

**Umberto LUCIA**

*Dipartimento Energia “Galileo Ferraris”*

*Politecnico di Torino*

*Elementi di Ingegneria  
delle terapie termiche*

CLUT

I diritti di elaborazione, di traduzione o l'adattamento anche parziale in qualsiasi forma, di memorizzazione anche digitale, su supporti di qualsiasi tipo, di riproduzione e di adattamento totale o parziale con qualsiasi mezzo (compresi i microfilm e le copie fotostatiche) sono riservati per tutti i paesi.

Fotocopie per uso personale (cioè privato ed individuale) nei limiti del 15% di ciascun volume possono essere effettuate negli esercizi che aderiscono all'accordo SIAE.—SNS e CNA Confartigianato, CASA, Confcommercio del 18 Dicembre 2000, dietro pagamento del compenso previsto in tale accordo, conformemente alla legge n. 633 del 23.04.1941.

Per riproduzioni ad uso non personale l'editore potrà concedere a pagamento l'autorizzazione a riprodurre un numero di pagine non superiore al 15% delle pagine del presente volume. Le richieste per tale tipo di riproduzione vanno inoltrate esclusivamente all'indirizzo dell'Editore.

La messa a punto di un libro è un'operazione complessa ed articolata, che necessita di studi, progettualità grafica, nonché di numerosi controlli di testo, immagine, stili grafici e di stampa. È praticamente impossibile pubblicare un libro scevro da errori. La CLUT ringrazia sin d'ora i lettori che vorranno segnalare all'indirizzo dell'Editore eventuali errori riscontrati nella lettura del libro.

©2017 C.L.U.T. Editrice

Proprietà letteraria riservata

Stampato in Italia da STAMPATRE - Torino

Copyright C.L.U.T. - Torino - Settembre 2017

Titolo: *Elementi di ingegneria delle terapie termiche*

ISBN 978-88-7992-415-3

Edizioni C.L.U.T. - Torino

Corso Duca degli Abruzzi, 24 - 10129 Torino

Tel. 011 564 79 80 – Fax 011 54 21 92

*Ideazione e progetto grafico di copertina di Andrea Ruffo*

# Prefazione

Questo volumetto è la sintesi delle lezioni del corso di *Terapie termiche* tenuto presso il corso di Laurea Magistrale in *Ingegneria Biomedica* e di *Ingegneria Energetica e Nucleare* del Politecnico di Torino.

Il corso ha l'obiettivo di sviluppare l'analisi delle terapie termiche in ambito medico e veterinario, dal punto di vista della Fisica Tecnica, quindi prestando attenzione ai fondamenti termodinamici e di trasmissione del calore.

Queste lezioni presentano i principi fondamentali dell'ingegneria delle terapie termiche, da cui lo studente approfondirà autonomamente gli argomenti in relazione ai suoi interessi applicativi. Si vogliono quindi fornire le conoscenze di base utili per rendere lo studente autonomo nello studio e nell'applicazione delle terapie termiche. Nel testo non sono presenti le esercitazioni che sono svolte durante il corso, per consentire a chiunque avesse intenzione di introdurre questi argomenti in un corso equivalente, di svolgere le applicazioni più coerenti con il percorso di studi a cui afferisce il corso stesso.

Alcuni ringraziamenti sono dovuti ai colleghi con cui ho ampiamente discusso dell'argomento e del corso, in particolare a Romano Borchiellini, da cui è nata l'idea di introdurre aspetti innovativi nella didattica inerente la Fisica Tecnica, a Valter Giaretto, per l'interesse rivolto alla criogenia, a Marco Knaflitz per avermi supportato nel contestualizzare il corso nel percorso di studi della Laurea Magistrale in Ingegneria Biomedica, a Giovanni Vincenzo Fracastoro e Marco Torchio per avermi supportato nel contestualizzare il corso nel percorso di studi della Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare. Un ringraziamento

---

particolare va ad Antonio Ponzetto con cui ho spesso dibattuto di tematiche mediche e a Emilio Paulicci con cui si sono avvicendanti continuamente discorsi inerenti le applicazioni biomediche della Fisica Tecnica in ambito industriale e di trasferimento tecnologico.

Alessandria/Torino, 4 agosto 2017

Umberto Lucia

# Indice

<b>1</b>	<b>Elementi di terapie termiche</b>	<b>1</b>
1.1	Introduzione . . . . .	1
1.2	Considerazioni sugli effetti biologici . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Metrologia in ingegneria</b>	<b>9</b>
2.1	Introduzione alla metrologia . . . . .	9
2.2	Fondamenti di metrologia e il S.I. . . . .	13
2.3	L'incertezza della misura . . . . .	18
2.4	La misura in ingegneria biomedica . . . . .	25
2.5	Qualità, precisione e calibrazione . . . . .	31
2.6	Appendice . . . . .	36
2.6.1	Storia della metrologia: date di riferimento . . . . .	36
<b>3</b>	<b>La trasmissione del calore nei sistemi biologici</b>	<b>41</b>
3.1	Introduzione . . . . .	41
3.2	L'equazione del calore . . . . .	43
3.3	Scambio termico in criogenia . . . . .	47
3.4	Appendice . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Sorgenti per terapie termiche</b>	<b>55</b>
4.1	Campi e tessuti . . . . .	55
4.2	Gli ultrasuoni . . . . .	61
4.2.1	L'elasticità . . . . .	61

---

4.2.2	Le onde sonore . . . . .	63
4.2.3	Proprietà delle onde . . . . .	68
4.2.4	Interazione tra onde e superfici . . . . .	70
4.2.5	Interazione tra onde . . . . .	71
4.2.6	L'effetto Doppler . . . . .	73
4.2.7	L'analisi armonica . . . . .	74
4.2.8	Velocità di gruppo e di fase . . . . .	77
4.2.9	Interazioni acustiche . . . . .	78
4.3	Gli ultrasuoni . . . . .	80
<b>5</b>	<b>Elementi di dosimetria termica</b>	<b>85</b>
5.1	La dosimetria . . . . .	85
5.2	Le alterazioni termiche nei tessuti viventi . . . . .	87
5.3	La formula di Arrhenius . . . . .	90
5.4	Determinazione dei coefficienti di processo . . . . .	92
5.5	Modelli termofisici operativi . . . . .	95
5.6	Dose termica . . . . .	98
5.7	Simulazione numerica dei trattamenti termici . . . . .	102
5.8	Terapie con ultrasuoni . . . . .	104
5.9	Linee guida e protocolli terapeutici . . . . .	107
<b>6</b>	<b>Sintesi tecnico-clinica delle terapie termiche</b>	<b>111</b>
6.1	Ipertermia . . . . .	111
6.2	Ablazione termica . . . . .	113
6.3	Criogenia clinica . . . . .	115
6.3.1	Crioconservazione . . . . .	116
6.3.2	Crioterapia con azoto liquido . . . . .	116
6.3.3	Criochirurgia oncologica . . . . .	117
6.4	Nanoparticelle per le terapie termiche . . . . .	117
6.4.1	Nanoparticelle ferromagnetiche . . . . .	118
6.4.2	Nanoparticelle superparamagnetiche . . . . .	119
6.5	Le terapie termali . . . . .	120

6.6 Elementi di termometria clinica . . . . . 122

**Bibliografia**