

Curriculum scientifico e didattico  
del  
Prof. Fabrizio Dughiero

Settore scientifico disciplinare ING-IND/31 Elettrotecnica

Luglio 2008

## Note Biografiche

Fabrizio Dughiero

nato a Chioggia (Venezia) il 1° febbraio 1964, ha conseguito, nel 1982 il diploma di maturità scientifica presso il liceo scientifico G. Veronese di Chioggia con il punteggio 60/60. Si è laureato in Ingegneria Elettrotecnica presso l'Università di Padova nel luglio 1988 con punti 110/110 e lode discutendo una tesi dal titolo "Tempra simultanea ad induzione di ruote dentate", relatore il prof. Sergio Lupi.

Dall'ottobre 1987 all'agosto 1988 è stato professore supplente annuale di Elettrotecnica e Misure elettriche presso l'Istituto Tecnico Industriale A. Righi di Chioggia.

Subito dopo la laurea ha svolto il corso A.U.C. (avviamento ufficiali di complemento) nella Marina Militare all'Accademia Militare di Livorno nel corpo del Genio Navale (settembre - dicembre 1988). E' stato poi assegnato come Guardia Marina all'ufficio tecnico della Marina Militare (Navalgenarmi) di Ancona dove ha prestato servizio come supervisore e collaudatore nella costruzione di navi MTF (navi per trasporto fari) di proprietà della Marina Militare.

Dal gennaio al settembre 1990 ha lavorato presso la Marelli Macchine Elettriche di Arzignano (Vicenza) nell'ufficio R&D e come progettista di alternatori.

Dall'ottobre 1990 al 30 giugno 1991 è stato professore supplente di Elettrotecnica e Misure Elettriche presso l'Istituto Tecnico Industriale A. Righi di Chioggia.

Nello stesso periodo ha svolto attività di ricerca, come vincitore di borsa di studio, per la società SIPAR (sistemi intelligenti) di Rovereto (Trento) nell'ambito di un contratto di ricerca stipulato tra il Dipartimento di Ingegneria Elettrica e la stessa SIPAR riguardante lo studio di fattibilità per un sistema di rilevazione di difetti superficiali in billette di acciaio tramite l'utilizzo di riscaldamento ad induzione e analisi termografica.

Dal 1° luglio 1991 è stato ricercatore universitario del gruppo concorsuale I17X (ora ING-IND/31) presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Padova.

Dal 1° luglio 1994 è stato ricercatore confermato di ruolo avendo conseguito giudizio positivo nella valutazione dell'attività scientifica e didattica svolta nel primo triennio di attività.

Dal 1° novembre 1998 è stato professore di ruolo di seconda fascia presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Catania, con l'incarico d'insegnamento di Elettrotecnica per il Corso di Laurea in Ingegneria Edile.

Dal 1° Novembre 1999 è stato trasferito a Padova con il ruolo di professore di seconda fascia presso la Facoltà di Ingegneria della stessa Università, con l'incarico d'insegnamento di Elettrotecnica per i Corsi di Laurea in Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali.

Attualmente ricopre il ruolo di professore associato confermato presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Padova con l'incarico dei seguenti insegnamenti:

- *Elettrotecnica* – Laurea triennale in Ingegneria Informatica
- *Progettazione Automatica di Dispositivi Elettrici e Magnetici (PADEM)* – Laurea specialistica in Ingegneria Elettrotecnica
- *Numerical Models for Fields Analysis in Biological Beings* – Scuola di Dottorato in Ingegneria dell'Informazione

## Attività didattica

Per quanto riguarda l'attività didattica, ha svolto esercitazioni in aula o in laboratorio e/o cicli di lezione per i seguenti corsi:

*Elettrotermia* per il corso di laurea in Ingegneria Elettrotecnica dell'Università di Padova (prof. S. Lupi) dall'a.a. 1991-92 all' a.a. 1997-98.

*Elettrotecnica* per i corsi di laurea in Ingegneria Elettronica, Informatica e delle Telecomunicazioni dell'Università di Padova (prof. M. Guarnieri) dall'a.a. 1991-92 all'a.a. 1994-95 compreso.

*Principi di Ingegneria Elettrica* per il corso di laurea in Ingegneria Gestionale dell'Università di Padova (prof. S. Lupi) dall'a.a. 1992-93 all'a.a. 1997-98.

*Elettrotecnica I* per il corso di laurea in Ingegneria Elettrica dell'Università di Padova (Prof. G.Malesani) dall'a.a. 1995-96 all' a.a. 1997-98.

Per tutti i corsi citati ha partecipato attivamente alle commissioni d'esame.

Negli a.a. 1994-95 e 1995-96, 1996-97, 1997-98, 2000-2001 e 2001-2002 ha tenuto il corso di *Elettrotecnica* serale (40 ore) della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Padova per studenti lavoratori.

Negli a.a 1995-96, 1996-97 e 1997-98 è stato professore incaricato di *Elettrotecnica ed Azionamenti Elettrici* per il corso di Diploma in Ingegneria Meccanica dell'Università di Padova (modulo di Elettrotecnica).

Negli a.a. 1996-97 e 1997-98 è stato professore incaricato di *Elettrotecnica* per il corso di Diploma in Ingegneria Informatica dell'Università di Padova (un modulo).

Nell'anno accademico 1998-99 è stato professore di ruolo di seconda fascia presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Catania con l'incarico d'insegnamento di *Elettrotecnica* per il corso di laurea in Ingegneria Edile.

Nello stesso anno accademico (98-99) ha ricoperto i seguenti incarichi:

- professore incaricato di *Elettrotecnica ed Azionamenti Elettrici* per il corso di Diploma in Ingegneria Meccanica dell'Università di Padova (modulo di Elettrotecnica)
- professore incaricato di *Elettrotecnica* per il corso di Diploma in Ingegneria Informatica dell'Università di Padova (un modulo).

Negli anni accademici 1999-2000, 2000-2001 e 2001-2002 ha ricoperto i seguenti incarichi:

- professore di ruolo di *Elettrotecnica* per i corsi di laurea di Ingegneria dei Materiali, Chimica e Meccanica.
- professore incaricato di *Elettrotecnica* per il corso di Diploma in Ingegneria Informatica (un modulo)
- professore incaricato di *Elettrotermia* al V anno del corso di Laurea di Ingegneria dei Materiali.

Inoltre ha tenuto, per gli studenti iscritti al primo anno del corso di Dottorato in Ingegneria Elettrotecnica, un corso monografico di 12 ore dal titolo "*Analisi Elettromagnetica mediante metodi*

*numerici*” nell’ambito dell’attività didattica organizzata dal collegio docenti all’interno dello stesso corso.

Nell’ anno accademico 2002-2003 ha ricoperto i seguenti incarichi:

- professore incaricato di *Elettrotecnica* per i corsi di laurea triennali di Ingegneria Chimica e dei Materiali.
- professore incaricato di *Elettrotecnica* per il corso di laurea triennale in Ingegneria Informatica, Biomedica e Elettronica
- professore di ruolo di *Elettrotecnica* per i corsi di laurea di Ingegneria dei Materiali, Chimica e Meccanica.

Inoltre ha tenuto, per gli studenti iscritti al primo anno del corso di Dottorato in Ingegneria Elettrotecnica, un corso monografico di 12 ore dal titolo “*Analisi Elettromagnetica mediante metodi numerici*” nell’ambito dell’attività didattica organizzata dal collegio docenti all’interno dello stesso corso.

Nello stesso anno accademico 2002-2003 ha ricoperto l’incarico di docente del corso di “*Laboratorio di didattica dell’Elettrotecnica*” per la SISS coordinata dall’Ateneo di Venezia (Scuola Interateneo per l’insegnamento ai docenti della scuola Superiore).

Nell’ anno accademico 2003-2004 ha ricoperto i seguenti incarichi:

- professore di ruolo di *Elettrotecnica* per i corsi di laurea triennali di Ingegneria Chimica e dei Materiali.
- professore incaricato di *Elettrotecnica* per il corso di laurea triennale in Ingegneria Informatica, Biomedica e Elettronica
- professore incaricato di *Elettrotermia* per il corso di laurea di Ingegneria dei Materiali.

Inoltre ha tenuto, per gli studenti iscritti al primo anno del corso di Dottorato in Ingegneria Elettrotecnica, un corso monografico di 12 ore dal titolo “*Analisi Elettromagnetica mediante metodi numerici*” nell’ambito dell’attività didattica organizzata dal collegio docenti all’interno dello stesso corso.

Nell’ anno accademico 2004-2005 ha ricoperto i seguenti incarichi:

- professore di ruolo di *Elettrotecnica* per i corsi di laurea triennali di Ingegneria Chimica e dei Materiali.
- professore incaricato di *Elettrotecnica* per il corso di laurea triennale in Ingegneria Informatica, Biomedica e Elettronica
- professore incaricato di *Elettrotermia* per il corso di laurea di Ingegneria Elettrica.

Inoltre ha tenuto, per gli studenti delle scuola di Dottorato in Ingegneria dell’Informazione un corso dal titolo “*Analisi di campi elettromagnetici e termici in strutture biologiche*”.

Dall’ anno accademico 2005-2006 ad oggi ha ricoperto i seguenti incarichi:

- professore di ruolo di “*Elettrotecnica*” per il corso di laurea triennale di Ingegneria Informatica.
- professore incaricato di “*Progettazione Automatica di Dispositivi Elettrici e Magnetici*” per il corso di laurea specialistica in Ingegneria Elettrotecnica (affidamento gratuito)
- professore incaricato del corso “*Numerical Models for Fields Analysis in Biological Beings*” per la Scuola di Dottorato in Ingegneria dell’Informazione (affidamento gratuito)

In questi anni di attività presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Padova e il Dipartimento Elettrico, Elettronico e Sistemistico dell'Università di Catania è stato relatore e correlatore di numerose tesi di laurea.

E' stato supervisore per i seguenti studenti di dottorato:

Marco Bullo: *“Modelli numerici per lo studio di problemi elettromagnetici e termici nei trattamenti di Ipertermia”* (titolo di Dottorato di ricerca in Ingegneria Elettrotecnica conseguito nel 2005)

Valentina D'Ambrosio: *“Numerical Models for Hypethermic Treatments”* (titolo di Dottorato di ricerca in Bioelettromagnetismo e Compatibilità elettromagnetica conseguito nel 2007)

Cristiano Greggio: *“Analisi, progettazione e verifica sperimentale di schermi passivi per la mitigazione dei campi magnetici in prossimità di impianti di riscaldamento ad induzione”* (titolo di Dottorato di ricerca in Bioelettromagnetismo e Compatibilità Elettromagnetica conseguito nel 2008)

E' stato relatore per il seguente studente di dottorato del Politecnico di Milano:

Giacomo Maccalli (Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettrotecnica del Politecnico di Milano): *“Ottimizzazione multi-obiettivo di sistemi di riscaldamento ad induzione per applicazioni di elettrotermia nel campo dei semiconduttori mediante tecniche evoluzionistiche”* (titolo di dottorato di ricerca in Ingegneria Elettrotecnica conseguito nel 2008)

E' attualmente supervisore dei seguenti studenti di Dottorato

Dario Ciscato: *“Applicazioni industriali innovative dell'EPM (Electromagnetic Processign of Materials)”* (Studente al II anno di corso del Dottorato di ricerca in Ingegneria Elettrotecnica)

Elisabetta Sieni: *“Tecniche di ipertermia induttiva mediante nano particelle magnetiche per il rilascio controllato in loco di farmaci chemioterapici e il loro potenziamento terapeutico”* (Studente al I anno di Dottorato di ricerca in Bioingegneria)

Schema riassuntivo dell'attività didattica:

Anno accademico	Titolo dei corsi	Corso di Laurea
91-92	Esercitazioni per Elettrotermia	Ingegneria Elettrica (prof. Lupi)
	Esercitazioni per Elettrotecnica	Ingegneria Elettronica, Informatica e delle Telecomunicazioni
92-93	Esercitazioni per Elettrotermia	Ingegneria Elettrica (prof. Lupi)
	Esercitazioni per Elettrotecnica	Ingegneria Elettronica, Informatica e delle Telecomunicazioni (Prof. Guarnieri)
	Esercitazioni per Principi di Ingegneria Elettrica	Ingegneria Gestionale (Prof. Lupi)

93-94	<p>Esercitazioni per Elettrotermia</p> <p>Esercitazioni per Elettrotecnica</p> <p>Esercitazioni per Principi di Ingegneria Elettrica</p>	<p>Ingegneria Elettrica (prof. Lupi)</p> <p>Ingegneria Elettronica, Informatica e delle Telecomunicazioni (Prof. Guarnieri)</p> <p>Ingegneria Gestionale (Prof. Lupi)</p>
94-95	<p>Esercitazioni per Elettrotermia</p> <p>Esercitazioni per Elettrotecnica</p> <p>Esercitazioni per Principi di Ingegneria Elettrica</p> <p>Corso di Elettrotecnica serale</p>	<p>Ingegneria Elettrica (prof. Lupi)</p> <p>Ingegneria Elettronica, Informatica e delle Telecomunicazioni (Prof. Guarnieri)</p> <p>Ingegneria Gestionale (Prof. Lupi)</p> <p>Studenti Lavoratori</p>
95-96	<p>Esercitazioni per Elettrotermia</p> <p>Esercitazioni per Elettrotecnica</p> <p>Esercitazioni per Principi di Ingegneria Elettrica</p> <p>Corso di Elettrotecnica serale</p> <p>Corso di Elettrotecnica ed Azionamenti Elettrici (Modulo di Elettrotecnica)</p> <p><i>Supplenza</i></p>	<p>Ingegneria Elettrica (prof. Lupi)</p> <p>Ingegneria Elettrica (Prof. Malesani)</p> <p>Ingegneria Gestionale (Prof. Lupi)</p> <p>Studenti Lavoratori</p> <p>Diploma in Ingegneria Meccanica</p>
96-97	<p>Esercitazioni per Elettrotermia</p> <p>Esercitazioni per Elettrotecnica</p> <p>Esercitazioni per Principi di Ingegneria Elettrica</p> <p>Corso di Elettrotecnica serale</p> <p>Corso di Elettrotecnica ed Azionamenti Elettrici (Modulo di Elettrotecnica)</p> <p><i>Supplenza</i></p>	<p>Ingegneria Elettrica (prof. Lupi)</p> <p>Ingegneria Elettrica (Prof. Malesani)</p> <p>Ingegneria Gestionale (Prof. Lupi)</p> <p>Studenti Lavoratori</p> <p>Diploma in Ingegneria Meccanica</p>

	<p>Corso di Elettrotecnica (Insegnamento a distanza) <i>Supplenza</i></p>	<p>Diploma in Ingegneria Informatica</p>
97-98	<p>Esercitazioni per Elettrotermia</p> <p>Esercitazioni per Elettrotecnica</p> <p>Esercitazioni per Principi di Ingegneria Elettrica</p> <p>Corso di Elettrotecnica serale</p> <p>Corso di Elettrotecnica ed Azionamenti Elettrici (Modulo di Elettrotecnica) <i>Supplenza</i></p> <p>Corso di Elettrotecnica (Insegnamento a distanza) <i>Supplenza</i></p>	<p>Ingegneria Elettrica (prof. Lupi)</p> <p>Ingegneria Elettrica (Prof. Malesani)</p> <p>Ingegneria Gestionale (Prof. Lupi)</p> <p>Studenti Lavoratori</p> <p>Diploma in Ingegneria Meccanica</p> <p>Diploma in Ingegneria Informatica</p>
98-99	<p>Corso di Elettrotecnica <i>Incarico istituzionale</i></p> <p>Corso di Elettrotecnica ed Azionamenti Elettrici (Modulo di Elettrotecnica) <i>Supplenza</i></p> <p>Corso di Elettrotecnica (Insegnamento a distanza) <i>Supplenza</i></p>	<p>Ingegneria Edile (Università di Catania)</p> <p>Diploma in Ingegneria Meccanica</p> <p>Diploma in Ingegneria Informatica</p>
99-00	<p>Corso di Elettrotecnica <i>Incarico Istituzionale</i></p> <p>Corso di Elettrotermia <i>Supplenza</i></p> <p>Corso di Elettrotecnica (Insegnamento a distanza) <i>Supplenza</i></p> <p>Corso di “Analisi Elettromagnetica mediante metodi numerici” <i>Incarico dato dal collegio docenti</i></p>	<p>Ingegneria dei Materiali</p> <p>Ingegneria dei Materiali</p> <p>Diploma in Ingegneria Informatica</p> <p>Dottorato in Ingegneria Elettrotecnica</p>

00-01	<p>Corso di Elettrotecnica <i>Incarico Istituzionale</i></p> <p>Corso di Elettrotermia <i>Supplenza</i></p> <p>Corso di Elettrotecnica serale</p> <p>Corso di Elettrotecnica (Insegnamento a distanza) <i>Supplenza</i></p> <p>Corso di “Analisi Elettromagnetica mediante metodi numerici” <i>Incarico dato dal collegio docenti</i></p>	<p>Ingegneria dei Materiali</p> <p>Ingegneria dei Materiali</p> <p>Studenti Lavoratori</p> <p>Diploma in Ingegneria Informatica</p> <p>Dottorato in Ingegneria Elettrotecnica</p>
01-02	<p>Corso di Elettrotecnica <i>Incarico Istituzionale</i></p> <p>Corso di Elettrotermia <i>Supplenza</i></p> <p>Corso di Elettrotecnica serale</p> <p>Corso di Elettrotecnica (Insegnamento a distanza) <i>Supplenza</i></p> <p>Corso di “Analisi Elettromagnetica mediante metodi numerici” <i>Incarico dato dal collegio docenti</i></p>	<p>Ingegneria dei Materiali</p> <p>Ingegneria dei Materiali</p> <p>Studenti Lavoratori</p> <p>Diploma in Ingegneria Informatica</p> <p>Dottorato in Ingegneria Elettrotecnica</p>
02-03	<p>Corso di Elettrotecnica <i>Incarico Istituzionale</i></p> <p>Corso di Elettrotecnica <i>Supplenza</i></p> <p>Corso di Elettrotecnica (Insegnamento a distanza) <i>Supplenza</i></p> <p>Corso di Elettrotecnica serale</p> <p>Corso di “Analisi Elettromagnetica mediante metodi numerici”</p>	<p>Ingegneria dei Materiali (VO)</p> <p>Ingegneria Chimica (laurea triennale)</p> <p>Ingegneria Elettronica, Biomedica e Informatica (laurea triennale)</p> <p>Studenti Lavoratori</p> <p>Dottorato in Ingegneria Elettrotecnica</p>

	<i>Incarico dato dal collegio docenti</i>	
03-04	<p>Corso di Elettrotecnica <i>Incarico Istituzionale</i></p> <p>Corso di Elettrotecnica <i>Supplenza</i></p> <p>Corso di Elettrotermia <i>Supplenza</i></p> <p>Corso di “Analisi Elettromagnetica mediante metodi numerici” <i>Incarico dato dal collegio docenti</i></p>	<p>Ingegneria Chimica (laurea triennale)</p> <p>Ingegneria Informatica (laurea triennale)</p> <p>Ingegneria dei materiali (VO)</p> <p>Dottorato in Ingegneria Elettrotecnica</p>
04-05	<p>Corso di Elettrotecnica <i>Incarico Istituzionale</i></p> <p>Corso di Elettrotecnica <i>Supplenza</i></p> <p>Corso di Elettrotermia <i>Supplenza</i></p> <p>Corso di “<i>Numerical Models for Fields Analysis in Biological Beings</i>” <i>Incarico dato dal collegio docenti</i></p>	<p>Ingegneria Chimica (laurea triennale)</p> <p>Ingegneria Informatica (laurea triennale)</p> <p>Ingegneria Elettrica (VO)</p> <p>Scuola di Dottorato in Ingegneria dell’informazione</p>
05-06	<p>Corso di Elettrotecnica <i>Incarico Istituzionale</i></p> <p>Corso di Progettazione Automatica di Dispositivi Elettrici e Magnetici <i>Affidamento Gratuito</i></p> <p>Corso di “<i>Numerical Models for Fields Analysis in Biological Beings</i>” <i>Incarico dato dal collegio docenti</i></p>	<p>Ingegneria Informatica (laurea triennale)</p> <p>Ingegneria Elettrotecnica (laurea specialistica)</p> <p>Scuola di Dottorato in Ingegneria dell’informazione</p>
	Corso di Elettrotecnica <i>Incarico Istituzionale</i>	Ingegneria Informatica (laurea triennale)

06-07	<p>Corso di Progettazione Automatica di Dispositivi Elettrici e Magnetici <i>Affidamento Gratuito</i></p> <p>Corso di “<i>Numerical Models for Fields Analysis in Biological Beings</i>” <i>Incarico dato dal collegio docenti</i></p>	<p>Ingegneria Elettrotecnica (laurea specialistica)</p> <p>Scuola di Dottorato in Ingegneria dell’informazione</p>
07-08	<p>Corso di Elettrotecnica <i>Incarico Istituzionale</i></p> <p>Corso di Progettazione Automatica di Dispositivi Elettrici e Magnetici <i>Affidamento Gratuito</i></p> <p>Corso di “<i>Numerical Models for Fields Analysis in Biological Beings</i>” <i>Incarico dato dal collegio docenti</i></p>	<p>Ingegneria Informatica (laurea triennale)</p> <p>Ingegneria Elettrotecnica (laurea specialistica)</p> <p>Scuola di Dottorato in Ingegneria dell’informazione</p>

## **Attività di tipo didattico, organizzativo e scientifico**

Nel 1995 ha partecipato attivamente alla messa in opera di un laboratorio didattico, occupandosi personalmente dell'acquisto dell'hardware e del software necessari, nell'ambito del progetto TEMPUS-TACIS T-JEP-10021-95 tra l'Università Elettrotecnica di S. Pietroburgo, l'Università di Hannover e il Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Padova.

Nell'ambito di un corso intensivo dal titolo "Economia dell'energia mediante l'uso razionale delle tecnologie elettriche", all'interno del progetto europeo TEMPUS-TACIS T-JEP-10021-95, ha tenuto negli anni 1996, 1997 e 1998 presso l'Università Elettrotecnica di S. Pietroburgo, diverse ore di lezione riguardanti l'impiego dei metodi numerici e delle tecniche di ottimizzazione nella progettazione di impianti di riscaldamento ad induzione.

Ha partecipato ufficialmente ad un progetto TEMPUS-TACIS Compact Project CP\_20021-98 dell'Unione Europea di durata biennale a partire dal 1 gennaio 1999 di cui è stato responsabile il prof. Sergio Lupi. All'interno di tale progetto ha preparato alcune monografie, riguardanti l'applicazione dei metodi numerici alla progettazione di sistemi di riscaldamento ad induzione da utilizzare come materiale didattico durante i corsi tenuti presso le Università di S. Pietroburgo, Samara e NovoSibirsk (Russia).

Nel novembre del 1997 ha tenuto un corso intensivo di due giorni (16 ore di lezione) presso la società Tetrapak R&D Spa di Modena dal titolo: "Corso sulle tecnologie di saldatura di materiali termoplastici". (Convenzione didattica tra la Tetrapak e il Dipartimento di Ingegneria Elettrica).

Ha svolto le seguenti ricerche nell'ambito di contratti di ricerca stipulati tra ditte private e il Dipartimento di Ingegneria Elettrica:

- "Progettazione ottimale di un forno a resistori per la fusione dell'oro, tramite l'utilizzo di metodi numerici e prove in laboratorio" (Contratto di ricerca con la società Di Maio di Varese - 1994).
- "Dimensionamento elettromagnetico e termico di impianti di riscaldamento ad induzione per fili, barre e tubi di acciaio magnetico" (Contratto di ricerca con la Società ATE di Vicenza - 1995).
- "Calcolo elettromagnetico e termico di induttori per riscaldamento ad induzione con avanzamento continuo di nastri sottili d'oro" (Contratto di ricerca con la Società UNOAERRE di Arezzo - 1995).
- "Studio di campi elettromagnetici nei pressi di generatori ad alta frequenza per la piegatura del legno" (Contratto di ricerca con la società E.SE.CO. di S. Lucia di Piave - Treviso - 1995).
- "Sviluppo di codici di calcolo per il dimensionamento di sistemi ad induzione con carichi a simmetria cilindrica" (Contratto di ricerca con la Società ATE di Vicenza - 1996).
- "Misure di campo elettrico e magnetico in prossimità di apparecchiature per la tempra ad induzione a 500 kHz" (Contratto di ricerca con la società IVET di Vicenza - 1997)
- Studio e realizzazione di apparecchiature per l'esame magnetoinduttivo delle funi degli impianti di risalita (Contratto di ricerca con la provincia autonoma di Trento - 1997)

- “Analisi ed ottimizzazione dei profili di temperatura in dispositivi ad induzione per la crescita epitassiale dei semiconduttori” (Contratto di ricerca con la società LPE di Bollate - Milano - 1997)

E' stato responsabile scientifico dei seguenti contratti di ricerca:

- "Studio e progettazione di induttori per la saldatura di materiali termoplastici contenenti film di materiale conduttore" (Contratto di ricerca con Tetrapak Research and Development SPA di Modena 1998)
- "Studio di trasformatori speciali mediante l'uso di codici 3D agli elementi finiti" (Contratto di ricerca stipulato con l'ABB ADDA di Monselice - 2000).
- "Studio mediante il metodo FEM di trasformatori a derivatore magnetico per saldatrici" (Contratto di ricerca stipulato con la Telwin S.p.a. di Villaverla - 2000)
- "Utilizzo di metodi numerici orientati all'analisi delle prestazioni di motori a magneti permanenti" (Contratto di ricerca con la società ELVI di Brescia - 2001)
- "Studio e applicazione di tecnologie Elettrotermiche per la formatura, lievitazione e cottura della pizza" (Contratto di ricerca con la società SITOS di Rovereto - 2002)
- "Analisi di fattibilità di un trattamento ad induzione a flusso trasverso per la ricottura di nastri d'argento" (Contratto con la Società Pietro Galliani di Vergato, Bologna - 2002)
- "Utilizzo di metodi numerici orientati all'analisi e all'ottimizzazione delle prestazioni di sensori elettromagnetici di portata" (Contratto con la Società Hemina s.p.a. di Montagnana, Padova - 2002)
- "Ottimizzazione di forni ad infrarosso e ad induzione per la cottura di cibi" (Contratto di ricerca con la Società Sitos - Rovereto, 2003)
- "Progettazione di un prototipo di induttore per il riscaldamento di preforme in PET e relative verifiche sperimentali" (Contratto stipulato con la società Sipa – Zoppas Industries – 2004)
- "Caratterizzazione di pannelli radianti per applicazioni industriali mediante termocamera e spettrofotometro" (Contratto di ricerca stipulato con la società Stalam - Bassano – 2005)
- "Ricerca sulle applicazioni domestiche del riscaldamento ad induzione e possibili innovazioni" (Contratto stipulato con la multinazionale Whirlpool Europe – 2005)
- Ottimizzazione del fenomeno dell'adesione tra coating organici e contenitori in plastica attraverso tecnologie di essiccazione a RF o MW (Contratto stipulato con la società Sipa – Zoppas Industries – 2006)
- "Organizzazione delle attività del gruppo R&D dell'azienda SAET nel settore delle applicazioni del riscaldamento ad induzione" (Contratto di ricerca stipulato con la società SAET – Torino 2007)

- “Sistemi di raffreddamento rapido per trattamenti di Bright annealing su tubi di acciaio Inox AISI 304, 304L, 316 e 316L” (Contratto stipulato con la società SAET – Torino – 2008)
- “Analisi bibliografica sugli effetti dell’esposizione ai campi elettromagnetici emessi da piani di cottura ad induzione e misure sperimentali su piani di cottura di produzione Whirlpool” (Contratto stipulato con la multinazionale Whirlpool Europe – 2008)

Ha partecipato all’attività di ricerca nell’ ambito del progetto PRIN 1998 (Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale) dal titolo: AIPott: “Realizzazione di un Ambiente Innovativo per il Progetto Ottimizzato di Dispositivi Elettromagnetici”.

Ha partecipato all’attività di ricerca nell’ ambito del progetto PRIN 2000 (Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale) dal titolo:” Strumenti Avanzati per l’Ottimizzazione Progettuale in Elettromagnetismo (SAOPE)”.

Ha partecipato all’attività di ricerca nell’ ambito del progetto PRIN 2002 (Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale) dal titolo:” Implementazione numerica di una formulazione finita dell’elettromagnetismo e analisi comparativa con approcci differenziali e integrali discretizzati”.

Ha partecipato all’attività di ricerca nell’ ambito del progetto PRIN 2005 (Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale) dal titolo:”Tecniche di riscaldamento ad induzione a flusso trasverso per il trattamento di nastri di leghe di materiali non ferrosi e realizzazione di un prototipo e relative prove sperimentali per un sistema di riscaldamento di billette di alluminio in rotazione in un campo statico”.

E’ stato *responsabile* per l’Università di Padova di un progetto di ricerca biennale CRAFT finanziato dall’Unione Europea N. JOE3-CT98-7023 (1 dicembre 1998 – 1 dicembre 2000), svolto in cooperazione con l’Istituto di Elettrotermia dell’Università di Hannover, 2 aziende tedesche e 2 aziende italiane dal titolo:“ Transverse flux induction heating of non-ferrous and precious metal strip”.

Attualmente è *responsabile scientifico* del Progetto di Ateneo (finanziamento 2007- durata 24 mesi): “Ipertermia con radiofrequenze associata a chemioterapia per via sistemica in pazienti affetti da metastasi epatiche da cancro colo-rettale. Treatment planning dei pazienti e sperimentazione clinica” – I progetti di Ateneo sono finanziamenti dati dall’Ateneo sulla base di peer review nazionali e internazionali a giovani ricercatori o professori associati che vogliono avviare o sviluppare nuove tematiche di ricerca di respiro internazionale.

E’ reviewer per le seguenti riviste:

COMPEL

Medical and Biological Computing and Engineering

Medical Physics

Ha fatto parte dell’Editorial Board di numerosi congressi COMPUMAG e CEFC .

Ha ricoperto il ruolo di segretario scientifico dei seguenti congressi internazionali:

- IHS98 – International Induction Heating Seminar – tenutosi a Padova dal 13 al 15 maggio del 1998

- HIS01 - International Seminar on Heating by Internal Sources - tenutosi a Padova dal 12 al 14 settembre 2001
- HES04 – International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources - tenutosi a Padova dal 22-25 giugno del 2004
- HES07 – International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources - tenutosi a Padova dal 19 al 22 giugno del 2007.

Nell'ambito di queste conferenze ha anche ricoperto il ruolo di chairman in diverse sessioni dedicate all'ottimizzazione, ai metodi numerici per la simulazione di problemi elettromagnetici e termici accoppiati e alle applicazioni speciali del riscaldamento ad induzione.

E' stato Guest Editor delle seguenti special Issue di COMPEL (International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering)  
 COMPEL Journal Vol. 22 N. 1 2003 (Selected Papers from HIS01 Conference)  
 COMPEL Journal Vol. 24 N. 1 2005 (Selected Papers from HES04 Conference)  
 COMPEL Journal Vol. 27 N. 2008 (Selected papers from HES07 Conference)

Ha fatto parte del collegio docenti del dottorato di ricerca in Bioelettromagnetismo e Compatibilità Elettromagnetica del Dipartimento di Elettronica e Informatica dell'Università di Padova.

Fa parte del collegio docenti della scuola di dottorato in Ingegneria dell'Informazione (indirizzo Bioingegneria) del Dipartimento di Elettronica e Informatica dell'Università di Padova.

E' stato membro della commissione di Ateneo per lo studio degli effetti dell'esposizione del corpo umano ai campi elettromagnetici.

Ha organizzato nel settembre 2002 in Italia, per conto dell'UIE, (Union International d'Electrothermie) il "Young Engineers Study Tour" viaggio annuale organizzato da questa associazione per far conoscere le realtà industriali nel settore elettrotermico nei diversi paesi europei.

Nel giugno 2004 ha organizzato presso l'Università di Padova un corso intensivo per studenti di dottorato provenienti da diversi paesi europei nel campo del riscaldamento ad induzione e dell'EPM (Electromagnetic Processing of Materials) che ha visto la partecipazione di circa 20 giovani dottorandi da 8 paesi europei diversi.

Ha ricoperto il ruolo di Chairman per la sessione "Optimization and control" nel congresso MEP 2003 (Modelling for Electromagnetic Processing) organizzato dall'Università di Hannover nel marzo 2003.

Ha ricoperto il ruolo di Chairman nella sessione "Plasma applications" nella conferenza EPM 2003 tenutasi a Lione – Francia - nell'ottobre 2003.

Ha ricoperto il ruolo di Chairman nella sessione "Environmental Friendly – Magnetic Separation" nella conferenza EPM 2006 tenutasi a Sendai – Giappone - nell'ottobre 2006.

Nel periodo maggio 2003-luglio 2003 ha ospitato presso il Laboratorio di elettrotermia di Padova il ricercatore dell'Università di Città del Capo (Sudafrica) Irshad Khan per lo sviluppo di una ricerca in collaborazione con tale Università sul tema "Progetto di un generatore a radiofrequenza per il trattamento ablativo di metastasi epatiche".

Ha ricoperto il ruolo di responsabile dei servizi informatici del Dipartimento di Ingegneria elettrica dovendosi occupare della gestione della rete, dei servizi di posta elettronica e del laboratorio didattico PC.

E' stato rappresentante della Facoltà di Ingegneria nella commissione di Ateneo che si occupa dei rapporti tra Università e Mondo del Lavoro.

E' stato membro aggiunto nella commissione per gli esami di stato per l'abilitazione alla professione di ingegnere per le sessioni primaverile e autunnale 1995 e 2000.

E' stato membro di commissione per l'esame finale di dottorato in diverse sedi.

Nel 2003 è stato eletto commissario ed ha svolto i lavori di commissione per il concorso ad un posto di professore di II fascia nel raggruppamento concorsuale ING-IND/31 presso la Facoltà di Ingegneria del Politecnico di Torino.

Nel 2004 è stato eletto commissario ed ha svolto i lavori di commissione per il concorso ad un posto di professore di II fascia nel raggruppamento concorsuale ING-IND/31 presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Palermo.

Nel 2006 è stato eletto commissario e ha svolto i lavori di commissione per il concorso ad un posto di ricercatore nel raggruppamento concorsuale ING-IND/31 presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna.

Nel 2007 è stato eletto commissario e ha svolto i lavori di commissione per il concorso ad un posto di ricercatore nel raggruppamento concorsuale ING-IND/31 presso la Facoltà di Ingegneria del Politecnico di Milano.

## **Riconoscimenti, invited lectures e papers, seminari e comitati**

Nel dicembre 1996 e' stato invitato presso l'Istituto di Elettrotermia di Hannover a tenere un seminario dal titolo: "Attività di ricerca svolte presso il laboratorio di Elettrotermia di Padova".

Nel novembre 1997 e' stato invitato a tenere presso l'Istituto di Elettrotermia di Hannover un seminario dal titolo: "Tecniche di ottimizzazione applicate alla progettazione di sistemi di riscaldamento ad induzione".

Nell'aprile 2005 è stato invitato presso l'Università di Ilmenau a tenere un seminario dal titolo "Fusione in levitazione mediante campi elettromagnetici".

Nel giugno 2005 è stato invitato a tenere un corso intensivo "Tecnologia del riscaldamento ad induzione" nell'ambito della scuola di dottorato in Ingegneria Elettrotecnica dell'Università di Bologna.

Nel novembre 2005 ha partecipato con un "invited paper" al congresso ICHS 2005 XXVII annual meeting (International conference of Hypethermic Clinical Society)

Nel giugno 2006 è stato invitato a tenere un corso intensivo sui "Metodi numerici applicati alla progettazione di impianti di riscaldamento ad induzione" nell'ambito della scuola di dottorato in ingegneria elettrotecnica dell'Università "La Sapienza" di Roma.

Nel maggio 2007 è stato invitato a tenere un seminario dal titolo "Numerical methods for the prediction of electromagnetic and thermal field distribution during hyperthermia treatments", nell'ambito della scuola di dottorato in Ingegneria Elettrotecnica del Politecnico di Torino.

Nel maggio 2007 è stato invitato presso il Policlinico di Graz a tenere un seminario dal titolo: "Numerical simulation of hyperthermia treatments: a powerful method for treatment planning".

Nel novembre 2007 è stato invitato come relatore dalla società nazionale SITILO (Società Italiana di Terapie Integrate Locoregionali in Oncologia) nell'ambito del convegno "Focus on Innovative Locoregional Oncotherapies"

Nel maggio 2008 è stato invitato come relatore dalla società nazionale SITILO (Società Italiana di Terapie Integrate Locoregionali in Oncologia) nell'ambito della giornata di studio relativa alle "Tecniche innovative per la cura dei tumori" organizzata dall'Istituto dei Tumori IRCSS Giovanni Paolo II di Bari.

E' stato eletto nel 2007 membro nell'International Board dell'European Society of Hyperthermic Oncology, come rappresentante della comunità scientifica italiana.

Fa parte del gruppo di esperti internazionali WG9 del CENELEC, che si occupa di redigere le normative europee riguardanti la valutazione di rischio da campi elettromagnetici in prossimità di impianti di riscaldamento ad induzione.

Fa parte del comitato tecnico CT27 – Elettrotermia del CEI. Tale comitato si occupa di redigere e valutare proposte di norme riguardanti gli impianti elettrotermici in genere.

Ha ricevuto il premio come “Best poster paper “ nell’ambito del congresso internazionale CEFC per il lavoro: “M. Bullo, F. Dughiero, M. Guarnieri, E. Tittone: “The Prediction of Temperature Distribution in RF-Ablation Therapy by Means of the Cell Method”.

Ha ricevuto il premio come best paper nella conferenza ESHO2007 tenutasi a Praga nel giugno 2007 con il lavoro: “Numerical FEM Models for the Prediction of Temperature during MW Superficial Hyperthermia Treatments”.

Nell’aprile 2008 è stato invitato dall’AIM – Associazione Italiana di Metallurgia – a tenere una lezione dal titolo: “La tecnologia della tempra superficiale ad induzione: caratteristiche principali, parametri di processo, applicazioni” presso la sede del Politecnico di Milano a Piacenza.

Nel maggio 2008 è stato invitato dalla Società AIDII – Associazione Italiana dei Medici Igienisti ambientali – a tenere un seminario dal titolo:”Esposizione umana ai campi elettromagnetici in ambiente industriale: valutazioni e bonifiche”.

## Attività scientifica

L'attività scientifica di Fabrizio Dughiero è stata svolta presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Padova e il Dipartimento Elettrico, Elettronico e Sistemistico dell'Università di Catania. Gli argomenti trattati riguardano prevalentemente l'Elettrotermia (disciplina scientifica del gruppo concorsuale ING-IND31) e in particolare il riscaldamento ad induzione, l'impiego di metodi numerici per lo studio dei campi elettromagnetici e termici accoppiati, lo sviluppo e l'applicazione di tecniche di ottimizzazione per la progettazione ottima di dispositivi elettromagnetici e in particolare di sistemi di riscaldamento ad induzione. In questi ultimi anni, il candidato si è occupato anche di sviluppo di formulazioni innovative per la soluzione di problemi di campo basate sulla formulazione finita dell'elettromagnetismo (metodo delle celle) e ha avviato un nuovo filone di ricerca che riguarda lo studio di tecniche ipertermiche per la cura di tumori con particolare riguardo allo sviluppo di codici numerici per la soluzione di problemi elettromagnetici e termici accoppiati in presenza della perfusione sanguigna (soluzione dell'equazione di Pennes) in organi particolari del corpo umano (fegato, pelvi, cervello etc.).

Nell'attività di ricerca il candidato ha sempre cercato di trovare il giusto equilibrio tra approfondimento teorico e attività sperimentale. E' per questo motivo che in un gran numero di pubblicazioni insieme ai risultati ottenuti con metodi di calcolo, spesso innovativi e originali, si sono affiancati anche i risultati sperimentali necessari per verificare l'efficacia dei metodi proposti e per acquisire quella sensibilità pratica necessaria per comprendere le differenze tra il modello matematico e la realtà fisica.

Alcuni temi di ricerca sono stati sviluppati in collaborazione con ricercatori italiani e/o di altri paesi ritenendo fondamentale per la crescita la cooperazione tra gruppi di estrazione culturale diversa. Lo scambio di idee, la conoscenza di metodologie nuove e di nuovi o complementari punti di vista su argomenti di ricerca comune è fondamentale per l'avanzamento culturale e della ricerca in sé.

L'attività scientifica di tipo sperimentale necessita anche di un congruo numero di ricercatori e per questo motivo in questi anni è stato fatto un notevole sforzo per creare un gruppo minimo stabile all'interno del laboratorio di Elettrotermia, come si può dedurre dai nomi degli autori delle diverse pubblicazioni.

Negli ultimi anni il candidato è diventato responsabile del Laboratorio di Elettrotermia di Padova. Tale laboratorio, attualmente, vede la presenza di quattro persone strutturate (un prof. di I fascia, un professore di II fascia, un ricercatore e un tecnico laureato), tre studenti di dottorato, e 5/6 studenti in tesi per ogni anno accademico.

Le principali ricerche svolte si riferiscono ai seguenti temi:

- a) *Analisi di problemi elettromagnetici e termici accoppiati mediante la realizzazione di procedure numeriche basate sul metodo delle differenze finite, degli elementi finiti e degli integrali di volume. Studio dell'influenza reciproca generatore-carico nel riscaldamento ad induzione, mediante l'implementazione di procedure di accoppiamento delle equazioni circuitali e di campo.*
- b) *Studio e implementazione di metodi analitici monodimensionali e bidimensionali e impiego di metodi numerici per lo studio di sistemi di riscaldamento ad induzione a campo progressivo con alimentazione polifase*
- c) *Analisi di sistemi di riscaldamento ad induzione a flusso trasverso per il riscaldamento di nastri metallici di materiali non magnetici e magnetici*

- d) *Sviluppo e implementazione di tecniche di ottimizzazione e loro impiego nella progettazione automatica di dispositivi elettromagnetici, di sistemi di riscaldamento ad induzione e per il controllo della superficie libera di metalli fusi.*
- e) *Esposizione umana ai campi elettromagnetici in prossimità di impianti elettrotermici in ambiente industriale.*
- f) *Analisi di tecniche di ipertermia, basate sull'utilizzo di sorgenti elettromagnetiche, e sviluppo di metodi e procedure per il "treatment planning" di pazienti sottoposti a ipertermia per la cura di tumori*
- g) *Sviluppo di formulazioni innovative basate sul metodo delle celle per lo studio di problemi elettromagnetici in regime quasi-stazionario e termici. Applicazioni di tali formulazione alla soluzione di problemi elettromagnetici e termici accoppiati nel riscaldamento ad induzione e nell'ipertermia.*

## Breve descrizione delle ricerche

*Analisi di problemi elettromagnetici e termici accoppiati mediante la realizzazione di procedure numeriche basate sul metodo delle differenze finite, degli elementi finiti e degli integrali di volume. Studio dell'influenza reciproca generatore-carico nel riscaldamento ad induzione, mediante l'implementazione di procedure di accoppiamento delle equazioni circuitali e di campo.*

E' ben nota l'importanza di una previsione esatta delle caratteristiche dei transitori termici nel riscaldamento ad induzione di corpi ferromagnetici sia nelle applicazioni industriali del riscaldamento a cuore (forgiatura, laminazione, stampaggio) sia nei trattamenti termici degli acciai (tempra, rinvenimento, bonifica) al fine di ottenere una progettazione ed un esercizio ottimali dell'impianto.

Oggi sono disponibili numerosi pacchetti software che consentono la soluzione di problemi elettromagnetici e termici sia tridimensionali che bidimensionali. Tali pacchetti non sono però dedicati alla soluzione di problemi di riscaldamento ad induzione.

Per questo motivo sono state studiate e implementate procedure basate sul metodo delle differenze finite che consentono la soluzione di problemi elettromagnetici e termici accoppiati sia in geometrie con simmetria cilindrica che in billette di sezione rettangolare e per materiali che hanno caratteristiche non lineari, variabili sia in funzione della temperatura (resistività elettrica, conducibilità termica, calore specifico) sia in funzione della temperatura e dell'intensità del campo magnetico (permeabilità magnetica).

Per quanto riguarda le billette a simmetria cilindrica è stato implementato un programma numerico in linguaggio FORTRAN utilizzabile su PC che consente di simulare diversi processi di riscaldamento ad induzione sia a partire da campo imposto in superficie sia da tensione impressa sull'induttore. Tale programma è stato confrontato con risultati sperimentali e con altri programmi basati su metodi diversi.

Il software sviluppato consente di ottenere in uscita il transitorio termico completo del pezzo in riscaldamento con le relative distribuzioni di temperatura lungo il raggio in diversi istanti del transitorio. Inoltre sono disponibili, alla fine del calcolo, anche i parametri integrali del sistema quali il rendimento elettrico, il fattore di potenza, la totale potenza assorbita.

In un secondo tempo lo stesso pacchetto è stato ampliato per renderlo adatto allo studio di processi di tempra con rifusione superficiale, una tecnologia relativamente recente che consente di ottenere particolari caratteristiche metallurgiche della superficie del pezzo trattato. In questa versione il programma consente di studiare il comportamento di barrette d'acciaio sottoposte ad un campo magnetico di tipo impulsivo con frequenze dell'ordine di 450 kHz e consente di prevedere il comportamento del metallo anche nello stato fuso. Inoltre consente di prevedere la velocità di fusione e di solidificazione del materiale, parametro fondamentale per valutare le caratteristiche metallurgiche del materiale stesso.

Il software sviluppato è stato utilizzato per la progettazione di numerosi sistemi di riscaldamento ad induzione per la tempra e il rinvenimento in continuo di barre cilindriche d'acciaio e per la progettazione di sistemi di riscaldamento in continuo per il trattamento termico di fili d'acciaio con produzioni orarie elevate.

Lo sviluppo della procedura sopra descritta ha consentito, inoltre, di studiare i problemi che nascono nell'accoppiamento del carico, tipico di un processo di riscaldamento ad induzione, con il convertitore di frequenza atto a fornire la potenza, la corrente e la tensione necessarie.

Infatti per queste applicazioni vengono di solito usati convertitori di frequenza (a SCR, MOSFET, IGBT o triodi) le cui caratteristiche di uscita (tensione, frequenza, potenza) dipendono in maniera determinante dalle caratteristiche del carico (load resonant converters). E' chiaro quindi che se il

corpo in riscaldamento è ferromagnetico le notevoli variazioni dell'impedenza del carico in funzione della temperatura comportano, in talune applicazioni, notevoli variazioni delle caratteristiche di uscita del convertitore e quindi dei tempi di riscaldamento e dell'andamento del transitorio termico.

Sono state implementate delle procedure numeriche che accoppiano le equazioni per la soluzione del problema elettromagnetico e termico accoppiato con quelle che descrivono il comportamento dei circuiti elettronici di potenza relativi ai generatori. L'utilizzo del software sviluppato ha consentito di prevedere i limiti di variazione dei tempi e degli spessori di tempra in funzione dei parametri del generatore utilizzato.

Quest'ultimo studio è stato sviluppato in collaborazione con il prof. Yuri Blinov dell'Università Elettrotecnica di S. Pietroburgo (Russia), nell'ambito di un accordo di cooperazione scientifica fra l'Università di Padova e quella Università.

Sempre nell'ambito di questo filone di ricerca si sono sviluppati modelli numerici basati sul metodo delle differenze finite che consentono di ricavare i transitori termici nel riscaldamento ad induzione di billette di sezione rettangolare di materiale sia non magnetico che magnetico. Per quanto riguarda i materiali magnetici un aspetto fondamentale nel calcolo dei transitori termici risulta essere la transizione di Curie. Infatti durante questa transizione e per le modalità di trasferimento di calore nel riscaldamento ad induzione, alcune parti della billetta sono ancora magnetiche mentre altre sono già non magnetiche. Per questo motivo si deve prevedere un processo di "mesh" adattativa che consenta di seguire il fronte di separazione tra materiale magnetico e non. La procedura numerica è stata implementata in ambiente MATLAB ed è stata verificata dapprima con altri metodi numerici e analitici e poi con prove sperimentali.

Negli ultimi tempi si è rivolta l'attenzione allo studio di dispositivi noti come LEL (Longitudinal Electromagnetic Levitators) che consentono di fondere materiali mantenuti in sospensione da forze elettromagnetiche prodotte dallo stesso induttore responsabile del riscaldamento.

Per la simulazione di questi dispositivi sono stati dapprima sviluppati codici analitici bidimensionali che hanno consentito di ricavare i principali parametri che controllano il processo (numero di conduttori, correnti, frequenze, forze e posizione del pezzo in fusione). Tramite tali codici si sono studiate diverse configurazioni e si sono calcolati i transitori termici di riscaldamento per raggiungere la fusione. Uno dei maggiori problemi da affrontare nello studio di questi sistemi è la contemporanea presenza di due frequenze di alimentazione: una, in alta frequenza (200-450 kHz) dedicata esclusivamente al riscaldamento con la quale viene alimentata la parte superiore dell'induttore e una, in media frequenza (4-15 kHz) dedicata alla levitazione della billetta da fondere. Insieme ai codici analitici sono state sviluppate delle procedure di calcolo FEM in grado di eseguire in modo corretto ed efficiente l'analisi di tali sistemi. I problemi che si sono affrontati per l'implementazione di tali procedure riguardano il calcolo in regime di time-harmonic di un sistema alimentato con due frequenze diverse, il calcolo delle forze di levitazione eseguito mediante una procedura di "sliding mesh" in grado di valutare la forza sul pezzo per diverse posizioni verticali, il calcolo delle forze laterali e quindi la stabilità del sistema mediante procedure di sliding mesh in grado di valutare la forza di tipo orizzontale sul pezzo.

Tutti questi codici di calcolo sono stati usati per il dimensionamento di due prototipi di LEL installati presso il Laboratorio di Elettrotermia di Padova sui quali sono state eseguite numerose prove che hanno consentito di verificare l'attendibilità dei codici stessi.

*Pubblicazioni sul tema:* [R8], [R17], [R23], [R29], [R32], [C1], [C2], [C3], [C4], [C9], [C10], [C13], [C14], [C19], [C24], [C31], [C44], [C47], [C50], [C51], [C69], [C72], [C73]

*Studio e implementazione di metodi analitici monodimensionali e bidimensionali e impiego di metodi numerici per lo studio di sistemi di riscaldamento ad induzione a campo progressivo con alimentazione polifase*

I vantaggi di questi sistemi di riscaldamento, che possono essere pensati come motori lineari nei quali si cerca di rendere massime le perdite al “secondario”, sono molteplici. Tra i più importanti citiamo la possibilità di utilizzare frequenze industriali in luogo di alte frequenze, la possibilità di realizzare carichi equilibrati anche per potenze elevate evitando l’uso di circuiti di “simmetrizzazione” del carico, quello di ridurre le vibrazioni e la rumorosità del sistema induttore-carico dovute alla forza in gioco e, infine, quello di ottenere convenienti distribuzioni delle potenze specifiche nel corpo in riscaldamento, tali da assicurare al termine del processo l’uniformità di temperatura richiesta per le successive lavorazioni a caldo.

Tenuto conto dell’importanza industriale assunta oggi dal riscaldamento con avanzamento continuo di nastri metallici, sono stati sviluppati numerosi studi per il dimensionamento di induttori per queste applicazioni.

E’ stata sviluppata una notevole mole di lavoro su questo tema con specifico riferimento ai sistemi di tipo TWIH (Travelling Wave Induction Heaters). Il lavoro di ricerca è stato svolto anche in collaborazione con il gruppo di ricerca del prof. V. Nemkov dell’Università Elettrotecnica di S. Pietroburgo (Russia).

Le ricerche si sono concentrate su tre aspetti del problema:

1) Sviluppo di codici di calcolo analitici per sistemi di tipo TWIH sia per configurazioni assialsimmetriche (riscaldamento di contenitori cilindrici per il trattamento di vernici e altri prodotti chimici) sia per configurazioni piane di tipo “double side” (per il riscaldamento di corpi piani). Sono stati sviluppati codici sia monodimensionali che bidimensionali.

Per mezzo di tali codici è stata sviluppata una vasta analisi parametrica che ha consentito di approfondire la conoscenza di questi sistemi che fino ad oggi sono stati utilizzati molto poco nelle applicazioni elettrotermiche per l’elevato numero di parametri da considerare nella progettazione.

I codici numerici oggi disponibili, basati sul metodo degli elementi finiti o quelli da noi sviluppati basati sul metodo degli integrali di volume, sono infatti particolarmente utili per l’analisi dettagliata di singole configurazioni, ma male si prestano per l’analisi parametrica necessaria, preliminarmente, per individuare le configurazioni e gli schemi di avvolgimento più favorevoli.

2) Studio di configurazioni ottimali di TWIH, che consentono di ottenere convenienti distribuzioni delle potenze specifiche nel corpo da riscaldare.

In particolare è stata analizzata, con metodi numerici, l’influenza su tali distribuzioni della presenza delle cave e dei denti (i metodi analitici non possono tener conto di questi effetti a meno che non si voglia complicare di molto lo sviluppo cosa che va poi a ridurre i vantaggi dei codici analitici stessi) e proposta la riduzione delle disuniformità di potenza trasferita al carico da essa prodotte (“pulsazioni di dentatura”) mediante l’individuazione di una posizione ottima dell’induttore superiore rispetto a quello inferiore nella direzione di avanzamento del nastro.

Sono state analizzate le caratteristiche di un riscaldatore con avanzamento della lastra in direzione trasversale e longitudinale rispetto alle cave dell’induttore e inoltre si sono studiati, mediante metodi FEM 3D, per questi casi, gli effetti di bordo longitudinali e trasversali del carico e dell’induttore.

3) Sviluppo di codici di calcolo per l’analisi delle forze in sistemi di tipo TWIH.

Come accennato nella premessa, un aspetto importante di questi sistemi è la valutazione delle forze. Infatti, come è noto, il campo progressivo creato dall’alimentazione polifase crea due tipi di forze: una componente costante e una componente alternativa a frequenza doppia di quella di alimentazione. La prima è responsabile della eventuale “spinta” che in alcuni casi può essere

sfruttata come "motore" per il movimento del nastro stesso. La seconda è responsabile delle vibrazioni del corpo in riscaldamento e dell'induttore stesso. Tali vibrazioni possono causare rumore e pertanto ne va valutata la loro entità al fine di non incorrere in errori grossolani nella progettazione del sistema. Infatti esistono delle normative che regolano il livello di rumore nei pressi di apparecchiature in ambienti di lavoro e quindi una valutazione delle frequenze e dell'entità di tale rumore risulta essere di fondamentale importanza anche in fase di progettazione.

*Pubblicazioni sul tema:* [R3], [R6], [R7], [R14], [C5], [C6], [C7], [C8], [C11], [C15], [C23]

*Analisi di sistemi di riscaldamento ad induzione a flusso trasverso per il riscaldamento di nastri metallici di materiali non magnetici e magnetici*

Come messo in evidenza precedentemente, un problema di grande attualità nell'industria metallurgica è quello del miglioramento dei procedimenti di riscaldamento con avanzamento continuo di nastri metallici prima di successive lavorazioni a caldo.

Una delle soluzioni oggi maggiormente studiate allo scopo è quella dell'impiego di induttori a flusso trasverso, che consentono di realizzare impianti facilmente adattabili a diverse esigenze produttive (quali diversi spessori e larghezze delle lamiere, lamiere di diversi metalli, etc.) e allo stesso tempo economia di esercizio.

Tali dispositivi, anche se proposti già da molto tempo, sono stati impiegati con successo solo recentemente. Infatti la progettazione di questi sistemi non può prescindere da uno studio approfondito tridimensionale di fenomeni quali l'influenza sulla distribuzione delle correnti indotte delle testate degli avvolgimenti dell'induttore e della posizione del bordo della lamiera rispetto alle estremità dell'induttore stesso.

Inoltre è di fondamentale importanza la previsione dei profili di temperatura all'uscita del sistema di riscaldamento.

Questi studi risultano difficili da eseguire per via sperimentale in quanto richiedono la costruzione di apparati di notevole potenza e per il fatto che non sono facilmente estraibili da risultati su prototipi comportamenti di carattere generale.

L'utilizzo di codici numerici basati sul metodo degli elementi finiti risulta di notevole aiuto nella progettazione di tali sistemi.

Le configurazioni che si devono studiare sono tutte tridimensionali ma anche in questo caso una prima valutazione delle caratteristiche generali può essere fatta utilizzando codici analitici e numerici bidimensionali.

Per questo motivo sono stati sviluppati dei codici analitici bidimensionali che consentono un'analisi parametrica di questi sistemi e le configurazioni più interessanti sono state studiate in maniera più approfondita tramite l'utilizzo di codici numerici tridimensionali.

Lo studio ha portato innanzitutto a definire dei criteri generali di progettazione e inoltre sono stati progettati induttori per applicazioni specifiche come quello per la ricottura di lastre sottili di metalli preziosi (oro, argento) con elevate produzioni orarie.

Per quanto riguarda quest'ultima applicazione sono state svolte anche ricerche metallurgiche in collaborazione con il gruppo di metallurgia del prof. Tiziani del Dipartimento di Tecnologie e Gestione dei Sistemi Industriali dell'Università di Padova.

Nel 1998 è stato dato un ulteriore impulso alla ricerca avendo ottenuto un congruo finanziamento dall'Unione Europea per lo sviluppo di un progetto biennale legato alla progettazione e all'utilizzo della tecnica del flusso trasverso per il riscaldamento di nastri di materiale non magnetico (progetto N. JOE3-CT98-7023 – 1998-2000).

Nell'ambito di tale progetto, nel laboratorio di Elettrotermia del Dipartimento sono stati sviluppati codici di calcolo ad hoc in grado di risolvere problemi elettromagnetici e termici accoppiati 3D nelle configurazioni tipiche di questi sistemi. Tali codici, basati su sviluppi analitici per la soluzione del problema elettromagnetico e numerici (differenze finite) per la soluzione del problema termico, si sono rivelati potentissimi strumenti di progettazione. Dagli studi approfonditi svolti con l'ausilio di questi codici si sono sviluppate configurazioni innovative di induttori per il riscaldamento di nastri con larghezze variabili da 50 a 200 mm e spessori variabili da 0.5 a 2 mm. Si è costruito un prototipo industriale (potenza nominale  $P=100$  kW; frequenza di alimentazione  $f=1000-4000$  Hz; larghezza dei nastri in prova: 40-200 mm; velocità di avanzamento del nastro controllata da un azionamento nel range 400mm/min-10 m/min; lunghezza totale del prototipo  $L=8$  m), installato presso il Laboratorio di Elettrotermia del Dipartimento, sul quale sono state eseguite approfondite

campagne di misura. Si sono allestite delle prove per la valutazione dei parametri integrali del sistema quali impedenza, potenza attiva e reattiva assorbita in funzione della velocità e della temperatura di uscita del nastro. Sono state inoltre eseguite prove di tipo calorimetrico per la valutazione del rendimento del sistema. Particolarmente ardua è stata la misura di temperatura all'uscita dell'induttore, eseguita mediante l'utilizzo di una termocamera, e durante tutto il transitorio termico all'interno della camera di riscaldamento mediante termocoppie striscianti sul nastro o direttamente a contatto con il nastro stesso e trascinate insieme ad esso durante il processo di riscaldamento. Ulteriori verifiche sono servite per valutare i parametri metallurgici del materiale trattato (durezza, dimensione del grano etc.). I risultati sperimentali hanno consentito di valutare l'affidabilità delle procedure sviluppate per la progettazione di tali sistemi. In questi ultimi anni la ricerca si è concentrata anche sullo sviluppo di formulazioni FEM adatte a risolvere problemi elettromagnetici e termici accoppiati in configurazioni di tipo TFH (Transverse Flux Heating) per carichi ferromagnetici ovvero con caratteristiche spinte di non linearità sia per quanto riguarda le caratteristiche termiche dei materiali (conducibilità, calore specifico), ma soprattutto per le caratteristiche elettriche e in particolare per la permeabilità che in questo caso è dipendente sia dal campo magnetico che dalla temperatura (transizione di Curie). Le formulazioni miste utilizzate di tipo scalare ridotto, AV e surface impedance per carichi non lineari, hanno consentito di ottenere ottimi risultati in accordo con prove sperimentali, mantenendo accettabili i tempi di calcolo, ovvero dell'ordine di una decina di giorni di CPU su macchine multiprocessore con sistemi operativi a 64 bit in modo da poter gestire almeno 32 Gb di memoria RAM. In aggiunta sono state sviluppate procedure di calcolo particolari per la soluzione di problemi elettromagnetici e termici accoppiati su nastri in movimento.

I risultati della ricerca, oltre a dar luogo a numerose pubblicazioni presentate a congressi internazionali e/o pubblicati su rivista con referee hanno consentito di dimensionare impianti reali nell'ambito di contratti di ricerca stipulati con aziende italiane del settore.

*Pubblicazioni sul tema:* [R4], [R9], [R12], [R14], [R22], [C15], [C16], [C18], [C22], [C28], [C33], [C34], [C38], [C49], [C65], [C74], [M2]

*Sviluppo e implementazione di tecniche di ottimizzazione e loro impiego nella progettazione automatica di dispositivi elettromagnetici, di sistemi di riscaldamento ad induzione e per il controllo della superficie libera di metalli fusi.*

Durante un primo periodo l'attenzione è stata rivolta allo sviluppo di tecniche di tipo deterministico quali il metodo di Hooke e Jeeves basato su una ricerca diretta e il metodo di Fletcher and Reeves in cui viene utilizzato anche il gradiente della funzione. Tali algoritmi, sviluppati sia in ambiente FORTRAN che MATLAB, sono stati utilizzati sia accoppiandoli con codici analitici appositamente sviluppati per la determinazione della funzione costo, sia con codici numerici sviluppati ad hoc, come il metodo degli integrali di volume, ma anche con codici commerciali di tipo FEM. L'accoppiamento con codici FEM commerciali ha richiesto uno sforzo di programmazione non indifferente in quanto si sono scritte delle "user subroutines" in linguaggio FORTRAN in grado di indirizzare il codice nella valutazione della funzione obiettivo e nello stesso tempo di aggiornare le variabili di progetto. Al fine di provare le procedure sviluppate si sono utilizzati, oltre alle ben note funzioni analitiche utilizzabili per questi scopi, dei problemi benchmark noti nella letteratura specialistica o appositamente sviluppati.

Nello specifico questi algoritmi sono stati utilizzati nella progettazione di installazioni per il riscaldamento intermedio di billette di acciaio magnetico prima di una loro successiva laminazione. In questi impianti è richiesto, infatti un riscaldamento uniforme sia lungo la sezione del pezzo sia in direzione testa-coda. Il problema consiste nel ricavare opportune curve di potenza che poi vengono implementate nel controllo della potenza in uscita dei convertitori di frequenza per diversi diametri, lunghezze e produzioni orarie. A questo scopo è stato utilizzato l'algoritmo di Hooke e Jeeves associato ad un codice basato sul metodo delle differenze finite per il calcolo dei transistori termici. I risultati hanno portato ad un corretto dimensionamento degli induttori e del sistema di controllo dell'impianto altrimenti realizzabile solamente tramite un numero elevato di prove in esercizio e al successivo rifacimento degli induttori.

Un'altra applicazione ha riguardato la levitazione e il confinamento magnetico di metalli fusi. Tali dispositivi vengono utilizzati nei sistemi di colata continua al fine di evitare il contatto tra il metallo nella fase di solidificazione e la filiera. Tale processo consente di ottenere colate di elevata qualità e prive di difetti superficiali. Attualmente il progetto dei sistemi per il confinamento elettromagnetico del metallo fuso nel processo di colata continua passa per una laboriosa procedura "trial-and-error" con un notevole dispendio di tempo. Lo scopo del lavoro sviluppato è stato quello di trovare la posizione migliore delle spire dell'induttore e dello schermo magnetico in modo tale da produrre una curva della pressione magnetica atta ad equilibrare la spinta idrostatica del fuso. Il metodo proposto è risultato efficace e sulla base dei risultati delle simulazioni sono state proposte delle configurazioni innovative e originali che consentono di ottenere curve di pressione che producono un conveniente e preciso confinamento del metallo fuso.

Un altro problema interessante e di particolare applicazione pratica ha riguardato l'ottimizzazione degli effetti di bordo di un induttore per il riscaldamento ad induzione di un suscettore di grafite.

Nella produzione di semiconduttori esiste una fase, nota come crescita epitassiale, che richiede un trattamento termico dei wafer in Silicio in atmosfera controllata e con una ottima uniformità di temperatura.

Tale trattamento viene convenientemente ottenuto attraverso un riscaldamento di un disco di grafite sul quale vengono posti i wafer da trattare. Il riscaldamento del disco di solito viene ottenuto attraverso un induttore di tipo "Pancake", costituito da un numero variabile di spire alimentato con una frequenza opportuna.

Lo scopo del problema di ottimizzazione è quello di ottenere una distribuzione geometrica delle spire che costituiscono l'induttore in modo tale da garantire una uniforme distribuzione di temperatura nel disco di grafite.

Per la soluzione del problema si sono utilizzate tecniche di ottimizzazione stocastiche basate sugli algoritmi genetici, sulle strategie di tipo evolutivo e sull'algoritmo del Simulated Annealing.

Tra i diversi problemi affrontati, interessante è stato quello dell'ottimizzazione della configurazione geometrica di un induttore utilizzato nella saldatura di materiali termoplastici con interposto un foglio di alluminio (contenitori tetrapak).

Dal punto di vista elettrico i parametri da ottimizzare sono il rendimento dell'induttore, definito come rapporto tra potenza trasferita al film di alluminio e totale potenza assorbita dall'induttore e la distribuzione delle densità di potenza nello strato di alluminio. È necessario, inoltre, introdurre un vincolo sul fattore di merito, rapporto tra la potenza reattiva e quella attiva, che deve rimanere entro un valore prestabilito, al fine di ottenere una risposta in frequenza sufficientemente piatta e permettere un migliore adattamento del sistema induttore-carico.

Il problema risulta di tipo vettoriale in quanto le due funzioni obiettivo non sono tra di loro correlate. Tale problema è stato "scalarizzato" attraverso l'uso di "membership functions" ovvero utilizzando una logica di tipo "fuzzy" mentre, per quanto riguarda gli algoritmi di ottimizzazione si sono utilizzati sia metodi deterministici che stocastici e in particolare algoritmi di tipo genetico.

L'analisi termica successiva all'ottimizzazione dei soli parametri elettromagnetici ha consentito di verificare che la distribuzione di potenza ottimizzata consente di ottenere una distribuzione di temperatura uniforme e quindi una saldatura larga, adatta ad applicazioni di questo tipo, mantenendo un rendimento di processo accettabile.

Si è poi concentrata l'attenzione sull'impiego e l'implementazione di algoritmi di tipo ibrido (stocastico-deterministico) per l'ottimizzazione di funzioni vettoriali. La procedura implementata consiste in una parte che utilizza algoritmi di evolution strategy di tipo 1+1 e una seconda basata sul metodo del semplice.

Con questo algoritmo si è affrontata la progettazione di un sistema di riscaldamento ad induzione a flusso trasverso per il riscaldamento in continuo di nastri metallici di materiale non magnetico.

Le tecniche di riscaldamento di questo tipo risultano essere vantaggiose per il trattamento di nastri in quanto consentono di ottenere ottimi rendimenti con frequenze basse come spiegato precedentemente.

La difficoltà maggiore nella progettazione di questi sistemi sta nella previsione dei transitori termici che richiedono la soluzione di problemi elettromagnetici e termici in geometrie tridimensionali.

Le caratteristiche che vengono richieste ad un processo di questo tipo sono elevato rendimento e uniformità di temperatura nella sezione trasversale del nastro durante tutto il processo di riscaldamento. Tali obiettivi, da una analisi di sensibilità operata attraverso un codice analitico-numerico (analitico per la parte elettromagnetica, numerico per la parte termica) sviluppato appositamente per questo lavoro, risultano essere in contrasto tra di loro.

Il problema è quindi di tipo vettoriale e l'approccio utilizzato per la soluzione ha visto l'utilizzo di procedure basate sia sulla scalarizzazione della funzione obiettivo vettoriale con tecniche di tipo "fuzzy", sia sulla scelta a posteriori degli ottimi attraverso i criteri di Pareto.

Per quanto riguarda il primo approccio (scalarizzazione del problema vettoriale) i risultati ottenuti hanno dimostrato la validità dell'algoritmo implementato; infatti confrontando l'efficacia dei due algoritmi (evolution strategy e semplice) utilizzati singolarmente con quello misto si è riscontrata una maggiore velocità di quest'ultimo nel trovare i minimi della funzione obiettivo mantenendo una buona qualità di questi ultimi.

Dai risultati dell'ottimizzazione si sono scelte alcune configurazioni che sono state provate sperimentalmente su di un prototipo installato presso il Laboratorio di Elettrotermia di Padova. I risultati delle prove sperimentali hanno confermato la validità della procedura adottata.

Lo stesso problema è stato poi affrontato direttamente come soluzione del problema di tipo vettoriale. L'uso degli algoritmi di tipo evolutivo consente di affrontare questi problemi in un modo sistematico evitando la definizione di funzioni derivate attraverso sistemi di scalarizzazione.

Tuttavia il costo di un approccio sistematico talvolta risulta proibitivo. E' peraltro vero che nei problemi pratici una approssimazione delle funzioni del fronte di Pareto è spesso accettabile portando ad un costo computazionale ridotto.

Partendo da queste considerazioni si è cercato di risolvere il problema della progettazione ottima del sistema di riscaldamento a flusso trasverso direttamente basandosi sulla definizione della "Pareto optimality". In generale quindi partendo da una popolazione iniziale di individui che sono distribuiti in modo casuale nella "feasible region" il criterio di ottimizzazione citato è applicato a ciascun individuo e questo porta ad una popolazione finale che si distribuisce su un fronte ottimo di Pareto. Il principale vantaggio del metodo è il ridotto tempo di calcolo essenzialmente legato a due ragioni fondamentali: la storia di ciascun individuo è governata da una strategia evolutiva del più basso ordine (1+1) e inoltre l'algoritmo non richiede di valutare la popolazione corrente ordinandola in fronti di Pareto ad ogni iterazione. D'altro canto, gli individui non interagiscono tra di loro durante l'evoluzione e perciò potrebbero creare dei cluster prima della convergenza.

Per quantificare la convergenza verso soluzioni non dominate si sono utilizzati due particolari indici valutati di volta in volta all'interno dell'algoritmo di ottimizzazione.

Tale procedura è stata applicata alla progettazione di un sistema di riscaldamento a flusso trasverso e anche in questo caso i risultati dell'ottimizzazione sono stati poi verificati attraverso soluzioni ottenute con codici numerici e anche attraverso prove sperimentali sul prototipo installato presso il Laboratorio di Elettrotermia.

*Pubblicazioni sul tema:* [R2], [R5], [R8], [R10], [R11], [R13], [R16], [R18], [R19], [R24], [R25], [R34], [C17], [C25], [C29], [C30], [C35], [C47], [C52]

g) *Esposizione umana ai campi elettromagnetici in prossimità di impianti elettrotermici in ambiente industriale.*

Un problema di grande attualità (sia a livello nazionale con la recente uscita del testo unico sulla sicurezza negli ambienti di lavoro, sia a livello internazionale) è quello dell'esposizione umana ai campi elettromagnetici in tutta la gamma di frequenze, a partire da quella industriale fino a qualche centinaio di Gigahertz. Gli impianti elettrotermici hanno frequenze di funzionamento che vanno dai 50 Hz dei forni ad arco utilizzati per la fusione degli acciai fino ai 2450 MHz dei forni a microonde utilizzati nell'industria alimentare. Le potenze in gioco in questi impianti sono molto elevate se confrontate con le tipiche sorgenti di campi elettromagnetici più diffuse (antenne di telefonia mobile, elettrodotti, etc.) e quindi danno luogo a livelli di esposizione piuttosto elevati. La ricerca sviluppata in questo settore ha assunto due diverse direzioni.

La prima tematica, prevalentemente sperimentale, si è occupata della determinazione dei livelli di esposizione tipici di diversi impianti elettrotermici e di confrontare i valori dell'esposizione con quanto imposto dalla normativa vigente. In questi anni si sono acquisiti molti dati sperimentali misurando i livelli di esposizione nelle zone dove di solito staziona il personale addetto all'impianto. Tali misurazioni hanno riguardato sia forni di fusione ad induzione che impianti di trattamento termico e di tempra ad induzione, ma anche impianti di riscaldamento per perdite dielettriche. I livelli di esposizione trovati nei luoghi di lavoro sono risultati elevati, talvolta superando anche di alcune decine di volte i limiti imposti dalla normativa vigente.

Il secondo aspetto della ricerca, che riguarda prevalentemente gli impianti di riscaldamento ad induzione, ha visto l'utilizzo di codici di calcolo appositamente sviluppati per l'analisi dei campi in prossimità degli impianti e per la progettazione e l'analisi dell'efficienza di schermi di diversi materiali e configurazioni da utilizzare per ridurre i livelli di esposizione degli operatori addetti alle macchine. In particolare si sono sviluppati modelli semplificati basati su metodi analitici, in grado di dare una prima valutazione dei livelli di campo nell'intorno di impianti di riscaldamento ad induzione. Tali modelli si basano sull'utilizzo di sorgenti "primarie" (induttore) e secondarie (carico) che, una volta determinate, sono in grado di dare i valori di campo magnetico totale come somma di campi prodotti da correnti "singole" attraverso l'uso della legge di Biot-Savart. I risultati del codice di calcolo sono stati confrontati con misure sperimentali effettuate presso il laboratorio di Elettrotermia di Padova.

Per quanto riguarda la schermatura dei campi il problema è stato affrontato in modo organico e si sono messi a punto dei codici di calcolo numerico basati sia su metodi integrali che sul metodo degli elementi finiti. Tali codici sono stati utilizzati per la progettazione di schermi da utilizzare in forni ad induzione per la fusione di metalli preziosi. I risultati conseguiti, oltre a dar luogo a pubblicazioni scientifiche di notevole interesse, hanno portato anche ad applicazioni pratiche come la schermatura di alcuni forni ad induzione situati presso una nota fonderia di metalli preziosi. Le schermature così progettate hanno consentito di abbattere i livelli di esposizione anche di 20 volte facendo rientrare i limiti al di sotto di quanto imposto dalle linee guida dell'ICNIRP.

Un ultimo argomento affrontato nell'ambito di questa ricerca riguarda lo studio dei sistemi GIL (Gas Insulated Transmission Lines) che vengono utilizzati come linee di trasmissione nelle centrali, ma che attualmente stanno rivestendo un ruolo importante anche nella trasmissione a media distanza laddove sono notevoli i valori di esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici a bassa frequenza.

L'analisi di questi sistemi è stata affrontata mediante codici numerici basati sulla discretizzazione multiconduttori sia delle fasi che degli involucri. L'utilizzo delle formule di Carson-Clem ha consentito di valutare la distribuzione della densità di corrente nei diversi componenti del sistema.

In un secondo tempo si è voluto affrontare anche il problema del dimensionamento termico di tali dispositivi attraverso l'utilizzo sia di procedure analitiche, ma soprattutto attraverso codici numerici in grado di risolvere problemi elettromagnetici e termici accoppiati. I risultati ottenuti hanno consentito di valutare la distribuzione delle temperature sia in condizioni di regime che in condizioni di guasto. Tali valutazioni, originali sia per quanto riguarda i metodi utilizzati che per i risultati raggiunti, potranno essere di notevole aiuto ai progettisti di tali sistemi che attualmente hanno a disposizione soltanto tabelle o abachi generici.

*Pubblicazioni sul tema:* [R20], [R26], [C12], [C21], [C39], [C59], [C61], [C62], [C75]

*Analisi di tecniche di ipertermia, basate sull'utilizzo di sorgenti elettromagnetiche, e sviluppo di metodi e procedure per il "treatment planning" di pazienti sottoposti a ipertermia per la cura di tumori*

L'ipertermia nella cura dei tumori risale al 1893 quando Coley si accorse che inducendo la febbre in pazienti affetti da tumore si otteneva un numero di remissioni a lungo termine della malattia. Nel 1953 Nauts mise in relazione la temperatura indotta dalla febbre con la morte delle cellule tumorali. Da quel momento in poi molti ricercatori si sono dedicati alla sperimentazione di questa tecnica per la cura della malattia con risultati incoraggianti. La ricerca attuale, a livello internazionale, si muove su alcune direzioni promettenti che sono l'utilizzo dell'ipertermia in combinazione con la chemioterapia, o con la radioterapia o da sola in sostituzione o come complemento alle tecniche chirurgiche. La ricerca in questo settore risulta essere di carattere multidisciplinare in quanto richiede conoscenze di tipo biologico, medico e fisico-ingegneristico. Per quanto riguarda la parte fisica si deve ricordare che l'efficacia del trattamento è legata alla temperatura raggiunta dalla cellule tumorali che risulta essere influenzata dalla perfusione sanguigna diffusa (vascolarizzazione dei tessuti), e da quella localizzata legata ad alcuni vasi importanti. La ricerca in questo settore riguarda quindi due direzioni diverse ma legate tra di loro:

- l'utilizzo di tecniche elettrotermiche basate su riscaldamenti con sorgenti interne e l'ottimizzazione e adattamento di tali tecniche per l'innalzamento localizzato della temperatura di tessuti biologici
- lo studio dei campi di temperatura che si ottengono all'interno dell'organismo per pianificare la dosimetria termica, come definita dai medici.

Il primo aspetto richiede uno studio approfondito delle tecniche elettrotermiche, che attualmente vengono utilizzate per processi di tipo industriale, in modo da individuare quelle che si prestano maggiormente a questo tipo di utilizzo. Attualmente in letteratura si trovano applicati all'ipertermia, tutti i tipi di riscaldamento con sorgenti interne a seconda del tipo di trattamento effettuato o della regione da trattare. L'individuazione dei parametri fondamentali di processo (frequenza, potenza, tensione etc.) e la geometria degli applicatori sono tuttora un campo di ricerca aperto che richiedono studi approfonditi e competenze specifiche.

Per quanto riguarda il secondo aspetto la ricerca consiste nell'implementazione e l'utilizzo di codici numerici per lo studio di problemi elettromagnetici e termici accoppiati. Il semplice accoppiamento elettromagnetico e termico per ricavare il campo di temperatura dalla distribuzione del SAR all'interno dei tessuti biologici non è però sufficiente in quanto la perfusione sanguigna diffusa e localizzata altera notevolmente le distribuzioni. Lo studio di modelli di perfusione è quindi necessario per l'individuazione corretta della mappa termica. Ciò avviene attraverso l'utilizzo di modelli matematici quali l'equazione di Pennes adattati di volta in volta (perfusione diffusa) o attraverso la soluzione di problemi elettromagnetici, termici e fluidodinamici accoppiati tra di loro (vasi di dimensioni importanti).

Le ricerche in questo settore si sono ultimamente suddivise in due settori distinti: da una parte la simulazione dell'ablazione termica di metastasi epatiche e l'ottimizzazione del processo di riscaldamento; dall'altra lo studio approfondito del treatment planning per i trattamenti di ipertermia regionale a radiofrequenza.

Nell'ambito del primo studio si sono implementati codici ad hoc basati sia sul metodo FEM che sul metodo delle celle al fine di prevedere l'estensione della zona trattata con l'ablazione termica. Tale parametro risulta infatti di fondamentale importanza per il successo del trattamento stesso e per non incorrere in recidive. Attraverso i codici sviluppati, che devono consentire di risolvere problemi di tipo accoppiato in presenza di una forte non linearità del problema termico dovuta alla perfusione sanguigna estremamente variabile con la temperatura, si sono proposte tecniche innovative di

terapia e si sono dati gli strumenti, agli specialisti del settore, per operare in un modo più “scientifico” rispetto a quanto fatto finora.

Per quanto riguarda il secondo aspetto della ricerca si sono studiati dei modelli numerici che hanno consentito di ricavare con estrema precisione le temperature in diverse zone del corpo sottoposto a trattamento. In tale tecnica (ipertermia loco-regionale a RF) è fondamentale portare tutte le zone in trattamento a temperature nel range 42-43 °C. Solo così viene potenziato il potere del chemioterapico associato al trattamento ipertermico. Bisogna inoltre evitare “hot spot” che possono provocare danni, talvolta anche irreversibili, ai pazienti in trattamento. Lo studio effettuato ha portato a risultati originali e apprezzati notevolmente dal mondo scientifico del settore. Infatti tale studio ha messo in evidenza i limiti del metodo nel trattamento di particolari tumori solidi localizzati nella zona pelvica. Il grasso e le ossa pelviche sono degli ostacoli alla somministrazione del calore all’interno dei tessuti malati e alcune configurazioni proposte nel nostro studio si sono dimostrate molto più efficaci di quelle che attualmente vengono utilizzate.

Modelli simili sono stati applicati anche per la terapia ipertermica di tumori cerebrali in collaborazione con il reparto di radioterapia dell’Ospedale di Verona (Dott. Sergio Maluta). Gli studi teorici preliminari, effettuati attraverso modelli numerici, ma anche attraverso prove sperimentali su phantom, hanno consentito all’equipe medica di affrontare la sperimentazione clinica con maggior consapevolezza delle potenzialità e dei limiti di questa terapia.

In entrambi i casi, ovvero ablazione termica e ipertermia clinica, la modellizzazione viene effettuata a partire da modelli reali ovvero da ricostruzioni 3D ottenute da immagini diagnostiche (TAC, RMN, PET etc.). In questo modo si vuole sviluppare un modello particolare del paziente al quale somministrare il trattamento ipertermico, cosa che già avviene ad esempio nella radioterapia.

La modellizzazione serve da una parte a comprendere meglio i meccanismi di somministrazione del calore e dall’altra a creare una sorta di protocollo di trattamento che si servirà di tali simulazioni per la scelta dei parametri fondamentali del trattamento stesso.

Un ultimo filone di ricerca riguarda l’utilizzo di tecniche induttive per il trattamento ipertermico. In questo settore si è prima affrontato il problema della simulazione dell’ipertermia induttiva con thermoseed e, più recentemente, lo studio di tecniche di ipertermia induttiva che fanno uso di nanoparticelle magnetiche.

I thermoseed sono dei piccoli elementi filiformi di qualche millimetro di lunghezza e di pochi decimi di diametro costituiti di materiale ferromagnetico con bassa temperatura di Curie (Pd-Co, Fe-Co, Cu-Ni). Quest’ultima caratteristica viene sfruttata per controllare la temperatura del thermoseed stesso, che, sottoposto ad un campo magnetico esterno di una certa intensità e frequenza, raggiunge una precisa temperatura terapeutica. La temperatura di Curie funge da controllo intrinseco della potenza depositata e quindi della temperatura del tessuto circostante, in quanto la transizione del materiale da magnetico a non-magnetico porta a situazioni di assorbimento di potenza completamente diverse, passando da un assorbimento molto elevato quando il materiale è magnetico ad assorbimenti bassissimi dopo che il materiale è diventato non magnetico. Il modello numerico implementato ha consentito di analizzare la distribuzione di temperatura in una regione epatica sottoposta ad un trattamento di questo tipo mettendo in evidenza i limiti legati anche alla perfusione localizzata dovuta all’arteria epatica e alla vena porta che fungono da veri e propri scambiatori di calore.

L’utilizzo di nano particelle magnetiche è una evoluzione della tecnica di ipertermia induttiva con thermoseed. Mentre nei thermoseed si sfruttano le perdite legate alle correnti indotte nei materiali di cui i thermoseed sono costituiti, nel caso delle nanoparticelle si sfruttano i meccanismi di perdita in fluidi magnetici (soluzioni colloidali di nanoparticelle a singolo dominio ovvero superparamagnetiche) legati al rilassamento di Brown e di Néel. I modelli teorici partono dalla valutazione del SAR in distribuzioni statistiche di nanoparticelle con diverse dimensioni mediante la relazione di Langevin. La distribuzione del SAR viene utilizzata come sorgente di calore per la successiva soluzione della Bioheat equation che consente di determinare la distribuzione del campo termico nei diversi tessuti sottoposti a trattamento.

Gli studi hanno portato ad alcuni risultati interessanti e apprezzati dalla comunità scientifica internazionale. Riconoscimento di questa attività, oltre alle pubblicazioni e agli invited papers e seminari, è stato l'invito a far parte del board scientifico della società ESHO (European Society of Hyperthermic Oncology).

*Pubblicazioni sul tema:* [R30], [R31], [R33], [R34], [R35], [R36], [C44], [C53], [C54], [C55], [C56], [C57], [C58], [C60], [C63], [C66], [C67], [C68], [C70], [C71]

*Sviluppo di formulazioni innovative basate sul metodo delle celle per lo studio di problemi elettromagnetici in regime quasi-stazionario e termici. Applicazioni di tali formulazione alla soluzione di problemi elettromagnetici e termici accoppiati nel riscaldamento ad induzione e nell'ipertermia.*

La risoluzione di problemi di campo e in particolare di campo elettromagnetico, quando il dominio non ha una forma semplice, contiene diversi materiali magari con caratteristiche di non-linearità, presenta sorgenti distribuite in modo complicato, necessita di accoppiamento con circuiti di alimentazione esterni al dominio è difficilmente affrontabile con metodi analitici. La soluzione di problemi fisici è oggi generalmente basata su formulazioni differenziali e anche le equazioni di Maxwell vengono affrontate facendo riferimento a questi tipici schemi. Tali schemi differenziali portano a delle soluzioni approssimate delle equazioni differenziali di campo attraverso processi di discretizzazione che consentono di ottenere sistemi algebrici, la cui soluzione è anche la soluzione approssimata del problema di campo. Ultimamente sono stati proposti da diversi autori (Tonti, Weiland) alcune formulazioni che si basano su un approccio finito dei problemi di campo, ovvero su quelle che vengono anche definite leggi integrali.

Tali metodi hanno in comune le seguenti caratteristiche:

- L'utilizzo di grandezze globali ovvero delle grandezze cosiddette integrali perché ricavate da integrali di linea, di superficie, di volume. Alcune di queste grandezze integrali possono essere riconosciute nella tensione elettrica (integrale di linea) nel flusso del vettore spostamento elettrico, nel flusso del vettore induzione magnetica (integrali di superficie), nella carica elettrica (integrale di volume).
- La suddivisione delle variabili globali in tre grandi classi ovvero le variabili di configurazione, le variabili di sorgente e quelle energetiche. Le grandezze integrali sono associate non più a nodi come nel FEM nodale, ma ad elementi spaziali dotati di dimensione fisica. Una tensione sarà associata ad una linea, un flusso ad una superficie e una carica ad un volume. Le entità geometriche, inoltre, sono dotate di una orientazione interna o esterna per consentire una corretta rappresentazione delle grandezze fisiche.

La formulazione numerica del metodo delle celle richiede l'uso di due complessi di celle. Infatti partendo da una prima suddivisione del dominio di analisi in celle (realizzando quello che prende il nome di complesso di celle primale) si esegue una seconda divisione, associando una porzione di ogni cella a ciascuno dei suoi nodi. Con questa divisione si attribuisce ad ogni nodo del sistema primale di celle una regione di dominio, creando, di fatto, un secondo sistema di celle, detto sistema duale: esiste infatti una piena dualità fra gli elementi geometrici dei due sistemi di celle. Ad ogni nodo del sistema primale viene naturalmente associata una cella del sistema duale (che costituisce la regione di competenza del nodo primale); viceversa, ai nodi del sistema duale corrispondono celle del sistema primale. Più in generale, agli elementi geometrici del sistema primale (punti P, linee L, superfici S e volumi V del complesso primale) corrispondono gli elementi geometrici del sistema duale (rispettivamente volumi  $V_d$ , superfici  $S_d$ , linee  $L_d$  e punti  $P_d$  del complesso duale).

Una grande risorsa del metodo, oltre alla sua semplicità, è la stretta aderenza alla realtà fisica e sperimentale: facendo uso di variabili globali, il metodo delle celle conserva una grande aderenza alla realtà fisica-sperimentale, riferendo le grandezze trattate agli elementi geometrici dei due sistemi di celle con la stessa logica con cui le grandezze vengono misurate sperimentalmente.

Da queste premesse ha preso spunto la ricerca svolta in questo settore che ha visto una evoluzione nei lavori svolti partendo dalla soluzione di semplici problemi di elettrostatica in domini contenenti materiali anisotropi fino ad arrivare a sviluppare codici di calcolo per la soluzione di problemi elettromagnetici e termici accoppiati in configurazioni 3D.

Dopo il primo semplice esperimento per l'analisi di campo elettrostatico in un dominio contenente materiali anisotropi si sono sviluppate formulazioni dei problemi di campo nel caso di correnti indotte in domini bidimensionali per la soluzione di problemi pratici legati al campo del riscaldamento ad induzione. I risultati sono stati confrontati con codici FEM sviluppati ad hoc in

modo da poter controllare perfettamente sia la mesh che le variabili di nodo. Successivamente si sono implementate formulazioni CM (Cells Method) che fanno uso di interpolazioni del secondo ordine sia per nel caso di complesso duale di tipo baricentrico che con un complesso duale basato sull'utilizzo dei punti pesati di Gauss. La formulazione è stata applicata a problemi di ipertermia e in particolare all'analisi del campo di conduzione di corrente e campo termico nei trattamenti di ablazione in domini bidimensionali.

Negli ultimi tempi si sono sviluppate formulazioni basate sul metodo delle celle per la soluzione di problemi accoppiati in modo forte. Il significato di forte sta nel modo di accoppiamento delle equazioni di Helmholtz (nel contesto del metodo delle celle è meglio parlare di problema di correnti indotte in regime armonico) con quella di Fourier della trasmissione di calore. Infatti solitamente tale accoppiamento viene eseguito in modo iterativo (debole) in quanto le costanti di tempo del fenomeno elettromagnetico e del fenomeno termico sono molto diverse tra di loro. In questo caso si è voluta sviluppare la formulazione per la soluzione di problemi che necessitano di questo tipo di accoppiamento come il calcolo dei transistori termici in componenti elettronici di potenza (MOSFET, SCR, IGBT etc.). I risultati ottenuti con questa formulazione originale sono stati confrontati sia con quelli ottenuti con codici di tipo commerciale sia con prove sperimentali eseguite presso il laboratorio di Elettrotermia di Padova.

Da ultimo si è affrontato un problema 3D di ablazione termica (problema di conduzione di corrente accoppiato ad un problema di transitorio termico in presenza di perfusione sanguigna) mediante una formulazione 3D di tipo CM. I risultati sono stati confrontati con quelli ottenuti mediante un codice FEM 3D commerciale dimostrando la piena affidabilità e la semplicità di applicazione del metodo CM.

*Pubblicazioni sul tema:* [R28], [R29], [R31], [R32], [R36], [C48], [C52], [C54], [C60], [C63]

## **Pubblicazioni scientifiche**

### **Schema riassuntivo delle pubblicazioni scientifiche**

Pubblicazioni su rivista internazionale:	<b>38</b>
Pubblicazioni su proceedings di congressi internazionali:	<b>75</b>
Monografie scientifiche:	<b>3</b>
Curatele	<b>3</b>
Monografie didattiche:	<b>1</b>
Brevetti:	<b>2</b>

### **Pubblicazioni scientifiche su rivista Internazionale**

- [R1] F. Dughiero, S. Lupi, M.F. Nunes: "20-50 kHz Amorphous Core Power Transformers for Induction heating Applications", Journal of Applied Physics 69 (8), 15 April 1991.
- [R2] F. Dughiero, M.Guarnieri, S. Lupi: "An Optimization Procedure for Electromagnetic Confinement and Levitation Systems" IEEE Trans on Magnetics, Vol. 29, N. 2, March 1993, pp. 1758-1761.
- [R3] F. Dughiero, S. Lupi, P. Siega: "Analytical Calculation of Travelling Wave Induction Heating Systems", COMPEL Journal, Vol. 13, N. 1, March 1994, pp. 183-186.
- [R4] V. Bukanin, F. Dughiero, V. Nemkov, S. Lupi: "3D-FEM Simulation of Transverse-Flux Induction Heaters", IEEE Trans. on Mag. Vol 31, No 3, May 1995, pp. 2174-2177.
- [R5] N. Bianchi, F. Dughiero: "Optimal Design Techniques Applied to Transverse-Flux Induction Heating Systems", IEEE Trans. on Mag Vol. 31, No 3, May 1995, pp. 1992-1995.
- [R6] F. Dughiero, S. Lupi, P. Siega: "Calculation of Forces in Travelling Wave Induction Heating Systems", IEEE Trans. on Mag. Vol 31, No 6, November 1995, pp. 3560-3562.
- [R7] F. Dughiero, S. Lupi, P. Siega: "Analytical Calculation of Double-Side Planar Travelling Wave Induction Heating Systems", COMPEL Journal, Vol. 14, N. 4, December 1995, pp. 251-255.
- [R8] I. Artuso, F. Dughiero, S. Lupi., A. Lainati:"Intermediate Induction Reheating in Rolling Mills for Optimum Temperature Distribution: “ Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics No. 10, pp. 230-233
- [R9] F. Dughiero, M. Forzan, S. Lupi:"3D Solution of Electromagnetic and Thermal Coupled Field Problems in the Continuous Transverse Flux Heating of Metal Strips", IEEE Trans. On Mag. -Vol. 3, N. 2, March 1997 pp. 2147-2150.
- [R10] P.Di Barba, F. Dughiero, F. Trevisan:" Optimization of the Loney's Solenoid through Quasi-Analytical Strategies: a Benchmark Problem Reconsidered", IEEE Trans. On Mag. - Vol. 3, N. 2, March 1997 pp.1864-1867.

- [R11] P. Di Barba, F. Dughiero, F. Trevisan: "Optimal Design of Windings for the Continuous Induction Hardening Process of Steel Bars", *Int. J. of Applied Electromagnetics and Mechanics* 9 (1998) 53-63 IOS Press.
- [R12] Dughiero F., Forzan M., Lupi S., Tasca M.: "Numerical and Experimental Analysis of an Electro-Thermal Coupled Problem for Transverse Flux Induction Heating Equipment", *IEEE Trans. On Mag.* -Vol. 34, N. 5, September 1998 pp.3106-3109.
- [R13] Battistetti M., Dughiero F., Nunes Alves M.: "Optimization Procedures in the Design of Continuous Induction Hardening and Tempering Installations for Magnetic Steel Bars", *IEEE Trans. On Mag.* -Vol. 34, N. 5, September 1998 pp.2865-2868.
- [R14] S.Lupi, M.Forzan, F.Dughiero, A.Zenkov: "Comparison of Edge-Effects of Transverse Flux and Travelling Wave Induction Heating Inductors", *IEEE Trans. On Mag*, Vol. 35, No 5, September 1999, pp. 3556-3558
- [R15] F. Colaone, A. Dallago, F. Degasperi, F. Dughiero, M. Forzan, S. Lupi: "Design of Light Electromagnetic Detectors for Steel Wire Ropes Inspection", *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics* No 18, pp 301-304
- [R16] M. Battistetti, F. Dughiero, S. Lupi: "Optimisation of Edge-Effects in Induction Heating Applications", *COMPEL* Vol. 19, No 2, 2000 pp. 589-595
- [R17] F. Dughiero, S. Lupi, S. Ponchiroli: "The Prediction of Thermal Transients in Induction Heating of Rectangular Billets", *COMPEL* Vol. 19, No 2, 2000 pp. 712-717
- [R18] S. Alfonzetti, E. Dilettoso, F. Dughiero, N. Salerno: "Stochastic Optimisation of an Induction Heating System by means of DBCI", *COMPEL* Vol. 19, No 2, 2000 pp. 569-575
- [R19] M. Battistetti, F. Dughiero, S. Lupi, M. Farina, P. Di Barba, A. Savini: "Optimal Design of an Inductor for Transverse-Flux Heating using a Combined Evolutionary-Simplex Method", *COMPEL Journal* Vol. 20 N. 2 2001 pp. 507-522
- [R20] R. Benato, F. Dughiero, M. Forzan, A. Paolucci "Proximity Effect and Magnetic Field Calculation in GIL and in Isolated Phase Bus Ducts", *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 38, NO. 2, March 2002.
- [R21] A. Babini, R. Borsari, F. Dughiero, A. Fontanini, M. Forzan : "3D FEM Simulation of Inductors for Induction Sealing", *COMPEL Journal* Vol. 22 N. 1 January 2003, pp. 170-180
- [R22] F. Dughiero, S. Lupi, A. Muhlbauer, A. Nikanorov: "TFH – Transverse flux Induction Heating of non-ferrous and precious metal strips – Results of a UE Research Project", *COMPEL Journal* Vol. 22 N. 1 January 2003, pp. 134-148
- [R23] I. Artuso, F. Dughiero, S. Lupi, B. Nacke, A. Nikanorov, D. Ostwaldt, M. Schiavon: "Advantages of Intermediate Induction Heating in Hot mills for Flexible steel production", *Elektrowarme International, Vulkan-Verlag Essen*, Vol. 2, June 2002, pp.69-75

- [R24] P. Di Barba, F. Dughiero, S. Lupi, A. Savini: "Optimisation techniques applied to the design of Inductors for Industrial Applications", COMPEL Journal Vol. 22 N. 1 January 2003, pp. 111-122
- [R25] P. Di Barba, F. Dughiero, A. Savini: "Multiobjective Shape Design of an Inductor for Transverse-Flux Heating of Metal Strips", IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 39 N. 3, May 2003, pp. 1519-1522.
- [R26] R. Benato, F. Dughiero: "Solution of Coupled Electromagnetic and Thermal Problems in Gas Insulated Transmission Lines", IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 39 N. 3, May 2003, pp. 1741-1744.
- [R27] F. Dughiero, M. Forzan, S. Lupi: "LEP - Laboratory for Electroheat of Padua University" – Elktrowarme International – Vulkan Verlag – Vol. 1 – 2004. Pp 30-36. (invited paper)
- [R28] M. Bullo, F. Dughiero, M. Guarnieri, E. Tittone: "Isotropic and anisotropic electrostatic field computation by means of the Cell Method", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40 No. 2, marzo 2004, pp.1013-1016.
- [R29] M. Bullo, F. Dughiero, M. Guarnieri, E. Tittone: "A 2-D Formulation for Eddy Currents Anisotropic Problems with the Cell Method", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, pp. 1368-1371. 2005
- [R30] F. Dughiero, S. Corazza: " Numerical simulation of induction heating thermal deposition for oncological hyperthermic treatment", Medical & Biological Engineering & Computing, Vol 43. pp. 40-46, 2005
- [R31] F. Dughiero, M. Bullo, V. D'Ambrosio, M. Guarnieri: "Coupled Electrical and Thermal Transients Conduction Problems with a quadratic Interpolation Cell Method Approach" . IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 42, N. 4, pp. 991-994. 2006
- [R32] F. Dughiero, M. Bullo, M. Guarnieri, E. Tittone: "Non linear Coupled Thermo-Electromagnetic Problems with the Cell Method". IEEE Transactions on Magnetics Vol 42, N.4, pp. 1003-1006. 2006
- [R33] F. Dughiero, V. D'Ambrosio, M. Forzan: "Numerical models of RF-thermal ablation treatments". International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics Vol 25 N. 1-4. 2007
- [R34] F. Dughiero, V. D'Ambrosio, P. Di Barba, M.E. Mognaschi, A. Savini: "Non-invasive thermometry for the thermal ablation of liver tumor: a computational methodology". International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics Vol 25 N. 1-4. 2007
- [R35] F. Dughiero, V. D'Ambrosio: "Numerical Model for RF capacitive regional deep Hyperthermia in pelvic tumours". Medical & Biological Engineering & Computing. vol. 45, N.5, pp. 459-466. 2007
- [R36] F. Dughiero, M. Bullo, V. D'Ambrosio, M. Guarnieri: "A 3-D Cell Method Formulation for coupled Electric and Thermal Problems". IEEE Transactions on Magnetics Vol.43, N. 4, pp. 1197-2000. 2007

- [R37] F. Dughiero, M. Bullo, M. Forzan, S. Lupi: “Laboratory Prototype of the Double Frequency longitudinal electromagnetic levitator for levitation melting”. *Magnetohydrodynamics* vol. 43, N.2, pp. 151-159. 2007.
- [R38] F. Dughiero, R. Araneo, M. Fabbri, M. Forzan, A. Geri, A. Morandi, S. Lupi, P.L. Ribani, G. Veca: “Electromagnetic and Thermal Analysis of the induction heating of aluminum billets rotating in DC magnetic field” – *COMPEL* – Vol. 27, N. 2, 2008 – pp. 467- 479

## Publicazioni scientifiche su congressi internazionali

- [C1] F. Dughiero, S. Lupi: "The Control of Temperature Transients in the Induction Heating of Steel", U.I.E. Seminar: "Heat Transfer in Electroheat", Lodz, Poland, 22-25 October 1991. pp 61-67
- [C2] M. Nunes, G.E. Filippo, S. Lupi, F. Dughiero: "Tratamento de Refusao Superficial por Inducao Eletromagnetica", Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo Aplicado, Belo Horizonte, Brasil, 21-24 March 1992. pp 327-336. (in portoghese)
- [C3] G. Crepaz, F. Dughiero, S. Lupi, E. Ramous: "Modern Installations for the Continuous Process Induction Hardening and Tempering of Steel Bars", ELECTROTECH 92, XII International Conference of the U.I.E., Montreal, Canada, 14-18 June, 1992. pp. 130-139.
- [C4] Yu. Blinov, F. Dughiero, S. Lupi: "Influence on the Frequency Converter Characteristics of the Inductor-Load Impedance Variations in the Induction Heating of Steel", International Conference ED&PE '92, Kosice (CS), 14-16 September 1992. pp. 233-235.
- [C5] V. Bukanin, F. Dughiero, S. Lupi, V. Nemkov: "Simulation and Design Problems of Multiphase Induction Heating Systems", 37 ° Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, 21-24 September, 1992. pp. 588-593.
- [C6] F. Dughiero, S. Lupi, P. Siega: "Calcolo Analitico di Induttori Polifasi per Riscaldamento ad Induzione", Report UPdie, Dept. of Electrical Engineering, University of Padua (Italy), 93/01 July 1993. (pp 36).
- [C7] A. Ali, V. Bukanin, F. Dughiero, S. Lupi, V. Nemkov, P. Siega: "Simulation of Multiphase Induction Heating Systems", Second IEE International Conference on Computation in Electromagnetics (CEM), Nottingham (UK), 12-14 April, 1994. pp 211-214.
- [C8] F. Dughiero, S. Lupi, V. Nemkov, P. Siega: "Travelling Wave Inductors for the Continuous Induction Heating of Metal Strips", MELECON 94, Antalya (Turkey), 12-14 april,1994. pp 1154-1157.
- [C9] Yu. Blinov, F. Dughiero, S. Lupi: "Mutual Influence Between Load and Frequency Converter in the Induction Heating of Steel", IECON 94, Bologna (Italy), September 1994. pp 679-683.
- [C10] M. Nunes Alves, F Dughiero, P. Siega: "Simulation of Transient Temperature Distributions in the Induction Hardening with Surface Melting", International Symposium on Scientific Problems of High Frequency Electrotechnology, St. Petersburg (Russia), 28-30 June 1994. pp 141-144.
- [C11] V. Bukanin, F. Dughiero, V. Nemkov, S. Lupi: "Multiphase induction heating of flat metal", International Symposium on Scientific Problems of High Frequency Electrotechnology, St. Petersburg (Russia), 28-30 June 1994.(in russo) pp 18-27.
- [C12] F. Dughiero, S. Lupi, V. Nemkov, Yu. Palzev: "Critical Review of Standards on Human Exposure to Electromagnetic Fields", EMC'94 ROMA, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Rome, Italy, 13-16 September, 1994. pp. 312-316.

- [C13] F. Dughiero, M. Forzan, S. Lupi: "Solution of Coupled Electromagnetic and Thermal Problems in Induction Heating Applications", 3rd IEE International Conference on Computation in Electromagnetics CEM '96, Bath, UK, 10-12 April, 1996, pp 301-305.
- [C14] I. Artuso, F. Dughiero, S. Lupi, S. Partisani, P. Facchinelli: "Installations for the Continuous Heat Treatment of Steel Wires", BNCE-UIE International Congress on Electricity Applications, Birmingham, UK, 16-20 June, 1996. Pubblicato sui proceedings della conferenza M2-35.
- [C15] V. Bukanin, V. Nemkov, F. Dughiero, M. Forzan, S. Lupi: "Induction Heating of Flat Metal Bodies", BNCE-UIE International Congress on Electricity Applications, Birmingham, UK, 16-20 June, 1996. Pubblicato sui proceedings della conferenza M3-17.
- [C16] F. Dughiero, S. Lupi, A. Ruhnke, A. Muhlbauer, A. Nikanorov, V. Demidovitch: "Electromagnetic Forces during Transverse Flux Heating of Metal Strips", Proceedings of Electromagnetic Processing of Materials Conference, Paris, France, 26-29 May, 1997, Vol. 2, pp.87-93.
- [C17] Battistetti M.- Dughiero F.- Lupi S.: "Optimization Techniques Applied to the Design of Continuous Induction Hardening and Tempering Lines" ASM 1st International Induction Heat Treating Symposium, Indianapolis (USA), 15-17 September 1997, pp.719-723.
- [C18] F. Dughiero, S. Lupi, A. Ruhnke, A. Muhlbauer, A. Nikanorov, V. Demidovitch: "Methods and Tools for All-Round Optimization of Transverse-Flux Induction Heaters" 1st International Induction Heat Treating Symposium, Indianapolis (USA), 15-17 September 1997 pp.865-870.
- [C19] Artuso I., Dughiero F., Lupi S., Siega P.: "L'automazione nelle applicazioni Elettrotermiche", 4th workshop on AC motor drives technology, Vicenza, Italy, May 1997.
- [C20] Lupi S., Dughiero F.: "LEP Electroheat Laboratory of Padua University", Pubblicato sul Bollettino del Dipartimento di Elettrotecnologie dell'Università di S. Pietroburgo in occasione del 50° anniversario dalla fondazione (**invited paper**) pp. 11-14.
- [C21] Bukanin V., Dughiero F., Lupi S., Nemkov V.: "Zone di influenza nociva dei campi elettromagnetici in alcuni tipi di impianti ad induzione", III Simposio Internazionale EMC'97 (Compatibilità ed Ecologia Elettromagnetica), S. Pietroburgo, Russia, 23-27 giugno 1997, Vol.2 pp. 338-341 (in russo).
- [C22] Artuso I., Dughiero F., Fabbro P, Lupi S., Tiziani A.: "Transverse Flux Heating for Heat Treatment of Precipitous Metal Strips", IHS-98 International Induction Heating Seminar, Padova, Italia, 13-15 maggio 1998 pp.157-166.
- [C23] Bukanin V., Dughiero F., Lupi S., Zenkov A.: "Spatial Control Methods of Electromagnetic Fields and Heat Sources", IHS-98 International Induction Heating Seminar, Padova, Italia, 13-15 maggio 1998 pp.381-388.
- [C24] Battistetti M., Dughiero F., Forzan M.: "Design Tools for the Optimization of Continuous Induction Heating Lines", IHS-98 International Induction Heating Seminar, Padova, Italia, 13-15 maggio 1998 pp.397-402.

- [C25] Bianchi N., Dughiero F., Lupi S.: "Design of Induction Heating Systems by Optimization of Field Shape", IHS-98 International Induction Heating Seminar, Padova, Italia, 13-15 maggio 1998 pp.413-426.
- [C26] Battistetti M., Dughiero F., Forzan M.: "Investigation on Electromagnetic Fields in the Surrounding of Induction Heating Installations", IHS-98 International Induction Heating Seminar, Padova, Italia, 13-15 maggio 1998 pp.473-478.
- [C27] Blinov Y., Dughiero F., Kachanov B., Lupi S., Sergeev A.: "Calculation of Forces in High-Frequency Electrodynamics Separation Systems", IHS-98 International Induction Heating Seminar, Padova, Italia, 13-15 maggio 1998 pp.489-498.
- [C28] Bonollo F., Dughiero F., Fabbro P., Lupi S., Tiziani A.: "Aspetti Metallurgici nell'Applicazione di un Trattamento di Riscaldamento ad Induzione a Flusso Trasverso su Nastri di Metalli Preziosi", pubblicato sui Proceedings del 27° Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Metallurgia, Orvieto, 16-18 Settembre 1998.
- [C29] F. Dughiero, P. Di Barba, M. Forzan, S. Lupi, A. Savini: "Numerical synthesis of optimal power density distribution in induction heating systems," in 4th Int. Workshop on Optimization Jyväskylä, Finland, Aug. 1998, pp. 7-9.
- [C30] Battistetti M. , Dughiero F. , Lupi S. : " Optimal Design of Inductors for Special Applications" – International Symposium on Material processing, Riga, Latvia, May 1999.
- [C31] F. Dughiero, S. Lupi, S. Ponchiroli: " A Numerical Design Tool for Rectangular Steel Billets Induction Heating Lines" , COMPUMAG 12th Conference on the Computation on Electromagnetic Fields, Sapporo, Japan, October 25-28, 1999. Vol. 2, pp. 590-591.
- [C32] F. Colaone, F. Dughiero, M. Forzan, S. Lupi: "Eddy Current Non Destructive Testing for Ferromagnetic Wire Ropes", , COMPUMAG 12th Conference on the Computation on Electromagnetic Fields, Sapporo, Japan, October 25-28, 1999. Vol. 2, pp. 630-631.
- [C33] M. Battistetti, F. Colaone, F. Dughiero, M. Forzan, S. Lupi, S. Ponchiroli: "A 3D Analytical Tool for Design and Optimization of Transverse Flux Induction Heating Systems", EPM2000 3rd International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, April 3-6, 2000, Nagoya, Japan.
- [C34] F. Colaone, F. Dughiero, M. Forzan, S. Lupi, S. Ponchiroli, A. Muhlbauer, A. Nikanorov, G. Nauvertat: "Numerical Tools for Optimum Design of Transverse Flux Induction Heaters of Non-Ferrous Metal Strip", EPM2000 3rd International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, April 3-6, 2000, Nagoya, Japan.
- [C35] M. Battistetti, F. Dughiero, S. Lupi, M. Farina, P. Di Barba, A. Savini: "Multiobjective Design Optimisation of an Inductor for Surface Heating:an Innovative Approach", CEFC2000, June 4-7 2000, Milwaukee, Wisconsin, USA.
- [C36] S. Lupi, F. Dughiero: " Research Activity at LEP – Laboratory for Electroheat of Padua University", ELTEC 2001, Conferenza Internazionale sulle Elettrotecnologie del XXI secolo, San Pietroburgo, Russia, 4-5 aprile 2001. (in russo) **Invited Paper**

- [C37] V. Bukanin, F. Dughiero, S. Lupi, A. Zenkov : “Edge Effects in Plate Induction Systems”, Proceedings di HIS-01, International Seminar on Heating by Internal Sources, Padova, Italy, September 12-14, 2001. Pp. 533-538
- [C38] F. Dughiero, E. Florian:” Metallurgical Aspects of Annealing metal strips through Transverse Flux Inductors”, Proceedings di HIS-01, International Seminar on Heating by Internal Sources, Padova, Italy, September 12-14, 2001. pp. 631-638
- [C39] R. Benato, F. Dughiero, L. Fellin, A. Paolucci: “Condutture a fasi Blindate: calcolo degli effetti di prossimità e del campo magnetico esterno” Atti della Riunione generale dell’ AEI, Padova, Italy, 3-5 ottobre, 2001. pp. 345-350.
- [C40] S. Corazza, F. Dughiero: “ Thermal Dosimetry Simulation of Inductive Interstitial Hyperthermia”, XXIV International Congress on Clinical Hyperthermia, Roma, Italy, 24-29 settembre, 2001.
- [C41] F. Dughiero, M. Forzan: “Transient Magnetic FEM Analysis for the Prediction of Electrodynamical Forces in Transformers with Magnetic Shunts”, Proceedings of INTERMAG 2002, EV05, April 28 – May 2, 2002, Amsterdam, Netherlands.
- [C42] F. Dughiero, M. Forzan:”Maximum error Method for a Fast Solution of ECT Benchmarks”, Proceedings of IGTE2002 Symposium, 16-18 settembre 2002, Graz, Austria.
- [C43] F. Dughiero, M. Forzan, S. Lupi:” Reheating 150 mm Billets of A356 Alloy for Thixo-Processing”, Proceedings of MEP 2003 Modelling for Electromagnetic Processing Symposium, 24-26 marzo 2003, Hannover, Germania.
- [C44] F. Dughiero, S. Lupi, E. Tittone:” Analysis of a Laboratory Prototype of Longitudinal Electromagnetic Levitator”, Proceedings of MEP 2003 Modelling for Electromagnetic Processing Symposium, 24-26 marzo 2003, Hannover, Germania.
- [C45] F. Dughiero, M. Forzan:” Transient Magnetic FEM Analysis for the prediction of electrodynamic forces in Transformers with magnetic shunts”, ISEM 2003 conference, 12-14 maggio 2003, Versailles, Francia.
- [C46] M. Bullo, V. D’Ambrosio, F. Dughiero, A. Ravagnan: “ Numerical models and optimization of interstitial RF ablation processes for liver metastasis therapy”, 21 th meeting of European Society for Hyperthermic Oncology (ESHO 2003), June 4-7, 2003, Monaco di Baviera, Germania.
- [C47] F. Dughiero, S. Lupi, E. Tittone: “ Optimal Design of an electromagnetic Longitudinal Levitator”, COMPUMAG Conference 2003, July 13-17, 2003, Saratoga Springs, USA.
- [C48] M. Bullo, F. Dughiero, M. Guarnieri, E. Tittone: “ Isotropic and anisotropic electrostatic field computation by means of cell method”, COMPUMAG Conference 2003, July 13-17, 2003, Saratoga Springs, USA.
- [C49] F. Dughiero, M. Guarnieri, S.Lupi, E.Tittone: “ Numerical Analysis and Experimental Validation of an Inductive Heating System”, Proceedings of CEFC 2002, 16-19 giugno, 2002, Perugia, Italia.

- [C50] F. Dughiero, M. Forzan, S. Lupi, E. Tittone: “ Numerical and Experimental analysis of longitudinal electromagnetic levitators”, proceedings of EPM 2003 conference, 14-17 ottobre 2003, Lione, Francia.
- [C51] F. Dughiero, M. Forzan, S. Lupi, M. Nunes Alves, M. Schiavon: “ Two steps reheating of A356 billets for thixo-forming”, proceedings of EPM 2003 conference, 14-17 ottobre 2003, Lione, Francia.
- [C52] M. Bullo, F. Dughiero, M. Guarnieri, E. Tittone: “The Prediction of Temperature Distribution in RF-Ablation Therapy by Means of Cell Method”, presentato al CEFC 2004, Seul, Corea del Sud, 8-12 giugno 2004, premiato come “Best Poster Paper”.
- [C53] D’Ambrosio V., Dughiero F. “FEM models of Radiofrequency Thermal therapy in Cancer Cure”, presentato al HES-04 Conference, 23-25 giugno 2004, Padova, Italy, pp 250-256
- [C54] M. Bullo, V. D’Ambrosio, F. Dughiero ‘Numerical Models of Electromagnetic and Thermal Problems in Radiofrequency Ablation Therapy’ – IGTE 2004, Graz settembre 2004.
- [C55] D. Bertolasco, V. D’Ambrosio, F. Dughiero:”Numerical Model for RF capacitive regional deep Hyperthermia”, Proceedings of ESHO2005 conference, Graz (Austria), June 8-11 2005, pp.44-45.
- [C56] V. D’Ambrosio, F. Dughiero, P. Di Barba, M.E. Mognaschi, A. Savini: “Non-invasive Thermometry for the Thermal Ablation of Liver tumor: a Computational Methodology”, Proceedings of ISEM 2005, Bad Gastein (Austria), September 12-14, 2005, pp.228-229.
- [C57] V. D’Ambrosio, F. Dughiero, M. Forzan: “Numerical Models of RF-Thermal Ablation Treatments”, Proceedings of ISEM 2005, Bad Gastein (Austria), September 12-14, 2005, pp.246-247.
- [C58] V. D’Ambrosio, F. Dughiero:”Numerical models for RF-Thermal ablation and RF capacitive Hyperthermia”, **Invited paper** to XXVII ICHS Annual Meeting, New trends in Hyperthermia, Florence (Italy), October 27-28, 2005.
- [C59] M. Bertocco, F. Dughiero, C. Greggio, E. Sieni, A. Sona: “Efficient Characterization of magnetic field sources”, IMTC 2006 Instrumentation and Measurement Technology Conference, Sorrento (Italy), April 24-27 2006.
- [C60] M. Bullo, F. Dughiero, M. Guarnieri: “The Prediction of Temperature Distribution in RF-Ablation Therapy by Means of the Cell Method”, Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Fields, Health and Environment - EHE06, Madeira Island (P), 27-29 April 2006.
- [C61] F. Dughiero, M. Forzan, C. Greggio:”Evaluation and Mitigation of EMF in the surrounding of Induction Furnaces with reference to ICNIRP Guidelines”, Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Fields, Health and Environment - EHE06, Madeira Island (P), 27-29 April 2006.
- [C62] M. Bertocco, F. Dughiero, C. Greggio, E. Sieni:”An efficient model to evaluate the magnetic field in the surroundings of Induction Heating installations”, Proceedings of the

International Conference on Electromagnetic Fields, Health and Environment - EHE06, Madeira Island (P), 27-29 April 2006.

- [C63] F. Dughiero, M. Bullo, V. D'Ambrosio: "a 3D Cell Method Formulation for Coupled Electric and Thermal Problems", CEFC 2006 Conference – April 30th – May 3rd – 2006 – Miami – FL – USA.
- [C64] F. Dughiero, D. Ciscato, M. Forzan, C. Greggio: "MHD FEM analysis of Electromagnetic Stirrers for Aluminum Furnaces" - CEFC 2006 Conference – April 30th – May 3rd – 2006 – Miami – FL – USA.
- [C65] F. Dughiero, M. Forzan, S. Lupi: "Fully Coupled Electromagnetic-Thermal-Motion 3D Models for Transverse Flux Induction Heating" - CEFC 2006 Conference – April 30th – May 3rd – 2006 – Miami – FL – USA.
- [C66] A. Candeo, F. Dughiero, M. Puchinger: "Numerical FEM Models for the Prediction of Temperature During Superficial MW Hyperthermia Treatments – ESHO 2007 Conference – June – 14 – 16 – 2007 - Praga – Repubblica Ceca
- [C67] V. D'Ambrosio, F. Dughiero, M. Giri, S. Maluta: Numerical Models for RF Capacitive Hyperthermia for Brain Tumors – ESHO 2007 Conference – June – 14 – 16 – 2007 – Praga – Repubblica Ceca
- [C68] F. Dughiero: "Numerical simulation of hyperthermia treatments: a powerful method for treatment planning" – HES07 International Conference – Heating By Electromagnetic Sources – June, 192 – 22 – 2007 – Padova – Italy
- [C69] F. Dughiero, S. Dominici, B. Pillin: "In Line Induction Bright Annealing of Stainless Steel Tubes" – HES07 International Conference – Heating By Electromagnetic Sources – June, 19 – 22 – 2007 – Padova – Italy pp. 201-208
- [C70] F. Dughiero, A. Candeo: "A first 3D numerical model for the treatment planning of hepatocellular carcinoma by magnetic fluid hyperthermia - ICHO 2008 – 10th International Congress on Hyperthermic Oncology – 9-12 April, 2008 – Munich, Germany
- [C71] F. Dughiero, A. Candeo: "Numerical FEM models for the planning of magnetic induction hyperthermia treatments with nanoparticles" – CEFC 2008 Conference – May, 2-5, 2008 – Athens – Greece.(submitted to IEEE trans. On Mag.)
- [C72] F. Dughiero, A. Canova, M. Forzan, F. Freschi, L. Giaccone, M. Repetto, F. Fasolo: "Simplified approach for 3D nonlinear induction heating problems" – CEFC 2008 Conference – May, 2-5, 2008 – Athens – Greece. (Submitted to IEEE Trans. On Mag.)
- [C73] F. Dughiero, A. Canova, M. Forzan, F. Freschi, L. Giaccone, M. Repetto, F. Fasolo: "Induction heating of ferromagnetic workpieces by equivalent magnetic material properties" – CEFC 2008 Conference – May, 2-5, 2008 – Athens – Greece. (Submitted to IEEE Trans. On Mag.)
- [C74] Dughiero F., Bullo M., Forzan M., Geri A., Veca G.: "Optimization of a variable width inductor for Transverse Flux Heating of Non-Magnetic strips" – CEFC 2008 Conference – May, 2-5, 2008 – Athens – Greece. (Submitted to IEEE Trans. On Mag.)

- [C75] Dughiero F., C. Greggio, M. Forzan: "A Novel Approach for Computing Shielding Effectiveness of Conductive Metal Sheets, against AC Magnetic Fields in IF Range in Industrial Environment" – PIERS 2008 Conference – Cambridge – MA – USA – July 2-6 – 2008

## **Monografie scientifiche**

- [M1] Dughiero F., Lupi S.: "Modern Technologies and Economical Advantages of Electroheat" su "Economics in Electroenergetics and Energy Saving by the Rational Use of Electrotechnologies", libro di testo adottato per il corso intensivo organizzato nell'ambito del progetto Tempus Tacis T\_JEP-10021-95, raccomandato dal ministero dell'istruzione professionale della Federazione Russa, pp. 350.
- [M2] F. Dughiero: "Transverse Flux Induction Heating of Metal Strip (TFH)", Booklet in the frame of TEMPUS-TACIS Compact Project, CP\_20021-98, S. Petersburg, 1-6 November 1999.
- [M3] Dughiero F., Lupi S. et. Al.: "Sovremennye Energoberegajuscie Elektrotehnologii" (Moderne Tecnologie Elettriche per il Risparmio Energetico) libro di testo in lingua russa adottato per il corso intensivo organizzato nell'ambito del progetto TEMPUS-TACIS Compact Project, CP\_20021-98 raccomandato dal ministero dell'istruzione professionale della Federazione Russa. pp. 548.

## **Monografie didattiche**

- [MD1] Dughiero F., Bagatin M., Gnesotto F., Chitarin G., Desideri D., Maschio A. "Esercitazioni di Elettrotecnica: reti elettriche", Progetto Leonardo, Esculapio, Bologna, 2004.

## **Curatele**

- [CU1] DUGHIERO F. (main Guest Editor) (2003). COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. Di AA. VV. (vol. 1, pp. 1-192). ISBN: 0332-1649. BRADFORD: Emerald (UNITED KINGDOM). Selected papers from HIS01 conference.
- [CU2] DUGHIERO F., (main Guest Editor) (2005). COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering;. Di AA. VV. (vol. 24). ISBN: 0332-1649. Selected papers from HES 04 Conference.
- [CU3] DUGHIERO F., (main Guest Editor) (2008). COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. Di AA. VV. (vol. 27). ISBN: 0332-1649. Selected papers from HES07 conference - Dughiero F. Guest editor.

## Brevetti

- [BR1] Dughiero F., Armellin A, Corocher C, Forzan M, Zoppas M. (2007). “Preform Heating Device” - WO2007/031509 A1 -. S.I.P.A. S.p.A. Via caduti del Lavoro, 3 - 31029 Vittorio Veneto (BL).
- [BR2] Dughiero F., Cesano M.(2008) “Metodo e dispositivo per Tempra ad Induzione Localizzata di Componenti Meccanici, in particolare ralle per cuscinetti di rotolamento di grandi dimensioni – E6352/08 – SAET – Via Torino, 213 – Leinì – Torino (Deposito Internazionale Nr. PCT/IT2008/000475)

Padova 11/08/2008

Prof. Fabrizio Dughiero