulta essere: 4856 A		
Correnti nelle stazioni :		
I1 = 4856 A	I2= 3955 A	I3=3569 A
Tmax = 1087°C e ΔT12= 4 °C		
La massima velocità suggerita per la seconda simulazione è **8 m/min**		

- -

Tabella 7.2 – *Tabella riassuntiva della seconda e ultima parte della risoluzione del 1°Step (paragrafo7.3)*

Seconda Simulazione		
Pmax= 60000kW	n°$_{STAZIONI}$=3	Velocità=8 m/min



Correnti nelle stazioni :		
Corrente di prima simulazoone I=20000 A Dal cotrollo di potenza la massima corrente risulta essere: 4856 A		
I1 = 4856 A	I2= 4856 A	I3= 4000 A
Tmax = 1042 °C e ΔT12=10 °C		

7.4 2°STEP

Con il secondo step ci si avvicina ad una analisi più complessa che terminerà con il paragrafo 7.5.
In questo caso, come già accennato nella presentazione dei tre approcci, si studia il riscaldamento del tubo mediante una unica stazione e quindi l'obiettivo è quello di trovare una coppia di valori velocità-corrente che soddisfino i requisiti termici su P1 e sulla sezione P1-P2.

Una volta ottenuta, la macro in Python è stata sperimentata sulla geometria completa di figura 6.2.

In una prima simulazione è stato fatto uno screening della funzione obiettivo su un campo piuttosto ampio di valori di corrente-velocità per poter rilevare la zona del dominio in cui vive la soluzione. Così facendo è stato possibile restringere in un secondo momento il dominio ad un campo più vicino ai parametri che portano alla soluzione.

Tabella 7.3 – *Tabella riassuntiva della prima simulazione per la risoluzione del 2° Step*
Simulazione di screening per individuare i campi di velocità e corrente vicini ai valori ottimi

Prima simulazione			
	Valore minimo	Valore massimo	Passo di variazione
Corrente	1000 A	30000 A	1000 A
Velocità	3 m/min	53 m/min	5 m/min
Soluzione	5m/min ; 5000 A	T_{MAX} =932°C	ΔT =4°C

Se si osservano le simulazioni registrate dall'esecuzione del programma (vedi Appendice 2) ed in particolare le ultime in ordine cronologico - cioè quelle che concorrono per il titolo di best solution - si vede che esistono altri valori altrettanto buoni di velocità e corrente che consentono un riscaldamento più veloce e portano a valori di temperatura più vicini ai 1100°C in P1; questo a discapito della differenza di temperatura tra P1 e P2.
Se però, di tutte queste coppie si considerano solo quelle per cui si ha un ΔT_{12} <100°C (l'obiettivo diventa quindi quello di ottenere un valore inferiore ai 100°C) si vede che il processo di riscaldamento può essere potenziato.
Perciò se in senso stretto si vanno a minimizzare entrambe le grandezze termiche in esame, la coppia v-i è quella segnata in tabella 7.4, diversamente ecco oltre alla soluzione prima presentata, alcune coppie altrettanto valide e i relativi dati termici:

Tabella 7.4 – *Tabella con altre coppie velocità-corrente trovate nei file di testo della prima simulazione in cui sono state memorizzate tutte le simulazione effettuate dall'ottimizzatore*

Velocità [m/min]	**Corrente [A]**	**ΔT_{12} [°C]**	**T_{MAX} [°C]**
5	**5000**	4	932
10	**7000**	34	1204
15	**7000**	73	978

Se si accetta che il vincolo sulla differenza di temperatura ΔT_{12} sia rispettato in ugual maniera indipendentemente dal suo valore, purché inferiore ai 100°C, le soluzioni riportate qui in alto sono molto più appetibili:
se è sufficiente portare il cordone a temperature di poco inferiori ai 1100 °C, sicuramente la coppia 15m/min-7000A è la migliore; se invece per motivi tecnologici la T_{MAX} deve superare i 1100°C e si può portare a valori poco più alti (1200°C in questo caso specifico) la coppia migliore è 10-7000; di nuovo, se è importante anche l'entità del salto termico ΔT_{12} allora, come precedentemente scritto, la coppia ottima è 5m/min-5000A.

Visto che le tre soluzioni "vivono" in intervalli di velocità e corrente contenuti rispetto a quelli di variazione, è stata reiterata la simulazione restringendo i campi e aumentando la sensibilità (passo di variazione) nella scelta dei due parametri.

Tabella 7.5 – *Tabella riassuntiva della seconda simulazione per la risoluzione del 2° Step*
I campi di velocità-corrente sono stati ristretti dopo i risultati riportati in tabella 7.3 e 7.4

Seconda simulazione			
	Valore minimo	Valore massimo	Passo di variazione
Corrente	4500 A	7500 A	250 A
Velocità	4 m/min	16 m/min	1 m/min
Soluzione	5 m/min; 5500°	T_{MAX} =1115°C	ΔT =5°C

Se anche in questo caso si prendono in esame i file di testo in cui sono stati registrati i valori delle grandezze di interesse alla fine di ogni ciclo di riscaldo, si nota che esistono altri valori ottimi di velocità e corrente e ancora, se si accetta qualsiasi ΔT_{12}, purché inferiore ai 100°C, la produttività del processo di riscaldamento può essere potenziata notevolmente, infatti:

Tabella 7.6 – *Tabella con altre coppie velocità-corrente trovate nei file di testo della seconda simulazione in cui sono state memorizzate tutte le simulazione effettuate dall'ottimizzatore*

Velocità [m/min]	Corrente [A]	ΔT_{12} [°C]	T_{MAX} [°C]
5	5500	5	1115
16.0	7500.0	91	1080

Perciò, in questo secondo approccio, risulta evidente come i valori forniti dall'ottimizzatore siano corretti se si cerca di minimizzare entrambi i valori di temperatura in osservazione. Se invece i requisiti sul profilo di temperatura lungo l'asse del cordone sono meno restrittivi ed è accettato qualsiasi ΔT_{12}<100°C, grazie alla registrazione di tutte le iterazioni eseguite dal programma, si riesce a trovare una combinazione velocità-corrente che rende il processo estremamente più performante. Questo processo, che richiede un piccolo passo manuale (osservazione dei dati nel file di testo) può essere reso completamente automatico.

<u>Possibilità (eventuale) di miglioramento del 2°STEP:</u>

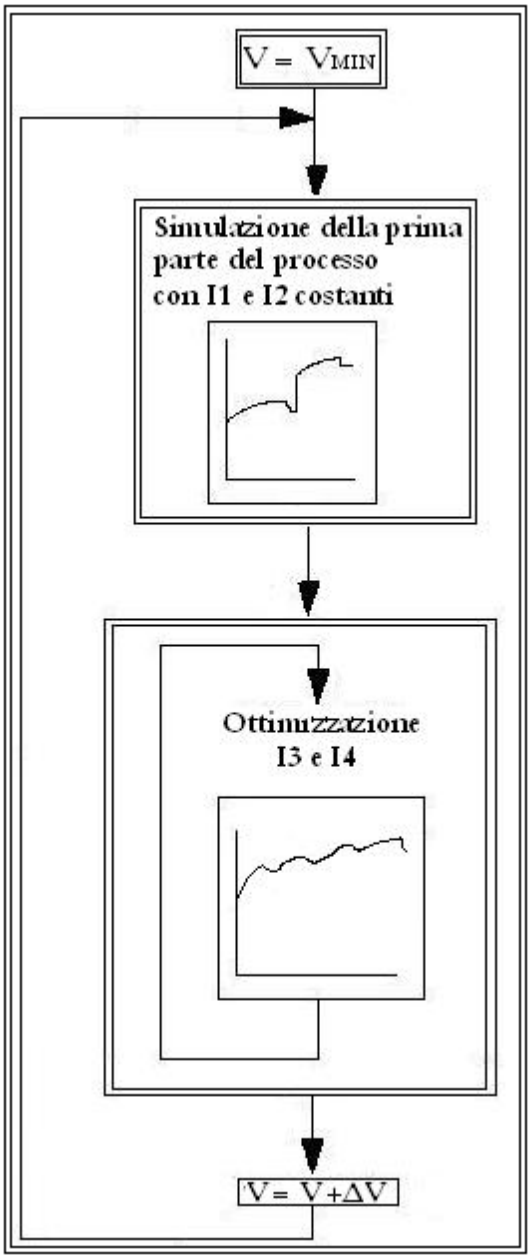
Una modifica alla logica del programma potrebbe risolvere automaticamente anche questo problema: si tratta di far ottimizzare una funzione che tenga conto solo della T_{MAX} e di inserire un vincolo sulla ΔT_{12}. In questo modo tutte le simulazioni caratterizzate da una differenza di temperatura fra P1 e P2 maggiore a 100°C (vincolo non rispettato) dovranno essere eliminate qualsiasi sia la funzione obiettivo, andando quindi a ripetere la stessa iterazione scartando i due parametri di partenza.

Di contro, per queste simulazioni occorre una conoscenza accurata del processo e dei parametri per non incappare in casi in cui il vincolo venga violato troppo spesso, dando così luogo ad un numero troppo elevato di iterazioni non valide e quindi processi troppo lunghi e potenzialmente non risolubili.

7.5 3°STEP

Questa volta la simulazione è più completa e si avvicina sempre più al caso reale in cui il processo di ricottura è realizzato da più induttori. Questo sarà il caso di 4 stazioni, per le prime due si prevede un funzionamento a regime, mentre per le ultime c'è la possibilità di modulare la potenza.

Le prime due stazioni servono a fornire l'energia per portare P1 ad un temperatura prossima a Tmax, mentre le ultime due consentono una equalizzazione delle temperatura lungo la sezione longitudinale del cordone di saldatura. Ecco che, rispetto ad un valore massimo I_{MAX}, I_1 sarà il 100%, I_2 il 90%, I_3 variabile fra l'80% e il 50%, mentre I_4 fra il 50% e il 20%.



Dati questi vincoli sull'alimentazione degli induttori, si andranno così ad ottimizzare le ultime due correnti per più valori di velocità e per ognuna di queste si troveranno i valori di corrente I3 e I4 che permettono di ottenere dei risultati che si avvicinino a quelli attesi, ovvero un valore di temperatura massima in P1 che si avvicini a 1100°C e una differenza di temperatura tra P1 e P2 inferiore a 100°C.

Una volta specificato l'intervallo di variazione della velocità, partendo da valori bassi e diminuendo il tempo di riscaldo, ci si aspetta che per le prime simulazioni si arrivi ad avere valori di I3 e I4 coerenti e poi delle coppie I3-I4 per le quali i vincoli su T_{MAX} e ΔT_{12} non vengano soddisfatti.
Infatti, se la velocità è troppo elevata, il calore o l'energia fornita al tubo risulta insufficiente per portare P1 a valori di temperatura prossimi a T_{MAX} e il tempo dell'intero processo risulta insufficiente affinché la differenza termica tra i punti P1 e P2 resti al di sotto dei 100°C.

Figura 7.2 – *Diagramma logico per la risoluzione del 3°Step*

In questo elaborato è stato trattato il caso della geometria completa di figura 6.2, i dati per la simulazione sono:

Tabella 7.7 – *Tabella riassuntiva dei dati inseriti nell'ottimizzatore per la risoluzione del 3°Step*

VELOCITÀ	STAZIONE 1	STAZIONE 2	STAZIONE 3	STAZIONE 4
$V_{MIN=}$35 m/min	I1= Imax*1 A	I2= Imax*0.9 A	I3max= Imax*0.8 A	I4max= Imax*0.5 A
V_{MAX}=60 m/min			I3min= Imax*0.5 A	I4min= Imax*0.2 A
Passo di variazione velocità 5m/min	I_{MAX} = 10500 A , Passo di variazione corrente 50 A			

RISULTATO DELLA SIMULAZIONE

Tabella 7.8 – *Tabella riassuntiva dei drisultati del 3°Step*

v=35 m/min;	**v=40 m/min;**	**v=45 m/min;**	**v = 50m/min;**	**v = 55m/min;**	**v = 60m/min;**
I3=5350 A	I3=5750 A	I3=6650 A	I3=7500 A	I3=8000 A	I3=8050 A
I4= 2100 A	I4= 2200 A	I4= 2200 A	I4= 4800 A	I4= 2100 A	I4= 2300 A
T_{MAX} =1098 °C	T_{MAX} =1100 °C	T_{MAX} =1099 °C	T_{MAX} =1098 °C	T_{MAX} =1099 °C	T_{MAX} =1101 °C
ΔT_{12}=32 °C	ΔT_{12}=45 °C	ΔT_{12}=62 °C	ΔT_{12}=25 °C	ΔT_{12}=101 °C	ΔT_{12}=123 °C

In analogia a quanto detto nell'analisi dei risultati del secondo caso, se si accettano tutte le coppie di parametri per cui il ΔT12 sia inferiore a 100°C, risulta possibile spingersi intorno ad una velocità di 55m/min e rendere il tutto più performante:

- per 55m/min con I3=8000 A e I4 = 2100 A risulta T_{12}=1099°C e ΔT_{12} = 101°C(poco superiore ai 100°C);
- per 60 m/min non esiste una coppia adeguata I3 - I4.

8. Conclusioni

Il bagaglio di preparazione formato nel corso degli anni di studio accompagnato all'esperienza maturata sul campo durante il periodo di stage presso Inova Lab ha reso possibile la stesura di questo elaborato.

In primo luogo ci si è concentrati sulla realizzazione di uno script in Python che fosse in grado di gestire il solver Flux in modo da rendere automatico il processo di simulazione di un processo di ricottura mediante più stazioni di riscaldo.

Una volta realizzato un solido strumento di calcolo è stato possibile sfruttarlo per costruire l'ottimizzatore ovvero un sistema automatizzato per la ricerca dei parametri fondamentali nel processo di ricottura, quali le correnti degli induttori e la velocità di avanzamento del tubo, questo per renderlo il più performante possibile nel rispetto dei vincoli termici ampliamente trattati nei precedenti capitoli.

Come descritto nel 7, dove si spiegano gli approcci di risoluzione del problema, l'algoritmo di ottimizzazione può essere usato con più sagacia cambiando la funzione obbiettivo ad esempio realizzando una funzione obbiettivo dipendente solo dalla T_{MAX} e costruendo un vincolo in modo tale che l'i-esima iterazione e la relativa funzione obbiettivo venga convalidata solo se il ΔT_{12} è inferiore ai 100°C.
Questo metodo di implementazione porta ad una analisi più approfondita e può portare a velocità più alte ma è piuttosto rischioso; infatti richiede un feedback delle conoscenze del processo e in particolare della scelta dei campi di variazione delle variabili di ingresso e se queste sono lontane da quelle ricercate si rischia di entrare in un loop di simulazioni non che non rispettano il vincolo e che quindi saranno annullate dal programma allungando notevolmente il tempo di soluzione con il rischio che il processo non vada a buon fine.

Questo elaborato può essere preso come spunto e punto di partenza per l'analisi più approfondita del problema:
si possono usare modello più accurati in termini di geometria e materiali;
si può usare un funzione obbiettivo con un numero più alto di parametri e quindi aggiungendo allo studio altre variabili del trattamento termico ad esempio la dimensione traferro e la frequenza alimentazione.

Il punto di arrivo di questa analisi potrebbe essere la realizzazione di un processo automatizzato che, noti i parametri geometrici dei tubi che si desidera trattare, analizzi automaticamente i singoli casi restituendo per ognuno i dati caratteristici dell'impianto di ricottura; la potenzialità di questo strumento nelle mani di una azienda che si occupa di produzione di tubi sarebbe enorme, in poche ore si potrebbe conoscere la configurazione ottimale dell'impianto di produzione per una vasta gamma di tubi. In poche parole sfruttamento delle proprie risorse per il raggiungimento del massimo profitto.

Appendice 1

Listati programma di calcolo

Di seguito il programma principale in cui vi è l'ottimizzatore, la generazione delle coppie dei parametri e la chiamata a Flux. Il programma si riferisce allo STEP 3, comunque del tutto simile ai listati degli altri 2 (STEP 1 e STEP 2)

"Programma.py" che viene lanciato mediante Python.

Il programma relativo al codice di ottimizzazione è stato fornito dal professore Paolo Di Barba docente di Progettazione di dispositivi elettrici e magnetici (PADEM) e poi rielaborato per il caso qui trattato.

```
#! Flux3D 10.3

#% DESIGN IMPROVER
#%-----------------------------------------------------------------------------------
#% Paolo Di Barba
#% Electromagnetic Devices CAD Lab, University of Pavia, January 2005
#%-----------------------------------------------------------------------------------
# Riadattamento dello script :  Federico Boldrin
#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%
#% A stochastic optimization algorithm of lowest-order
#% Several processes from different starting points can be run in parallel
#% Ancillary file of run_estra.m
#%------------------------------------------------------------------------
#% INPUT PARAMETERS
#% npop                          number of processes in parallel
#% pop_start                 set of initial points
#%                                      N=number of design variables
#% minx                          lower bounds

#% maxx                          upper bounds
#% max_iter                  maximum number of iterations (suggested 100-500)
#% obj_fname                     name of .m file for objective function
#% costr_fname               name of .m file for constraints
#%                                      (both linear and non linear)
#% min_or_max            string defining if the maximum or the minimum must be looked
#% dmin                          final dispersion
#% kd          dispersion coefficient
#%--------------------------------------------------------------------------------
#% OUTPUT PARAMETERS
#% pop                                set of final points
#%                                      N=number of design variables
#% best                          the best final point
#% val_best                  objective value for the best final point
#% x_story_best          x-history of the best process
#% obj_f_story           f-history of all processes
#% obj_f_story_best      f-history of the best process
#% pop_start             initial set
#%-----------------------------------------------------------------------
#% INTERNAL PARAMETERS
#% p_ann                 probability of successful iteration
#%                               (suggested 0.2)
#% q_ann                 rate of contraction/expansion of Gauss p.d.f.
#%                               (suggested 0.9)
#% d_start           initial standard deviation  it is a rectangular matrix
#%                               N=number of design variables
#%        (suggested initial dispersion ~= search
#%                               interval size for each design variable)
#% niback                number of backward iteration for correcting the Gauss p.d.f.
#%                               (suggested 50)
#% n_objf     number of objective calls
#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#%#

def  estra(pop_start,minx,maxx,step,dmin,kd,max_iter,obj_fname,constr_fname,min_or_max):

  global n_objf , nv , i_impro , impro , i_iter , dfin, d_start

  p_ann=0.2   #% probability of successful iteration
  q_ann=0.9   #% rate of correction of the Gauss probability density function
  niback=50   #% number of historical iterations to be considered
  d_start=[0.0]*nv

  obj_f_story_best=[0.0]*max_iter                        #% f-history of the best one out of npop processes
  obj_f_story=[0.0]*max_iter            #% f-history of all processes
  obj_f_story_first=[0.0]*max_iter        #% f-history of the first process
  full_obj_f_story=[0.0]*max_iter
  x_story_best=[0.0]*max_iter
  x_story=[0.0]*max_iter

  #% Set of initial points fulfilling constraints
  if pop_start==[] :
   #for ii in range(1 , 2)
   #ii=1
   indi_constr=1
   while indi_constr==1 :
    for ii in (nv) :
     pop_start[ii]=minx[ii]+uniform(minx[ii],maxx[ii])
     #% continuous-to-discrete conversion
     for ik in range (nv) :
      if step[ik]!=0 :
```

```
          pop_start[ik]=round(pop_start[ik]/step[ik])*step[ik]
         #end
       #end
        #%---------------------------------
     indi_constr=costr_cop(pop_start,no_staz,v,I1,I2)
     #end
   #end
  #end
  pop_start_out=pop_start

#% Initial standard deviation
  for ii in range (nv) :
    d_start[ii] = kd*(maxx[ii]-minx[ii])   #% array (npop,nv)
  #end

#% Some starting values
  m=pop_start   # valore del punto precedente
  x=[0.0]*nv

#%Starting objective value
  stampaora()
  print 'ITERAZIONE INIZIALE'


  if min_or_max=='look_for_min' :
    fit_old=-objf(m,d_start)  # valore della funzione obiettivo
  else :
    fit_old=objf(m,d_start)
  #end

  fit_start=fit_old
  i_impro=[0.0]*(max_iter+1)
  #i_impro[0]=[1]*max_iter

#% Starting iteration
  d=d_start
  indi=[0.0]*(max_iter +1)
  i_iter=1

#% Successive iterations
  while (i_iter<max_iter and (max(div_el(d,d_start)))>dmin) :
    stampaora()
    print 'ITERAZIONE', i_iter

#% Constraint-compatible generation of a new point
    #for ii in range (1, 1+1) :
    x=gen(d,m,no_staz,v) #,constr_fname,i_iter)
    print x
    #end

   #% Objective value of the new point
    if min_or_max=='look_for_min' :
      fit_new=-objf(x,d)
    else :
      fit_new=objf(x,d)
    #end

#%  Selection and correction
    for ii in range (2) :
        [m,fit_old,indi_out]=mut(x,m,fit_new,fit_old)
        indi[i_iter]=indi_out
        d=ann(d,i_iter,niback,indi,p_ann,q_ann)
    #end

#% Recovering the best process
    pippo=(fit_old)
    pluto=0    #% pippo(1) because more than one process might have the highest value of o.f.

#% Historical arrays
    if min_or_max=='look_for_min' :
      obj_f_story_best[i_iter]=-fit_old   #% f-history of the best one out of npop processes
      #obj_f_story[i_iter]=-fit_old              #% f-history of all processes
      #obj_f_story_first[i_iter]=-fit_old       #% f-history of the first process
      full_obj_f_story[i_iter]=-fit_new        #% full f-history of the first process
    else :
      obj_f_story_best[i_iter]=fit_old
      #obj_f_story[i_iter]=fit_old
      #obj_f_story_first[i_iter]=fit_old
      full_obj_f_story[i_iter]=fit_new         #% full f-history of the first process
    #end

    bestv=m #??????
    x_story_best[i_iter]=bestv
    x_story[i_iter]=m                    #% x-history of the first process

    dfin=max(div_el(d,d_start))
    i_iter=i_iter+1
   #%i_iter

   #% Stopping criterion dependent on the index of improvement of the o.f. (npop=1 only)
   #if npop==1 :



    i_impro[i_iter]=1+abs(fit_old-fit_start)/abs(fit_start)   #% current index of improvement
    if (i_impro[i_iter] >= (1+impro) and impro!=0) :
      n_objf=(i_iter+1)
      pop=m
      best=m
      if min_or_max=='look_for_min' :
        val_best=-fit_old(pluto)
      else  :
        val_best=fit_old(pluto)
```

```
      #end
      return
    #end
   #%-------------------------------------------------------------

  #end

#% Set of final points
  n_objf=(i_iter+1)*1
  pop=m
  best=m
  if min_or_max=='look_for_min' :
    val_best=-fit_old
  else :
    val_best=fit_old
  #end

  res_ott = [pop,best,val_best,obj_f_story,full_obj_f_story,pop_start_out,x_story]
  return res_ott



#%-----------------------------------------------------------------------------------

def  ann(d,ni,niback,indi,p_ann,q_ann) :
#% niback is the number of backward iterations for correction:
#it is used to evaluate probability q_ok of successful iteration
#% indi is the index of successful iterations (i.e. iterations such
#that o.f. is improved) at the time being; indi is updated in estra.m on exit from mut.m
#% ni is the total number of iterations at the time being (ni=i_iter); i_iter is updated in estra.m
  q_ok=0
  if ni>=niback :
    for ii in range(ni-niback,ni) :
      q_ok=q_ok+indi[ii] #% q_ok is the number of successful iterations at the time being

    q_ok=q_ok/niback    #% q_ok is transformed into the percentage of successful iterations wrt niback

    if q_ok <= p_ann                :
      d_out=[0.0]*len(d)
      for jj in range(len(d)):
        d_out[jj] = d[jj]*q_ann  #% the std deviation is decreased
    else :
      d_out=[0.0]*len(d)
      for jj in range(len(d)):
        d_out[jj]=d[jj]/q_ann  #% the std deviation is increased

  else  :
    for ii in range(ni) :
      q_ok=q_ok+indi[ii]
    if ni==0 :
      q_ok=q_ok
    else :
      q_ok=q_ok/ni
    d_out=d  #% the std deviation d remains unchanged wrt to its initial value until ni < niback
  return d_out


#def zeros(a,b):
#  a=[0.0]*b
#  for ii in range (a) :
#    c[ii] = a
#  return [c]

def div_el(a,b):
  c=[0.0]*len(a)
  if len(a) == len(b) :
    for ii in range (len(a)) :
      c[ii] = a[ii]/b[ii]
  else :
      c=[]
      print 'a and b have not the same length'
  return c

#-------------------------------------------------
def mut(x,m,fnew,fold) : #m_out,f_out,indi_out
#% Selection between old point and new point
#% ancillary file of estra.m

  #fold
  if fnew>fold   :        #% by default, the o.f. is maximized
    f_out=fnew
    m_out=x
    indi_out=1          #% if selection takes place, indi_out is set to 1
  else :
    f_out=fold
    m_out=m
    indi_out=0

  return [m_out,f_out,indi_out]


#-------------------------------------------------
def gen(d,m,no_staz,v) : #,costr_fname,i_iter) :
#% generation of a new point fulfilling constraints
#% ancillary file of estra.m
  global step, nv
  from random import uniform
  from math import sqrt
  from math import log
  from math import cos
  from math import pi

  ngen=0
```

```
  indi=1

  while indi==1 :
    x=[0.0]*nv
    for ii in range(nv) :
      if d[ii]==0.0 :
        print m[ii]
        x[ii] = m[ii]
      else :
        r1=uniform(0, 1)
        r2=uniform(0, 1)
        if r1==0 :
          r1=0.5

        u=sqrt(-2*log(r1))*cos(2*pi*r2) #%generation of a normal sample u given two uniform samples(r1,r2)
        x[ii]=m[ii]+d[ii]*u
      #% continuous-to-discrete conversion
        if step[ii]!=0 :
          x[ii]=round(x[ii]/step[ii])*step[ii]

    ngen=ngen+1
    if ngen>=30 :
      print 'difficulties in generating a feasible point at iteration no.'
    #print disp(i_iter)

    indi=costr_cop(x,no_staz,v,I1,I2)         #% indi=1 means violation of constraints
    #indi=0
  ngen=ngen-1

  return x


def costr_cop(x,no_staz,v,I1,I2):  #  function[i]=
#% User-supplied constraints
#% ancillary file of gen.m
#% Hierarchical order for an efficient optimisation:
#%   1 Side constraints
#%   2 Geometry-dependent constraints (linear first, then non-linear)
#%   3 Field-dependent constraints
  global kd , minx, maxx

  ii=0    #% constraint fulfilled

#%if x(1)>maxx(1)|x(1)<minx(1)
  if x[0]>maxx[0] or x[0]<minx[0] or x[1]>maxx[1] or x[1]<minx[1] :
    ii=1   #% constraint violated
    #print 'unfeasible point !!!'
    #print minx[0],x[0],maxx[0]
    #print minx[1],x[1],maxx[1]
    #print '\n'
    return ii
  #end
  print "Punto all'interno del dominio delle constraints"
  print minx[0],x[0],maxx[0]
  print minx[1],x[1],maxx[1]
  print '\n'

  f = open('V_I.txt','w')
  f.write("Di seguito:  numero delle stazioni, la velocita' e le n correnti da dare in input al flux" + '\n' + str(no_staz) + '\n' + str(v) + '\n' +str(I1) + '\n' +str(I2)+'\n' + str(x[0])+ '\n' +str(x[1]))
  f.close()

def waitforfile_fede(file):
  import os
  import time
  attesa=1
  print '-----attendo il sincro, entro nel ciclo while'
  while attesa == 1 :
                    # time.sleep(2)
                    # print attesa
    try:
      f = open(file,'r')
      f.close()
      attesa=0
    except:
      attesa=1
  print ' ----Ho rilevato il sincro e sono uscito dal while'

#-----------------------------------------------------

def objf(x,d) :
  from math import *
  global flux_project_name, tminS1, tmaxS1, stepS1, scenarioName

  print 'start diam np=', x[0]
  print 'start conc=', x[1]

  #-------------------------------------------
  from math import *
  import os
  import sys
  import traceback
  import time
  pathDeltaT12='C:\\Lavori\\Federico\\Seam_Annealing\\FLUX\\Ottimizzazione_Tmax_DT\\4staz_2fisse_2ottimizzate_Vesterna\\'
  print '----lancio unique box----'
  time.sleep(2)
  os.system('UNIQUE_BOX_two.cmd')

  file='C:\\Lavori\\Federico\\Seam_Annealing\\FLUX\\Ottimizzazione_Tmax_DT\\4staz_2fisse_2ottimizzate_Vesterna\\sincrotempM_2.txt'
  print '-- Lancio il "waitforfile_fede" aspettando la fine del Magnetico--'
  waitforfile_fede(file)
  time.sleep(2)
  os.remove(file)
  print '----aspetto il file sincro, ma prima aspetto 5 secondi ----'
```

```
  time.sleep(5)
  file='C:\\Lavori\\Federico\\Seam_Annealing\\FLUX\\Ottimizzazione_Tmax_DT\\4staz_2fisse_2ottimizzate_Vesterna\\sincrotempT_2.txt'
  print '-- Lancio il "waitforfile_fede" aspettando la fine del Termico--'
  waitforfile_fede(file)
  time.sleep(2)
  os.remove(file)

  #-------------------------------------------
  print 'Aspetto 10 secondi e poi riparto'
  time.sleep(10)
  # carica il delta temperatura e lo chiamo DeltaT12
  f=open(str(pathDeltaT12)+'DELTA_TEMP_12.txt','r')
  DeltaT12 = f.readlines()
  T1=float(DeltaT12[0])
  T2=float(DeltaT12[1])
  Tmassimacordone=float(DeltaT12[3])
  DeltaT12=float(DeltaT12[2])
  f.close

  #-------------------------------------------


  k1 = 0.61
  k2 = 0.5/400
  f_val_1= k1*abs((Tmassimacordone-fobj_val)/fobj_val)
  f_val_2= k2*DeltaT12

  f_val = f_val_1+ f_val_2
  # if Tmassimacordone > fobj_val:
     # f_val=1

  f=open(str(pathDeltaT12)+'DELTA_TEMP_12_STORY.txt','a')
  orario=(stampaora())
  f.write(orario+'\t'*3+str(x[0])+'\t'+str(x[1])+'\t'*3+str(T1)+'\t'+str(T2)+'\t'+str(DeltaT12)+'\t'+str(Tmassimacordone)+'\t'*3+str(f_val)+'\t'*2+str(f_val_1)+'\t'*2+str(f_val_2)+'\t'*3+str(d[0])+'\n')
  print f_val

  return f_val

#% DESIGN IMPROVER
#%-----------------------------------------------------------------------------------------
def stampaora():
                    from time import *
                    a=gmtime()
                    giorno=a[2]
                    mese=a[1]
                    anno=a[0]
                    ora=a[3]
                    minu=a[4]
                    orario= str(ora)+ ':'+str(minu) +'\t' + str(giorno)+'/'+str(mese)+'/'+str(anno)
                    return orario

def leggi_T_DT():

    f= open('DELTA_TEMP_12_STORY.txt','r')
    lines = f.readlines()
    f.close()
    lenght=(len(lines))
    line_ok=str(lines[(lenght-1):(lenght)])
    for line in line_ok:
          ciccio = line_ok.split('\\t\\t\\t')
    for ciccio in line_ok:
          ci = line_ok.split('\\t')
    DT=ci[10]
    T=ci[11]
    return T,DT
#% DESIGN IMPROVER
#%-----------------------------------------------------------------------------------------
from math import *
import time
import os
import shutil
print 'START ind_launch'
global minx , maxx ,  step , nv , n_objf , i_impro , impro , i_iter , dfin , d_start, fobj_val, flux_project_name, tminS1, tmaxS1, stepS1, scenarioName #npop

#% INPUT parameters
#npop=1       #% number of processes in parallel
nv=2         #% number of design variables

#% side constraints
no_staz= 4    #numero stazioni
Imax= 10500
I1= Imax*1
I2= Imax*0.9
I3max=  Imax*0.8
I3min= Imax*0.5
I4max=  Imax*0.5
I4min= Imax*0.2
maxx=[I3max,I4max]  #             Correnti massime
minx=[I3min,I4min]    #          Correnti minime
step=[50,50]   #      step di variazione delle correnti
Vmax = 60
Vmin = 55
v=Vmin
passo_v= 5
pop_start=[I3max,I4max]  #% set of initial points (if void, a set fulfilling constraints and discretization steps is randomly generated), array (npop,nv)
fobj_val=1100.0

pathDeltaT12='C:\\Lavori\\Federico\\Seam_Annealing\\FLUX\\Ottimizzazione_Tmax_DT\\4staz_2fisse_2ottimizzate_Vesterna\\'
f=open(str(pathDeltaT12)+'DELTA_TEMP_12_STORY.txt','w')
f.write(str(stampaora())+"Di seguito :  ORA ; corrente in stazione 3 , 4  ; T1-T2-deltaT12-Tmassimacordone ; fval=fval1+fval2   fval1   fval2   d  \n")
f.close()

kd=0.9                                                    #% dispersion coefficient
```

```
file_objf='objf'                    #% filename of user-supplied objective function
file_constr='costr_cop'     #% filename of user-supplied constraints
min_or_max='look_for_min'   #% look_for_min=minimization, look_for_max=maximization

dmin=1e-4
maxiter=90
impro=0      #% prescribed index of improvement of the o.f. (if =0, it is disregarded)

flag=0
while flag == 0 :
                    ##############################################
                    # si caricano i valori delle correnti e della velocità
                    f = open('V_I.txt','w')
                    f.write("Di seguito:  numero delle stazioni, la velocita' e le n correnti da dare in input al flux" + '\n' + str(no_staz) + '\n' + str(v) + '\n' +str(I1)+ '\n' +str(I2)+'\n'
+str(pop_start[0])+ '\n' +str(pop_start[1]))
                    f.close()
                    print 'Ho memorizzato nel file i valori iniziali di velocita e corrente'
                    time.sleep(4)
                    ##############################################
                    # simulazione delle prime 2 stazioni
                    print '---Loading....simulazione delle prime 2 stazioni...'
                    os.system('UNIQUE_BOX.cmd')

                    file='C:\\Lavori\\Federico\\Seam_Annealing\\FLUX\\Ottimizzazione_Tmax_DT\\4staz_2fisse_2ottimizzate_Vesterna\\sincrotempM_1.txt'
                    print '--- Lancio il "waitforfile_fede" aspettando la fine del Magnetico--'
                    waitforfile_fede(file)
                    time.sleep(2)
                    os.remove(file)
                    print '----aspetto il file sincro, ma prima aspetto 5 secondi ----'
                    time.sleep(5)
                    file='C:\\Lavori\\Federico\\Seam_Annealing\\FLUX\\Ottimizzazione_Tmax_DT\\4staz_2fisse_2ottimizzate_Vesterna\\sincrotempT_1.txt'
                    print '-- Lancio il "waitforfile_fede" aspettando la fine del Termico--'
                    waitforfile_fede(file)
                    time.sleep(4)
                    os.remove(file)

                    ##############################################

                    #ottimizzazione delle ultime due stazioni
                    print '\n\n\n\n\n\n\n'
                    print 'Loading .....ottimizzazione delle ultime due stazioni.....'
                    [pop,best,val_best,obj_f_story,full_obj_f_story,pop_start,x_story]=estra(pop_start,minx,maxx,step,dmin,kd,maxiter,file_objf,file_constr,min_or_max)
                    print'---terminato l''ottimizzazione delle ultime due stazioni'

                    ##############################################

                    #copio lo storico dell'ottimizzatore per ogni velocità
                    salvataggio='DELTA_TEMP_12_STORY_' + str(v)+ '.txt'
                    shutil.copyfile('DELTA_TEMP_12_STORY.txt',salvataggio)

                    filerisultati='RISULTATO_' + str (v) + '.txt'

                    pathDeltaT12='C:\\Lavori\\Federico\\Seam_Annealing\\FLUX\\Ottimizzazione_Tmax_DT\\4staz_2fisse_2ottimizzate_Vesterna\\'
                    f=open(str(pathDeltaT12)+'DELTA_TEMP_12_STORY.txt','w')
                    f.write(str(stampaora())+"Di seguito :  ORA ; corrente in stazione  3,4  ; T1-T2-deltaT12-Tmassimacordone ; fval=fval1+fval2   fval1   fval2   d  \n")
                    f.close()

                    if i_iter >= maxiter :
                      print 'WARNING - Number of iterations exceeded !'
                      print 'Final dispersion'
                      print dfin
                      print '\n Prescribed dispersion'
                      print dmin
                    elif dfin>=dmin :
                      print 'WARNING - Search tolerance under-attained !'
                    else:
                                print 'FINAL SOLUTION in the design space'
                                print best         #% x-value of the best one out of npop processes
                                print '\n FINAL SOLUTION in the objective space'
                                print val_best   #% f-value of the best one out of npop processes
                                f = open(filerisultati,'w')
                                f.write('FINAL SOLUTION in the design space : '+ str (best) + '\n FINAL SOLUTION in the objective space : ' + str(val_best))
                                f.close()

                    if v<=Vmax:
                       v=v+passo_v
                    else:
                       flag=1
                    print "---PASSO AD UN ALTRA VELOCITA'"
                    print "++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++"

                    ##############################################
f = open('fineprocesso.txt','w')
f.write("ORA è POSSIBILE ANALIZZARE I DATI NEI FILE DELTA_TEMP_12_STORY PER OGNI VELOCITA")
f.close()
```

Altri listati chiamati dal programma principale.

"UNIQUE_BOX.cmd"

```
set APPLIFLUX=Preflu2d
ping -n 1 0.0.0.1
start C:\\Cedrat\\Flux_10.3\\bin\\flux.exe -executeSpy C:\Lavori\Federico\Seam_Annealing\FLUX\12.4.2011\14_quattordicesimo_TUBO_vel_7p5\SeamAnn_M.py
ping -n 3 0.0.0.1
start C:\\Cedrat\\Flux_10.3\\bin\\flux.exe -executeSpy C:\Lavori\Federico\Seam_Annealing\FLUX\12.4.2011\14_quattordicesimo_TUBO_vel_7p5\SeamAnn_T.py
```

****

"UNIQUE_BOX_two.cmd"

```
set APPLIFLUX=Preflu2d

ping -n 10 0.0.0.1
start C:\\Cedrat\\Flux_10.3\\bin\\flux.exe -executeSpy C:\Lavori\Federico\Seam_Annealing\FLUX\Ottimizzazione_Tmax_DT\4staz_2fisse_2ottimizzate_Vesterna\SeamAnn_M_3.py
ping -n 10 0.0.0.1
start C:\\Cedrat\\Flux_10.3\\bin\\flux.exe -executeSpy C:\Lavori\Federico\Seam_Annealing\FLUX\Ottimizzazione_Tmax_DT\4staz_2fisse_2ottimizzate_Vesterna\SeamAnn_T_3.py
```

****

"letturafile.py"

```
# funzione per recuperare la temperatura del punto desiderato P=(x,y) #
def file_read(x,y,file):
        filepath = file#"CURR_TEMP.DEX"                # file contenente le informazioni da cercare

        coord_x = x # unita' in millimetri!!!
        coord_y = y # unita' in millimetri!!!

        coord_x= float("% 4.5f" % coord_x)
        coord_y= float("% 4.5f" % coord_y)

        coord = [coord_x,coord_y]


        file = open(str(filepath), 'r')
        line_no = file.readlines()
        file.close()

        print '--------no. righe totali: ' + str(len(line_no))

        line_ok = line_no[2:]                  # non mi interessano le prime 2 righe di commento di Flux!

        for line in line_ok:                   # scorri tutte le righe
                currline = line.split()                # array delle stringhe contenute nella riga
    curr_x= float("% 4.5f" % currline[0])
                curr_y= float("% 4.5f" % currline[1])
                curr_xy = [curr_x,curr_y]
                if curr_xy == coord:                   # confronto con le coordinate desiderate
                        print 'trovato!'
                        break

        print '\n'*3+'-------temperatura cercata: ' + currline[3] + ' °C' + '\n'*3
    TIvalue = float(currline[3])
        return TIvalue
```

****

"fcalcoloVmax.py"

Funzione utilizzata nello STEP 1 per calcolare il valore della velocità massima

```
def v_massima(no_staz,t_heat,t_cool,I._heat,I._cool,Pmax,n_t,PmeanFlux):
        from math import *
        import os
        import sys
        import traceback
        import time
        #-----------------------------------------------------------------------------------------
        #Calcolo l'Energia fornita alla billetta come prodotto della potenza media dissipata per effetto joule nella billetta e il tempo di esecuzione
        EnergiaFornitaBilletta = PmeanFlux * ( no_staz *(t_heat+t_cool) )
        print EnergiaFornitaBilletta
        #-----------------------------------------------------------------------------------------
        #Calcolo il valore (medio) della potenza massima che si decide di imporre al sistema
```

```
PMaxFromInput= Pmax * L_heat / (L_heat+L_cool) #no_staz * Pmax * L_heat / (L_heat+L_cool)   #visto che Lheat=1000 e Lcool = 500, Pmean=no_staz*Pmax*2/3
print PMaxFromInput
#Imponendo l'ugualianza della energia, data la potenza massima calcolo il tempo (minimo)di esecuzione del processo, da questo poi la velocità (massima)
t=EnergiaFornitaBilletta / PMaxFromInput
print t
print 'contro'
told= no_staz * (t_heat+t_cool)
print told
v=no_staz *(L_heat+L_cool)/t
v=v*60/1e3                                  #velocità metri al minuto
v = float("% 3.1f" % v)
print v
# ora salvo il valore della velocità in   "velocita.txt"
outfile = open("VelocitaMassima.txt",'w')
outfile.write(str(v)+'\n')
return v
```

****

A seguire gli script relative allo STEP 2, del tutto simili agli altri 2 STEP

"Seam_Ann_M.py"

```
#! Preflu2D 10.3
# Magnetic file computation

from math import *
import os
import sys
import traceback

#---------------- DATI DI INGRESSO--------------------------

projname_M = 'prova_M' # file containing Geometry + Physics [magnetic]
regname = 'TUBE' # face/volume region of induced currents
solvproj_M = 'ris_m' # file containing the results [magnetic]
syncfile_T = 'Synchro_T.txt'

# speed = 20 # velocità tubo (m/min)
L_heat = 1000 # lunghezza induttore riscaldo (mm)
L_cool = 500 # spazio tra gli induttori (mm)
no_staz = 1 # numero di stazioni di riscaldo
# I_on = 9000.0 # corrente nell'induttore (A.rms)
Inew = 10.0 # valore Ioff
phi0 = 0.0 # phase shift della forma d'onda trapezoidale


# f = open('V_I.txt','w')
# f.write("Di seguito:  la velocita' e la corrente da dare in input al flux \n" + str(speed) + '\n' +str(I_on))
# f.close()

f = open('V_I.txt','r')
v_i = f.readlines()
f.close()
speed=float(v_i[1])
I_on=float(v_i[2])


#---------------- fine dati ingresso--------------------------

try:
        os.remove(str(syncfile_T))

except:
        print '---file ' + str(syncfile_T) + ' già rimosso!'

try :

        # ############## STEP1:INITIALIZATION OF MAGNETIC PROBLEM ####################

        loadProject(str(projname_M) + '.FLU')

        SolvingOptions['SOLVING_OPTIONS'].newtonRaphsonParameters=ParametersNewtonRaphson(precision=1.0E-4,
                                                maximumIterationNumber=100,
                                                relaxationFactorComputationMethod=ParametersNewtonRaphsonRelaxationFactorComputationMethodAutomatic())
        SolvingOptions['SOLVING_OPTIONS'].transientVariableSetToZeroType=NoTransientVariablesReset()

        # Creation of a SpatialParameter TKELVIN
        # In order to have an access to the predifined models
        CreateTemperature(defaultValue=293.15)

        try:
                # Creation of a solving pilot in order to store the different thermal time steps
                VariationParameterPilot(name='SOLVINGPILOT',referenceValue=1.0)
        except:
                print '\n--- SOLVINGPILOT variable already existing!'

        try:
                # Crea la variabile di aggiornamento della corrente impressa CURR
                VariationParameterMultiphysics(name='CURR',referenceValue=I_on)
        except:
                print '\n--- CURR variable already existing!'
                VariationParameter['CURR'].referenceValue=I_on

        # Variables sync with thermal application via text file
        print '\n--- Syncing variables with thermal application!'
```

```
fvars = open('curr_vars.txt','w')
fvars.write(str(speed)+'\n')
fvars.write(str(L_heat)+'\n')
fvars.write(str(L_cool)+'\n')
fvars.write(str(no_staz)+'\n')
fvars.close()

# Creation of different variables
t_heat = (L_heat/1e3) / (speed/60.0)
t_cool = (L_cool/1e3) / (speed/60.0)
Tp = t_heat + t_cool # periodo della forma d'onda trapezoidale
Ton = t_heat # periodo di Ion

        # Supply current
CurrentSource['CURRENTSOURCE_1'].rmsModulus='CURR' #'CURR*ONOFF'

# Creation of multipoint support by data exchange file exportation of Magnetic nodes
ExportNodeCoordinatesRegionFace(file=exportDexFluxFile(fileName='NODES_M'),
                                                                                mechanicalSetPosition=CurrentPosition(),
                                                                                regionFace=RegionFace[str(regname)],
                                                                                lengthUnit=LengthUnit['MILLIMETER'],
                                                                                coordSys=CoordSys['XY1'])
print '---coordinates of Magnetic mesh nodes saved in NODES_M.DEX file'

print '---wait for response from thermal application (1)'
# Waiting for the thermal iteration synchronization file
# to continue the magnetic computation
waitForFile(fileName="Synchro_T.txt",existFile="exist")

# Creation of multipoint support by data exchange file importation of thermal nodes
MultipointSupportImportingCoordinates(multipointSupportName='MPT_T',

file=coordinatesImportDexFluxFile(coordinatesFileName='NODES_T.DEX'),

mechanicalSetDependency=MultipointSupportWithoutMechanicalSet(),
                                                                                lengthUnit=LengthUnit['MILLIMETER'],
                                                                                coordSys=CoordSys['XY1'])

print '---Creation scenario M'
# Creation of the scenario of magnetic problem
Scenario(name='M')
Scenario['M'].addPilot(pilot=MultiValues(parameter=VariationParameter['SOLVINGPILOT'],
                                                                                intervals=[IntervalStepValue(minValue=0.0,
                                                                                maxValue=1.0,
                                                                                stepValue=1.0)]))

# Opening of multiphysics session
Scenario['M'].openSessionMultiPhysics(projectName=(str(solvproj_M) + '.FLU'))

# Deletion of the thermal iteration synchronization file
os.remove("Synchro_T.txt")

# Creation of a magnetic iteration synchronization file
# the thermal problem can continue the computation
f1=open('Synchro_M.txt','a')
f1.close()

print '---wait for response from Thermal application (2)'
# Waiting for the thermal iteration synchronization file
# to continue the magnetic computation
waitForFile(fileName="Synchro_T.txt",existFile="exist")

# ########################### END OF STEP1 ##################################

# ############### STEP 2 : COMPUTATION OF MAGNETIC PROBLEM ##################

# ITERATION 1 MAGNETIC
print '---Init Magnetic solving'
solveCurrentStep()

# Exportation of the physical values dLossV in a data exchange file --> VALUES_DSOURCE.DEX
ExportDataMultipointSupport(exportDataFile=exportDexFluxFile(fileName='VALUES_DSOURCE'),
                                                                                mechanicalSetPosition=CurrentPosition(),
                                                                                formula='dLossV',
                                                                                multipointSupport=MultipointSupport['MPT_T'],
                                                                                lengthUnit=LengthUnit['MILLIMETER'],
                                                                                coordSys=CoordSys['XY1'],

exportDataMultipointSupportRegion=ExportRegionFace(regionFace=RegionFace[str(regname)]))

# Deletion of the thermal iteration synchronization file
os.remove("Synchro_T.txt")

# Creation of a magnetic iteration synchronization file
# the thermal problem can continue the computation
f1=open('Synchro_M.txt','a')
f1.close()

print '---wait for response from Thermal application (3)'
# Waiting for the thermal iteration synchronization file
# to continue the EC computation
waitForFile(fileName="Synchro_T.txt",existFile="exist")

# Creation and assignment of a variable "fin" to control the end of the computation
fin=1

# Creation and assignment of a variable "i" to increment the computation step
i=1.0

# Creation and assignment of variable PrecM to take into account the computation precision
PrecM=1.0

#====== IT IS THE BEGINNING OF LOOP "END COMPUTATION" ======
```

```
# Carrying out of a while loop to iterate on time steps until final time is reached.
while fin == 1 :
        print '---value of variable "fin" while loop',fin
        print '---activation next step'
        activateNextStep()
        niter=1

        # Importa il valore del timestep corrente dal file curr_time.txt
        print '---importo il timestep dal file curr_time.txt'
        #waitForFile(fileName="curr_T.txt",existFile="exist")

        ft = open('curr_time.txt','r')
        tvalue = ft.readlines() # legge la stringa 'time_vec[i+1]'
        ft.close()
        print '---timestep corrente: ' + tvalue[0] + 's'
        tvalue = float(tvalue[0])

        # Importa il valore di temperatura attualizzato dal file curr_T.txt
        print '---importo la temperatura dal file curr_T.txt'
        #waitForFile(fileName="curr_T.txt",existFile="exist")

        fT = open('curr_T.txt','r')
        Tvalue = fT.readlines() # legge la stringa 'Tvalue'
        fT.close()
        print '---temperatura corrente: ' + Tvalue[0] + ' degC'
        Tvalue = float(Tvalue[0]) # converte a float

        #initiateCurrentStep()

        found = False # condizione di arresto ciclo for
        k = 0
        while k < no_staz and not found:
                if tvalue >= (k*Tp + phi0) and tvalue < (k*Tp + Ton + phi0): # se siamo dentro Ton
                        print "---siamo in Ton!!"
                        found = True # esci dal ciclo while!
                k += 1

        if not found:
                VariationParameterMultiphysics['CURR'].UpdateVariationParameterMultiphysics(value=Inew)
                print "---siamo in Toff!!"
                print "---nuovo valore di CURR: " + str(Inew) + " A"


                        #====== IT IS THE BEGINNING OF LOOP "PRECISION" ======
        # Carrying out of a while loop to reiterate as long as a condition is satisfied
        print 'Loop no linear'
        while PrecM > 0.001:
                print '---solving current step'
                solveCurrentStep()

                # Exportation of the physical values dLossV in a data exchange file --> VALUES_DSOURCE.DEX
                ExportDataMultipointSupport(exportDataFile=exportDexFluxFile(fileName='VALUES_DSOURCE'),
                                                mechanicalSetPosition=CurrentPosition(),
                                                formula='dLossV',
                                                multipointSupport=MultipointSupport['MPT_T'],
                                                lengthUnit=LengthUnit['MILLIMETER'],
                                                coordSys=CoordSys['XY1'],
                                                exportDataMultipointSupportRegion=ExportRegionFace(regionFace=RegionFace[str(regname)]))

                # Deletion of the thermal iteration synchronization file
                os.remove("Synchro_T.txt")

        # Creation of a magnetic iteration synchronization file
                # the thermal problem can continue the computation
                f1=open('Synchro_M.txt','a')
                f1.close()

                print '---wait for response from Thermal application (4)'
                # Waiting for the thermal iteration synchronization file
                # to continue the magnetic computation
                waitForFile(fileName="Synchro_T.txt",existFile="exist")

                print '---solving niter:',niter
                niter=niter+1

                # Updating of a tabulated quantity: temperature
                UpdateConstantTabulatedSpatialQuantityByImportRegionFace(spatialParameter=SpatialParameter['TKELVIN'],
                                                file=importDexFluxFile(fileName='VALUES_TKELVIN.DEX'),
                                                localization=NodeToNode(),
                                                mechanicalSetPosition=CurrentPosition(),
                                                regionFace=RegionFace[str(regname)],
                                                lengthUnit=LengthUnit['MILLIMETER'],
                                                coordSys=CoordSys['XY1'])

                #Updating of the precision variable
                PrecM = SpatialParameter['TKELVIN'].precision

                        #====== IT IS THE END OF LOOP "PRECISION" ======

        # Creation of a Magnetic time step synchronization file : the precision PrecM is reached
        f1=open('PrecM.OK','a')
        f1.close()

        #Check if the precision of thermal problem is reached
        try :
                f1 = open("PrecT.OK","r")
                f1.close()
        except :
                # Initializing of precision variable to can start a new computation
                PrecM = 1.0

        # When the both precision (M and T) is reached then increment solving pilot
        # Detection of the end of magnetic problem solving to stop or to active next step
```

```
# If the end of computation is reached --> fin = 0 to leave the loop
try :
        f1 = open("fin_T.txt","r")
        f1.close()
        os.remove("fin_T.txt")
        print '---END OF COMPUTATION'
        fin=0
        print '---value of the variable "fin" in the try',fin
# If the end of computation is not reached, the computation continue
except :
        # Initializing of precision variable to can start a new computation
        PrecM=1.0

        # Deletion of the thermal iteration synchronization file
        os.remove("Synchro_T.txt")

         # Creation of a magnetic iteration synchronization file
        # the thermal problem can continue the computation
        f1=open('Synchro_M.txt','a')
        f1.close()

        # Define the next step
        i=i+1.0
        defineNextSteps(stepValue=[i])
        print '---Number of time steps : ',i

        print '---wait for response from Thermal application (5)'
        # Waiting for the thermal iteration synchronization file
        # to continue the magnetic computation
        waitForFile(fileName="Synchro_T.txt",existFile="exist")

        # Updating of a tabulated quantity: temperature
        UpdateConstantTabulatedSpatialQuantityByImportRegionFace(spatialParameter=SpatialParameter['TKELVIN'],
                                                file=importDexFluxFile(fileName='VALUES_TKELVIN.DEX'),
                                                localization=NodeToNode(),
                                                mechanicalSetPosition=CurrentPosition(),
                                                regionFace=RegionFace[str(regname)],
                                                lengthUnit=LengthUnit['MILLIMETER'],
                                                coordSys=CoordSys['XY1'])

         #====== IT IS THE END OF LOOP "END COMPUTATION" ======


    Scenario['M'].closeSessionMultiPhysics()
    print '---END OF MAGNETIC COMPUTATION'

    # Deletion of the thermal iteration synchronization file
    os.remove("Synchro_T.txt")

    # Deletion of magnetic time step synchronization file
    os.remove("PrecM.OK")

    # Creation of a magnetic iteration synchronization file
    # the thermal problem can continue the computation
    f1=open('Synchro_M.txt','a')
    f1.close()
    saveProject()
    closeProject()
    f=open('sincrotempM.txt','w')
    f.close()
    exit()
    # ########################### END OF STEP2 ##################################

except :
    traceback.print_exc(file=sys.stderr)
    ef = open('hs_err_pp_res','a')
    ef.close()
    resetError()
    closeProject()
    exit()
```

****

"Seam_Ann_T.py"

```
#! Preflu2D 10.3
# Thermal computation file

# Default import modules
from math import *
import time
import os
import sys
import traceback
# User import modules
from functs import frange #importa dal file 'functs.py' la funzione 'frange()'
from fEliminaFile import Rubbish

projname_T = 'prova_T' # file containing Geometry + Physics [thermal]
```

```
regname = 'TUBE' # face/volume region of induced currents
solvproj_T = 'ris_T' # file containing the results [thermal]
matname = 'ACCIAIO' # name of the heated material
syncfile_M = 'Synchro_M.txt'

try:
        os.remove(str(syncfile_M))

except:
        print '---file ' + str(syncfile_M) + ' già rimosso!'

try :

        # ############## STEP1:INITIALIZATION OF THERMAL PROBLEM ####################

        loadProject(str(projname_T) + '.FLU')

        SolvingOptions['SOLVING_OPTIONS'].newtonRaphsonParameters=ParametersNewtonRaphson(precision=1.0E-3,
                                                                maximumIterationNumber=50,
                                                                relaxationFactorComputationMethod=ParametersNewtonRaphsonRelaxationFactorComputationMethodAutomatic())

        # Creation of a SpatialParameterTabulated : DSOURCE
        SpatialParameterTabulated(name='DSOURCE',parameterType=ScalarReal(),defaultValue='0')

        # Variables sync with thermal application via text file
        print '\n--- Syncing variables with magnetic application!'
        fvars = open('curr_vars.txt','r')
        vars = fvars.readlines()
        fvars.close()

        speed = float(vars[0])
        L_heat = float(vars[1])
        L_cool = float(vars[2])
        no_staz = float(vars[3])

        # Creation of different variables (default values: tinit=2e-3; stepinit=5e-3)
        t_heat = (L_heat/1e3) / (speed/60.0)
        t_cool = (L_cool/1e3) / (speed/60.0)
        tinit = t_heat+t_cool
        stepinit = t_heat*0.1
        stepinit = float("% 3.3f" % stepinit)
        t_heat = float("% 3.3f" % t_heat)
        t_cool = float("% 3.3f" % t_cool)
        tinit = float("% 3.3f" % tinit)
        t_all=no_staz*tinit
        t_all = float("% 3.3f" % t_all)

        print "\n\n\n\n\n scrivo t_heat,t_cool, tinit,stepinit"
        print t_heat,
        print t_cool
        print tinit
        print stepinit

        # Loop on time steps
        nb_init=int(round(tinit/stepinit)) # no. passi di inizializzazione tolto il primo (t=0)
        # nb_pas1=int(round((tfinal1-tinit)/step1))
        # nb_pas2=int(round((tfinal2-tfinal1)/step2))
        nb_pas=nb_init #+ nb_pas1 + nb_pas2 # Total number of steps (without t=0)

        t1=frange(0,tinit,stepinit)
        ts = t1+[tinit]#+t2+t3+[tfinal2] # time-steps vector

        # Print for debugging purposes
        print '\n--- Total no. of steps inside the loop: ' + str(nb_pas)
        print '--- Total no. of computations (including t=0): ' + str(len(ts))
        print '--- List of time-steps:' + str(ts)

        RegionFace[str(regname)].thermalTransient2D=Thermal2DFaceThermalConductor(material=Material[str(matname)],
                                                                heat=VolumeHeatSourceSpatialFormula(value='DSOURCE'))


        # Exportation of the coordinates of mesh nodes in a data exchange file --> NODES_T.DEX
        ExportNodeCoordinatesRegionFace(file=exportDexFluxFile(fileName='NODES_T'),
                                                                mechanicalSetPosition=CurrentPosition(),
                                                                regionFace=RegionFace[str(regname)],
                                                                lengthUnit=LengthUnit['MILLIMETER'],
                                                                coordSys=CoordSys['XY1'])
        print '---coordinates of Thermal mesh nodes saved in nodes_T.DEX file'

        #Creation of a thermal iteration synchronization file
        #the magnetic problem can continue the computation
        f=open('Synchro_T.txt','a')
        f.close()

        print '---Wait for response from Magnetic application (1)'
        #Waiting for the magnetic iteration synchronization file
        #to can continue the thermal computation
        waitForFile(fileName="Synchro_M.txt",existFile="exist")

        # Creation of multipoint support by data exchange file importation of Magnetic nodes
        MultipointSupportImportingCoordinates(multipointSupportName='MPT_M',
                        file=coordinatesImportDexFluxFile(coordinatesFileName='NODES_M.DEX'),
                        mechanicalSetDependency=MultipointSupportWithoutMechanicalSet(),
                        lengthUnit=LengthUnit['MILLIMETER'],
                        coordSys=CoordSys['XY1'])

        # # Creation of 2D grid for temperature evaluation purposes
        # Grid2DRectangularXY(name='GRID_TEMP',coordSys=CoordSys['XY1'],visibility=Visibility['VISIBLE'],
                                                # color=Color['Turquoise'],origin=['0','REXT-1'],alongX=['1','0','2'],alongY=['1','0','2'])

        print '---Creation scenario T'
        # Creation of thermal scenario. Same time step than FLUX2D solver
        Scenario(name="T")
```

```
Scenario['T'].addPilot(pilot=MultiValues(parameter=VariationParameter['TIME'],

intervals=[IntervalStepValue(minValue=0.0,maxValue=tinit,stepValue=stepinit)]))
# Opening a multiphysic session
Scenario['T'].openSessionMultiPhysics(projectName=(str(solvproj_T) + '.FLU'))

#Deletion of the magnetic iteration synchronization file
os.remove("Synchro_M.txt")

#Creation of a thermal iteration synchronization file
#the magnetic problem can continue the computation
f=open('Synchro_T.txt','a')
f.close()

print '---Wait for response from Magnetic application (2)'
#Waiting for the magnetic iteration synchronization file
#to can continue the thermal computation
waitForFile(fileName="Synchro_M.txt",existFile="exist")

print '---Updating of tabulated quantity : Joule losses'
# Updating of a tabulated quantity: Joule losses
UpdateConstantTabulatedSpatialQuantityByImportRegionFace(spatialParameter=SpatialParameter['DSOURCE'],

        file=importDexFluxFile(fileName='VALUES_DSOURCE.DEX'),

        localization=NodeToNode(),

        mechanicalSetPosition=CurrentPosition(),

        regionFace=RegionFace[str(regname)],

        lengthUnit=LengthUnit['MILLIMETER'],

        coordSys=CoordSys['XY1'])

# ############################ END OF STEP1 ##################################


# ############### STEP 2 : COMPUTATION OF THERMAL PROBLEM ##################
# ITERATION 1 Thermal
print '---Init Thermal solving'
solveCurrentStep()

                        # FACE REGION
print '---esporto le temperature sulla faccia TUBE nel file CURR_TEMP.DEX'
result = ExportDataRegionFace(exportDataFile=exportDexFluxFile(fileName='CURR_TEMP.DEX'),
                                mechanicalSetPosition=CurrentPosition(),
                                formula='TCelsius',
                                regionFace=RegionFace[str(regname)],
                                lengthUnit=LengthUnit['MILLIMETER'],
                                coordSys=CoordSys['XY1'],
                                locationValues=LocationValuesNodes())

ft=open('curr_time.txt','w') # apre un file di scambio e salva il valore del timestep corrente
ft.write(str(ts[0]))
ft.close()

executeSpy('fileread.py') # script di ricerca massima temperatura che ritorna il float 'Tvalue'
fT=open('curr_T.txt','w') # apre un file di scambio e salva il valore di temperatura
fT.write(str(Tvalue))
fT.close()

#Deletion of the magnetic iteration synchronization file
os.remove("Synchro_M.txt")

# Creation of a thermal iteration synchronization file
#the magnetic problem can continue the computation
f=open('Synchro_T.txt','a')
f.close()

print '---wait for response from magnetic application (3)'
# Waiting for the magnetic iteration synchronization file
#to can continue the thermal computation
waitForFile(fileName="Synchro_M.txt",existFile="exist")

print '---Updating of tabulated quantity : Joule losses'
# Updating of a tabulated quantity: Joule losses
UpdateConstantTabulatedSpatialQuantityByImportRegionFace(spatialParameter=SpatialParameter['DSOURCE'],

        file=importDexFluxFile(fileName='VALUES_DSOURCE.DEX'),

        localization=NodeToNode(),

        mechanicalSetPosition=CurrentPosition(),

        regionFace=RegionFace[str(regname)],

        lengthUnit=LengthUnit['MILLIMETER'],

        coordSys=CoordSys['XY1'])

# Creation and assignment of variable "PrecT" to take into account the computation precision
PrecT=1.0

                                #====== IT IS THE BEGINNING OF LOOP "END COMPUTATION" ======
# Carrying out of a for loop to iterate on time steps until final time is reached (nb_pas).
for i in range(nb_pas):
        print '---activate next step: ' + str(i+1) + ' out of ' + str(nb_pas)
        print '---current time step: ' + str(ts[i+1]) + 's on ' + str(ts[nb_pas]) + 's'

        activateNextStep()
        niter=1
```

```
ft=open('curr_time.txt','w') # apre un file di scambio e salva il valore del timestep corrente
ft.write(str(ts[i+1]))
ft.close()


executeSpy('fileread.py') # script di ricerca massima temperatura che ritorna il float 'Tvalue'
fT=open('curr_T.txt','w') # apre un file di scambio e salva il valore di temperatura
fT.write(str(Tvalue))
fT.close()

                #====== IT IS THE BEGINNING OF LOOP "PRECISION" ======
# Carrying out of a while loop to reiterate as long as a condition is satisfied
# until reached a precision of 0.1%
print '---Loop no linear'
while PrecT > 0.001:

        print '---solving current step'
        solveCurrentStep()

                # FACE REGION
        os.remove('CURR_TEMP.DEX')
        print '---esporto le temperature sulla faccia TUBE nel file CURR_TEMP.DEX'
        result = ExportDataRegionFace(exportDataFile=exportDexFluxFile(fileName='CURR_TEMP.DEX'),
                                      mechanicalSetPosition=CurrentPosition(),
                                      formula="TCelsius',
                                      regionFace=RegionFace[str(regname)],
                                      lengthUnit=LengthUnit['MILLIMETER'],
                                      coordSys=CoordSys['XY1'],
                                      locationValues=LocationValuesNodes())

        # Exportation of the physical values Tkelvin in a data exchange file --> VALUES_TKELVIN.DEX
        ExportDataMultipointSupport(exportDataFile=exportDexFluxFile(fileName='VALUES_TKELVIN'),
                                    mechanicalSetPosition=CurrentPosition(),
                                    formula="TKelvin',
                                    multipointSupport=MultipointSupport['MPT_M'],
                                    lengthUnit=LengthUnit['MILLIMETER'],
                                    coordSys=CoordSys['XY1'],
                                    exportDataMultipointSupportRegion=ExportRegionFace(regionFace=RegionFace[str(regname)]))

        # Deletion of the magnetic iteration synchronization file
        os.remove("Synchro_M.txt")

        # Creation of a thermal iteration synchronization file
        #the magnetic problem can continue the computation
        f=open('Synchro_T.txt','a')
        f.close()

        print '---wait for response from magnetic application (4)'
        # Waiting for the magnetic iteration synchronization file
        #to can continue the thermal computation
        waitForFile(fileName="Synchro_M.txt",existFile="exist")

        print '---solving niter:',niter
        niter=niter+1

        print '---Updating of tabulated quantity : Joule losses'
        # Updating of a tabulated quantity: Joule losses
        UpdateConstantTabulatedSpatialQuantityByImportRegionFace(spatialParameter=SpatialParameter['DSOURCE'],
                file=importDexFluxFile(fileName='VALUES_DSOURCE.DEX'),
                localization=NodeToNode(),
                mechanicalSetPosition=CurrentPosition(),
                regionFace=RegionFace[str(regname)],
                lengthUnit=LengthUnit['MILLIMETER'],
                coordSys=CoordSys['XY1'])

        # Updating the precision computation
        PrecT = SpatialParameter['DSOURCE'].precision

  #====== IT IS THE END OF LOOP "PRECISION" ======

# Creation of a thermal time step synchronization file : the precision PrecT is reached
f=open('PrecT.OK','a')
f.close()

#Check if the precision of m agnetic problem is reached
try :
        f = open("PrecM.OK","r")
        f.close()
except :
        # Initializing of precision variable to can start a new computation
        PrecT = 1.0

# When the both precision (M and T) is reached then increment the time with the current time step : activateNextStep

# Deletion of the magnetic iteration synchronization file
os.remove("Synchro_M.txt")

# Creation of a thermal iteration synchronization file
# the magnetic problem can continue the computation
f=open('Synchro_T.txt','a')
f.close()

print '---wait for response from magnetic application (5)'
# Waiting for the magnetic iteration synchronization file
# to can continue the thermal computation
waitForFile(fileName="Synchro_M.txt",existFile="exist")

# Initializing of precision variable to can start a new computation
PrecT=1

  #====== IT IS THE END OF LOOP "END COMPUTATION" ======

# End of thermal computation problem --> stop the magnetic problem computation
```

```
f=open('fin_T.txt','a')
f.close()

# Deletion of the magnetic iteration synchronization file
os.remove("Synchro_M.txt")

# Deletion of thermal time step synchronization file
os.remove("PrecT.OK")

# Creation of a thermal iteration synchronization file
# the magnetic problem can continue the computation
f=open('Synchro_T.txt','a')
f.close()

print '---wait for response from magnetic application (6)'
# Waiting for the magnetic iteration synchronization file
# to can continue the thermal computation
waitForFile(fileName="Synchro_M.txt",existFile="exist")

Scenario["T"].closeSessionMultiPhysics()
print '---end of multiphysics session on solving '

# Deletion of the magnetic iteration synchronization file
os.remove("Synchro_M.txt")

f=open('Synchro_T.txt','a')
f.close()

# ############################ END OF STEP2 ##################################

# ######################## STEP3 : POSTPROCESSING ############################

# Inserisco i sensori
try :
        SensorPonctual["T1","T2"].deleteForce()
        print '---Ho rimosso i sensori presenti---'
except:
        print ''

SensorPonctual(name="T1",spatialFormula="TCelsius",coordSys=CoordSys["XY1"],uvw=["0","DIA*0.5"])
SensorPonctual(name="T2",spatialFormula="TCelsius",coordSys=CoordSys["XY1"],uvw=["0","DIA*0.5-TH"])

evaluateSensors()

EvolutiveCurve2D(name="GRAFICO_T1",
                evolutivePath=EvolutivePath(parameterSet=[SetParameterXVariable(paramEvol=VariationParameter["TIME"],


                                                limitMin=0.0,

                                                limitMax=t_all)]),
                formula=["T1"])

EvolutiveCurve2D(name="GRAFICO_T2",
                evolutivePath=EvolutivePath(parameterSet=[SetParameterXVariable(paramEvol=VariationParameter["TIME"],


                                                limitMin=0.0,

                                                limitMax=t_all)]),
                formula=["T2"])

res=Curve2d["GRAFICO_T1"]
P1=res.y[0]
P2=P1.values
TEMPERATURA_1=P2[len(P2)-1]

for kkk in range(1,len(P2)-1):
        if P2[kkk+1]>P2[kkk]:
                indexP2=kkk+1
                Tmassimacordone=P2[kkk+1]
                print str(indexP2)
                print str(Tmassimacordone)

res=Curve2d["GRAFICO_T2"]
P1=res.y[0]
P2=P1.values
TEMPERATURA_2=P2[len(P2)-1]

DELTA_TEMP_1_2='TEMPERATURA_1-TEMPERATURA_2
print "\n\n\nLa differenza di temperatura T12 vale: " + str(DELTA_TEMP_1_2)
f=open("DELTA_TEMP_12.txt","w")
f.write(str(TEMPERATURA_1)+"\n"+str(TEMPERATURA_2)+"\n"+str(DELTA_TEMP_1_2)+"\n"+str(Tmassimacordone))
f.close()
time.sleep(5)
Rubbish()
saveProject()
closeProject()
f=open("sincrotempT.txt","w")
f.close()
exit()
# ############################ END OF STEP3 ##################################

except :
        traceback.print_exc(file=sys.stderr)
        ef = open("hs_err_pp_res","a")
        ef.close()
        resetError()
        closeProject()
        exit()
```

Appendice 2

Dati numerici riferiti alle simulazioni degli esempi del capitolo 7

Dati relativi al I STEP

velocità = 5 m/min			
Tempo [s]	**T1 [°C]**	**T2 [°C]**	**ΔT [°C]**
0.0	20.0	20.0	0.0
1.2	258.1	46.1	212.0
2.4	380.9	95.7	285.2
3.6	474.8	157.8	317.0
4.8	555.7	224.6	331.1
6.0	629.2	292.1	337.1
7.2	697.7	358.2	339.5
8.4	762.3	422.2	340.2
9.6	823.8	483.8	340.0
10.8	882.5	543.1	339.4
12.0	938.5	599.9	338.5
13.2	758.9	629.2	129.8
14.4	692.0	633.8	58.2
15.6	651.8	624.6	27.1
16.8	622.7	609.6	13.2
18.0	599.4	592.6	6.9
19.2	579.5	575.6	4.0
20.4	718.2	576.3	141.9
21.6	782.0	593.2	188.8
22.8	827.9	619.0	208.9
24.0	866.3	648.7	217.6
25.2	900.6	679.4	221.3
26.4	932.5	709.8	222.7
27.6	962.6	739.5	223.1
28.8	991.2	768.2	223.0
30.0	1018.6	795.9	222.7
31.2	891.1	806.0	85.1
32.4	838.7	800.4	38.3
33.6	804.4	786.4	18.0
34.8	778.0	769.0	9.0
36.0	755.6	750.8	4.8
37.2	876.0	748.1	127.9
38.4	915.4	758.2	157.3
39.6	945.7	774.9	170.8
40.8	971.0	794.3	176.8
42.0	993.6	814.3	179.2
43.2	1014.4	834.2	180.2
44.4	1034.1	853.6	180.5
45.6	1052.7	872.3	180.4
46.8	1070.5	890.3	180.3
48.0	1087.6	907.6	180.0
49.2	979.4	910.8	68.6
50.4	932.5	901.7	30.8
51.6	900.6	886.1	14.5
52.8	875.2	867.9	7.3
54.0	853.3	849.3	4.0

velocità = 8 m/min			
Tempo [s]	**T1 [°C]**	**T2 [°C]**	**ΔT [°C]**
0.0	20.0	20.0	0.0
0.8	213.1	31.3	181.8
1.6	312.8	56.6	256.2
2.4	387.7	92.3	295.4
3.2	450.9	134.1	316.8
4.0	507.4	179.0	328.5
4.8	559.7	224.9	334.8
5.6	608.9	270.7	338.1
6.4	655.8	316.0	339.8
7.2	700.8	360.3	340.5
8.0	744.3	403.5	340.7
8.8	595.1	434.5	160.5
9.6	537.9	450.6	87.2
10.4	504.1	455.5	48.6
11.2	480.9	453.4	27.5
12.0	463.3	447.5	15.8
12.8	641.1	450.9	190.2
13.6	727.2	467.3	259.9
14.4	789.9	493.7	296.2
15.2	841.8	526.2	315.6
16.0	887.7	561.8	325.9
16.8	929.8	598.6	331.3
17.6	969.3	635.5	333.8
18.4	1006.8	672.0	334.9
19.2	1042.8	707.7	335.0
20.0	888.6	731.7	156.9
20.8	826.4	741.3	85.1
21.6	787.6	740.2	47.4
22.4	759.5	732.6	26.9
23.2	737.2	721.5	15.7
24.0	718.4	708.9	9.4
24.8	701.8	695.8	6.0
25.6	813.4	690.1	123.3
26.4	864.1	693.8	170.3
27.2	899.3	704.5	194.8
28.0	927.5	719.6	207.9
28.8	951.9	737.0	214.9
29.6	974.0	755.4	218.6
30.4	994.6	774.2	220.5
31.2	1014.2	792.8	221.4
32.0	1032.9	811.2	221.7
32.8	925.7	821.9	103.8
33.6	879.8	823.5	56.3
34.4	849.6	818.1	31.5
35.2	826.6	808.6	18.0
36.0	807.7	797.0	10.6

Dati relativi alla seconda simulazione del II STEP con i seguenti campi di corrente e velocità:

Dalla prima simulazione			
	Valore minimo	Valore massimo	Passo di variazione
Corrente	1000 A	30000 A	1000 A
Velocità	3 m/min	53 m/min	5 m/min
Soluzione	5m/min ; 5000 A	T_{MAX} =932°C	ΔT =4°C

velocità [m/min]	corrente [A]	T1 [°C]	T2 [°C]	ΔT [°C]	Tmax [°C]	fobb	fobb1 = f (Tmax)	fobb2 = f (ΔT)
3.0	15000.0	1920.0	1920.6	-0.6	4359.5	1.808246955	1.807538265	0.000708691
5.0	8000.0	1238.6	1231.4	7.2	2142.6	0.587227894	0.578193484	0.00903441
15.0	24000.0	2671.4	2498.1	173.3	5425.0	2.615092622	2.398405876	0.216686746
40.0	21000.0	2028.4	850.5	1178.0	4159.7	3.169190243	1.696731708	1.472458535
10.0	12000.0	1620.6	1557.2	63.3	2968.6	1.115418117	1.036233965	0.079184152
20.0	16000.0	1777.9	1396.3	381.6	3529.1	1.824087327	1.347068899	0.477018427
5.0	5000.0	562.1	558.1	4.1	932.6	0.097919407	0.092812421	0.005106986
40.0	24000.0	2326.6	1021.1	1305.5	4818.9	3.694128505	2.062295419	1.631833085
20.0	7000.0	438.7	329.7	109.0	847.8	0.276046518	0.139848373	0.136198145
15.0	29000.0	2934.1	2780.7	153.4	6184.0	3.011106239	2.819310016	0.191796223
10.0	19000.0	2427.1	2376.5	50.6	4735.1	2.079110103	2.015818086	0.063292017
30.0	3000.0	81.7	52.4	29.2	144.5	0.56641149	0.529852319	0.03655917
40.0	14000.0	1120.0	435.4	684.7	2256.4	1.497104256	0.641283304	0.855820953
45.0	8000.0	429.4	134.2	295.2	778.0	0.54756977	0.178558198	0.369011571
10.0	26000.0	2801.3	2763.2	38.1	5898.0	2.708352412	2.660710135	0.047642276
25.0	27000.0	2695.6	2039.9	655.7	5663.1	3.350078886	2.530420372	0.819658514
45.0	8000.0	429.4	134.2	295.2	778.0	0.54756977	0.178558198	0.369011571
10.0	3000.0	142.9	136.3	6.6	241.6	0.484325442	0.476021121	0.008304322
20.0	10000.0	852.2	640.3	211.9	1668.7	0.580274565	0.315392506	0.264882058
5.0	10000.0	1615.6	1608.7	6.9	2908.5	1.011439011	1.002871078	0.008567933
5.0	6000.0	781.0	775.5	5.5	1310.8	0.123748282	0.116902843	0.006845439
10.0	9000.0	1055.0	1004.4	50.6	1902.6	0.508306486	0.44507699	0.063229495
15.0	21000.0	2460.9	2273.8	187.0	4893.2	2.337315511	2.103506302	0.23380921
30.0	17000.0	1683.1	955.6	727.5	3417.2	2.194375701	1.285013831	0.909361869
35.0	1000.0	28.4	23.0	5.3	34.2	0.597693164	0.591041561	0.006651603
25.0	3000.0	88.1	62.6	25.5	156.6	0.554999068	0.523177504	0.031821564
5.0	29000.0	2548.0	2549.1	-1.1	6429.5	2.956799759	2.955468858	0.001330901
5.0	7000.0	1012.9	1006.2	6.6	1723.3	0.353927747	0.345667874	0.008259873
15.0	22000.0	2536.9	2354.4	182.5	5078.8	2.434515765	2.206434812	0.228080953
35.0	9000.0	603.1	255.3	347.8	1103.5	0.43665363	0.001920033	0.434733597
10.0	3000.0	142.9	136.3	6.6	241.6	0.484325442	0.476021121	0.008304322
5.0	6000.0	781.0	775.5	5.5	1310.8	0.123748282	0.116902843	0.006845439
5.0	11000.0	1758.6	1752.4	6.2	3235.2	1.191833017	1.184092656	0.007740361
20.0	16000.0	1777.9	1396.3	381.6	3529.1	1.824087327	1.347068899	0.477018427
45.0	2000.0	45.7	27.2	18.6	67.6	0.595736271	0.572532662	0.023203609
50.0	8000.0	358.2	107.8	250.5	701.6	0.534009732	0.220945218	0.313064514
10.0	1000.0	33.7	32.9	0.7	44.6	0.586168883	0.585241885	0.000926999
10.0	24000.0	2716.3	2675.4	40.9	5597.9	2.545453535	2.494291498	0.051162037
5.0	22000.0	2398.9	2398.4	0.5	5467.8	2.422764603	2.422158557	0.000606046
20.0	8000.0	563.8	422.9	140.9	1095.9	0.178406023	0.002294092	0.176111931
10.0	11000.0	1442.9	1381.7	61.2	2627.9	0.923803023	0.847270924	0.076532098
5.0	15000.0	2117.2	2113.8	3.4	4243.7	1.747538493	1.743311746	0.004226747
50.0	17000.0	1423.5	400.9	1022.6	2870.8	2.260262809	0.981975246	1.278287563
35.0	6000.0	281.5	125.1	156.4	505.2	0.525360293	0.329838378	0.195521916
15.0	22000.0	2536.9	2354.4	182.5	5078.8	2.434515765	2.206434812	0.228080953
20.0	28000.0	2821.2	2444.9	376.3	5923.4	3.145207754	2.674785345	0.470422409
35.0	10000.0	735.4	309.6	425.8	1350.2	0.670956813	0.138744159	0.532212655
25.0	9000.0	623.1	399.6	223.5	1232.7	0.352926901	0.07356595	0.279360951
15.0	18000.0	2186.8	1988.0	198.8	4270.1	2.006422018	1.757939512	0.248482506
30.0	7000.0	354.2	196.0	158.2	695.6	0.422031778	0.224239729	0.197792049
50.0	18000.0	1556.5	442.0	1114.5	3146.3	2.527886343	1.134778391	1.393107952
5.0	15000.0	2117.2	2113.8	3.4	4243.7	1.747538493	1.743311746	0.004226747
25.0	4000.0	140.9	95.7	45.2	262.7	0.520852264	0.464329847	0.056522416

10.0	13000.0	1781.7	1718.1	63.6	3285.6	1.291510565	1.212002429	0.079508136
35.0	20000.0	2194.7	1016.2	1178.5	4146.9	3.162778959	1.689639199	1.47313976
30.0	24000.0	2422.4	1513.0	909.4	5033.1	3.317846729	2.18108619	1.136760539
5.0	21000.0	2370.5	2369.7	0.8	5314.5	2.338091374	2.337111455	0.00097992
15.0	23000.0	2606.8	2429.0	177.9	5255.7	2.526866261	2.304534831	0.22233143
50.0	1000.0	26.1	21.4	4.7	31.3	0.598508896	0.5926502	0.005858696
25.0	13000.0	1204.7	781.7	423.0	2410.5	1.255447337	0.726704306	0.528743031
35.0	23000.0	2512.7	1224.6	1288.1	4805.1	3.66480871	2.054660913	1.610147797
35.0	18000.0	1940.9	869.0	1071.9	3642.3	2.749739841	1.409831372	1.339908469
15.0	25000.0	2731.3	2562.4	169.0	5587.5	2.69977112	2.48854923	0.211221889
20.0	9000.0	702.4	526.9	175.6	1371.1	0.369802635	0.15032565	0.219476986
25.0	8000.0	499.4	321.1	178.3	983.4	0.287556994	0.064679488	0.222877506
35.0	28000.0	2914.2	1531.8	1382.3	5704.0	4.28102605	2.553135804	1.727890246
15.0	23000.0	2606.8	2429.0	177.9	5255.7	2.526866261	2.304534831	0.22233143
10.0	20000.0	2496.7	2448.4	48.4	4924.3	2.181182822	2.120744388	0.060438434
50.0	24000.0	2248.9	692.2	1556.7	4622.3	3.899163726	1.95327083	1.945892896
40.0	18000.0	1668.3	670.9	997.4	3393.0	2.518347502	1.271553405	1.246794097
30.0	19000.0	1932.7	1127.1	805.6	3945.0	2.584670046	1.577684859	1.006985187
20.0	14000.0	1488.4	1146.0	342.4	2941.1	1.449017259	1.020957179	0.428060079
20.0	2000.0	54.5	45.4	9.0	88.0	0.572463753	0.561185429	0.011278324
5.0	13000.0	1971.2	1966.5	4.7	3787.8	1.496402391	1.490527851	0.00587454
40.0	16000.0	1398.9	550.8	848.2	2831.5	2.02038428	0.960168831	1.06021545
25.0	15000.0	1505.1	994.1	510.9	3024.2	1.705727054	1.067071405	0.638655649
50.0	10000.0	545.8	156.9	388.9	1080.3	0.497083266	0.010911117	0.486172149
35.0	19000.0	2072.2	943.2	1129.0	3901.6	2.964810772	1.553590722	1.41122005
45.0	22000.0	2317.8	765.2	1552.5	4382.2	3.760794612	1.820136156	1.940658456
5.0	24000.0	2449.1	2449.1	0.0	5760.6	2.58456694	2.584515097	5.18E-05
50.0	17000.0	1423.5	400.9	1022.6	2870.8	2.260262809	0.981975246	1.278287563
45.0	17000.0	1667.9	509.2	1158.7	3104.0	2.559685211	1.11132296	1.448362251
50.0	5000.0	152.5	54.3	98.2	286.9	0.573642675	0.450917321	0.122725354
45.0	24000.0	2525.5	863.9	1661.6	4811.4	4.135115791	2.058165639	2.076950151
35.0	27000.0	2843.9	1474.3	1369.6	5539.5	4.173843015	2.461894759	1.711948256
5.0	22000.0	2398.9	2398.4	0.5	5467.8	2.422764603	2.422158557	0.000606046
45.0	11000.0	783.9	234.6	549.2	1436.8	0.873312909	0.186767145	0.686545764
15.0	1000.0	30.3	28.8	1.5	39.8	0.589865292	0.587952459	0.001912833
5.0	4000.0	371.8	369.1	2.7	609.5	0.275395074	0.272000682	0.003394392
40.0	18000.0	1668.3	670.9	997.4	3393.0	2.518347502	1.271553405	1.246794097
15.0	6000.0	389.7	335.4	54.3	727.3	0.274527646	0.20668688	0.067840767
40.0	3000.0	73.3	39.6	33.7	127.7	0.581271498	0.539205598	0.042065899
5.0	17000.0	2223.4	2221.1	2.3	4637.7	1.96470999	1.96180923	0.002900759
45.0	1000.0	27.4	21.8	5.5	32.5	0.598902045	0.591980082	0.006921964
25.0	28000.0	2756.8	2104.0	652.8	5821.0	3.434008034	2.617986932	0.816021102
30.0	9000.0	568.3	309.6	258.7	1129.5	0.339703857	0.016346976	0.323356881
40.0	3000.0	73.3	39.6	33.7	127.7	0.581271498	0.539205598	0.042065899
25.0	24000.0	2487.2	1828.8	658.4	5150.1	3.068951039	2.245951145	0.822999894
50.0	1000.0	26.1	21.4	4.7	31.3	0.598508896	0.5926502	0.005858696
10.0	23000.0	2668.5	2626.0	42.5	5439.8	2.459807686	2.406630911	0.053176775
45.0	16000.0	1519.1	458.9	1060.2	2819.6	2.278865586	0.953588651	1.325276935
35.0	18000.0	1940.9	869.0	1071.9	3642.3	2.749739841	1.409831372	1.339908469
15.0	6000.0	389.7	335.4	54.3	727.3	0.274527646	0.20668688	0.067840767
35.0	11000.0	877.9	368.9	509.0	1616.7	0.92281488	0.286512889	0.636301992
45.0	14000.0	1215.7	362.4	853.3	2245.3	1.701732315	0.635114587	1.066617727
5.0	26000.0	2492.4	2492.9	-0.5	6037.7	2.738806057	2.738190429	0.000615629
10.0	28000.0	2875.1	2839.4	35.8	6180.2	2.861901309	2.81721178	0.044689529
25.0	6000.0	291.4	190.1	101.3	564.9	0.423386118	0.296711827	0.126674291
35.0	13000.0	1184.5	500.3	684.2	2192.6	1.461110462	0.605870989	0.855239473
15.0	9000.0	829.2	714.1	115.2	1572.0	0.405702884	0.261734719	0.143968166
35.0	4000.0	136.4	66.7	69.7	236.0	0.566259049	0.479150764	0.087108285
15.0	12000.0	1349.2	1176.6	172.6	2578.1	1.035454563	0.819679636	0.215774927
5.0	7000.0	1012.9	1006.2	6.6	1723.3	0.353927747	0.345667874	0.008259873
15.0	12000.0	1349.2	1176.6	172.6	2578.1	1.035454563	0.819679636	0.215774927
10.0	8000.0	859.5	816.7	42.7	1542.8	0.298947849	0.245540152	0.053407697
20.0	2000.0	54.5	45.4	9.0	88.0	0.572463753	0.561185429	0.011278324
15.0	18000.0	2186.8	1988.0	198.8	4270.1	2.006422018	1.757939512	0.248482506
45.0	7000.0	334.0	107.5	226.6	601.3	0.559750081	0.276561058	0.283189024
10.0	24000.0	2716.3	2675.4	40.9	5597.9	2.545453535	2.494291498	0.051162037
35.0	22000.0	2414.4	1157.1	1257.4	4597.7	3.511354112	1.939656011	1.571698101
45.0	14000.0	1215.7	362.4	853.3	2245.3	1.701732315	0.635114587	1.066617727

15.0	21000.0	2460.9	2273.8	187.0	4893.2	2.337315511	2.103506302	0.23380921
20.0	10000.0	852.2	640.3	211.9	1668.7	0.580274565	0.315392506	0.264882058
20.0	13000.0	1331.8	1016.7	315.1	2626.3	1.240287199	0.846407573	0.393879626
5.0	23000.0	2425.0	2424.8	0.2	5616.4	2.504796544	2.504532891	0.000263653
5.0	23000.0	2425.0	2424.8	0.2	5616.4	2.504796544	2.504532891	0.000263653
30.0	3000.0	81.7	52.4	29.2	144.5	0.56641149	0.529852319	0.03655917
20.0	23000.0	2498.3	2097.1	401.2	5099.7	2.719489572	2.218029396	0.501460176
45.0	13000.0	1066.2	317.2	749.0	1964.4	1.415580644	0.479336989	0.936243655
10.0	6000.0	505.9	480.1	25.8	898.0	0.144278673	0.111999374	0.032279299
15.0	24000.0	2671.4	2498.1	173.3	5425.0	2.615092622	2.398405876	0.216686746
15.0	23000.0	2606.8	2429.0	177.9	5255.7	2.526866261	2.304534831	0.22233143
10.0	2000.0	74.7	71.7	3.0	118.6	0.547955393	0.544255965	0.003699427
5.0	23000.0	2425.0	2424.8	0.2	5616.4	2.504796544	2.504532891	0.000263653
25.0	30000.0	2869.2	2224.0	645.2	6121.0	3.590875118	2.784382976	0.806492141
5.0	27000.0	2512.0	2512.7	-0.7	6171.3	2.813109693	2.812240357	0.000869336
35.0	23000.0	2512.7	1224.6	1288.1	4805.1	3.66480871	2.054660913	1.610147797
45.0	7000.0	334.0	107.5	226.6	601.3	0.559750081	0.276561058	0.283189024
25.0	11000.0	901.9	579.4	322.6	1796.0	0.789150458	0.385957596	0.403192863
25.0	5000.0	208.8	138.2	70.5	398.9	0.476968402	0.388782653	0.088185749
20.0	3000.0	97.5	77.2	20.3	173.0	0.539412095	0.514054699	0.025357396
10.0	26000.0	2801.3	2763.2	38.1	5898.0	2.708352412	2.660710135	0.047642276
20.0	7000.0	438.7	329.7	109.0	847.8	0.276046518	0.139848373	0.136198145
15.0	7000.0	520.4	447.4	73.0	978.1	0.158893248	0.067605648	0.0912876
25.0	5000.0	208.8	138.2	70.5	398.9	0.476968402	0.388782653	0.088185749
25.0	18000.0	1906.3	1304.9	601.4	3858.6	2.281567803	1.529796179	0.751771624
20.0	24000.0	2572.0	2175.0	397.0	5278.2	2.81323993	2.317018652	0.496221278
45.0	17000.0	1667.9	509.2	1158.7	3104.0	2.559685211	1.11132296	1.448362251
30.0	6000.0	266.0	149.4	116.6	517.2	0.468924056	0.323196589	0.145727467
10.0	17000.0	2262.2	2206.6	55.6	4321.3	1.85590361	1.78638205	0.06952156
10.0	16000.0	2163.7	2105.6	58.2	4092.5	1.732194027	1.659478837	0.07271519
30.0	4000.0	129.6	77.6	52.0	241.3	0.541133022	0.476181091	0.064951931
30.0	17000.0	1683.1	955.6	727.5	3417.2	2.194375701	1.285013831	0.909361869
35.0	18000.0	1940.9	869.0	1071.9	3642.3	2.749739841	1.409831372	1.339908469
15.0	5000.0	277.6	239.6	37.9	512.5	0.373211003	0.32578076	0.047430243
5.0	27000.0	2512.0	2512.7	-0.7	6171.3	2.813109693	2.812240357	0.000869336
25.0	1000.0	27.6	24.7	2.8	35.2	0.59403126	0.59049177	0.00353949
10.0	17000.0	2262.2	2206.6	55.6	4321.3	1.85590361	1.78638205	0.06952156
10.0	13000.0	1781.7	1718.1	63.6	3285.6	1.291510565	1.212002429	0.079508136
10.0	18000.0	2349.5	2296.4	53.1	4534.8	1.971066074	1.904726343	0.066339731
50.0	16000.0	1288.7	360.7	928.0	2592.9	1.987842786	0.827897832	1.159944954
10.0	5000.0	359.6	341.4	18.2	633.0	0.281756496	0.25898472	0.022771776
30.0	23000.0	2338.1	1441.4	896.7	4838.5	3.194077647	2.07314875	1.120928897
40.0	19000.0	1795.1	731.3	1063.8	3660.3	2.749572338	1.41979164	1.329780697
5.0	11000.0	1758.6	1752.4	6.2	3235.2	1.191833017	1.184092656	0.007740361
35.0	15000.0	1500.1	644.3	855.8	2790.8	2.007420337	0.93763916	1.069781177
35.0	27000.0	2843.9	1474.3	1369.6	5539.5	4.173843015	2.461894759	1.711948256
15.0	13000.0	1517.0	1331.5	185.5	2905.8	1.233249941	1.001417892	0.231832049
50.0	28000.0	2592.3	848.5	1743.8	5403.1	4.566057487	2.38628046	2.179777027
5.0	29000.0	2548.0	2549.1	-1.1	6429.5	2.956799759	2.955468858	0.001330901
10.0	8000.0	859.5	816.7	42.7	1542.8	0.298947849	0.245540152	0.053407697
10.0	16000.0	2163.7	2105.6	58.2	4092.5	1.732194027	1.659478837	0.07271519
45.0	30000.0	3007.9	1134.6	1873.3	5880.6	4.992656202	2.651065201	2.341591002
15.0	13000.0	1517.0	1331.5	185.5	2905.8	1.233249941	1.001417892	0.231832049
5.0	26000.0	2492.4	2492.9	-0.5	6037.7	2.738806057	2.738190429	0.000615629
45.0	17000.0	1667.9	509.2	1158.7	3104.0	2.559685211	1.11132296	1.448362251
10.0	11000.0	1442.9	1381.7	61.2	2627.9	0.923803023	0.847270924	0.076532098
40.0	7000.0	309.1	126.6	182.5	604.8	0.502756867	0.274601013	0.228155854
40.0	19000.0	1795.1	731.3	1063.8	3660.3	2.749572338	1.41979164	1.329780697
45.0	1000.0	27.4	21.8	5.5	32.5	0.598902045	0.591980082	0.006921964
40.0	2000.0	43.7	28.7	15.0	67.9	0.591071869	0.572370855	0.018701014
10.0	17000.0	2262.2	2206.6	55.6	4321.3	1.85590361	1.78638205	0.06952156
15.0	16000.0	1955.0	1753.6	201.4	3781.4	1.738673421	1.486967582	0.251705839
10.0	11000.0	1442.9	1381.7	61.2	2627.9	0.923803023	0.847270924	0.076532098
10.0	15000.0	2052.1	1991.5	60.6	3845.5	1.598206929	1.522503582	0.075703347
50.0	25000.0	2342.9	732.4	1610.5	4831.4	4.082381414	2.069256519	2.013124895
10.0	10000.0	1252.2	1195.3	56.9	2269.0	0.719429602	0.648258466	0.071171136
30.0	16000.0	1547.0	867.9	679.2	3133.5	1.976640307	1.12769291	0.848947398
30.0	4000.0	129.6	77.6	52.0	241.3	0.541133022	0.476181091	0.064951931

25.0	23000.0	2407.8	1751.5	656.3	4963.2	2.962672185	2.142322449	0.820349737
30.0	22000.0	2247.6	1367.0	880.6	4633.5	3.060264871	1.959460756	1.100804115
40.0	6000.0	232.7	98.3	134.3	450.1	0.528296877	0.360393814	0.167903062
5.0	11000.0	1758.6	1752.4	6.2	3235.2	1.191833017	1.184092656	0.007740361
40.0	15000.0	1259.6	492.2	767.4	2543.5	1.759798105	0.800510792	0.959287313
20.0	24000.0	2572.0	2175.0	397.0	5278.2	2.81323993	2.317018652	0.496221278
25.0	5000.0	208.8	138.2	70.5	398.9	0.476968402	0.388782653	0.088185749
20.0	4000.0	157.6	121.6	36.0	291.9	0.493161274	0.448138463	0.045022811
50.0	25000.0	2342.9	732.4	1610.5	4831.4	4.082381414	2.069256519	2.013124895
5.0	14000.0	2050.5	2046.5	4.0	4025.3	1.627212055	1.622202353	0.005009702
35.0	19000.0	2072.2	943.2	1129.0	3901.6	2.964810772	1.553590722	1.41122005
35.0	9000.0	603.1	255.3	347.8	1103.5	0.43665363	0.001920033	0.434733597
35.0	29000.0	2980.5	1587.6	1392.9	5862.5	4.382108594	2.641006151	1.741102443
5.0	14000.0	2050.5	2046.5	4.0	4025.3	1.627212055	1.622202353	0.005009702
20.0	18000.0	2028.1	1626.6	401.5	4049.7	2.137605317	1.635721266	0.501884052
5.0	25000.0	2471.5	2471.8	-0.3	5900.9	2.662680467	2.662336512	0.000343956
35.0	22000.0	2414.4	1157.1	1257.4	4597.7	3.511354112	1.939656011	1.571698101
15.0	22000.0	2536.9	2354.4	182.5	5078.8	2.434515765	2.206434812	0.228080953
10.0	6000.0	505.9	480.1	25.8	898.0	0.144278673	0.111999374	0.032279299
35.0	11000.0	877.9	368.9	509.0	1616.7	0.92281488	0.286512889	0.636301992
50.0	2000.0	41.2	25.5	15.7	62.7	0.594872433	0.575217268	0.019655164
10.0	27000.0	2839.4	2802.6	36.9	6041.1	2.786180671	2.740077794	0.046102876
20.0	14000.0	1488.4	1146.0	342.4	2941.1	1.449017259	1.020957179	0.428060079
50.0	16000.0	1288.7	360.7	928.0	2592.9	1.987842786	0.827897832	1.159944954
25.0	26000.0	2630.6	1972.8	657.8	5499.1	3.26174627	2.439501707	0.822244563
5.0	1000.0	42.2	42.1	0.2	57.1	0.578557055	0.578337071	0.000219984
30.0	3000.0	81.7	52.4	29.2	144.5	0.56641149	0.529852319	0.03655917
40.0	25000.0	2413.3	1075.2	1338.1	5017.1	3.844866593	2.172207443	1.67265915
30.0	24000.0	2422.4	1513.0	909.4	5033.1	3.317846729	2.18108619	1.136760539
20.0	8000.0	563.8	422.9	140.9	1095.9	0.178406023	0.002294092	0.176111931
20.0	24000.0	2572.0	2175.0	397.0	5278.2	2.81323993	2.317018652	0.496221278
15.0	4000.0	185.1	160.8	24.4	335.7	0.454313969	0.423842833	0.030471136
5.0	20000.0	2339.4	2338.3	1.1	5155.7	2.250435816	2.249046309	0.001389507
45.0	17000.0	1667.9	509.2	1158.7	3104.0	2.559685211	1.11132296	1.448362251
30.0	30000.0	2827.5	1888.7	938.7	6037.3	3.911345651	2.737954613	1.173391038
30.0	12000.0	966.7	526.1	440.6	1940.1	1.016581027	0.465861429	0.550719598
30.0	10000.0	692.4	376.2	316.2	1381.5	0.551391429	0.156086132	0.395305297
25.0	4000.0	140.9	95.7	45.2	262.7	0.520852264	0.464329847	0.056522416
45.0	29000.0	2939.2	1092.2	1846.9	5720.4	4.870875563	2.562212853	2.30866271
20.0	6000.0	328.7	248.1	80.6	630.0	0.361309764	0.260614753	0.100695011
45.0	7000.0	334.0	107.5	226.6	601.3	0.559750081	0.276561058	0.283189024
45.0	4000.0	122.8	48.6	74.2	210.2	0.586197411	0.493439738	0.092757673
10.0	12000.0	1620.6	1557.2	63.3	2968.6	1.115418117	1.036233965	0.079184152
35.0	2000.0	49.1	31.7	17.4	74.0	0.590751748	0.568955516	0.021796232
20.0	15000.0	1637.8	1273.1	364.7	3243.1	1.644267639	1.188449075	0.455818563
15.0	6000.0	389.7	335.4	54.3	727.3	0.274527646	0.20668688	0.067840767
45.0	5000.0	180.6	64.7	115.9	317.1	0.579021186	0.434175349	0.144845838
15.0	21000.0	2460.9	2273.8	187.0	4893.2	2.337315511	2.103506302	0.23380921
15.0	10000.0	1000.1	863.7	136.4	1901.5	0.615028154	0.444494844	0.17053331
40.0	14000.0	1120.0	435.4	684.7	2256.4	1.497104256	0.641283304	0.855820953
30.0	20000.0	2045.4	1209.7	835.7	4187.8	2.756926915	1.712301893	1.044625021
25.0	23000.0	2407.8	1751.5	656.3	4963.2	2.962672185	2.142322449	0.820349737
45.0	8000.0	429.4	134.2	295.2	778.0	0.54756977	0.178558198	0.369011571
40.0	22000.0	2134.5	908.6	1225.9	4391.0	3.35738429	1.825004762	1.532379528
20.0	8000.0	563.8	422.9	140.9	1095.9	0.178406023	0.002294092	0.176111931
15.0	11000.0	1175.2	1019.2	156.0	2240.4	0.827379763	0.632383578	0.194996185
50.0	10000.0	545.8	156.9	388.9	1080.3	0.497083266	0.010911117	0.486172149
10.0	20000.0	2496.7	2448.4	48.4	4924.3	2.181182822	2.120744388	0.060438434
35.0	2000.0	49.1	31.7	17.4	74.0	0.590751748	0.568955516	0.021796232
15.0	10000.0	1000.1	863.7	136.4	1901.5	0.615028154	0.444494844	0.17053331
35.0	25000.0	2689.4	1353.5	1335.9	5189.3	3.937610527	2.267702234	1.669908294
5.0	7000.0	1012.9	1006.2	6.6	1723.3	0.353927747	0.345667874	0.008259873
25.0	21000.0	2230.0	1585.0	645.0	4559.3	2.724551514	1.918313477	0.806238037
25.0	16000.0	1647.0	1100.0	547.0	3316.8	1.913056152	1.229329436	0.683726715
25.0	18000.0	1906.3	1304.9	601.4	3858.6	2.281567803	1.529796179	0.751771624
5.0	6000.0	781.0	775.5	5.5	1310.8	0.123748282	0.116902843	0.006845439
10.0	6000.0	505.9	480.1	25.8	898.0	0.144278673	0.111999374	0.032279299
20.0	15000.0	1637.8	1273.1	364.7	3243.1	1.644267639	1.188449075	0.455818563

10.0	7000.0	674.1	639.9	34.2	1204.0	0.100406335	0.057657762	0.042748573
5.0	3000.0	219.3	217.7	1.6	353.0	0.416176102	0.414231698	0.001944404
15.0	9000.0	829.2	714.1	115.2	1572.0	0.405702884	0.261734719	0.143968166
10.0	7000.0	674.1	639.9	34.2	1204.0	0.100406335	0.057657762	0.042748573
5.0	3000.0	219.3	217.7	1.6	353.0	0.416176102	0.414231698	0.001944404
15.0	7000.0	520.4	447.4	73.0	978.1	0.158893248	0.067605648	0.0912876
5.0	4000.0	371.8	369.1	2.7	609.5	0.275395074	0.272000682	0.003394392
5.0	8000.0	1238.6	1231.4	7.2	2142.6	0.587227894	0.578193484	0.00903441
5.0	3000.0	219.3	217.7	1.6	353.0	0.416176102	0.414231698	0.001944404
5.0	5000.0	562.1	558.1	4.1	932.6	0.097919407	0.092812421	0.005106986
5.0	7000.0	1012.9	1006.2	6.6	1723.3	0.353927747	0.345667874	0.008259873
5.0	6000.0	781.0	775.5	5.5	1310.8	0.123748282	0.116902843	0.006845439
5.0	**5000.0**	**562.1**	**558.1**	**4.1**	**932.6**	**0.097919407**	**0.092812421**	**0.005106986**

Dati relativi alla seconda simulazione del II STEP con i seguenti campi di corrente e velocità:

Seconda simulazione			
	Valore minimo	Valore massimo	Passo di variazione
Corrente	4500 A	7500 A	250 A
Velocità	4 m/min	16 m/min	1 m/min
Soluzione	5 m/min ; 5500A	T_{MAX} =1115°C	ΔT =5°C

velocità [m/min]	corrente [A]	T1 [°C]	T2 [°C]	ΔT [°C]	Tmax [°C]	fobb	fobb1 = f (Tmax)	fobb2 = f (ΔT)	Deviaz. Standard
10.0	7000.0	674.1	639.9	34.2	1204.0	0.100406335	0.057657762	0.042748573	10.8
6.0	6500.0	810.0	800.8	9.3	1375.5	0.164389822	0.152782113	0.011607709	10.8
10.0	6250.0	546.0	518.2	27.9	970.9	0.106404547	0.07157332	0.034831227	10.8
13.0	7500.0	648.3	583.1	65.2	1199.6	0.136792808	0.055232682	0.081560126	10.8
7.0	5750.0	663.5	644.8	18.7	1067.2	0.041627539	0.018213447	0.023414092	10.8
13.0	7500.0	648.3	583.1	65.2	1199.6	0.136792808	0.055232682	0.081560126	10.8
6.0	6000.0	702.0	693.8	8.2	1186.4	0.058181005	0.047926561	0.010254443	10.8
11.0	4500.0	313.0	285.4	27.6	520.3	0.355942135	0.321452783	0.034489352	10.8
15.0	5500.0	331.2	285.4	45.8	615.3	0.32603742	0.268813398	0.057224022	10.8
10.0	5750.0	467.1	443.3	23.8	827.7	0.180787978	0.150998963	0.029789015	10.8
9.0	5250.0	422.5	406.4	16.1	736.1	0.221908849	0.20180677	0.02010208	10.8
9.0	5000.0	385.7	371.0	14.6	670.3	0.256584962	0.238280819	0.018304143	10.8
11.0	6750.0	668.7	608.9	59.8	1130.5	0.091722605	0.016920673	0.074801932	10.8
8.0	5250.0	456.4	444.0	12.4	785.0	0.190173714	0.174654122	0.015519592	10.8
13.0	5500.0	362.7	326.5	36.2	662.3	0.287999334	0.242714607	0.045284726	10.8
5.0	6000.0	781.0	775.5	5.5	1310.8	0.123748282	0.116902843	0.006845439	10.8
10.0	5000.0	359.6	341.4	18.2	633.0	0.281756496	0.25898472	0.022771776	10.8
5.0	6750.0	954.7	948.3	6.4	1618.4	0.295454253	0.287497621	0.007956632	10.8
12.0	5000.0	319.3	293.4	26.0	574.7	0.32375029	0.291292385	0.032457905	10.8
8.0	5250.0	456.4	444.0	12.4	785.0	0.190173714	0.174654122	0.015519592	10.8
6.0	4750.0	456.3	450.9	5.4	762.1	0.194190384	0.18739458	0.006795804	10.8
5.0	7250.0	1070.6	1063.8	6.8	1828.6	0.412590365	0.404068517	0.008521848	10.8
7.0	4500.0	420.1	408.2	11.9	668.9	0.25397127	0.239077409	0.014893861	10.8
8.0	6500.0	678.8	660.5	18.3	1178.6	0.066427045	0.043565775	0.02286127	10.8
4.0	7250.0	1171.7	1167.7	4.0	2023.0	0.516862641	0.511842976	0.005019665	10.8
13.0	4500.0	250.1	225.7	24.4	451.1	0.390375102	0.359853907	0.030521196	10.8
10.0	6000.0	505.9	480.1	25.8	898.0	0.144278673	0.111999374	0.032279299	10.8
9.0	6500.0	629.6	605.7	23.9	1106.8	0.033662693	0.00378463	0.029878062	10.8
8.0	7250.0	827.4	805.5	21.9	1443.6	0.217844613	0.190520179	0.027324433	10.8
4.0	6000.0	877.9	874.3	3.5	1476.0	0.212883868	0.208484468	0.004399399	10.8
10.0	4750.0	326.8	310.4	16.5	573.7	0.312462755	0.291856469	0.020606286	10.8
6.0	7000.0	921.2	910.9	10.3	1572.2	0.274704705	0.261849845	0.012854861	10.8
13.0	6000.0	426.9	384.0	42.9	782.9	0.229462257	0.175847661	0.053614596	10.8
13.0	4500.0	250.1	225.7	24.4	451.1	0.390375102	0.359853907	0.030521196	10.8
15.0	6250.0	420.7	361.9	58.8	786.7	0.247173606	0.173733555	0.073440051	10.8
11.0	6000.0	536.5	488.4	48.1	903.3	0.169257986	0.109097191	0.060160795	10.8
7.0	7500.0	1063.4	1035.3	28.1	1733.4	0.386414713	0.351243378	0.035171335	10.8
7.0	6500.0	829.4	806.4	23.0	1341.3	0.162558	0.133831323	0.028726677	10.8
11.0	6000.0	536.5	488.4	48.1	903.3	0.169257986	0.109097191	0.060160795	10.8

8.0	6250.0	631.5	614.4	17.1	1094.6	0.024371937	0.003015961	0.021355976	10.8
8.0	6750.0	727.3	707.8	19.5	1264.9	0.11579297	0.091427553	0.024365417	10.8
7.0	5500.0	611.1	593.8	17.3	981.1	0.08758493	0.065944121	0.021640809	10.8
11.0	5750.0	495.3	450.9	44.4	832.5	0.203818551	0.148319759	0.055498792	10.8
6.0	7000.0	921.2	910.9	10.3	1572.2	0.274704705	0.261849845	0.012854861	10.8
14.0	6000.0	407.3	358.6	48.7	753.7	0.252897199	0.192061558	0.060835641	10.8
15.0	5750.0	359.8	309.9	49.9	670.1	0.300819626	0.238386835	0.062432791	10.8
10.0	5750.0	467.1	443.3	23.8	827.7	0.180787978	0.150998963	0.029789015	10.8
11.0	5500.0	455.6	414.8	40.8	764.5	0.237035008	0.186061084	0.050973924	10.8
11.0	7500.0	812.1	740.1	72.0	1377.7	0.243964876	0.153985836	0.08997904	10.8
10.0	7000.0	674.1	639.9	34.2	1204.0	0.100406335	0.057657762	0.042748573	10.8
14.0	6750.0	508.0	447.0	61.0	945.1	0.162203222	0.085921099	0.076282123	10.8
10.0	5500.0	429.8	407.9	21.9	760.0	0.215892568	0.188523238	0.02736933	10.8
5.0	6000.0	781.0	775.5	5.5	1310.8	0.123748282	0.116902843	0.006845439	10.8
7.0	6000.0	717.5	697.3	20.2	1156.1	0.05628094	0.031084413	0.025196527	10.8
4.0	4750.0	583.6	581.1	2.5	961.8	0.07979287	0.076632161	0.003160709	10.8
12.0	5250.0	349.7	321.1	28.6	631.1	0.295732297	0.260023428	0.035708868	10.8
4.0	7250.0	1171.7	1167.7	4.0	2023.0	0.516862641	0.511842976	0.005019665	10.8
9.0	4500.0	316.9	305.0	11.9	547.8	0.321150984	0.306233233	0.014917751	10.8
7.0	5000.0	511.7	497.1	14.5	818.2	0.174425745	0.156250061	0.018175684	10.8
6.0	5000.0	502.0	496.0	6.0	840.5	0.151372077	0.143901939	0.007470138	10.8
9.0	5000.0	385.7	371.0	14.6	670.3	0.256584962	0.238280819	0.018304143	10.8
6.0	5000.0	502.0	496.0	6.0	840.5	0.151372077	0.143901939	0.007470138	10.8
16.0	7250.0	534.3	448.0	86.3	1012.9	0.156163933	0.048316298	0.107847635	10.8
4.0	4500.0	528.9	526.6	2.3	868.5	0.131266907	0.128382037	0.00288487	10.8
12.0	7250.0	639.8	587.1	52.7	1171.0	0.105249037	0.039381154	0.065867883	10.8
14.0	5250.0	317.4	279.9	37.5	583.1	0.33351496	0.286646967	0.046867993	10.8
10.0	7000.0	674.1	639.9	34.2	1204.0	0.100406335	0.057657762	0.042748573	10.8
5.0	6500.0	896.5	890.4	6.1	1514.4	0.237429448	0.229813105	0.007616343	10.8
14.0	7500.0	618.8	544.5	74.3	1155.7	0.1238252	0.03091477	0.09291043	10.8
10.0	7500.0	765.0	726.5	38.5	1369.9	0.197798641	0.149684231	0.04811441	10.8
4.0	6000.0	877.9	874.3	3.5	1476.0	0.212883868	0.208484468	0.004399399	10.8
10.0	7250.0	719.1	682.7	36.3	1286.0	0.148573854	0.103141442	0.045432412	10.8
5.0	6750.0	954.7	948.3	6.4	1618.4	0.295454253	0.287497621	0.007956632	10.8
13.0	6000.0	426.9	384.0	42.9	782.9	0.229462257	0.175847661	0.053614596	10.8
5.0	5250.0	614.7	610.2	4.4	1022.7	0.048439165	0.04288767	0.005551495	10.8
12.0	6750.0	559.9	513.7	46.2	1022.2	0.100931068	0.043157462	0.057773606	10.8
9.0	7000.0	721.6	694.5	27.2	1272.5	0.129635468	0.09565183	0.033983638	10.8
9.0	6750.0	675.0	649.5	25.5	1188.6	0.081039469	0.049111391	0.031928078	10.8
11.0	5500.0	455.6	414.8	40.8	764.5	0.237035008	0.186061084	0.050973924	10.8
9.0	5500.0	461.0	443.4	17.6	804.8	0.185678676	0.163716195	0.021962481	10.8
12.0	5750.0	414.6	380.5	34.1	751.6	0.235797184	0.193189322	0.042607862	10.8
4.0	5000.0	640.2	637.5	2.7	1058.9	0.026247897	0.022814603	0.003433294	10.8
8.0	4500.0	342.3	333.0	9.2	584.3	0.297554636	0.286004772	0.011549864	10.8
10.0	4500.0	295.7	280.8	14.8	517.3	0.341656979	0.323120632	0.018536347	10.8
11.0	6250.0	579.2	527.2	52.0	976.6	0.133387452	0.068443178	0.064944274	10.8
9.0	6000.0	542.4	521.8	20.7	950.6	0.108716869	0.082874147	0.025842722	10.8
15.0	6250.0	420.7	361.9	58.8	786.7	0.247173606	0.173733555	0.073440051	10.8
9.0	5250.0	422.5	406.4	16.1	736.1	0.221908849	0.20180677	0.02010208	10.8
4.0	5250.0	698.3	695.3	3.0	1159.3	0.036557991	0.032859822	0.003698169	10.8
16.0	5250.0	292.1	246.0	46.1	544.7	0.365515504	0.307931087	0.057584416	10.8
7.0	7500.0	1063.4	1035.3	28.1	1733.4	0.386414713	0.351243378	0.035171335	10.8
11.0	4500.0	313.0	285.4	27.6	520.3	0.355942135	0.321452783	0.034489352	10.8
6.0	7000.0	921.2	910.9	10.3	1572.2	0.274704705	0.261849845	0.012854861	10.8
12.0	5250.0	349.7	321.1	28.6	631.1	0.295732297	0.260023428	0.035708868	10.8
12.0	4750.0	290.4	266.9	23.5	521.0	0.350448467	0.321101569	0.029346898	10.8
6.0	6750.0	865.3	855.5	9.8	1473.1	0.219133086	0.206884632	0.012248453	10.8
15.0	4500.0	228.8	198.0	30.8	419.3	0.415984548	0.377482116	0.038502432	10.8
8.0	5000.0	416.6	405.3	11.3	715.0	0.227664724	0.213517494	0.01414723	10.8
16.0	6000.0	374.5	314.7	59.9	704.0	0.294473016	0.219615074	0.074857942	10.8
6.0	5500.0	598.9	591.8	7.1	1007.4	0.060196428	0.051339744	0.008856684	10.8
15.0	5250.0	303.8	262.0	41.8	562.7	0.350170759	0.297949516	0.052221243	10.8
6.0	6000.0	702.0	693.8	8.2	1186.4	0.058181005	0.047926561	0.010254443	10.8
7.0	7500.0	1063.4	1035.3	28.1	1733.4	0.386414713	0.351243378	0.035171335	10.8
8.0	4500.0	342.3	333.0	9.2	584.3	0.297554636	0.286004772	0.011549864	10.8
5.0	5750.0	724.4	719.2	5.1	1212.1	0.068577401	0.062150943	0.006426458	10.8
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	10.8
5.0	6000.0	781.0	775.5	5.5	1310.8	0.123748282	0.116902843	0.006845439	10.8
14.0	6750.0	508.0	447.0	61.0	945.1	0.162203222	0.085921099	0.076282123	10.8
14.0	5000.0	289.9	255.9	34.1	531.1	0.358082662	0.315505895	0.042576767	10.8
9.0	5000.0	385.7	371.0	14.6	670.3	0.256584962	0.238280819	0.018304143	10.8
8.0	6750.0	727.3	707.8	19.5	1264.9	0.11579297	0.091427553	0.024365417	10.8
15.0	5250.0	303.8	262.0	41.8	562.7	0.350170759	0.297949516	0.052221243	10.8

8.0	4750.0	378.5	368.3	10.3	648.0	0.263470677	0.250648302	0.012822375	10.8
7.0	5250.0	560.5	544.6	15.9	898.1	0.131880766	0.111990215	0.019890552	10.8
6.0	4500.0	412.6	407.7	4.9	687.2	0.235054003	0.228913445	0.006140558	10.8
9.0	5500.0	461.0	443.4	17.6	804.8	0.185678676	0.163716195	0.021962481	10.8
6.0	7000.0	921.2	910.9	10.3	1572.2	0.274704705	0.261849845	0.012854861	10.8
10.0	6500.0	587.5	557.5	29.9	1046.3	0.067211871	0.029777263	0.037434607	10.8
11.0	7250.0	763.2	695.3	67.9	1293.3	0.192110785	0.107209321	0.084901464	10.8
5.0	4500.0	462.7	459.3	3.4	763.3	0.190961547	0.186732186	0.004229361	10.8
15.0	5500.0	331.2	285.4	45.8	615.3	0.32603742	0.268813398	0.057224022	10.8
7.0	7250.0	1004.2	977.3	26.9	1633.5	0.329546107	0.295866005	0.033680103	10.8
11.0	5750.0	495.3	450.9	44.4	832.5	0.203818551	0.148319759	0.055498792	10.8
14.0	5250.0	317.4	279.9	37.5	583.1	0.33351496	0.286646967	0.046867993	10.8
13.0	5500.0	362.7	326.5	36.2	662.3	0.287999334	0.242714607	0.045284726	10.8
7.0	6750.0	887.0	862.6	24.4	1437.2	0.217406639	0.186965814	0.030440825	10.8
12.0	5250.0	349.7	321.1	28.6	631.1	0.295732297	0.260023428	0.035708868	10.8
8.0	4500.0	342.3	333.0	9.2	584.3	0.297554636	0.286004772	0.011549864	10.8
14.0	6250.0	439.7	387.0	52.7	815.2	0.223762655	0.157930204	0.065832451	10.8
4.0	5500.0	757.5	754.3	3.2	1262.6	0.094101187	0.090150553	0.003950634	10.8
14.0	7250.0	580.8	511.0	69.8	1083.5	0.096409773	0.009150104	0.087259669	10.8
8.0	5750.0	540.9	526.2	14.7	934.2	0.110321679	0.091938553	0.018383126	10.8
12.0	6000.0	449.0	412.0	37.0	815.7	0.203917592	0.157675654	0.046241938	10.8
4.0	6000.0	877.9	874.3	3.5	1476.0	0.212883868	0.208484468	0.004399399	10.8
14.0	6750.0	508.0	447.0	61.0	945.1	0.162203222	0.085921099	0.076282123	10.8
7.0	6000.0	717.5	697.3	20.2	1156.1	0.05628094	0.031084413	0.025196527	10.8
12.0	5250.0	349.7	321.1	28.6	631.1	0.295732297	0.260023428	0.035708868	10.8
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	10.8
8.0	5000.0	416.6	405.3	11.3	715.0	0.227664724	0.213517494	0.01414723	10.8
10.0	4500.0	295.7	280.8	14.8	517.3	0.341656979	0.323120632	0.018536347	10.8
10.0	5750.0	467.1	443.3	23.8	827.7	0.180787978	0.150998963	0.029789015	10.8
13.0	5500.0	362.7	326.5	36.2	662.3	0.287999334	0.242714607	0.045284726	10.8
14.0	6250.0	439.7	387.0	52.7	815.2	0.223762655	0.157930204	0.065832451	10.8
5.0	4750.0	511.4	507.7	3.7	846.1	0.145467533	0.140802777	0.004664756	10.8
15.0	5250.0	303.8	262.0	41.8	562.7	0.350170759	0.297949516	0.052221243	10.8
10.0	5250.0	393.9	373.9	20.0	695.1	0.24955836	0.224530339	0.025028021	10.8
5.0	7500.0	1127.7	1120.7	7.0	1933.9	0.471187291	0.462447907	0.008739384	10.8
10.0	5500.0	429.8	407.9	21.9	760.0	0.215892568	0.188523238	0.02736933	10.8
11.0	5000.0	381.0	347.1	33.9	636.7	0.299323678	0.256935728	0.042387951	10.8
7.0	7500.0	1063.4	1035.3	28.1	1733.4	0.386414713	0.351243378	0.035171335	10.8
4.0	4750.0	583.6	581.1	2.5	961.8	0.07979287	0.076632161	0.003160709	10.8
9.0	5750.0	501.0	481.9	19.1	876.3	0.147932913	0.124054291	0.023878622	8.748
9.0	4750.0	350.5	337.2	13.3	607.5	0.28967466	0.273100244	0.016574416	7.08588
9.0	5250.0	422.5	406.4	16.1	736.1	0.221908849	0.20180677	0.02010208	5.7395628
8.0	5750.0	540.9	526.2	14.7	934.2	0.110321679	0.091938553	0.018383126	4.649045868
12.0	5250.0	349.7	321.1	28.6	631.1	0.295732297	0.260023428	0.035708868	3.765727153
11.0	4500.0	313.0	285.4	27.6	520.3	0.355942135	0.321452783	0.034489352	3.050238994
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	2.470693585
5.0	6000.0	781.0	775.5	5.5	1310.8	0.123748282	0.116902843	0.006845439	2.001261804
4.0	5000.0	640.2	637.5	2.7	1058.9	0.026247897	0.022814603	0.003433294	1.621022061
4.0	6250.0	938.2	934.5	3.7	1584.9	0.273513493	0.268926604	0.004586889	1.31302787
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	1.063552574
4.0	5500.0	757.5	754.3	3.2	1262.6	0.094101187	0.090150553	0.003950634	0.861477585
5.0	5750.0	724.4	719.2	5.1	1212.1	0.068577401	0.062150943	0.006426458	0.697796844
6.0	5500.0	598.9	591.8	7.1	1007.4	0.060196428	0.051339744	0.008856684	0.565215444
5.0	5750.0	724.4	719.2	5.1	1212.1	0.068577401	0.062150943	0.006426458	0.457824509
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.370837853
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.300378661
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.243306715
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.197078439
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.159633536
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.129303164
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.104735563
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.084835806
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.068717003
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.055660772
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.045085226
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.036519033
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.029580416
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.023960137
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.019407711
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.015720246
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.012733399
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.010314053
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.008354383

5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.00676705
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.005481311
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.004439862
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.003596288
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.002912993
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.002359525
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.001911215
5.0	5500.0	668.8	664.0	4.8	1115.9	0.014816653	0.008823479	0.005993175	0.001548084
5.0	**5500.0**	**668.8**	**664.0**	**4.8**	**1115.9**	**0.014816653**	**0.008823479**	**0.005993175**	**0.001253948**

Number of iterations : 194
Final dispersion :9.40461086986e-05 ; Prescribed dispersion : 0.0001
FINAL SOLUTION in the design space : [5.0, 5500.0] ; fobb = 0.0148166534287

Dati relativi al III STEP:

VELOCITA' 35 m / min								
I3 [A]	I4 [A]	T1 [°C]	T2 [°C]	ΔT [°C]	Tmax [°C]	fobb	fobb1 = f (Tmax)	fobb2 = f (ΔT)
5250.0	2100.0	912.1	880.6	31.5	1088.4	0.045857451	0.006431163	0.039426288
7450.0	3450.0	1075.4	1008.3	67.1	1326.9	0.20963947	0.125812992	0.083826479
7300.0	2750.0	1040.4	988.9	51.4	1308.3	0.179814851	0.115525267	0.064289584
5850.0	3850.0	1003.9	933.5	70.4	1141.9	0.11123158	0.023223528	0.088008052
7600.0	2850.0	1062.1	1007.3	54.8	1345.7	0.20475048	0.136274762	0.068475719
6600.0	3300.0	1019.8	959.9	59.8	1226.0	0.144652345	0.069890434	0.074761911
6250.0	4550.0	1059.5	967.4	92.2	1237.0	0.191231721	0.07599039	0.115241331
5750.0	3950.0	1003.7	931.0	72.7	1146.1	0.116464814	0.025546432	0.090918382
6250.0	3300.0	1000.8	942.5	58.3	1187.6	0.121503591	0.048589455	0.072914136
5800.0	3300.0	977.7	921.2	56.5	1141.0	0.093380839	0.022742452	0.070638387
5450.0	2950.0	947.6	900.1	47.5	1107.0	0.063211531	0.003865342	0.059346189
6450.0	2750.0	991.5	943.9	47.6	1209.3	0.120109606	0.060634961	0.059474644
8300.0	2950.0	1110.7	1050.5	60.1	1437.8	0.262495281	0.187316479	0.075178802
5450.0	3250.0	958.9	904.9	54.0	1107.0	0.071382802	0.003865342	0.06751746
6900.0	2150.0	999.0	959.7	39.3	1260.4	0.138137703	0.088961544	0.049176159
7700.0	2900.0	1070.1	1013.8	56.2	1358.5	0.213651207	0.14334465	0.070306557
8050.0	4250.0	1149.3	1058.7	90.6	1404.2	0.281938468	0.168677125	0.113261343
7900.0	3750.0	1116.2	1039.8	76.5	1384.4	0.253286878	0.157709645	0.095577233
6700.0	4200.0	1065.7	982.2	83.5	1226.3	0.174412063	0.070064179	0.104347884
5950.0	4050.0	1018.4	942.2	76.3	1167.0	0.132468515	0.037138788	0.095329727
6550.0	5050.0	1103.9	994.3	109.6	1313.5	0.255412231	0.118388324	0.137023907
7750.0	3550.0	1098.1	1027.3	70.8	1364.9	0.235431854	0.146907903	0.088523951
6700.0	3700.0	1042.1	972.2	69.9	1237.3	0.163558583	0.076165012	0.087393571
6200.0	2200.0	961.5	924.6	36.9	1182.3	0.091818518	0.045631267	0.04618725
6700.0	5150.0	1118.1	1004.5	113.6	1335.0	0.27231653	0.130311704	0.142004826
7850.0	2450.0	1065.3	1016.6	48.7	1377.9	0.214955413	0.154090506	0.060864907
5900.0	5150.0	1076.3	965.5	110.8	1288.7	0.243081302	0.104618468	0.138462835
6150.0	2350.0	963.1	923.9	39.1	1177.0	0.09161159	0.042694497	0.048917093
8100.0	4500.0	1165.3	1067.2	98.1	1351.6	0.262183736	0.139513152	0.122670585
6600.0	3200.0	1015.8	958.3	57.6	1226.0	0.141833429	0.069890434	0.071942995
6400.0	3400.0	1012.8	951.6	61.3	1203.9	0.13419877	0.057591816	0.076606954
8200.0	3800.0	1137.8	1058.7	79.1	1424.2	0.278683975	0.179807381	0.098876594
7400.0	3500.0	1074.4	1006.4	68.0	1320.7	0.207395717	0.122364282	0.085031435
7600.0	5000.0	1161.6	1049.6	111.9	1374.4	0.292080157	0.152176093	0.139904065
8350.0	3350.0	1128.8	1059.9	68.9	1444.6	0.277266607	0.19109736	0.086169247
6300.0	2300.0	969.6	930.6	39.0	1193.0	0.100277215	0.05156899	0.048708225
6050.0	2750.0	970.2	924.4	45.9	1166.5	0.094226381	0.036885482	0.0573409
5800.0	4750.0	1047.8	950.9	96.9	1234.6	0.195811712	0.074665529	0.121146183
7150.0	5200.0	1146.6	1029.6	117.0	1369.5	0.295681875	0.149431534	0.14625034
6400.0	3750.0	1027.9	957.9	70.0	1203.9	0.145033435	0.057591816	0.087441619
5300.0	3100.0	946.1	896.0	50.1	1093.0	0.066521996	0.00389075	0.062631246
5250.0	2200.0	914.8	881.7	33.1	1088.4	0.04776388	0.006431163	0.041332717
5300.0	3700.0	970.9	906.5	64.4	1098.8	0.081201991	0.000681001	0.08052099
7850.0	2950.0	1081.3	1023.4	58.0	1377.9	0.2265476	0.154090506	0.072457094
6650.0	4700.0	1089.3	990.8	98.4	1277.8	0.221678698	0.098622816	0.123055882
5650.0	4950.0	1052.1	949.1	103.0	1250.4	0.212226909	0.083431259	0.12879565
7350.0	3550.0	1073.5	1004.4	69.0	1314.5	0.20519471	0.118935009	0.086259701
6150.0	3650.0	1010.2	943.8	66.4	1177.0	0.125665657	0.042694497	0.08297116
6150.0	5100.0	1085.8	975.9	109.9	1296.3	0.246247487	0.108874575	0.137372912
6500.0	3650.0	1028.8	961.0	67.8	1214.9	0.148459452	0.063699163	0.084760289
6400.0	3300.0	1008.8	949.8	59.0	1203.9	0.131289975	0.057591816	0.073698159
6500.0	4500.0	1070.2	978.6	91.6	1246.2	0.195591757	0.081087588	0.114504169
7900.0	2200.0	1061.5	1016.6	44.9	1384.4	0.213877178	0.157709645	0.056167533
5400.0	3250.0	956.5	902.7	53.8	1102.3	0.068540205	0.001257556	0.067282649
5650.0	2450.0	940.7	901.9	38.7	1126.2	0.062952536	0.014519419	0.048433117
5650.0	2250.0	935.0	899.5	35.4	1126.2	0.058803951	0.014519419	0.044284532
5450.0	2850.0	944.0	898.6	45.4	1107.0	0.060658658	0.003865342	0.056793316
5500.0	2150.0	925.1	891.8	33.3	1111.7	0.048083215	0.006495477	0.041587737
5300.0	2900.0	938.8	893.0	45.9	1093.0	0.061238474	0.00389075	0.057347724
5800.0	2300.0	943.7	906.9	36.8	1141.0	0.068796205	0.022742452	0.046053753
5550.0	2450.0	935.9	897.5	38.3	1116.5	0.05708245	0.009147906	0.047934543
5400.0	2150.0	920.4	887.5	32.9	1102.3	0.042352204	0.001257556	0.041094648
5550.0	2100.0	926.2	893.4	32.7	1116.5	0.050044803	0.009147906	0.040896897

5450.0	2350.0	928.2	891.9	36.3	1107.0	0.049187	0.003865342	0.045321658
5250.0	2100.0	912.1	880.6	31.5	1088.4	0.045857451	0.006431163	0.039426288
5450.0	2150.0	922.7	889.6	33.1	1107.0	0.045205641	0.003865342	0.041340299
5350.0	2150.0	918.0	885.3	32.7	1097.6	0.042178625	0.001327826	0.040850799
5350.0	2200.0	919.4	885.9	33.5	1097.6	0.043142032	0.001327826	0.041814207
5350.0	2150.0	918.0	885.3	32.7	1097.6	0.042178625	0.001327826	0.040850799
5300.0	2100.0	914.4	882.7	31.7	1093.0	0.043557599	0.00389075	0.039666849
5300.0	2100.0	914.4	882.7	31.7	1093.0	0.043557599	0.00389075	0.039666849
5400.0	2100.0	919.1	886.9	32.1	1102.3	0.041411019	0.001257556	0.040153463
5400.0	2100.0	919.1	886.9	32.1	1102.3	0.041411019	0.001257556	0.040153463
5350.0	**2100.0**	**916.7**	**884.8**	**31.9**	**1097.6**	**0.041237071**	**0.001327826**	**0.039909245**

VELOCITA' 40 m / min									
I3 [A]	I4 [A]	T1 [°C]	T2 [°C]	ΔT [°C]	Tmax [°C]	fobb	fobb1 = f (Tmax)	fobb2 = f (ΔT)	Deviaz. Standard
5250.0	2100.0	874.3	834.0	40.3	1055.1	0.075252515	0.024880804	0.024880804	2835
7250.0	3400.0	1015.4	935.8	79.6	1261.3	0.188925105	0.089471425	0.089471425	2835
5750.0	4300.0	980.4	883.5	96.8	1133.3	0.139471098	0.018443214	0.018443214	2835
6550.0	2600.0	949.4	892.5	56.9	1182.4	0.11676242	0.045667308	0.045667308	2835
5250.0	4450.0	966.4	867.2	99.2	1124.7	0.137719108	0.013672926	0.013672926	2835
7100.0	4900.0	1080.0	954.9	125.1	1273.8	0.252725587	0.096367258	0.096367258	2835
7550.0	2550.0	1002.6	940.1	62.5	1297.3	0.187539759	0.109430363	0.109430363	2835
5750.0	2350.0	903.0	855.7	47.3	1101.0	0.059722811	0.000544985	0.000544985	2835
6350.0	2150.0	926.5	879.0	47.5	1161.1	0.093197193	0.033883765	0.033883765	2835
6650.0	4750.0	1047.8	930.7	117.1	1230.2	0.218573801	0.072208216	0.072208216	2835
6950.0	2300.0	961.8	907.9	53.8	1226.6	0.137512613	0.070216828	0.070216828	2835
6950.0	3800.0	1015.9	927.5	88.5	1226.6	0.180826643	0.070216828	0.070216828	2835
5450.0	2500.0	894.0	845.5	48.5	1073.0	0.07556445	0.014971113	0.014971113	2835
7400.0	2650.0	997.1	933.6	63.4	1279.2	0.17864994	0.099363908	0.099363908	2835
6700.0	5100.0	1070.5	940.3	130.2	1273.8	0.259096067	0.096377666	0.096377666	2835
8050.0	3550.0	1068.1	979.3	88.8	1360.1	0.255250487	0.144212551	0.144212551	2835
5850.0	2700.0	918.3	863.6	54.7	1110.6	0.074272157	0.005889254	0.005889254	2835
7900.0	2300.0	1016.2	955.8	60.4	1340.9	0.209033192	0.133582692	0.133582692	2835
5850.0	2100.0	901.0	857.4	43.6	1110.6	0.06043178	0.005889254	0.005889254	2835
6550.0	5100.0	1062.9	933.5	129.3	1265.3	0.253322258	0.091651093	0.091651093	2835
8350.0	2850.0	1060.5	986.2	74.2	1399.3	0.258742698	0.165960901	0.165960901	2835
6050.0	4250.0	991.7	894.9	96.8	1143.7	0.145272686	0.024229905	0.024229905	2835
6050.0	3700.0	965.8	885.6	80.3	1130.4	0.117185917	0.016833724	0.016833724	2835
6900.0	4550.0	1050.0	938.4	111.6	1222.8	0.207606342	0.068073601	0.068073601	2835
5450.0	3550.0	932.1	859.2	72.9	1073.0	0.1060389	0.014971113	0.014971113	2835
8250.0	4650.0	1132.6	1009.1	123.5	1319.7	0.276172316	0.121856426	0.121856426	2835
7700.0	3100.0	1029.7	954.5	75.2	1315.8	0.213711776	0.119668571	0.119668571	2835
8200.0	2950.0	1054.5	979.2	75.3	1379.5	0.249157509	0.155006151	0.155006151	2835
7450.0	3400.0	1026.7	945.8	80.9	1285.2	0.203798123	0.102700171	0.102700171	2835
5750.0	2700.0	913.6	859.5	54.1	1101.0	0.068217061	0.000544985	0.000544985	2835
7850.0	3100.0	1038.6	962.3	76.3	1334.6	0.225409061	0.130076228	0.130076228	2835
7250.0	4900.0	1088.2	962.2	126.0	1282.9	0.258907841	0.101434078	0.101434078	2835
6850.0	2750.0	969.9	908.1	61.8	1215.3	0.141256934	0.063957968	0.063957968	2835
7550.0	4400.0	1078.0	967.4	110.6	1246.9	0.219752138	0.081459249	0.081459249	2835
6700.0	2200.0	945.7	895.2	50.5	1198.7	0.117836051	0.054721019	0.054721019	2835
6050.0	4450.0	1002.0	898.6	103.4	1164.4	0.164959184	0.035720461	0.035720461	2835
5750.0	5250.0	1033.8	902.9	130.9	1241.1	0.24182858	0.078224246	0.078224246	2835
7100.0	4050.0	1035.6	938.8	96.8	1243.8	0.200739553	0.079755047	0.079755047	2835
6550.0	2300.0	940.6	889.4	51.3	1182.4	0.109739308	0.045667308	0.045667308	2835
6000.0	5150.0	1039.1	910.9	128.3	1241.5	0.238837103	0.07848161	0.07848161	2835
7750.0	3500.0	1048.1	962.7	85.5	1322.0	0.229959693	0.123119078	0.123119078	2835
5750.0	3850.0	958.6	875.7	82.9	1089.4	0.109504074	0.00585542	0.00585542	2835
6800.0	3850.0	1010.2	921.2	89.0	1209.7	0.172108057	0.060858737	0.060858737	2835
5650.0	2650.0	907.5	855.0	52.5	1091.5	0.070399341	0.004713426	0.004713426	2835
6150.0	3500.0	962.1	886.7	75.4	1140.5	0.116662481	0.022433073	0.022433073	2835
8050.0	3550.0	1068.1	979.3	88.8	1360.1	0.255250487	0.144212551	0.144212551	2835
7800.0	3450.0	1049.1	964.6	84.5	1328.3	0.232227294	0.126588327	0.126588327	2835
6150.0	5000.0	1037.3	913.9	123.4	1231.4	0.227126909	0.072874232	0.072874232	2835
7300.0	2500.0	986.8	927.0	59.8	1267.3	0.167528927	0.092749456	0.092749456	2835
7000.0	5150.0	1089.2	955.4	133.8	1297.4	0.276664108	0.109446261	0.109446261	2835
6600.0	4950.0	1056.6	932.6	124.0	1250.3	0.238376443	0.083347507	0.083347507	2835
8250.0	2500.0	1043.2	976.7	66.5	1386.1	0.241752565	0.15863996	0.15863996	2296.35
6200.0	2200.0	920.3	873.0	47.4	1145.6	0.084472205	0.025264333	0.025264333	1860.0435
5500.0	3350.0	926.0	858.1	67.8	1077.6	0.097240829	0.012439202	0.012439202	1506.635235
7950.0	2300.0	1019.2	958.5	60.7	1347.2	0.213004396	0.137107629	0.137107629	1220.37454
6550.0	2150.0	936.6	887.9	48.7	1182.4	0.106545634	0.045667308	0.045667308	988.5033777
5850.0	2250.0	904.9	858.8	46.1	1110.6	0.063571955	0.005889254	0.005889254	800.6877359
6150.0	3350.0	956.0	884.5	71.5	1140.5	0.111775349	0.022433073	0.022433073	648.5570661
5950.0	3900.0	970.1	884.7	85.5	1104.4	0.109292669	0.002431942	0.002431942	525.3312235
5750.0	2650.0	912.0	858.9	53.1	1101.0	0.066932749	0.000544985	0.000544985	425.5182911
6500.0	2900.0	956.7	893.8	62.9	1177.0	0.121265025	0.042690431	0.042690431	344.6698158
5950.0	2350.0	912.4	863.9	48.5	1120.4	0.071940871	0.011318974	0.011318974	279.1825508
6100.0	2250.0	916.8	869.2	47.6	1135.4	0.079145489	0.019622852	0.019622852	226.1378661
5550.0	2550.0	899.9	849.9	50.0	1082.2	0.072378282	0.009885586	0.009885586	183.1716716
5800.0	2550.0	911.2	859.8	51.4	1105.8	0.067451876	0.003206412	0.003206412	148.369054

5850.0	2400.0	909.1	860.3	48.8	1110.6	0.066925819	0.005889254	0.005889254	120.1789337
5700.0	2250.0	898.0	852.7	45.3	1096.2	0.058703431	0.002094978	0.002094978	97.34493631
5600.0	2250.0	893.5	848.8	44.7	1086.8	0.063215273	0.007310311	0.007310311	78.84939841
5550.0	2300.0	892.6	847.3	45.3	1082.2	0.066539218	0.009885586	0.009885586	63.86801271
5750.0	2200.0	899.0	854.2	44.7	1101.0	0.056437734	0.000544985	0.000544985	51.7330903
5750.0	2200.0	899.0	854.2	44.7	1101.0	0.056437734	0.000544985	0.000544985	41.90380314
5750.0	2200.0	899.0	854.2	44.7	1101.0	0.056437734	0.000544985	0.000544985	33.94208054
5750.0	2200.0	899.0	854.2	44.7	1101.0	0.056437734	0.000544985	0.000544985	27.49308524
5750.0	2200.0	899.0	854.2	44.7	1101.0	0.056437734	0.000544985	0.000544985	22.26939904
5750.0	2200.0	899.0	854.2	44.7	1101.0	0.056437734	0.000544985	0.000544985	18.03821323
5750.0	2200.0	899.0	854.2	44.7	1101.0	0.056437734	0.000544985	0.000544985	14.61095271
5750.0	2200.0	899.0	854.2	44.7	1101.0	0.056437734	0.000544985	0.000544985	11.8348717
5800.0	2200.0	901.3	856.3	45.0	1105.8	0.059457634	0.003206412	0.003206412	9.586246075
5750.0	2200.0	899.0	854.2	44.7	1101.0	0.056437734	0.000544985	0.000544985	7.764859321
5750.0	2200.0	899.0	854.2	44.7	1101.0	0.056437734	0.000544985	0.000544985	6.28953605
5750.0	2200.0	899.0	854.2	44.7	1101.0	0.056437734	0.000544985	0.000544985	5.0945242
5750.0	2200.0	899.0	854.2	44.7	1101.0	0.056437734	0.000544985	0.000544985	4.126564602
5750.0	2200.0	899.0	854.2	44.7	1101.0	0.056437734	0.000544985	0.000544985	3.342517328
5750.0	2200.0	899.0	854.2	44.7	1101.0	0.056437734	0.000544985	0.000544985	2.707439036
5750.0	2200.0	899.0	854.2	44.7	1101.0	0.056437734	0.000544985	0.000544985	2.193025619
5750.0	2200.0	899.0	854.2	44.7	1101.0	0.056437734	0.000544985	0.000544985	1.776350751
5750.0	2200.0	899.0	854.2	44.7	1101.0	0.056437734	0.000544985	0.000544985	1.438844108
5750.0	2200.0	899.0	854.2	44.7	1101.0	0.056437734	0.000544985	0.000544985	1.165463728
5750.0	2200.0	899.0	854.2	44.7	1101.0	0.056437734	0.000544985	0.000544985	0.94402562
5750.0	2200.0	899.0	854.2	44.7	1101.0	0.056437734	0.000544985	0.000544985	0.764660752

VELOCITA' 45 m / min									
I3 [A]	I4 [A]	T1 [°C]	T2 [°C]	ΔT [°C]	Tmax [°C]	fobb	fobb1 = f (Tmax)	fobb2 = f (ΔT)	Deviaz. Standard
5250.0	2100.0	795.9	746.6	49.3	967.4	0.135151858	0.073527262	0.061624596	2835
6400.0	2400.0	854.2	790.6	63.5	1073.4	0.094129651	0.014737303	0.079392348	2835
6350.0	4250.0	921.7	809.6	112.2	1066.7	0.158700951	0.018455203	0.140245748	2835
7750.0	4000.0	982.5	866.5	116.0	1222.3	0.212821338	0.06783529	0.144986049	2835
6250.0	3850.0	898.7	800.2	98.5	1058.5	0.146201121	0.023022634	0.123178487	2835
6500.0	3900.0	912.8	810.7	102.1	1083.6	0.136705061	0.00911272	0.127592342	2835
5650.0	3400.0	853.4	772.4	81.0	1002.0	0.155527137	0.05432249	0.101204647	2835
6650.0	3200.0	891.9	808.3	83.5	1099.1	0.104929707	0.000525271	0.104404436	2835
5300.0	4700.0	898.9	778.3	120.6	1061.0	0.172322119	0.021620539	0.15070158	2835
7950.0	3750.0	983.0	872.8	110.2	1246.5	0.219045066	0.0812522	0.137792866	2835
6300.0	5100.0	964.2	821.0	143.2	1153.8	0.208778872	0.029825398	0.178953474	2835
6850.0	3650.0	919.4	821.9	97.5	1120.2	0.133048507	0.011203591	0.121844917	2835
6950.0	2200.0	876.3	811.8	64.5	1131.0	0.097837762	0.017186608	0.080651155	2835
6450.0	2500.0	859.4	793.5	65.9	1078.5	0.094302287	0.011935083	0.082367204	2835
5950.0	4800.0	931.6	802.7	128.9	1102.5	0.162441528	0.001361887	0.161079641	2835
6200.0	3700.0	890.0	796.3	93.6	1053.6	0.142792932	0.025743811	0.11704912	2835
6900.0	3800.0	928.2	825.9	102.3	1125.6	0.142100462	0.014185263	0.1279152	2835
5850.0	2500.0	831.7	770.5	61.1	1020.3	0.120614311	0.04421908	0.076395231	2835
7400.0	3500.0	942.1	844.1	98.0	1181.3	0.167615639	0.045074471	0.122541168	2835
7800.0	3850.0	978.7	866.9	111.8	1228.3	0.210942031	0.071161794	0.139780237	2835
6500.0	2800.0	870.9	798.2	72.7	1083.6	0.099963985	0.00911272	0.090851265	2835
7650.0	3550.0	957.8	856.1	101.7	1210.4	0.188364233	0.061238156	0.127126077	2835
5800.0	2750.0	837.0	771.0	66.0	1015.6	0.129300385	0.046776041	0.082524344	2835
5650.0	3350.0	851.5	771.8	79.6	1002.0	0.15383496	0.05432249	0.09951247	2835
6200.0	2900.0	859.9	787.3	72.5	1053.6	0.116402096	0.025743811	0.090658284	2835
7950.0	4400.0	1012.6	881.7	131.0	1246.5	0.244959123	0.0812522	0.163706923	2835
6750.0	4750.0	966.4	833.3	133.1	1139.3	0.18819728	0.02177157	0.16642571	2835
7000.0	4500.0	966.1	840.0	126.1	1127.4	0.172820822	0.015184064	0.157636758	2835
6450.0	4500.0	938.8	817.2	121.6	1096.8	0.15383213	0.001785292	0.152046838	2835
7200.0	3050.0	914.7	830.2	84.5	1158.6	0.13817176	0.032486438	0.105685322	2835
7650.0	2200.0	914.0	843.0	70.9	1210.4	0.149901219	0.061238156	0.088663063	2835
6300.0	3350.0	880.6	796.0	84.6	1063.4	0.126008156	0.020281126	0.10572703	2835
7050.0	4850.0	987.0	847.6	139.4	1167.1	0.211405094	0.037202531	0.174202562	2835
7300.0	4500.0	981.7	853.1	128.7	1145.0	0.185774584	0.024948552	0.160826032	2835
8300.0	3450.0	991.4	886.3	105.1	1290.1	0.236803434	0.105433799	0.131369636	2835
7650.0	2600.0	924.8	846.3	78.6	1210.4	0.15944716	0.061238156	0.098209004	2835
6900.0	3850.0	930.4	826.5	103.8	1125.6	0.143994787	0.014185263	0.129809525	2835
8050.0	4700.0	1033.6	891.1	142.5	1212.3	0.240407141	0.062283208	0.178123933	2835
6550.0	2650.0	868.6	798.8	69.8	1088.7	0.09354927	0.006270263	0.087279007	2835
5550.0	3050.0	836.2	765.1	71.2	993.2	0.148213577	0.059249378	0.088964199	2835
5400.0	4350.0	884.9	776.3	108.6	1029.6	0.174824005	0.03903398	0.135790025	2835
6200.0	2700.0	853.5	785.4	68.0	1053.6	0.110785204	0.025743811	0.085041392	2835
5450.0	3700.0	857.2	769.1	88.1	972.4	0.180833306	0.07074451	0.110088796	2835
5500.0	2100.0	806.1	755.0	51.1	988.8	0.125534432	0.061681487	0.063852945	2835
5700.0	3100.0	844.4	770.9	73.5	1006.5	0.143707483	0.051827785	0.091879699	2835
7000.0	2300.0	881.4	814.7	66.8	1136.4	0.103662783	0.02020757	0.083455213	2835
7250.0	3950.0	953.0	843.0	109.9	1164.2	0.173038002	0.035604615	0.137433387	2835
5900.0	5000.0	940.4	804.2	136.2	1122.1	0.182556514	0.012259163	0.170297351	2835
7250.0	4800.0	994.7	855.5	139.2	1173.4	0.214630494	0.04068797	0.173942524	2835
6450.0	5000.0	965.6	825.2	140.3	1150.3	0.203342967	0.027914003	0.175428964	2835
7100.0	2850.0	902.8	823.8	79.0	1147.4	0.125009203	0.026308117	0.098701086	2835
5900.0	3400.0	864.2	781.4	82.8	1024.9	0.145166573	0.041641445	0.103525128	2296.35
6300.0	3900.0	903.2	802.8	100.5	1063.4	0.145878368	0.020281126	0.125597242	1860.0435
7700.0	3500.0	958.6	857.9	100.8	1216.4	0.19049143	0.064527387	0.125964043	1506.635235
6900.0	4450.0	958.5	834.9	123.5	1116.6	0.163603755	0.009210405	0.154393351	1220.37454
6200.0	2350.0	843.4	782.4	60.9	1053.6	0.10190807	0.025743811	0.076164259	988.5033777
6600.0	2350.0	862.5	798.3	64.2	1093.9	0.083696347	0.003407764	0.080288583	800.6877359
6850.0	2100.0	868.7	806.8	61.9	1120.2	0.088603353	0.011203591	0.077399762	648.5570661
7200.0	2200.0	889.4	822.6	66.8	1158.6	0.115933763	0.032486438	0.083447325	525.3312235
6750.0	2750.0	881.6	807.9	73.7	1109.6	0.097394585	0.005299487	0.092095098	425.5182911
6450.0	2500.0	859.4	793.5	65.9	1078.5	0.094302287	0.011935083	0.082367204	344.6698158
6400.0	2550.0	858.4	791.9	66.5	1073.4	0.097855044	0.014737303	0.08311774	279.1825508
6750.0	2550.0	875.6	806.1	69.4	1109.6	0.092093955	0.005299487	0.086794468	226.1378661
6550.0	2300.0	858.7	795.9	62.9	1088.7	0.084865643	0.006270263	0.07859538	183.1716716

6600.0	2400.0	863.9	798.7	65.2	1093.9	0.08488697	0.003407764	0.081479206	148.369054
6650.0	2500.0	869.1	801.6	67.6	1099.1	0.084988912	0.000525271	0.084463641	120.1789337
6650.0	2250.0	862.4	799.6	62.8	1099.1	0.079037941	0.000525271	0.07851267	97.34493631
6550.0	2150.0	854.9	794.7	60.2	1088.7	0.08151589	0.006270263	0.075245627	78.84939841
6650.0	2300.0	863.7	799.9	63.7	1099.1	0.080178587	0.000525271	0.079653315	63.86801271
6650.0	2250.0	862.4	799.6	62.8	1099.1	0.079037941	0.000525271	0.07851267	51.7330903
6600.0	2200.0	858.6	797.1	61.5	1093.9	0.080273259	0.003407764	0.076865495	41.90380314
6650.0	2250.0	862.4	799.6	62.8	1099.1	0.079037941	0.000525271	0.07851267	33.94208054
6650.0	2200.0	861.1	799.2	61.9	1099.1	0.077922108	0.000525271	0.077396837	27.49308524
6700.0	2200.0	863.6	801.2	62.3	1104.3	0.080308535	0.002377163	0.077931371	22.26939904
6650.0	2200.0	861.1	799.2	61.9	1099.1	0.077922108	0.000525271	0.077396837	18.03821323
6650.0	2200.0	861.1	799.2	61.9	1099.1	0.077922108	0.000525271	0.077396837	14.61095271
6650.0	2200.0	861.1	799.2	61.9	1099.1	0.077922108	0.000525271	0.077396837	11.8348717
6650.0	2200.0	861.1	799.2	61.9	1099.1	0.077922108	0.000525271	0.077396837	9.586246075
6650.0	2200.0	861.1	799.2	61.9	1099.1	0.077922108	0.000525271	0.077396837	7.764859321
6650.0	2200.0	861.1	799.2	61.9	1099.1	0.077922108	0.000525271	0.077396837	6.28953605
6650.0	2200.0	861.1	799.2	61.9	1099.1	0.077922108	0.000525271	0.077396837	5.0945242
6650.0	2200.0	861.1	799.2	61.9	1099.1	0.077922108	0.000525271	0.077396837	4.126564602
6650.0	2200.0	861.1	799.2	61.9	1099.1	0.077922108	0.000525271	0.077396837	3.342517328
6650.0	2200.0	861.1	799.2	61.9	1099.1	0.077922108	0.000525271	0.077396837	2.707439036
6650.0	2200.0	861.1	799.2	61.9	1099.1	0.077922108	0.000525271	0.077396837	2.193025619
6650.0	2200.0	861.1	799.2	61.9	1099.1	0.077922108	0.000525271	0.077396837	1.776350751
6650.0	2200.0	861.1	799.2	61.9	1099.1	0.077922108	0.000525271	0.077396837	1.438844108
6650.0	2200.0	861.1	799.2	61.9	1099.1	0.077922108	0.000525271	0.077396837	1.165463728
6650.0	2200.0	861.1	799.2	61.9	1099.1	0.077922108	0.000525271	0.077396837	0.94402562
6650.0	2200.0	861.1	799.2	61.9	1099.1	0.077922108	0.000525271	0.077396837	0.764660752

VELOCITA' 50 m / min									
I3 [A]	I4 [A]	T1 [°C]	T2 [°C]	ΔT [°C]	Tmax [°C]	fobb	fobb1 = f (Tmax)	fobb2 = f (ΔT)	Deviaz. Standard
5250	2100	790.8345214	781.1608764	9.673645039	914.2492295	0.225417824	0.135091469	0.090326355	2835
6600	3300	877.3887314	861.8058159	15.58291555	1009.415613	0.150296638	0.065879554	0.084417084	2835
6000	2100	821.439964	811.4193939	10.0205701	964.5400154	0.188495782	0.098516352	0.08997943	2835
8100	3900	974.3936331	954.6119876	19.78164554	1139.202082	0.10872896	0.028510605	0.080218354	2835
7200	3000	898.5826838	884.2271322	14.35555156	1058.351418	0.115934326	0.030289878	0.085644448	2835
6300	3900	882.6226236	863.6880145	18.9346091	986.4661297	0.163635478	0.082570088	0.081065391	2835
6900	3300	891.8597079	876.1307038	15.72900411	1033.380333	0.132721663	0.048450667	0.084270996	2835
8400	5100	1038.513724	1010.107516	28.40620804	1175.32333	0.126374396	0.054780604	0.071593792	2835
6300	2700	847.5497256	835.0332629	12.5164627	986.4661297	0.170053625	0.082570088	0.087483537	2835
6300	3000	855.1354994	841.2285919	13.90690759	986.4661297	0.16866318	0.082570088	0.086093092	2835
5700	4800	891.3573853	866.3635462	24.99383909	1007.981733	0.141928537	0.066922376	0.075006161	2835
8400	4200	1002.224839	980.3770748	21.84776467	1168.093482	0.127674767	0.049522532	0.078152235	2835
6900	4200	921.5983768	900.443752	21.15462481	1022.701886	0.135062185	0.05621681	0.078845375	2835
7800	4200	968.3077858	946.7411965	21.56658928	1111.273224	0.086632119	0.008198708	0.078433411	2835
6600	3900	896.4688108	877.3999819	19.06882887	1009.415613	0.146810725	0.065879554	0.080931171	2835
7500	4800	975.7767296	950.0658902	25.71083941	1098.369433	0.075475027	0.001185867	0.074289161	2835
6600	2400	854.6694219	843.2480028	11.42141911	1009.415613	0.154458135	0.065879554	0.088578581	2835
6900	2400	869.178477	857.601373	11.57710391	1033.380333	0.136873563	0.048450667	0.088422896	2835
8100	5100	1021.376985	993.0878846	28.28910005	1156.938468	0.113120695	0.041409795	0.0717109	2835
6900	4500	933.0640743	909.8234349	23.24063945	1043.505779	0.117846067	0.041086706	0.076759361	2835
8100	3300	955.5023299	939.1585788	16.34375106	1139.202082	0.112166854	0.028510605	0.083656249	2835
7800	4200	968.3077858	946.7411965	21.56658928	1111.273224	0.086632119	0.008198708	0.078433411	2835
8100	3000	947.2204906	932.386813	14.83367758	1139.202082	0.113676928	0.028510605	0.085166322	2835
7500	3600	931.6464736	913.9555922	17.69088142	1084.319211	0.093713329	0.01140421	0.082309119	2835
6300	4500	904.8578679	881.8689759	22.98889196	1013.308856	0.140059213	0.063048105	0.077011108	2835
6600	3600	886.5373164	869.2819093	17.25540712	1009.415613	0.148624147	0.065879554	0.082744593	2835
6900	3600	900.9925037	883.5950259	17.39747782	1033.380333	0.131053189	0.048450667	0.082602522	2835
6600	4200	907.1797891	886.1578419	21.0219472	1007.264212	0.146422263	0.06744421	0.078978053	2835
6300	2700	847.5497256	835.0332629	12.5164627	986.4661297	0.170053625	0.082570088	0.087483537	2835
7800	3600	947.8263931	929.9851112	17.84128191	1111.273224	0.090357426	0.008198708	0.082158718	2835
7200	2400	884.2753218	872.5384128	11.73690909	1058.351418	0.118552969	0.030289878	0.088263091	2835
5700	4800	891.3573853	866.3635462	24.99383909	1007.981733	0.141928537	0.066922376	0.075006161	2835
5400	4500	867.0429198	844.4068034	22.63611632	972.8537772	0.169833864	0.09246998	0.077363884	2835
8400	4200	1002.224839	980.3770748	21.84776467	1168.093482	0.127674767	0.049522532	0.078152235	2835
5700	3600	846.7583235	829.9055825	16.85274102	943.6447126	0.196860195	0.113712936	0.083147259	2835
6600	2700	861.4522154	848.7872126	12.66500284	1009.415613	0.153214551	0.065879554	0.087334997	2835
6900	5100	958.2994712	930.4797049	27.81976632	1089.331653	0.079939031	0.007758797	0.072180234	2835
7200	3900	925.9273936	906.5803944	19.34699924	1058.351418	0.110942879	0.030289878	0.080653001	2835
6600	5100	943.9494714	916.2445144	27.70495697	1073.964936	0.091229635	0.018934592	0.072295043	2835
8400	3300	972.802135	956.2995231	16.50261183	1168.093482	0.13301992	0.049522532	0.083497388	2835
6900	3300	891.8597079	876.1307038	15.72900411	1033.380333	0.132721663	0.048450667	0.084270996	2835
5400	4200	855.4850121	834.9588528	20.52615928	951.9551815	0.1871428	0.107668959	0.079473841	2835
7200	5100	973.2269108	945.2908032	27.93610764	1105.321998	0.075934437	0.003870544	0.072063892	2835
6000	3600	859.412719	842.4300655	16.98265354	964.5400154	0.181533699	0.098516352	0.083017346	2835
6600	4200	907.1797891	886.1578419	21.0219472	1007.264212	0.146422263	0.06744421	0.078978053	2835
6900	3600	900.9925037	883.5950259	17.39747782	1033.380333	0.131053189	0.048450667	0.082602522	2835
8400	4800	1025.66246	999.5743581	26.08810193	1151.864647	0.111631641	0.037719743	0.073911898	2835
6900	3000	883.5113012	869.3091622	14.20213899	1033.380333	0.134248528	0.048450667	0.085797861	2835
8400	4200	1002.224839	980.3770748	21.84776467	1168.093482	0.127674767	0.049522532	0.078152235	2835
7500	3000	914.2312602	899.7190019	14.51225829	1084.319211	0.096891952	0.01140421	0.085487742	2835
6900	3900	910.9065585	891.7001213	19.20643721	1033.380333	0.12924423	0.048450667	0.080793563	2835
6600	3600	886.5373164	869.2819093	17.25540712	1009.415613	0.148624147	0.065879554	0.082744593	2296.35
5700	4200	867.4971629	846.8530787	20.64408417	964.8017924	0.177681885	0.098325969	0.079355916	1860.0435
6900	4500	933.0640743	909.8234349	23.24063945	1043.505779	0.117846067	0.041086706	0.076759361	1506.635235
7200	4800	960.2531718	934.6670069	25.58616486	1081.735553	0.08769707	0.013283234	0.074413835	1220.37454
7800	5100	1004.77606	976.6047352	28.17132453	1139.135758	0.100291045	0.02846237	0.071828675	988.5033777
7800	3000	930.447334	915.775537	14.67179701	1111.273224	0.093526911	0.008198708	0.085328203	800.6877359
6600	5100	943.9494714	916.2445144	27.70495697	1073.964936	0.091229635	0.018934592	0.072295043	648.5570661
8100	5100	1021.376985	993.0878846	28.28910005	1156.938468	0.113120695	0.041409795	0.0717109	525.3312235
7800	3900	957.6811113	938.0460038	19.63510746	1111.273224	0.088563601	0.008198708	0.080364893	425.5182911
7200	4500	948.0421934	924.6719994	23.37019395	1059.54873	0.106048912	0.029419106	0.076629806	344.6698158
7500	5100	988.7224509	960.6689784	28.05347246	1121.926694	0.087893214	0.015946687	0.071946528	279.1825508
7200	5100	973.2269108	945.2908032	27.93610764	1105.321998	0.075934437	0.003870544	0.072063892	226.1378661
7200	5100	973.2269108	945.2908032	27.93610764	1105.321998	0.075934437	0.003870544	0.072063892	183.1716716
7500	4500	963.5915708	940.0900049	23.5015659	1076.209359	0.093800719	0.017302285	0.076498434	148.369054

7500	4800	975.7767296	950.0658902	25.71083941	1098.369433	0.075475027	0.001185867	0.074289161	120.1789337
7500	5100	988.7224509	960.6689784	28.05347246	1121.926694	0.087893214	0.015946687	0.071946528	97.34493631
7500	4800	975.7767296	950.0658902	25.71083941	1098.369433	0.075475027	0.001185867	0.074289161	78.84939841
7500	4800	975.7767296	950.0658902	25.71083941	1098.369433	0.075475027	0.001185867	0.074289161	63.86801271
7500	4800	975.7767296	950.0658902	25.71083941	1098.369433	0.075475027	0.001185867	0.074289161	51.7330903
7500	4800	975.7767296	950.0658902	25.71083941	1098.369433	0.075475027	0.001185867	0.074289161	41.90380314
7500	4800	975.7767296	950.0658902	25.71083941	1098.369433	0.075475027	0.001185867	0.074289161	33.94208054
7500	4800	975.7767296	950.0658902	25.71083941	1098.369433	0.075475027	0.001185867	0.074289161	27.49308524
7500	4800	975.7767296	950.0658902	25.71083941	1098.369433	0.075475027	0.001185867	0.074289161	22.26939904
7500	4800	975.7767296	950.0658902	25.71083941	1098.369433	0.075475027	0.001185867	0.074289161	18.03821323
7500	4800	975.7767296	950.0658902	25.71083941	1098.369433	0.075475027	0.001185867	0.074289161	14.61095271
7500	4800	975.7767296	950.0658902	25.71083941	1098.369433	0.075475027	0.001185867	0.074289161	11.8348717
7500	4800	975.7767296	950.0658902	25.71083941	1098.369433	0.075475027	0.001185867	0.074289161	9.586246075
7500	4800	975.7767296	950.0658902	25.71083941	1098.369433	0.075475027	0.001185867	0.074289161	7.764859321
7500	**4800**	**975.7767296**	**950.0658902**	**25.71083941**	**1098.369433**	**0.075475027**	**0.001185867**	**0.074289161**	**6.28953605**

VELOCITA' 55 m / min ; pto di partenza (8400,5250)									
I3 [A]	I4 [A]	T1 [°C]	T2 [°C]	ΔT [°C]	Tmax [°C]	fobb	fobb1 = f (Tmax)	fobb2 = f (ΔT)	Deviaz. Standard
8400	5250	950.9	750.6	200.3	1145.3	0.275469297	0.025100954	0.250368343	2835
7000	4600	847.0	691.6	155.3	998.9	0.250219579	0.056038411	0.194181167	2835
7650	3100	821.1	703.5	117.6	1060.5	0.168887376	0.021895875	0.1469915	2835
8400	5150	945.7	749.6	196.2	1134.9	0.264550421	0.019331702	0.245218719	2835
6800	3850	805.8	678.5	127.2	973.6	0.229124004	0.07010491	0.159019094	2835
6550	2750	757.7	663.1	94.6	949.8	0.201525106	0.08327511	0.118249996	2835
5800	3350	744.4	643.7	100.6	883.7	0.245777176	0.119971359	0.125805816	2835
5600	4250	771.2	644.9	126.3	899.0	0.269288846	0.111440618	0.157848227	2835
6150	4250	793.4	660.9	132.4	924.3	0.262942861	0.097431908	0.165510953	2835
6750	3850	803.4	676.9	126.6	968.8	0.231000936	0.072776077	0.158224859	2835
7450	2300	789.1	691.8	97.3	1039.2	0.155311912	0.03371011	0.121601802	2835
6300	5150	842.3	674.0	168.3	1017.1	0.256347475	0.045981358	0.210366118	2835
7600	3600	835.4	705.0	130.4	1055.1	0.187889299	0.024876269	0.16301303	2835
5350	5250	809.7	647.5	162.1	984.5	0.266706306	0.064034958	0.202671348	2835
7450	4600	868.9	707.6	161.3	1023.9	0.243830219	0.042188984	0.201641235	2835
6950	2550	770.8	675.3	95.4	988.2	0.181253103	0.061980584	0.119272519	2835
8350	3300	865.1	732.1	133.0	1139.1	0.187963483	0.021678569	0.166284914	2835
7750	4750	891.2	720.1	171.1	1055.4	0.238540384	0.024705736	0.213834648	2835
5650	5200	818.4	655.2	163.1	992.1	0.263734686	0.059821314	0.203913372	2835
6050	4800	814.3	662.9	151.4	969.9	0.261360883	0.072131441	0.189229442	2835
6750	3800	801.5	676.5	125.0	968.8	0.229066048	0.072776077	0.156289971	2835
8050	3500	855.5	721.5	134.0	1104.7	0.170106227	0.002584715	0.167521511	2835
7550	2950	811.4	698.9	112.5	1049.8	0.168477892	0.027838802	0.14063909	2835
7750	3350	834.4	708.9	125.5	1071.4	0.172791419	0.015881687	0.156909732	2835
8250	2900	847.1	725.6	121.5	1127.5	0.167165489	0.015244922	0.151920567	2835
6250	2850	747.3	654.1	93.2	922.4	0.21497946	0.09846318	0.116516281	2835
7100	3750	816.1	688.1	128.0	1003.2	0.213742262	0.053690774	0.160051488	2835
6950	2100	760.2	673.3	86.9	988.2	0.170612715	0.061980584	0.10863213	2835
7000	3100	788.8	680.2	108.7	993.2	0.195104057	0.059235652	0.135868405	2835
8100	2350	824.4	716.8	107.6	1110.3	0.140262444	0.005723749	0.134538695	2835
7100	4250	836.2	692.0	144.2	973.1	0.250594173	0.070368536	0.180225637	2835
8200	4650	910.4	736.7	173.8	1073.2	0.232041563	0.014844223	0.21719734	2835
5450	2150	697.2	627.3	69.9	855.4	0.222980935	0.135631996	0.087348939	2835
6500	4450	817.2	673.6	143.6	959.1	0.257621264	0.078116103	0.179505161	2835
7350	2250	782.9	688.0	95.0	1028.8	0.158218321	0.039509452	0.118708869	2835
7750	4000	858.4	713.6	144.8	1071.4	0.196836411	0.015881687	0.180954724	2835
8150	3850	873.8	728.0	145.8	1116.0	0.191161634	0.008880163	0.182281472	2835
8150	3050	846.1	722.5	123.6	1116.0	0.163420193	0.008880163	0.15454003	2835
5350	4350	766.1	638.9	127.2	897.0	0.271504845	0.112556952	0.158947893	2835
5700	2300	710.3	635.0	75.3	875.4	0.218690081	0.124541638	0.094148443	2835
6800	2200	755.3	668.6	86.7	973.6	0.178473462	0.07010491	0.108368552	2835
5900	2500	723.2	641.7	81.5	892.0	0.217183014	0.115324723	0.101858291	2835
6350	3250	764.0	659.7	104.3	931.4	0.223909236	0.093475556	0.13043368	2835
6150	3850	777.0	657.7	119.3	913.6	0.252469152	0.103375419	0.149093733	2835
8050	2300	820.5	714.6	105.9	1104.7	0.135016138	0.002584715	0.132431422	2835
7750	3300	832.8	708.6	124.2	1071.4	0.171114696	0.015881687	0.15523301	2835
7900	2100	808.0	707.9	100.2	1087.9	0.131935077	0.006727596	0.12520748	2835
6150	4600	809.0	664.0	144.9	955.7	0.261213469	0.080042454	0.181171015	2835
6900	4150	822.5	684.3	138.2	953.8	0.253812994	0.081071884	0.17274111	2835
6800	3900	807.7	678.9	128.8	973.6	0.231083129	0.07010491	0.160978218	2835
7350	4600	863.9	704.0	160.0	1018.3	0.245283995	0.045333429	0.199950566	2835
7550	2350	795.4	695.7	99.6	1049.8	0.152376853	0.027838802	0.124538051	2296.35
7500	3350	821.6	699.6	122.0	1044.5	0.183283399	0.03078343	0.152499969	1860.0435
6700	2650	761.7	667.4	94.3	964.0	0.193296745	0.075428714	0.117868031	1506.635235
8250	3950	883.2	732.7	150.4	1127.5	0.20328851	0.015244922	0.188043588	1220.37454
7450	3000	807.8	695.5	112.3	1039.2	0.174106635	0.03371011	0.140396525	988.5033777
8200	2950	845.9	723.9	122.0	1121.7	0.164507249	0.012053904	0.152453344	800.6877359
8350	2300	837.0	726.5	110.5	1139.1	0.1597719	0.021678569	0.138093331	648.5570661
7350	2300	784.1	688.2	95.9	1028.8	0.159373011	0.039509452	0.11986356	525.3312235
7800	2500	812.0	705.9	106.2	1076.8	0.145543331	0.012847984	0.132695347	425.5182911
8000	2350	819.0	712.9	106.1	1099.0	0.133215772	0.000536887	0.132678885	344.6698158
8000	2100	813.4	711.8	101.6	1099.0	0.127589421	0.000536887	0.127052534	279.1825508
8000	2300	817.8	712.6	105.2	1099.0	0.132040297	0.000536887	0.13150341	226.1378661
8000	2150	814.5	712.0	102.5	1099.0	0.128664461	0.000536887	0.128127574	183.1716716
7950	2100	810.7	709.8	100.9	1093.4	0.129768718	0.003641007	0.126127711	148.369054

7800	2100	802.7	704.0	98.7	1076.8	0.136228897	0.012847984	0.123380913	120.1789337
8050	2300	820.5	714.6	105.9	1104.7	0.135016138	0.002584715	0.132431422	97.34493631
8000	2150	814.5	712.0	102.5	1099.0	0.128664461	0.000536887	0.128127574	78.84939841
8050	2250	819.4	714.4	105.0	1104.7	0.133866109	0.002584715	0.131281393	63.86801271
8100	2200	821.0	716.1	104.9	1110.3	0.136813451	0.005723749	0.131089702	51.7330903
7950	2100	810.7	709.8	100.9	1093.4	0.129768718	0.003641007	0.126127711	41.90380314
7950	2100	810.7	709.8	100.9	1093.4	0.129768718	0.003641007	0.126127711	33.94208054
8000	2150	814.5	712.0	102.5	1099.0	0.128664461	0.000536887	0.128127574	27.49308524
7950	2100	810.7	709.8	100.9	1093.4	0.129768718	0.003641007	0.126127711	22.26939904
8000	2100	813.4	711.8	101.6	1099.0	0.127589421	0.000536887	0.127052534	18.03821323
8000	2100	813.4	711.8	101.6	1099.0	0.127589421	0.000536887	0.127052534	14.61095271
8000	2100	813.4	711.8	101.6	1099.0	0.127589421	0.000536887	0.127052534	11.8348717
8000	2100	813.4	711.8	101.6	1099.0	0.127589421	0.000536887	0.127052534	9.586246075
8000	2100	813.4	711.8	101.6	1099.0	0.127589421	0.000536887	0.127052534	7.764859321
8000	2100	813.4	711.8	101.6	1099.0	0.127589421	0.000536887	0.127052534	6.28953605
8000	2100	813.4	711.8	101.6	1099.0	0.127589421	0.000536887	0.127052534	5.0945242
8000	2100	813.4	711.8	101.6	1099.0	0.127589421	0.000536887	0.127052534	4.126564602
8000	2100	813.4	711.8	101.6	1099.0	0.127589421	0.000536887	0.127052534	3.342517328
8000	2100	813.4	711.8	101.6	1099.0	0.127589421	0.000536887	0.127052534	2.707439036
8000	2100	813.4	711.8	101.6	1099.0	0.127589421	0.000536887	0.127052534	2.193025619
8000	2100	813.4	711.8	101.6	1099.0	0.127589421	0.000536887	0.127052534	1.776350751
8000	2100	813.4	711.8	101.6	1099.0	0.127589421	0.000536887	0.127052534	1.438844108
8000	2100	813.4	711.8	101.6	1099.0	0.127589421	0.000536887	0.127052534	1.165463728
8000	2100	813.4	711.8	101.6	1099.0	0.127589421	0.000536887	0.127052534	0.94402562
8000	**2100**	**813.4**	**711.8**	**101.6**	**1099.0**	**0.127589421**	**0.000536887**	**0.127052534**	**0.764660752**

VELOCITA' 55 m / min ; pto di partenza (5250,2100)									
I3 [A]	I4 [A]	T1 [°C]	T2 [°C]	ΔT [°C]	Tmax [°C]	fobb	fobb1 = f (Tmax)	fobb2 = f (ΔT)	Deviaz. Standard
5250	2100	688.7	621.8	66.9	840.0	0.227810785	0.144157851	0.083652933	2835
7600	2700	806.9	699.4	107.5	1055.1	0.159251144	0.024876269	0.134374875	2835
5800	2400	716.6	638.3	78.4	883.7	0.217913838	0.119971359	0.097942478	2835
8250	2500	836.3	723.5	112.8	1127.5	0.15627786	0.015244922	0.141032938	2835
6050	2500	729.4	646.1	83.2	904.9	0.21223045	0.108212044	0.104018406	2835
7650	2650	808.1	701.0	107.1	1060.5	0.155805061	0.021895875	0.133909186	2835
7500	4250	855.9	706.4	149.6	1044.5	0.21773564	0.03078343	0.18695221	2835
5750	3800	758.7	645.5	113.2	868.9	0.269612593	0.128129096	0.141483497	2835
5300	2250	693.9	623.8	70.1	843.8	0.229693301	0.142055344	0.087637957	2835
5300	4000	749.5	634.7	114.8	865.3	0.273631781	0.13017133	0.143460452	2835
8250	5000	929.9	742.0	187.9	1110.2	0.240584587	0.005668475	0.234916112	2835
5800	3150	737.8	642.4	95.3	883.7	0.239154526	0.119971359	0.119183167	2835
6800	3350	787.6	675.0	112.6	973.6	0.210897385	0.07010491	0.140792475	2835
7850	3250	836.4	712.1	124.3	1082.3	0.165176077	0.009796605	0.155379472	2835
5900	2700	728.5	642.7	85.7	892.0	0.2224914	0.115324723	0.107166677	2835
7350	3250	810.7	693.5	117.3	1028.8	0.186083557	0.039509452	0.146574106	2835
7350	4550	861.6	703.5	158.1	1013.6	0.245546143	0.047890806	0.197655337	2835
7400	3150	810.0	694.6	115.4	1034.0	0.180816092	0.036618798	0.144197294	2835
5950	4200	782.9	654.5	128.4	910.6	0.265553082	0.105044006	0.160509077	2835
5700	3050	730.7	639.0	91.7	875.4	0.239179735	0.124541638	0.114638097	2835
5900	3300	746.7	646.3	100.4	892.0	0.240840586	0.115324723	0.125515863	2835
6550	3550	783.2	668.1	115.1	949.8	0.227125121	0.08327511	0.143850011	2835
5550	3250	731.2	636.0	95.2	863.3	0.250283488	0.131253457	0.119030031	2835
7400	4550	864.1	705.3	158.8	1016.5	0.24482196	0.046322862	0.198499097	2835
7800	2900	822.9	708.0	114.9	1076.8	0.156462145	0.012847984	0.143614161	2835
5750	2100	707.8	635.5	72.3	879.5	0.212608601	0.122266056	0.090342545	2835
7250	2100	774.7	683.7	90.9	1018.4	0.158911606	0.045236492	0.113675114	2835
5700	2650	719.1	636.7	82.4	875.4	0.227542993	0.124541638	0.103001355	2835
6750	2600	762.7	668.8	93.9	968.8	0.190108259	0.072776077	0.117332182	2835
7250	4600	859.0	700.4	158.6	1012.6	0.246718406	0.048439898	0.198278508	2835
7650	3350	829.2	705.1	124.1	1060.5	0.177027715	0.021895875	0.15513184	2835
8150	4500	900.9	733.3	167.5	1116.0	0.218317452	0.008880163	0.209437289	2835
7850	2600	817.2	708.3	108.9	1082.3	0.145978943	0.009796605	0.136182338	2835
6200	2550	737.0	651.0	86.0	918.0	0.208443774	0.100928737	0.107515037	2835
7100	5050	873.5	699.4	174.1	1048.1	0.24634561	0.028762064	0.217583546	2835
5500	2150	699.1	628.7	70.4	859.3	0.2214673	0.133452342	0.088014958	2835
7700	3750	846.1	709.8	136.3	1065.9	0.189224973	0.018897666	0.170327307	2835
7250	2700	789.2	686.6	102.6	1018.4	0.173530343	0.045236492	0.128293851	2835
6150	3900	779.0	658.1	120.8	895.4	0.264525827	0.113466683	0.151059144	2835
6200	3050	751.2	653.7	97.4	918.0	0.222708333	0.100928737	0.121779596	2835
5400	4150	759.3	638.6	120.8	881.9	0.271911616	0.120954341	0.150957275	2835
7000	3500	802.2	682.8	119.4	993.2	0.208475823	0.059235652	0.149240171	2835
6900	2950	779.5	675.8	103.7	983.3	0.194333557	0.064707129	0.129626429	2835
8050	4450	893.3	729.0	164.3	1104.7	0.207968064	0.002584715	0.205383348	2835
8250	2150	828.1	721.9	106.3	1127.5	0.148062774	0.015244922	0.132817852	2835
6900	5200	871.7	694.0	177.7	1052.9	0.248225297	0.02614345	0.222081847	2835
5700	2600	717.8	636.4	81.3	875.4	0.22620222	0.124541638	0.101660582	2835
6450	2950	759.0	661.0	98.0	940.6	0.210913476	0.088412784	0.122500692	2835
7700	2600	809.4	702.6	106.8	1065.9	0.152371718	0.018897666	0.133474052	2835
6750	3250	781.9	672.6	109.3	968.8	0.209422283	0.072776077	0.136646207	2835
6650	2250	749.5	663.8	85.7	959.2	0.185159906	0.078062787	0.107097119	2835
8350	4850	928.1	744.6	183.5	1101.7	0.230333075	0.00092231	0.229410766	2296.35
6100	2700	736.7	648.7	88.0	909.2	0.215856717	0.105803197	0.11005352	1860.0435
8050	3950	872.3	724.8	147.5	1104.7	0.186941512	0.002584715	0.184356797	1506.635235
8250	4150	891.3	734.3	156.9	1127.5	0.211395712	0.015244922	0.19615079	1220.37454
6900	4150	822.5	684.3	138.2	953.8	0.253812994	0.081071884	0.17274111	988.5033777
7700	2850	816.2	703.9	112.3	1065.9	0.159262751	0.018897666	0.140365085	800.6877359
6800	2750	769.1	671.3	97.8	973.6	0.192320771	0.07010491	0.12221586	648.5570661
8200	2550	834.8	721.7	113.1	1121.7	0.153416584	0.012053904	0.14136268	525.3312235
8100	3500	858.2	723.5	134.8	1110.3	0.174166339	0.005723749	0.16844259	425.5182911
7750	2350	805.7	703.2	102.5	1071.4	0.143991097	0.015881687	0.12810941	344.6698158
7850	2600	817.2	708.3	108.9	1082.3	0.145978943	0.009796605	0.136182338	279.1825508
7550	2400	796.6	696.0	100.6	1049.8	0.153580599	0.027838802	0.125741797	226.1378661
8100	2500	828.1	717.5	110.6	1110.3	0.143936965	0.005723749	0.138213216	183.1716716
8150	2500	830.8	719.5	111.3	1116.0	0.148028854	0.008880163	0.139148691	148.369054

8150	2600	833.4	720.0	113.4	1116.0	0.150602816	0.008880163	0.141722653	120.1789337
8100	2400	825.6	717.0	108.6	1110.3	0.141462244	0.005723749	0.135738495	97.34493631
8050	2400	822.9	715.0	107.8	1104.7	0.137391425	0.002584715	0.13480671	78.84939841
8000	2450	821.4	713.3	108.1	1099.0	0.135641938	0.000536887	0.135105052	63.86801271
8100	2450	826.8	717.3	109.6	1110.3	0.142687089	0.005723749	0.13696334	51.7330903
8050	2400	822.9	715.0	107.8	1104.7	0.137391425	0.002584715	0.13480671	41.90380314
8050	2450	824.1	715.3	108.8	1104.7	0.138616657	0.002584715	0.136031942	33.94208054
8000	2450	821.4	713.3	108.1	1099.0	0.135641938	0.000536887	0.135105052	27.49308524
7950	2450	818.7	711.4	107.3	1093.4	0.137823706	0.003641007	0.134182698	22.26939904
8000	2400	820.2	713.1	107.1	1099.0	0.134416324	0.000536887	0.133879437	18.03821323
8000	2400	820.2	713.1	107.1	1099.0	0.134416324	0.000536887	0.133879437	14.61095271
8000	2400	820.2	713.1	107.1	1099.0	0.134416324	0.000536887	0.133879437	11.8348717
8000	2400	820.2	713.1	107.1	1099.0	0.134416324	0.000536887	0.133879437	9.586246075
8000	2400	820.2	713.1	107.1	1099.0	0.134416324	0.000536887	0.133879437	7.764859321
8000	2400	820.2	713.1	107.1	1099.0	0.134416324	0.000536887	0.133879437	6.28953605
8000	2400	820.2	713.1	107.1	1099.0	0.134416324	0.000536887	0.133879437	5.0945242
8000	2400	820.2	713.1	107.1	1099.0	0.134416324	0.000536887	0.133879437	4.126564602
8000	2400	820.2	713.1	107.1	1099.0	0.134416324	0.000536887	0.133879437	3.342517328
8000	2400	820.2	713.1	107.1	1099.0	0.134416324	0.000536887	0.133879437	2.707439036
8000	2400	820.2	713.1	107.1	1099.0	0.134416324	0.000536887	0.133879437	2.193025619
8000	2400	820.2	713.1	107.1	1099.0	0.134416324	0.000536887	0.133879437	1.776350751
8000	2400	820.2	713.1	107.1	1099.0	0.134416324	0.000536887	0.133879437	1.438844108
8000	2400	820.2	713.1	107.1	1099.0	0.134416324	0.000536887	0.133879437	1.165463728
8000	2400	820.2	713.1	107.1	1099.0	0.134416324	0.000536887	0.133879437	0.94402562
8000	2400	820.2	713.1	107.1	1099.0	0.134416324	0.000536887	0.133879437	0.764660752

VELOCITA' 60 m / min ; pto di partenza (8400,5250)									
I3 [A]	I4 [A]	T1 [°C]	T2 [°C]	ΔT [°C]	Tmax [°C]	fobb	fobb1 = f (Tmax)	fobb2 = f (ΔT)	Deviaz. Standard
8400	5250	935.0	713.2	221.8	1125.6	0.291443997	0.0141923	0.277251697	2835
6800	5250	857.4	660.3	197.1	1036.9	0.281360148	0.035005616	0.246354531	2835
5500	4150	753.1	616.0	137.1	874.4	0.296476241	0.12509301	0.171383231	2835
5500	4700	777.8	620.3	157.5	923.0	0.295024485	0.098158174	0.196866312	2835
6850	4750	834.5	657.4	177.1	989.8	0.28243535	0.061115869	0.221319481	2835
7600	4300	849.0	677.6	171.4	1052.6	0.240554438	0.026309003	0.214245435	2835
7100	3400	790.3	655.5	134.9	1001.6	0.223150918	0.054583709	0.168567209	2835
8000	2500	807.4	680.5	126.9	1095.6	0.161062862	0.002415592	0.15864727	2835
7050	4150	816.6	658.9	157.7	996.6	0.254492747	0.057312556	0.197180191	2835
8150	4800	899.4	700.4	199.1	1066.0	0.267689712	0.018855635	0.248834078	2835
7200	5250	875.4	672.6	202.9	1057.5	0.277150943	0.023576266	0.253574676	2835
7150	3850	809.1	659.9	149.2	1006.5	0.238371582	0.051836822	0.186534759	2835
6050	4000	767.8	629.0	138.8	905.2	0.281531692	0.108052414	0.173479278	2835
7950	3750	844.2	685.6	158.6	1090.1	0.203753769	0.005463372	0.198290398	2835
8200	2350	814.2	686.9	127.3	1117.9	0.169013614	0.009948339	0.159065275	2835
8400	2350	824.8	694.1	130.7	1140.7	0.185951264	0.022586524	0.16336474	2835
8150	3000	829.1	688.2	140.9	1112.3	0.182958975	0.006831526	0.176127449	2835
5400	3650	729.7	610.2	119.6	852.9	0.286485016	0.137046804	0.149438212	2835
7050	2450	759.9	649.1	110.8	996.6	0.195841387	0.057312556	0.138528831	2835
7050	2550	762.4	649.5	112.9	996.6	0.198464081	0.057312556	0.141151526	2835
6400	3000	746.5	632.5	114.1	935.7	0.233727608	0.091131184	0.142596424	2835
6400	2100	723.2	628.5	94.8	935.7	0.209590897	0.091131184	0.118459713	2835
7550	3900	830.1	673.1	157.0	1047.3	0.225444343	0.029216612	0.196227731	2835
7200	5250	875.4	672.6	202.9	1057.5	0.277150943	0.023576266	0.253574676	2835
5900	4850	799.9	631.6	168.3	954.3	0.291187268	0.080784436	0.210402832	2835
8100	2350	808.9	683.4	125.6	1106.7	0.160678453	0.003731903	0.156946551	2835
7100	4150	818.9	660.4	158.5	1001.6	0.252689642	0.054583709	0.198105933	2835
5500	4000	746.9	614.9	132.0	862.2	0.296836716	0.13186599	0.164970726	2835
6550	4600	814.4	647.4	167.0	961.0	0.285874193	0.07710899	0.208765203	2835
5550	5100	799.4	624.9	174.4	964.1	0.293422255	0.075359936	0.218062319	2835
7850	4000	848.9	683.8	165.0	1079.3	0.217817482	0.011506772	0.20631071	2835
5250	2900	699.4	602.3	97.1	841.6	0.26468666	0.143284951	0.121401709	2835
6150	4150	777.9	632.7	145.2	902.8	0.290856306	0.109354293	0.181502013	2835
6950	3300	780.1	650.3	129.8	986.9	0.224995523	0.062715997	0.162279526	2835
6350	3700	768.2	635.2	133.1	931.2	0.259945736	0.09360413	0.166341605	2835
7850	4400	865.7	686.8	179.0	1079.3	0.235229799	0.011506772	0.223723027	2835
5650	2300	698.0	609.3	88.7	872.3	0.237142224	0.126271388	0.110870835	2835
5900	3800	754.0	623.7	130.3	892.6	0.27793254	0.115025078	0.162907461	2835
5400	2750	700.4	605.1	95.3	852.9	0.256151332	0.137046804	0.119104528	2835
7350	5150	877.2	676.4	200.8	1055.2	0.275848805	0.024843841	0.251004964	2835
8150	3500	845.4	691.0	154.4	1112.3	0.199857463	0.006831526	0.193025937	2835
5450	2150	687.2	603.8	83.5	856.7	0.239254101	0.134929518	0.104324583	2835
6700	3700	783.2	645.2	137.9	963.1	0.24831495	0.075906592	0.172408358	2835
6250	4200	784.1	635.8	148.3	911.6	0.289809446	0.104477239	0.185332206	2835
8000	4950	899.0	696.4	202.6	1071.7	0.26902118	0.015720285	0.253300895	2835
7800	3900	842.4	681.4	161.0	1073.8	0.215702306	0.014502306	0.201200001	2835
6950	5050	853.7	663.0	190.7	1024.1	0.280470726	0.042110438	0.238360288	2835
7850	4750	881.8	689.5	192.2	1043.8	0.271441107	0.031163778	0.240277329	2835
7050	2450	759.9	649.1	110.8	996.6	0.195841387	0.057312556	0.138528831	2835
7950	3800	846.1	685.9	160.2	1090.1	0.205713855	0.005463372	0.200250483	2835
5700	2400	702.2	610.9	91.3	876.3	0.238181098	0.124059712	0.114121386	2835
6150	4850	809.8	638.2	171.5	965.6	0.288936704	0.074554967	0.214381737	2296.35
7050	3950	808.4	657.5	151.0	996.6	0.246051411	0.057312556	0.188738856	1860.0435
7950	3100	821.8	681.7	140.1	1090.1	0.180594899	0.005463372	0.175131528	1506.635235
7150	3500	796.1	657.6	138.5	1006.5	0.224947544	0.051836822	0.173110722	1220.37454
7650	2750	796.4	669.7	126.7	1057.8	0.181726233	0.023383727	0.158342506	988.5033777
7700	2800	800.3	671.6	128.6	1063.1	0.181238524	0.020440825	0.160797699	800.6877359
7950	3050	820.3	681.4	138.8	1090.1	0.178992806	0.005463372	0.173529434	648.5570661
8400	2400	826.0	694.3	131.7	1140.7	0.187188601	0.022586524	0.164602077	525.3312235
8000	2300	802.6	679.7	122.9	1095.6	0.156050089	0.002415592	0.153634497	425.5182911
8100	2250	806.6	683.0	123.6	1106.7	0.158277097	0.003731903	0.154545194	344.6698158
7700	2150	784.0	668.8	115.2	1063.1	0.164415473	0.020440825	0.143974648	279.1825508
7750	2350	791.1	671.3	119.8	1068.5	0.167178225	0.017480337	0.149697888	226.1378661
8150	2400	812.7	685.3	127.4	1112.3	0.166074013	0.006831526	0.159242487	183.1716716
8150	2150	807.0	684.4	122.6	1112.3	0.160137181	0.006831526	0.153305654	148.369054

7950	2200	797.7	677.6	120.2	1090.1	0.155705121	0.005463372	0.15024175	120.1789337
8000	2300	802.6	679.7	122.9	1095.6	0.156050089	0.002415592	0.153634497	97.34493631
7900	2350	798.6	676.4	122.2	1084.7	0.161266104	0.00849378	0.152772324	78.84939841
7900	2200	795.2	675.8	119.4	1084.7	0.157698967	0.00849378	0.149205188	63.86801271
7900	2300	797.5	676.2	121.2	1084.7	0.160051105	0.00849378	0.151557325	51.7330903
7900	2200	795.2	675.8	119.4	1084.7	0.157698967	0.00849378	0.149205188	41.90380314
7900	2150	794.1	675.6	118.5	1084.7	0.156561853	0.00849378	0.148068073	33.94208054
7850	2150	791.6	673.9	117.6	1079.3	0.158543351	0.011506772	0.147036579	27.49308524
8000	2250	801.4	679.5	122.0	1095.6	0.154861697	0.002415592	0.152446105	22.26939904
8000	2250	801.4	679.5	122.0	1095.6	0.154861697	0.002415592	0.152446105	18.03821323
8000	2250	801.4	679.5	122.0	1095.6	0.154861697	0.002415592	0.152446105	14.61095271
8000	2250	801.4	679.5	122.0	1095.6	0.154861697	0.002415592	0.152446105	11.8348717
8000	2250	801.4	679.5	122.0	1095.6	0.154861697	0.002415592	0.152446105	9.586246075
8000	2250	801.4	679.5	122.0	1095.6	0.154861697	0.002415592	0.152446105	7.764859321
8000	2250	801.4	679.5	122.0	1095.6	0.154861697	0.002415592	0.152446105	6.28953605
8000	2250	801.4	679.5	122.0	1095.6	0.154861697	0.002415592	0.152446105	5.0945242
8000	2250	801.4	679.5	122.0	1095.6	0.154861697	0.002415592	0.152446105	4.126564602
8000	2250	801.4	679.5	122.0	1095.6	0.154861697	0.002415592	0.152446105	3.342517328
8000	2250	801.4	679.5	122.0	1095.6	0.154861697	0.002415592	0.152446105	2.707439036
8000	2250	801.4	679.5	122.0	1095.6	0.154861697	0.002415592	0.152446105	2.193025619
8000	2250	801.4	679.5	122.0	1095.6	0.154861697	0.002415592	0.152446105	1.776350751

VELOCITA' 60 m / min ; pto di partenza (5250,2100)									
I3 [A]	I4 [A]	T1 [°C]	T2 [°C]	ΔT [°C]	Tmax [°C]	fobb	fobb1 = f (Tmax)	fobb2 = f (ΔT)	Deviaz. Standard
5250	2100	679.0	598.8	80.2	841.6	0.243565265	0.143284951	0.100280315	2835
7750	2500	794.7	671.9	122.8	1068.5	0.170981892	0.017480337	0.153501555	2835
7000	2950	771.3	649.9	121.4	991.8	0.211773948	0.06002333	0.151750618	2835
7900	2600	804.9	677.5	127.4	1084.7	0.167729896	0.00849378	0.159236116	2835
8000	4700	887.0	694.3	192.7	1047.8	0.269816684	0.028950855	0.240865829	2835
7300	2500	772.8	657.1	115.7	1021.6	0.188072336	0.04348828	0.144584056	2835
7500	4500	853.0	675.8	177.1	1042.1	0.253528323	0.032106514	0.22142181	2835
6150	2600	724.9	623.6	101.3	913.7	0.229914928	0.103310664	0.126604264	2835
8100	3550	844.6	689.5	155.0	1106.7	0.19754261	0.003731903	0.193810707	2835
6950	5250	864.0	664.8	199.2	1044.5	0.279810256	0.030789495	0.249020761	2835
7350	2300	770.3	657.9	112.4	1026.7	0.181192212	0.040669591	0.140522621	2835
7250	4650	848.0	669.0	179.0	1001.3	0.278518475	0.054748541	0.223769934	2835
7150	4250	825.4	662.7	162.7	1006.5	0.255245015	0.051836822	0.203408193	2835
5550	2400	696.6	607.2	89.5	864.4	0.24246648	0.13063821	0.11182827	2835
6100	4200	778.1	631.8	146.3	904.7	0.291185454	0.108314695	0.182870759	2835
6900	5250	861.8	663.3	198.5	1041.9	0.280330693	0.032204234	0.248126459	2835
7700	2150	784.0	668.8	115.2	1063.1	0.164415473	0.020440825	0.143974648	2835
8050	4250	869.4	692.5	176.9	1101.2	0.221728894	0.000649515	0.221079379	2835
8100	3400	839.4	688.6	150.7	1106.7	0.192126095	0.003731903	0.188394192	2835
7250	3600	804.4	661.4	143.0	1016.5	0.224998259	0.046289073	0.178709186	2835
8350	2750	832.4	694.1	138.3	1135.0	0.192308297	0.019401435	0.172906863	2835
7100	2450	762.2	650.6	111.6	1001.6	0.194052734	0.054583709	0.139469025	2835
6100	4500	791.2	634.0	157.2	930.7	0.290395769	0.093887267	0.196508503	2835
7500	2100	773.1	662.0	111.1	1042.1	0.170962112	0.032106514	0.138855599	2835
6300	2700	733.7	628.2	105.5	926.8	0.227964826	0.096058578	0.131906248	2835
8250	2300	815.6	688.5	127.1	1123.6	0.172002152	0.013082293	0.158919858	2835
8050	2400	807.5	681.8	125.7	1101.2	0.157784457	0.000649515	0.157134942	2835
5600	2250	694.9	607.8	87.1	868.3	0.237369511	0.128464228	0.108905283	2835
6600	2900	752.1	637.7	114.4	953.8	0.22403124	0.081054963	0.142976277	2835
8350	2350	822.1	692.3	129.8	1135.0	0.181683634	0.019401435	0.162282199	2835
7150	2550	767.1	652.6	114.4	1006.5	0.194873286	0.051836822	0.143036464	2835
6200	2350	720.6	623.9	96.7	918.0	0.22183351	0.100911871	0.120921639	2835
5400	3800	735.4	611.2	124.2	852.9	0.292358465	0.137046804	0.155311661	2835
6850	3850	795.5	650.7	144.8	977.3	0.249059006	0.06804688	0.181012126	2835
8300	2350	819.5	690.5	129.0	1129.3	0.177438096	0.016233341	0.161204754	2835
7300	3800	814.2	664.3	149.9	1021.6	0.230867627	0.04348828	0.187379347	2835
6600	3800	782.6	643.0	139.7	953.8	0.255623214	0.081054963	0.174568251	2835
8000	3600	841.2	686.4	154.9	1095.6	0.196008031	0.002415592	0.193592439	2835
5600	2150	692.7	607.4	85.3	868.3	0.235046723	0.128464228	0.106582495	2835
6900	2750	761.0	645.8	115.1	982.1	0.209319329	0.065390525	0.143928804	2835
7150	3500	796.1	657.6	138.5	1006.5	0.224947544	0.051836822	0.173110722	2835
8050	4500	880.3	694.4	185.9	1101.2	0.233037697	0.000649515	0.232388182	2835
5750	4750	789.4	626.9	162.5	938.2	0.292784387	0.089706605	0.203077782	2835
7650	2800	797.8	670.0	127.8	1057.8	0.183176166	0.023383727	0.159792438	2835
7450	4400	846.1	673.4	172.7	1036.9	0.250819123	0.03497867	0.215840453	2835
6550	3750	778.6	641.2	137.4	949.2	0.255323472	0.083601627	0.171721845	2835
6400	2250	726.5	629.0	97.5	935.7	0.213025996	0.091131184	0.121894813	2835
7500	2200	775.3	662.4	112.9	1042.1	0.173215045	0.032106514	0.141108532	2835
7600	4300	849.0	677.6	171.4	1052.6	0.240554438	0.026309003	0.214245435	2835
7800	4750	879.3	687.8	191.4	1040.9	0.272026743	0.032747837	0.239278906	2835
6150	2950	734.8	625.3	109.5	913.7	0.240133542	0.103310664	0.136822878	2835
7150	4400	832.0	663.8	168.1	973.5	0.280307359	0.070152831	0.210154528	2296.35
6450	4000	784.1	640.0	144.1	940.2	0.268769265	0.088639765	0.180129499	1860.0435
7950	4100	858.0	688.0	170.0	1090.1	0.218007055	0.005463372	0.212543684	1506.635235
7150	3950	813.0	660.6	152.5	1006.5	0.242437192	0.051836822	0.19060037	1220.37454
7900	4600	877.3	690.0	187.2	1084.7	0.242532362	0.00849378	0.234038582	988.5033777
7400	2850	787.1	662.0	125.1	1031.8	0.194159448	0.037833042	0.156326406	800.6877359
7900	2500	802.3	677.1	125.3	1084.7	0.165066673	0.00849378	0.156572893	648.5570661
7050	2200	754.0	648.1	105.9	996.6	0.189740535	0.057312556	0.132427979	525.3312235
8000	2950	819.8	682.7	137.2	1095.6	0.173854205	0.002415592	0.171438613	425.5182911
7750	2150	786.5	670.5	116.0	1068.5	0.162470176	0.017480337	0.144989839	344.6698158
7900	3050	817.7	679.7	138.0	1084.7	0.180993205	0.00849378	0.172499425	279.1825508
8000	2300	802.6	679.7	122.9	1095.6	0.156050089	0.002415592	0.153634497	226.1378661
7850	2350	796.1	674.7	121.4	1079.3	0.163248882	0.011506772	0.15174211	183.1716716
7900	2300	797.5	676.2	121.2	1084.7	0.160051105	0.00849378	0.151557325	148.369054
7850	2450	798.5	675.1	123.4	1079.3	0.165757366	0.011506772	0.154250594	120.1789337
8150	2300	810.4	684.9	125.4	1112.3	0.163621542	0.006831526	0.156790016	97.34493631
8100	2350	808.9	683.4	125.6	1106.7	0.160678453	0.003731903	0.156946551	78.84939841
7850	2300	794.9	674.5	120.4	1079.3	0.162033551	0.011506772	0.150526779	63.86801271
7950	2300	800.0	677.9	122.1	1090.1	0.158056612	0.005463372	0.152593241	51.7330903

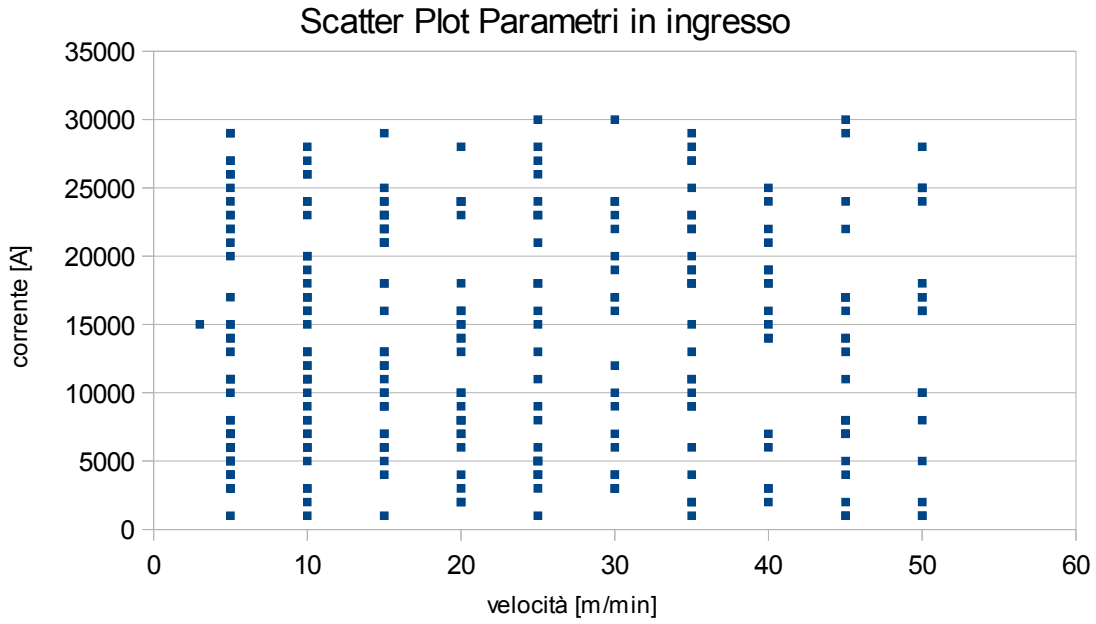
8050	2350	806.3	681.6	124.7	1101.2	0.156544562	0.000649515	0.155895047	41.90380314
8050	2300	805.2	681.4	123.7	1101.2	0.155330579	0.000649515	0.154681064	33.94208054
8100	2300	807.8	683.2	124.6	1106.7	0.159464817	0.003731903	0.155732914	27.49308524
8050	2300	805.2	681.4	123.7	1101.2	0.155330579	0.000649515	0.154681064	22.26939904
8050	2300	805.2	681.4	123.7	1101.2	0.155330579	0.000649515	0.154681064	18.03821323
8050	2300	805.2	681.4	123.7	1101.2	0.155330579	0.000649515	0.154681064	14.61095271
8050	2300	805.2	681.4	123.7	1101.2	0.155330579	0.000649515	0.154681064	11.8348717
8050	2300	805.2	681.4	123.7	1101.2	0.155330579	0.000649515	0.154681064	9.586246075
8050	2300	805.2	681.4	123.7	1101.2	0.155330579	0.000649515	0.154681064	7.764859321
8050	2300	805.2	681.4	123.7	1101.2	0.155330579	0.000649515	0.154681064	6.28953605
8050	2300	805.2	681.4	123.7	1101.2	0.155330579	0.000649515	0.154681064	5.0945242
8050	2300	805.2	681.4	123.7	1101.2	0.155330579	0.000649515	0.154681064	4.126564602
8050	2300	805.2	681.4	123.7	1101.2	0.155330579	0.000649515	0.154681064	3.342517328
8050	2300	805.2	681.4	123.7	1101.2	0.155330579	0.000649515	0.154681064	2.707439036
8050	2300	805.2	681.4	123.7	1101.2	0.155330579	0.000649515	0.154681064	2.193025619
8050	2300	805.2	681.4	123.7	1101.2	0.155330579	0.000649515	0.154681064	1.776350751
8050	2300	805.2	681.4	123.7	1101.2	0.155330579	0.000649515	0.154681064	1.438844108
8050	2300	805.2	681.4	123.7	1101.2	0.155330579	0.000649515	0.154681064	1.165463728
8050	2300	805.2	681.4	123.7	1101.2	0.155330579	0.000649515	0.154681064	0.94402562
8050	2300	805.2	681.4	123.7	1101.2	0.155330579	0.000649515	0.154681064	0.764660752

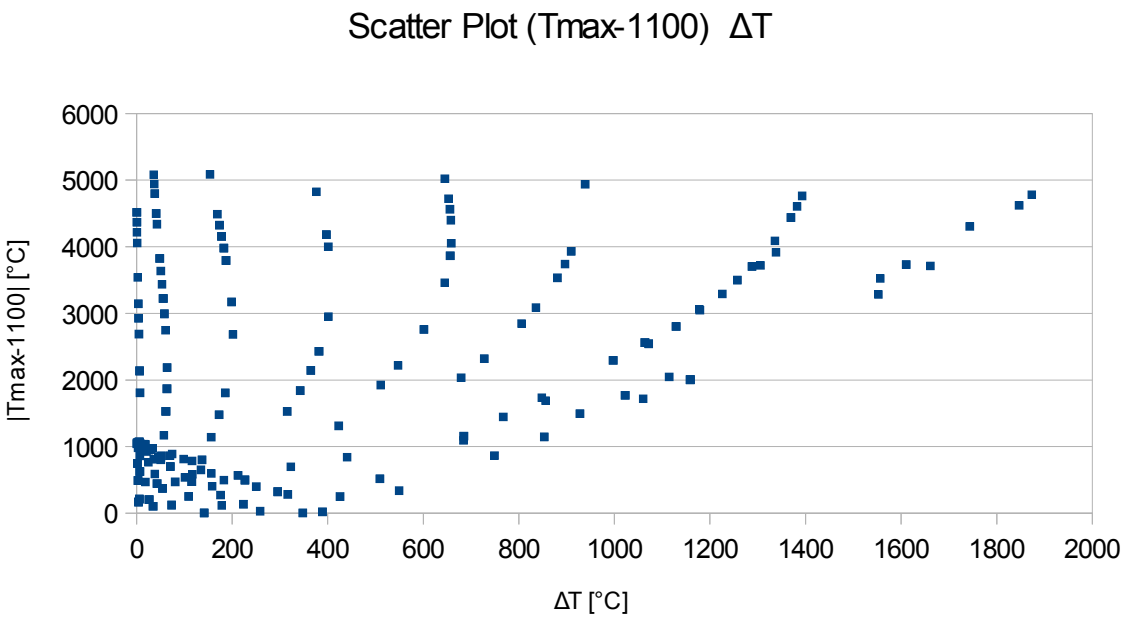
Appendice 3

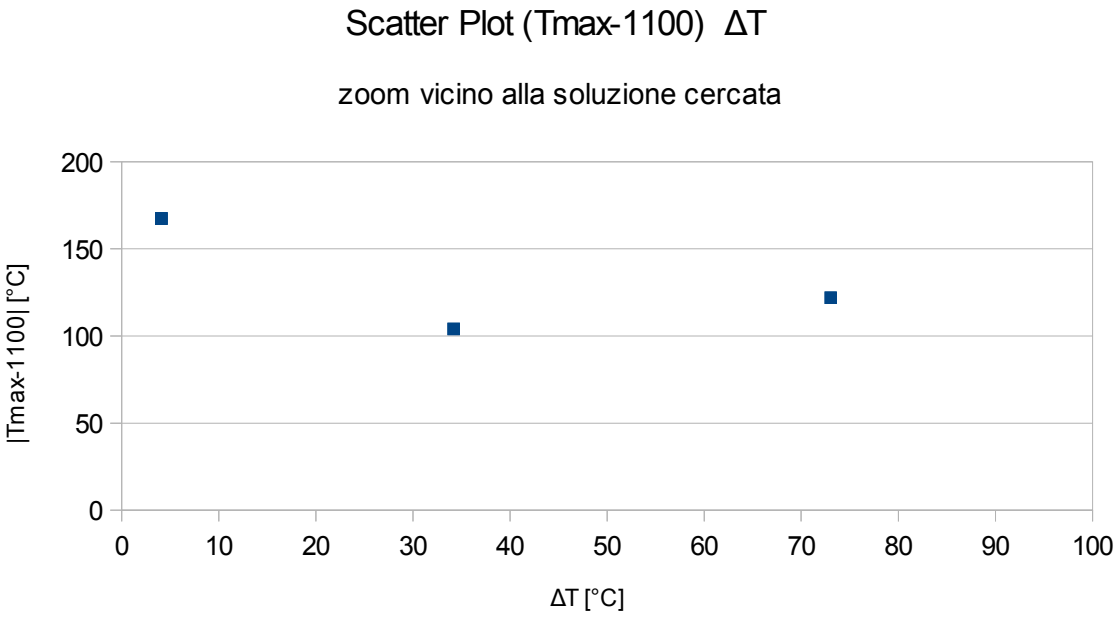
Grafici riferiti alle simulazioni degli esempi del capitolo 7

Grafici II STEP:

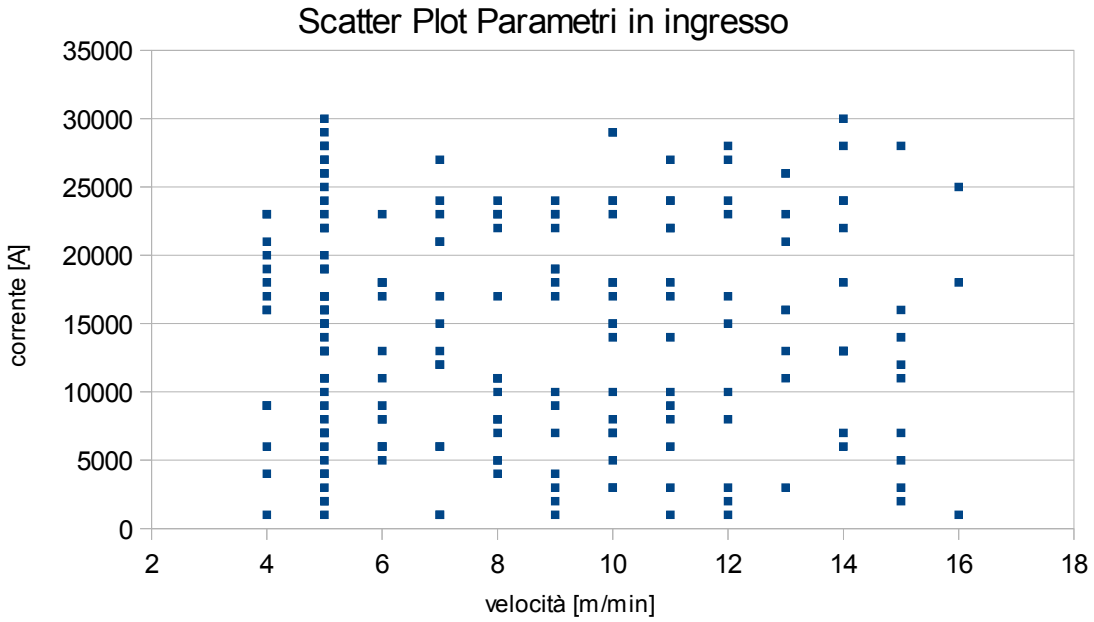
Dalla prima simulazione			
	Valore minimo	Valore massimo	Passo di variazione
Corrente	1000 A	30000 A	1000 A
Velocità	3 m/min	53 m/min	5 m/min

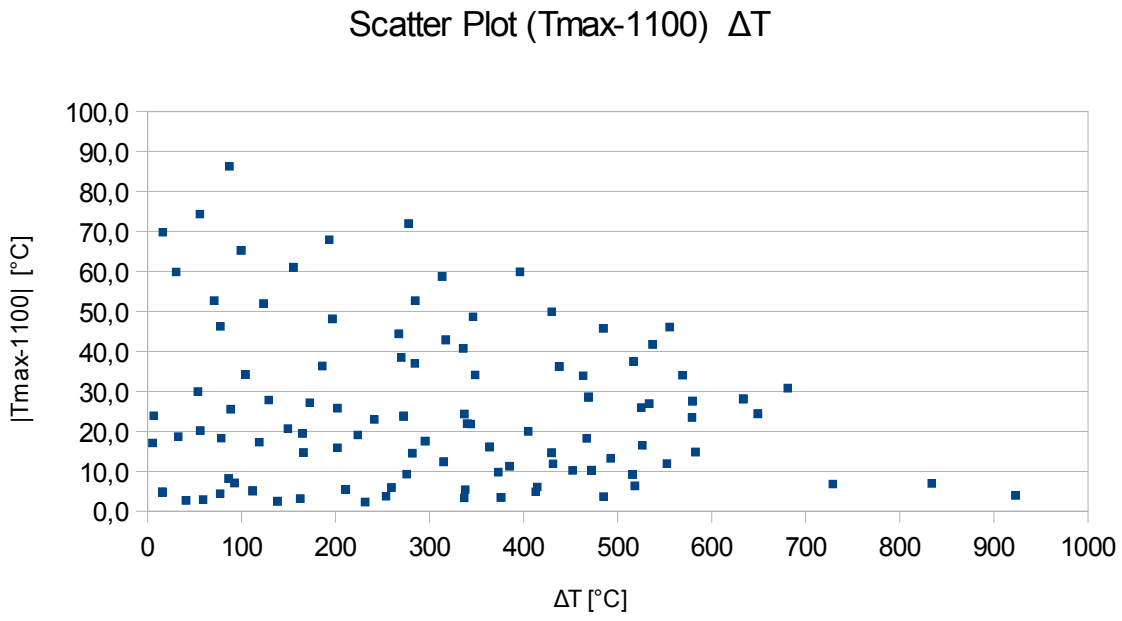


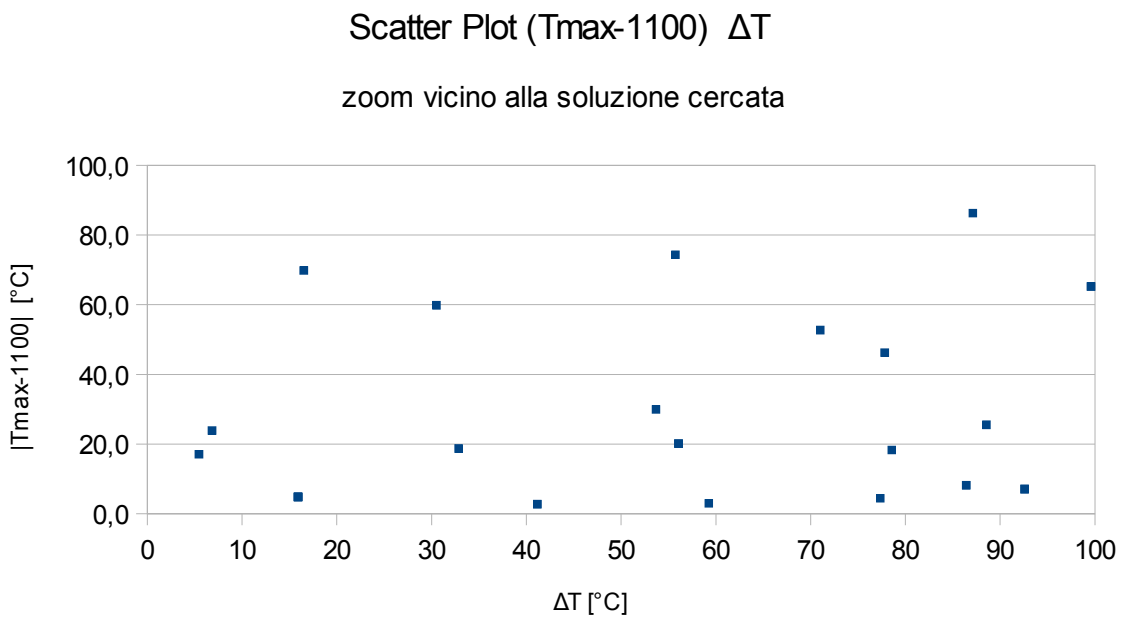

Scatter Plot (Tmax-1100) ΔT
|Tmax-1100| [°C]
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
ΔT [°C]


Scatter Plot (Tmax-1100) ΔT
zoom vicino alla soluzione cercata
|Tmax-1100| [°C]
200
150
100
50
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
ΔT [°C]

Dalla seconda simulazione			
	Valore minimo	Valore massimo	Passo di variazione
Corrente	4500 A	7500 A	250 A
Velocità	4 m/min	16 m/min	1 m/min

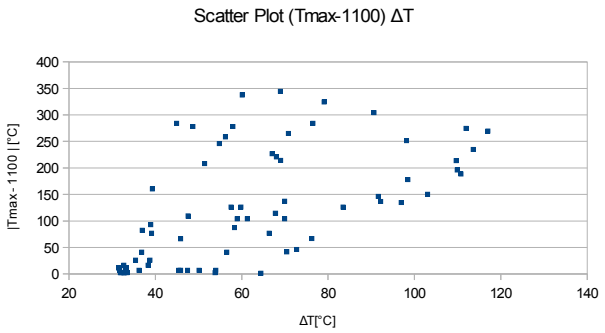
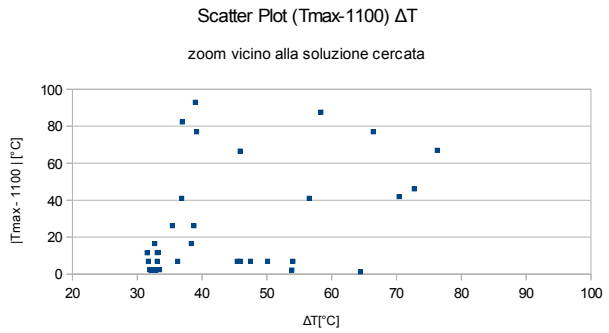
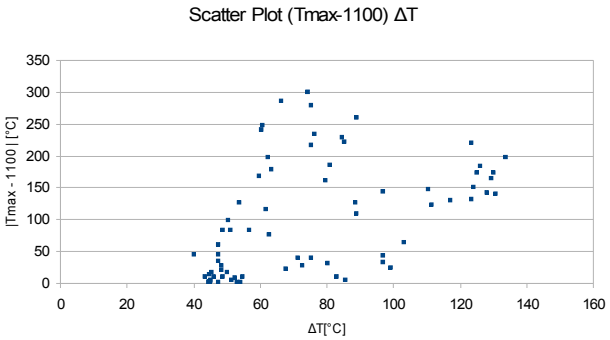
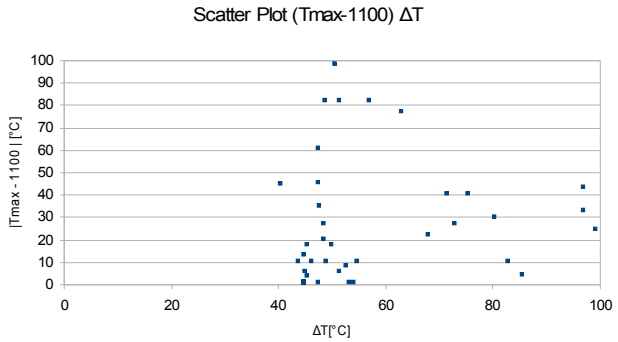
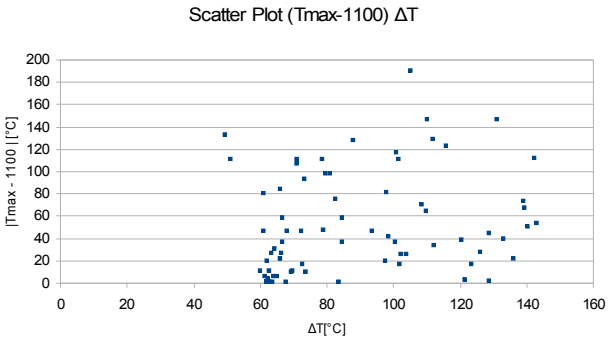
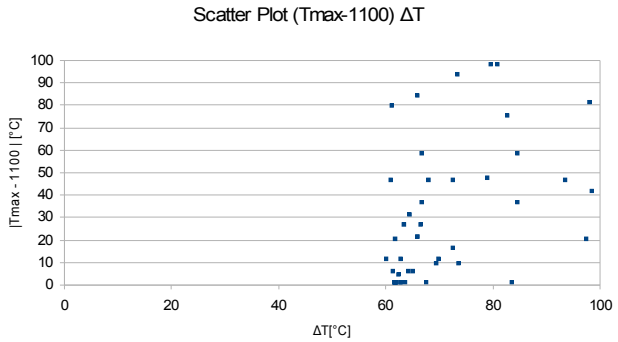


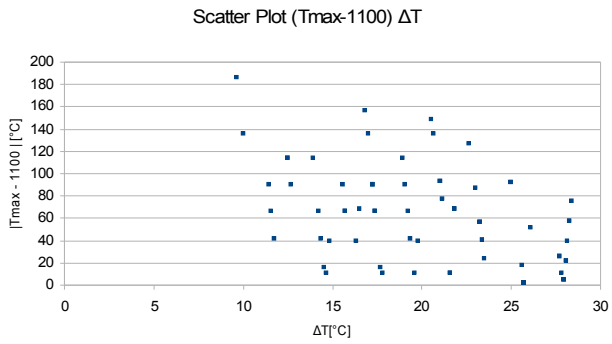
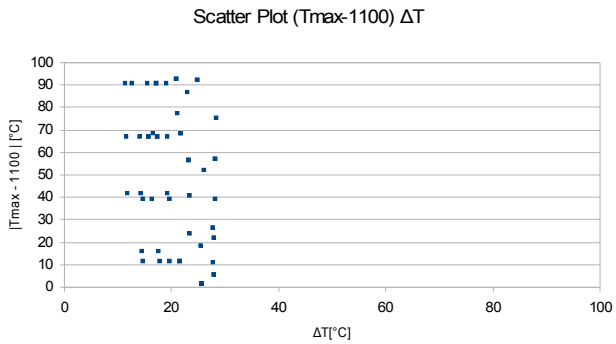
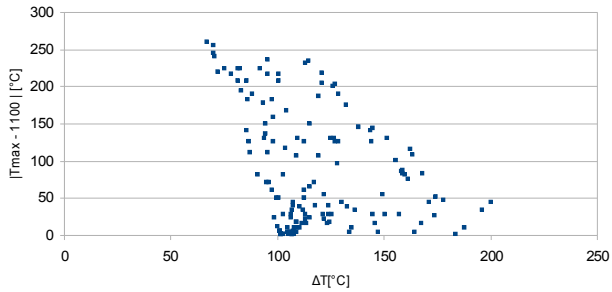
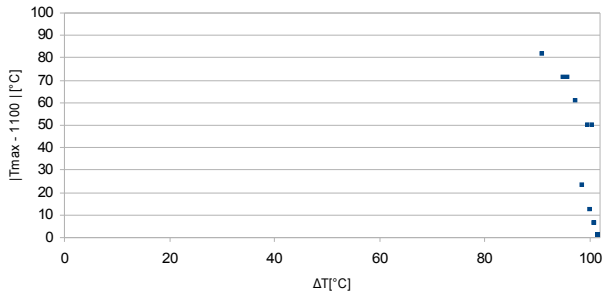
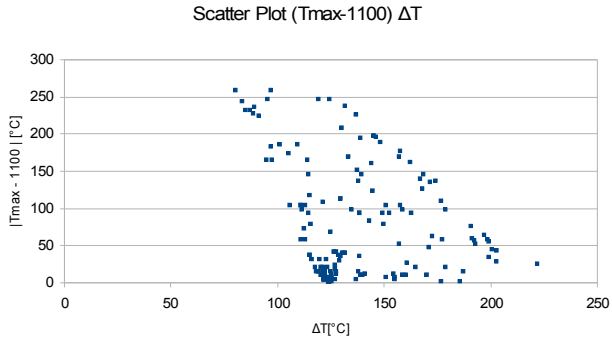
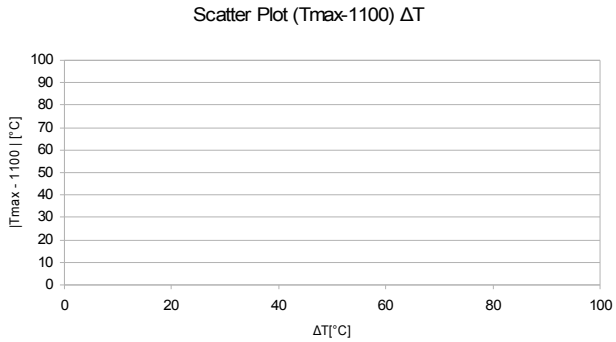

Scatter Plot (Tmax-1100) ΔT
|Tmax-1100| [°C]
100,0
90,0
80,0
70,0
60,0
50,0
40,0
30,0
20,0
10,0
0,0
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
ΔT [°C]


Scatter Plot (Tmax-1100) ΔT
zoom vicino alla soluzione cercata
|Tmax-1100| [°C]
100,0
80,0
60,0
40,0
20,0
0,0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
ΔT [°C]

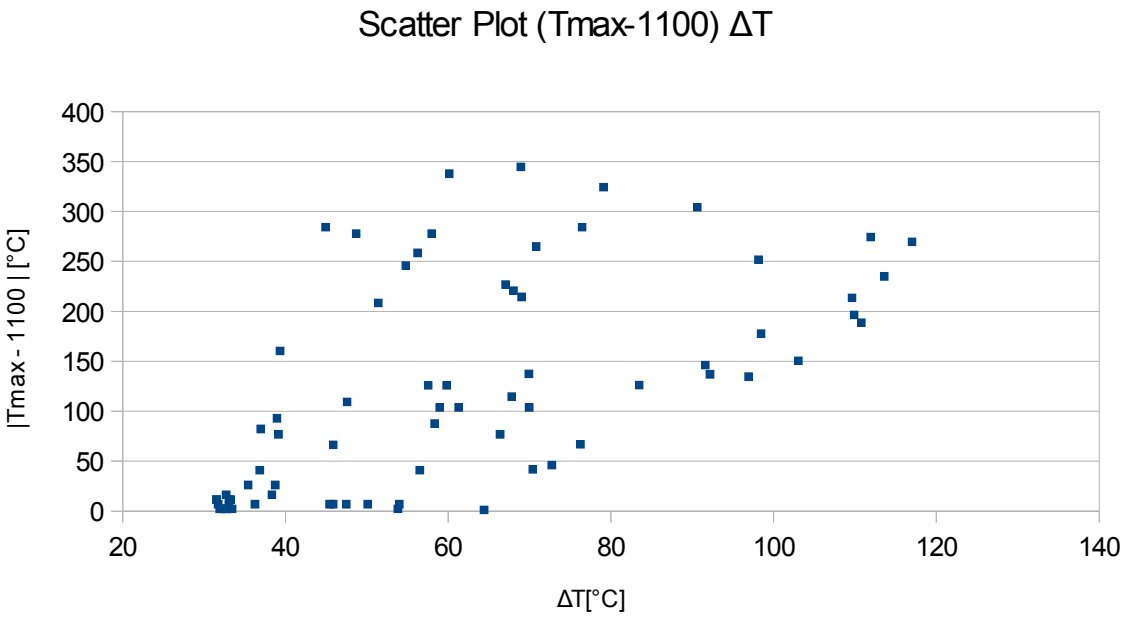
Grafici III STEP:

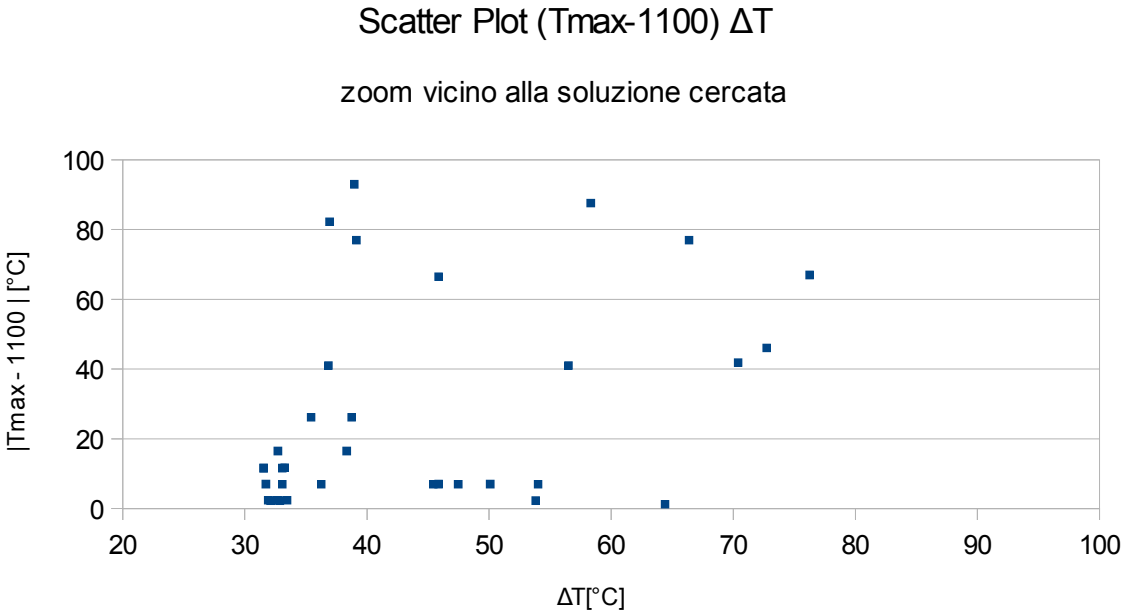
Seguono i grafici in scala ridotta per permettere un confronto immediato, successivamente i casi particolari:

	Grafici scatter plot	Grafici scatter plot a scala fissa per un rapido confronto fra le varie velocità
35 m/min		
40 m/min		
45 m/min		

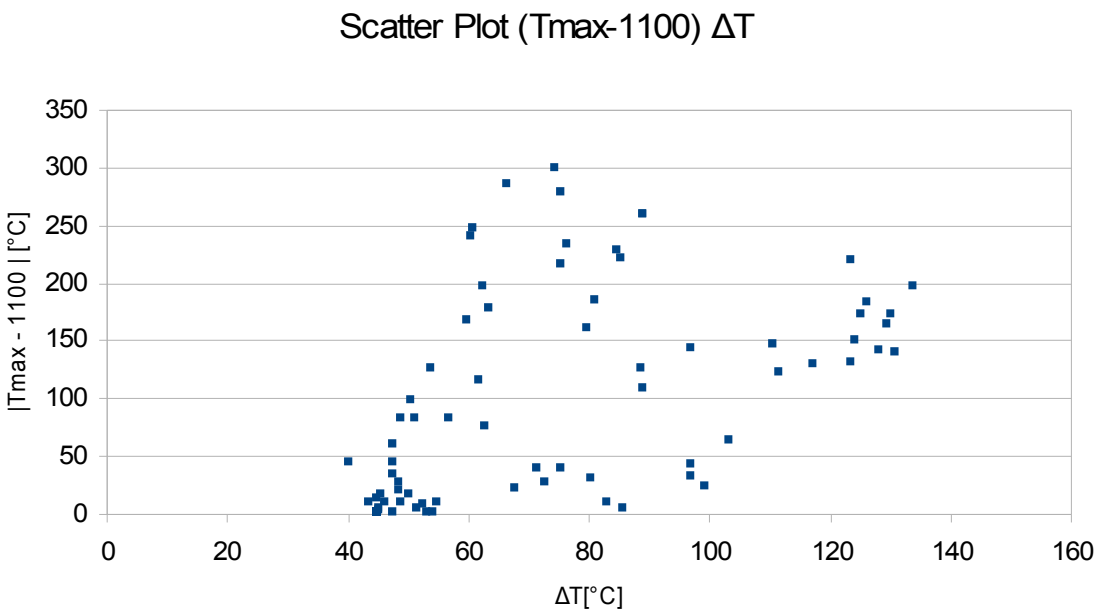
	Grafici scatter plot	Grafici scatter plot a scala fissa per un rapido confronto fra le varie velocità
50 m/min		
55 m/min		
60 m/min		

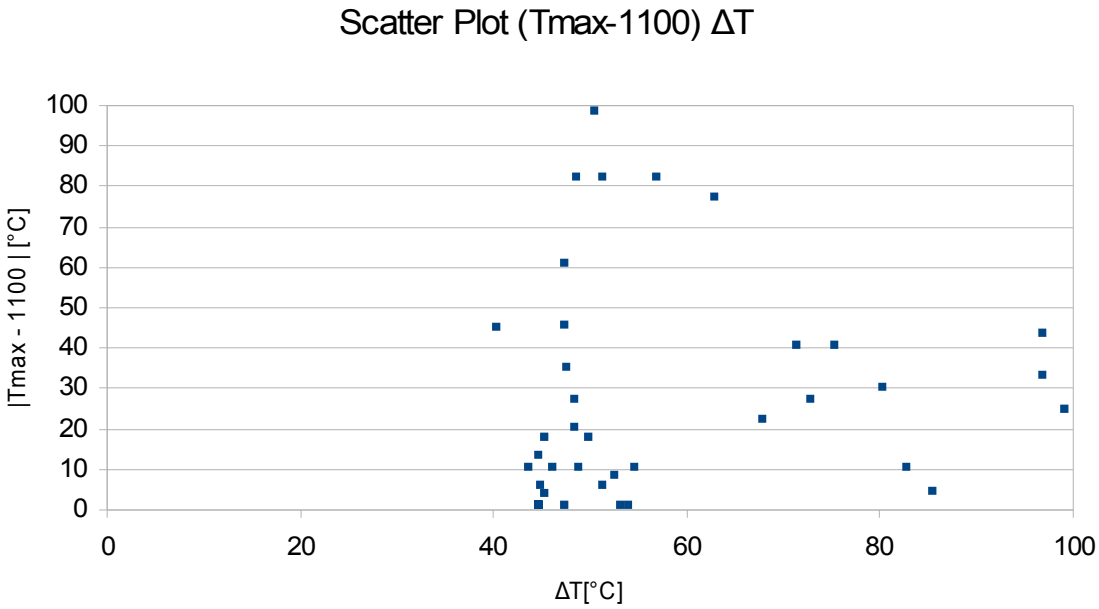
35 m/min:


Scatter Plot (Tmax-1100) ΔT
|Tmax - 1100 | [°C]
400
350
300
250
200
150
100
50
0
20
40
60
80
100
120
140
ΔT[°C]

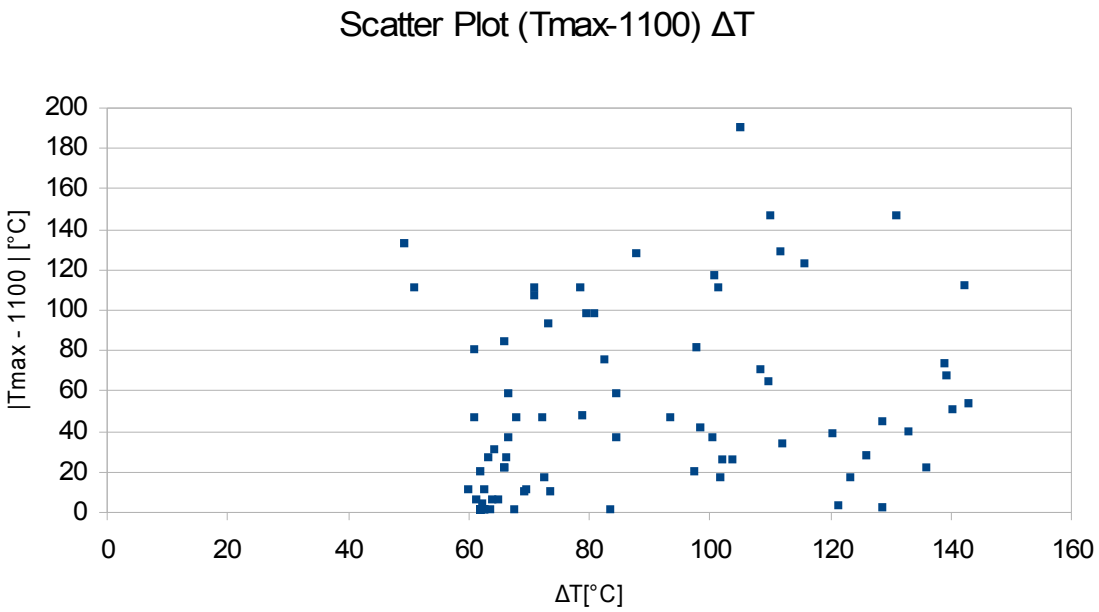

Scatter Plot (Tmax-1100) ΔT
zoom vicino alla soluzione cercata
|Tmax - 1100 | [°C]
100
80
60
40
20
0
20
30
40
50
60
70
80
90
100
ΔT[°C]

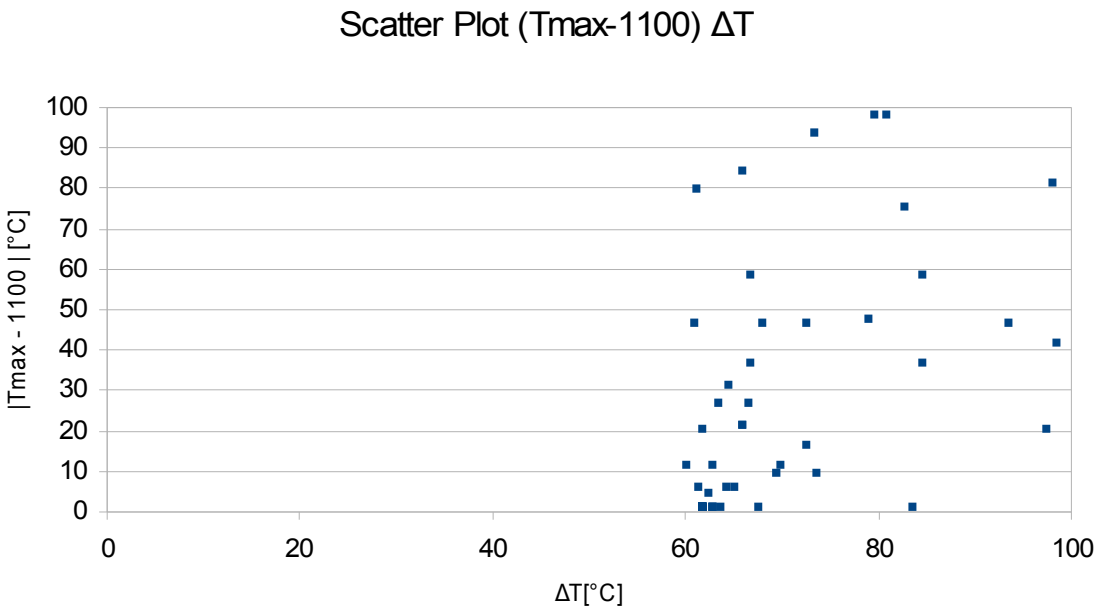
40 m/min:


Scatter Plot (Tmax-1100) ΔT
|Tmax - 1100 | [°C]
350
300
250
200
150
100
50
0
0
20
40
60
80
100
120
140
160
ΔT[°C]

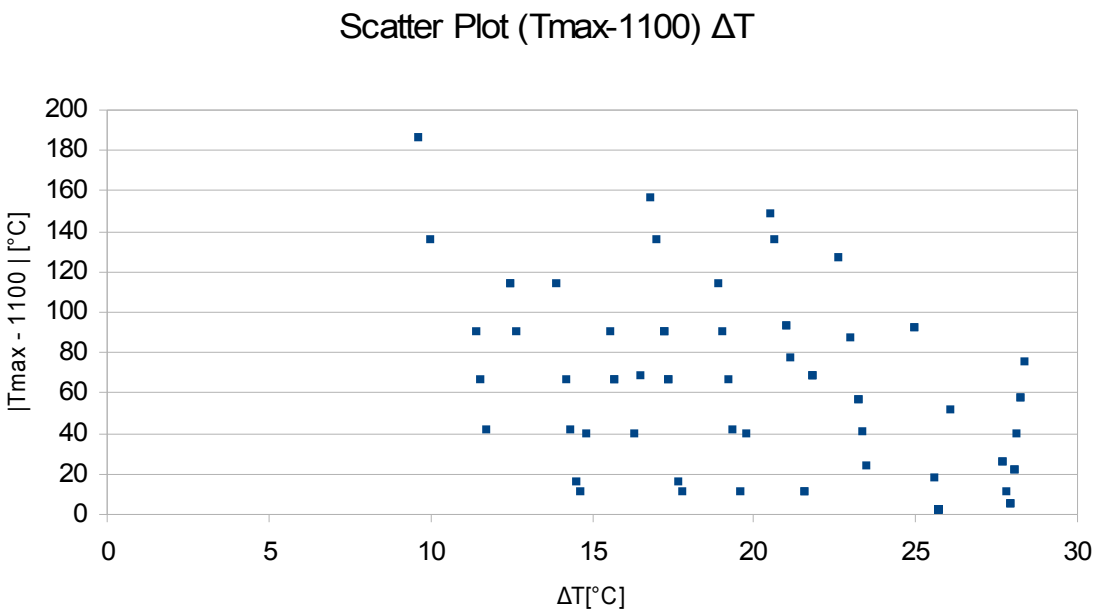

Scatter Plot (Tmax-1100) ΔT
|Tmax - 1100 | [°C]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
20
40
60
80
100
ΔT[°C]

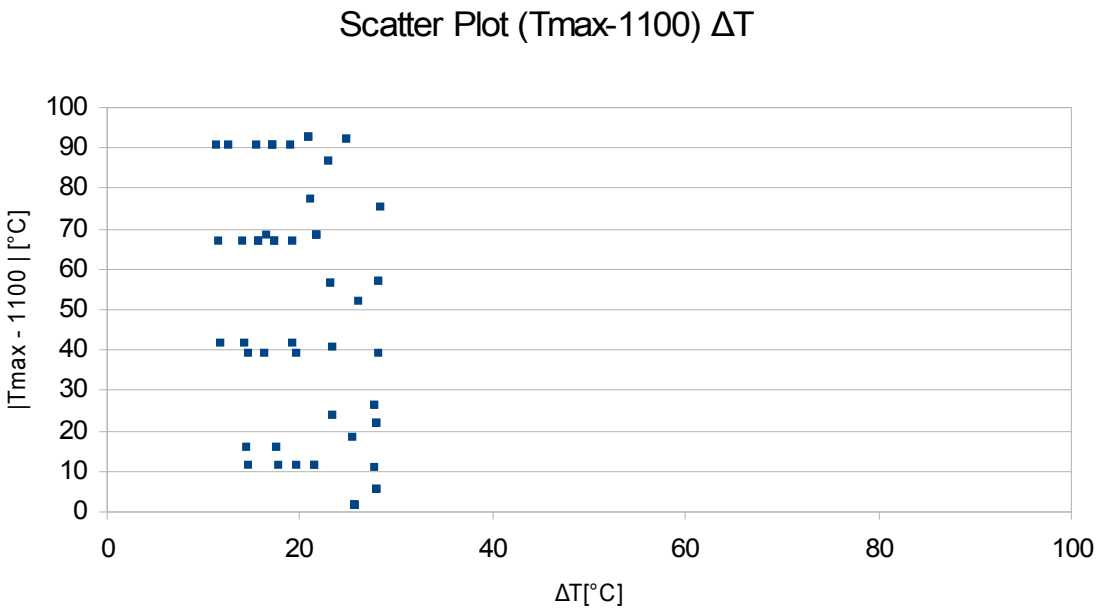
45 m/min:


Scatter Plot (Tmax-1100) ΔT
|Tmax - 1100 | [°C]
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
20
40
60
80
100
120
140
160
ΔT[°C]

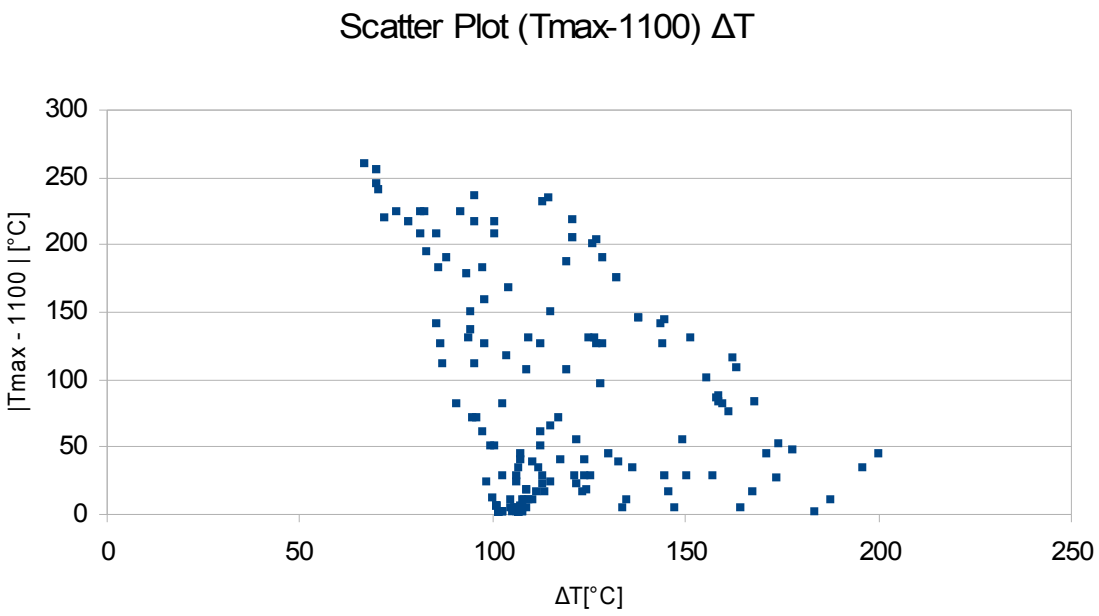

Scatter Plot (Tmax-1100) ΔT
|Tmax - 1100 | [°C]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
20
40
60
80
100
ΔT[°C]

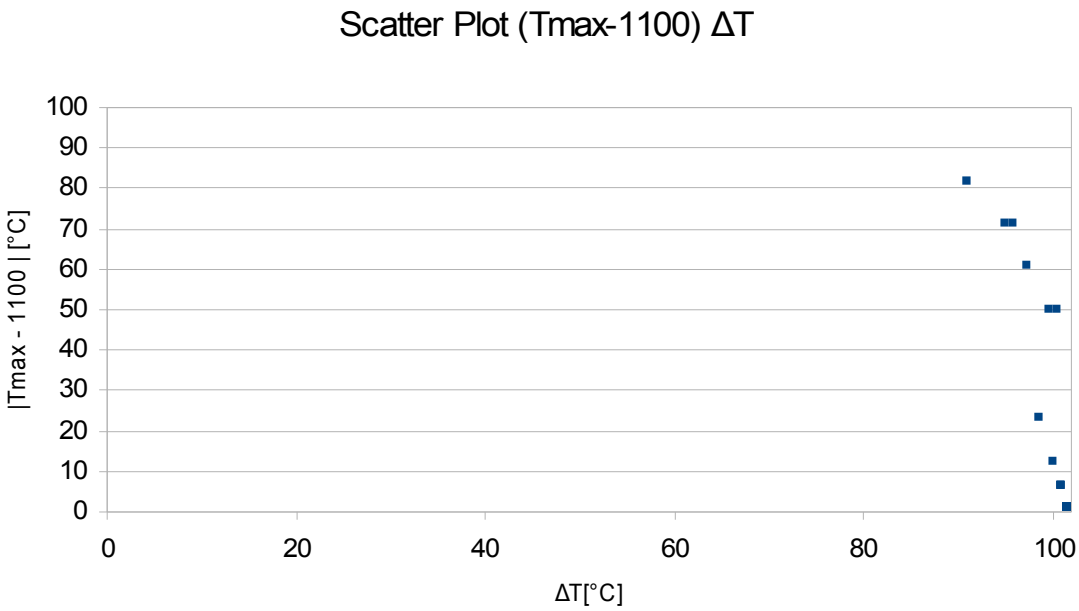
50 m/min:


Scatter Plot (Tmax-1100) ΔT
|Tmax - 1100 | [°C]
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
5
10
15
20
25
30
ΔT[°C]

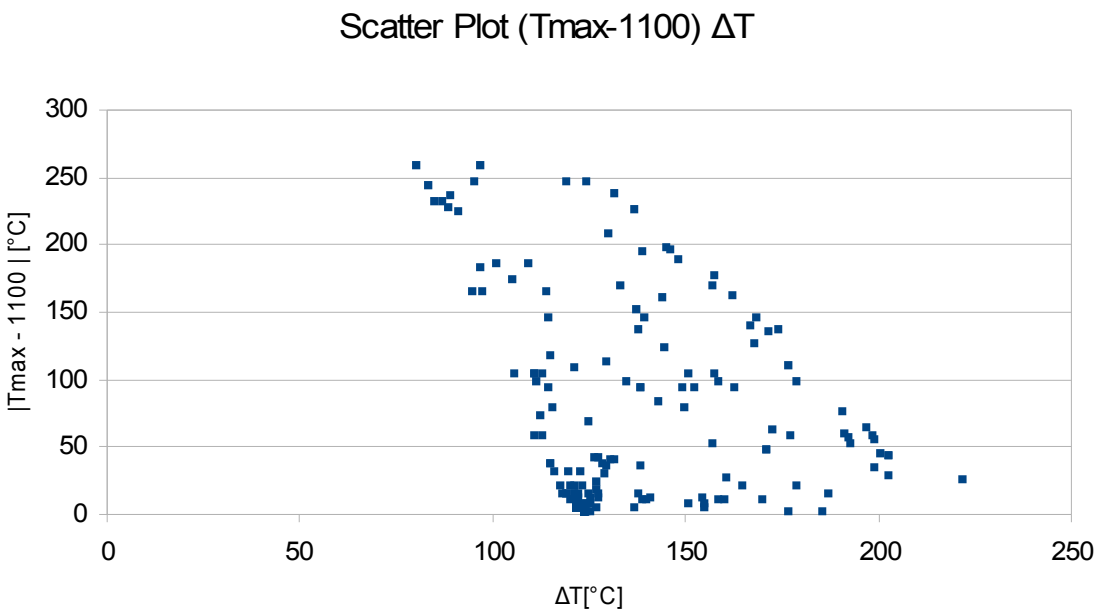

Scatter Plot (Tmax-1100) ΔT
|Tmax - 1100 | [°C]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
20
40
60
80
100
ΔT[°C]

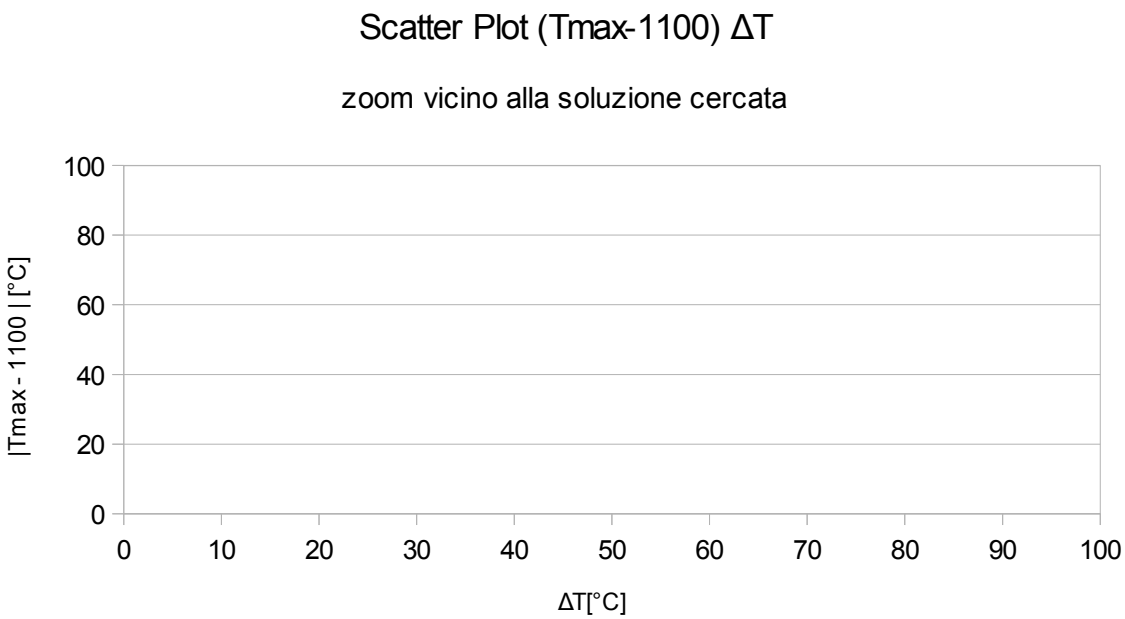
55 m/min:


Scatter Plot (Tmax-1100) ΔT
|Tmax - 1100 | [°C]
300
250
200
150
100
50
0
0
50
100
150
200
250
ΔT[°C]


Scatter Plot (Tmax-1100) ΔT
|Tmax - 1100 | [°C]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
20
40
60
80
100
ΔT[°C]

60 m/min:


Scatter Plot (Tmax-1100) ΔT
|Tmax - 1100 | [°C]
300
250
200
150
100
50
0
0
50
100
150
200
250
ΔT[°C]


Scatter Plot (Tmax-1100) ΔT
zoom vicino alla soluzione cercata
|Tmax - 1100 | [°C]
100
80
60
40
20
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
ΔT[°C]

Bibliografia

[1] turbomacchine.com

[2] "Manufactoring Process for Engineering Materials", Prentice Hall, S. Kalpakjian S.Schmid

[3] S.Lupi "Appunti di Elettrotermia" A.A. 2005-2006

[4] "Dizionario di ingegneria ", UTET,Eligio Perucca

[5] Dr. Paul Scott Vice President Technology Thermatool Corp, East Haven, CT, USA: "Seam Annealing of HF Welded API Pipe"

[6] python.org

[7] cedrat.com

[8] F.Dughiero "Appunti di PADEM"

[9] Flux "2D Application - Induction heating with Multiphysics coupling Technical Paper",CEDRAT