

Uno studio RTL dell'emissione luminosa di lampade diverse

G. Torzo e B. Pecori

Introduzione

La luce artificiale che usiamo tutti i giorni è prodotta essenzialmente da due tipi di lampade: quelle ad *incandescenza* (le comuni lampadine a filamento metallico alimentate a 220V o le lampade "alogene" alimentate a bassa tensione, tipicamente 12V o 24V), e quelle a *fluorescenza* (comunemente dette "tubi al neon"). Tra qualche anno si diffonderà anche l'illuminazione a LED. Suggeriamo qui alcuni esperimenti RTL per studiare le caratteristiche di queste diverse sorgenti di luce¹, e in Appendice riportiamo alcune informazioni che ci sembrano utili.

Un apparato RTL per misure rapide di intensità luminosa

Il sensore di luce Texas utilizza un fotodiodo con risposta spettrale prossima a quella dell'occhio umano, con tempi di risposta molto brevi². Esso è quindi in grado di rivelare rapide fluttuazioni di illuminamento (anche superiori al kHz) che l'occhio umano non può invece percepire: il tempo di risposta dei recettori nella retina (bastoncelli e coni) è infatti dell'ordine di decine di millisecondi, come si può facilmente dimostrare con l'ultimo esperimento qui descritto.

Un modo per mettere in evidenza il diverso comportamento dei diversi tipi di lampade (a incandescenza, a fluorescenza, LED) è quello di registrare l'intensità dell'illuminamento prodotto in funzione del tempo.

Connettiamo l'interfaccia CBL ad una calcolatrice grafica TI-89 o TI-92plus o Voyage™200, e lanciamo l'applicazione PHYSICS-italiano³.

Nel menu principale selezioniamo 1: PREDISP. SONDE, e poi nel menu NUMERO DI SONDE scegliamo 1: UNO, e poi scegliamo 7: LUCE nella prima lista delle sonde disponibili. Compare una finestra che chiede di connettere la sonda al canale 1. Connettiamo il sensore di luce in dotazione con CBL alla prima porta analogica,

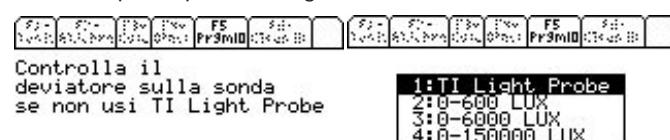


Figura 1

Alla richiesta di scegliere il tipo di sonda usata selezioniamo 1: TI Light Probe, e accettiamo la calibrazione predefinita: Nel menu principale selezioniamo 2: ACQUISIZIONE, e poi 1: MONITORAGGIO, e osserviamo i valori misurati ogni secondo quando muoviamo il sensore davanti alla sorgente di luce.

Posizioniamo il sensore in modo che il valore letto sia inferiore a 1.0 (altrimenti l'intensità di luce è eccessiva e satura il sensore).

Lampada a scarica

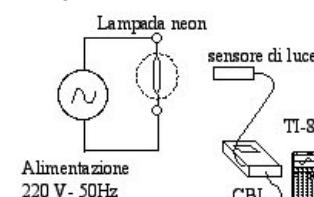


Figura 2: Apparato RTL per lo studio dell'emissione di una lampada a scarica

Iniziamo con una lampada a scarica di piccola potenza (una luce di sicurezza da soli 1.2 W) e predisponiamo il sistema per una acquisizione di 50 valori in rapida successione (separati tra loro da 1 millisecondo). Ad acquisizione terminata compare la finestra che indica ove sono memorizzati i valori (tempo in lista 1 e illuminamento in lista 2)

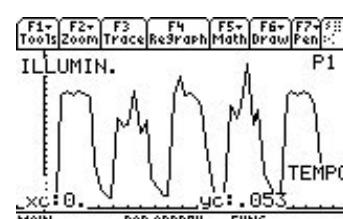


Figura 3: Grafico ottenuto con lampada fluorescente da 1.2 W

Osserviamo che l'intensità di luce non è costante, come sembra al nostro occhio, ma pulsata. La frequenza di ripetizione è di 1 impulso ogni 10 millisecondi, ovvero 100 Hz. Infatti la tensione alternata alla frequenza di rete (50 Hz) raggiunge il valore massimo che innesca la scarica due volte ogni periodo e quindi la scarica ha luogo a frequenza doppia⁴. Ripetendo la misura con una lampada fluorescente più potente (Philips SL18) da 18W, otteniamo un grafico un po' diverso:

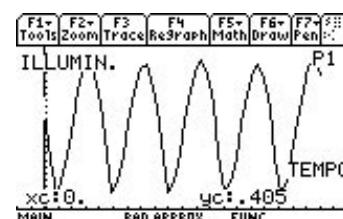


Figura 4: Grafico ottenuto con lampada fluorescente da 18 W

Per mettere meglio in evidenza il risultato modifichiamo la scala dell'asse Y per far comparire lo zero. Per questo dobbiamo uscire dal menù grafico e tornare al menu principale, selezionare 3: ANALISI e poi 3: RISCALA GRAFICO. Rieselezioniamo il CANALE 1 e poi (quando il grafico è stato tracciato) premiamo il tasto [ENTER] e poi 7: ESCI: compare la seguente finestra

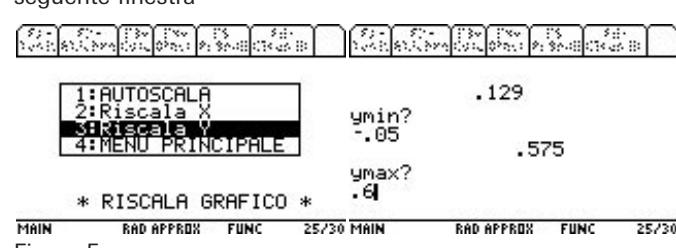
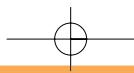


Figura 5



Uno studio RTL dell'emissione luminosa di lampade diverse

continua

Selezioniamo 3: Riscalda Y, e scegliamo come ymin un valore piccolo e negativo e come ymax un valore appena superiore al valore massimo acquisito (leggibile sullo schermo).

Premendo il tasto [ENTER] il grafico viene ritracciato con una scala che contiene l'asse X (tempi).

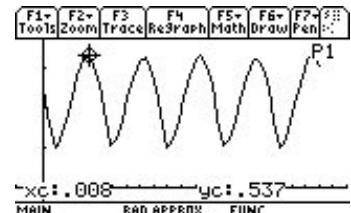


Figura 6: Grafico ottenuto con lampada fluorescente da 18 W, con evidenziato Y=0

E' qui evidente che l'intensità luminosa non torna mai a zero tra due valori massimi: le lampade fluorescenti a potenza maggiore mostrano un po' di inerzia. Il fenomeno della fluorescenza (più lento della scarica) diventa prevalente. Questo è un effetto gradito perché è stato dimostrato che illuminazione pulsata provoca affaticamento all'occhio.

Nota: se si acquisisce per tempi assai più lunghi, (ad esempio con DT=.002 e N=400 per un totale di 0.8 secondi) si può osservare che sovrapposta alla modulazione di intensità a 100 Hz c'è una modulazione su tempi lunghi (non periodica) dovuta alla variazione casuale di efficienza nella scarica.

Lampada a incandescenza

La stessa analisi può essere ripetuta per lampade ad incandescenza.

Anche qui si può cercare se vi è differenza nella dinamica del flusso luminoso emesso da lampade di potenza diversa, ad esempio lampade (alimentate a 220V) da 7, 25, 100 W.

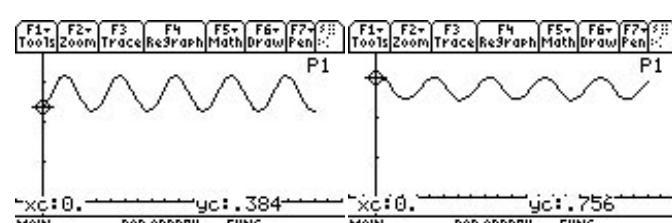


Figura 7: Grafico ottenuto con lampade ad incandescenza da 7W e da 25 W

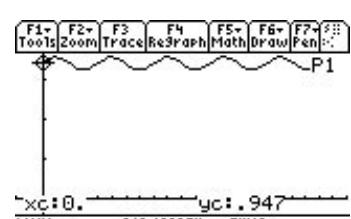


Figura 8: Grafico ottenuto con lampada ad incandescenza 100W

Mano a mano che la potenza cresce l'ampiezza relativa della modulazione della luce cala: quale può essere qui la spiegazione?

Iniziamo con l'osservare che la potenza irraggiata W_{irr}

obbedisce alla legge di Stefan Boltzmann $W_{irr} = \sigma A(T_x^4 - T_0^4)$, ove A è l'area della superficie del filamento, σ la costante di Stefan e ε il coefficiente di emissività, e quindi la modulazione dell'intensità luminosa dipende dalla modulazione della temperatura istantanea del filamento.

Dato che maggiore potenza emissiva (a parità di temperatura media raggiunta dal filamento) deve corrispondere a maggiore superficie irraggiante A, le lampade più potenti devono avere filamenti più grandi, e quindi con *maggior capacità termica* (massa).

Ne consegue una maggiore inerzia nel riscaldamento e raffreddamento durante il ciclo in cui la potenza dissipata per effetto Joule varia (si può notare per inciso che la frequenza di modulazione sinusoidale della potenza ($W=V^2/R=Rt^2$) è doppia rispetto alla frequenza di rete $V(t)=\sin(\omega t)$, dato che il quadrato di una funzione sinusoidale è una funzione sinusoidale a frequenza doppia).

Nota: in certi casi si può osservare una piccola asimmetria nei picchi (di massima e minima luminosità) interpretabili come leggera differenza nella potenza dissipata sul filamento (e conseguente variazione di luminosità). Tale differenza di potenza può essere dovuta ad un comportamento debolmente rettificante nei contatti (tra filamento ed elettrodi di supporto, o semplicemente nei cavi di collegamento o nel contatto a pressione sul portalampada (l'ossidazione di un contatto in bulbo vecchio può talvolta accrescere la resistenza di contatto a tal punto da impedire passaggio di corrente quando lo si avvia sul portalampada).

Dinamica dell'emissione da LED

La stessa analisi può essere ripetuta usando diodi LED, ma qui si deve fare attenzione a non bruciare il diodo con eccessiva corrente attraverso la giunzione: la tensione alternata deve essere di ampiezza limitata.

Un modo semplice è quello di usare un trasformatore, come quelli contenuti negli alimentatori per piccoli dispositivi (radioline, cellulari, ...), che trasformano il segnale di rete in una tensione alternata di piccola ampiezza.

Ad esempio l'alimentatore per le vecchie calcolatrici tascabili Hewlett Packard 34C fornisce in uscita 9 V a 50 Hz, con una corrente massima di 100 mA.

Connettendo i terminali di uscita di tale alimentatore ad un LED verde in serie ad una resistenza da 100 ohm, per limitare la corrente massima ad una decina di mA, la sonda di luce registra il seguente grafico.

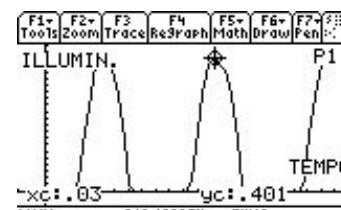
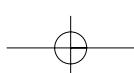
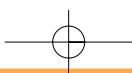


Figura 9: Grafico ottenuto con LED alimentato a 50 Hz

Si vede che il segnale di luce riproduce con buona approssimazione una sinusoida per il semiperiodo in cui il diodo conduce e segnale nullo per il semiperiodo in cui il





Uno studio RTL dell'emissione luminosa di lampade diverse

continua

diodo è polarizzato inversamente.

Non si nota apprezzabile inerzia nell'emissione (anche se il nostro occhio continua a percepire una luce costante, invece che pulsata, a causa del tempo di permanenza dell'immagine sulla retina).

Utilizzando anche una sonda di corrente ed un generatore di segnali che offre uscita in onda quadra (o triangolare), a frequenza anche superiore a 50 Hz, si può eseguire una analisi più quantitativa sia della linearità della risposta luminosa alla corrente che attraversa il LED, sia della rapidità del LED.

Stima del tempo di permanenza dell'immagine sulla retina

Usando il generatore di funzioni ad onda quadra ($\pm 10V$) e frequenza variabile, un diodo LED, e un sensore di luce si può ottenere una stima del tempo di permanenza dell'immagine sulla retina.

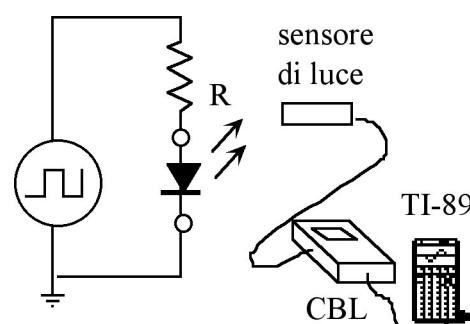


Figura 10: Apparato RTL per lo studio dell'emissione di un LED

La misura è assai semplice: alimentando il LED (un diodo emettitore di luce quando polarizzato direttamente) tramite una resistenza (ad esempio da $100\ \Omega$, per limitare la corrente a pochi mA) si scelga all'inizio una frequenza alta (ad esempio 300 Hz).

In queste condizioni la luce emessa dal LED ci appare costante mentre sappiamo che durante il semiperiodo in cui il LED è polarizzato inversamente esso non emette luce. Il LED ci sembra emettere luce di intensità costante solo perché i recettori della nostra retina hanno un tempo di recupero superiore al semiperiodo dell'onda quadra utilizzata. Possiamo diminuire lentamente la frequenza fino a che cominciamo a percepire lo sfarfallio della luce. A questa frequenza il semiperiodo è confrontabile con il tempo di permanenza dell'immagine sulla retina: basta acquisire la forma d'onda del segnale di luce e misurare il periodo facendo scorrere il cursore sul grafico in modalità TRACE per concludere la misura.

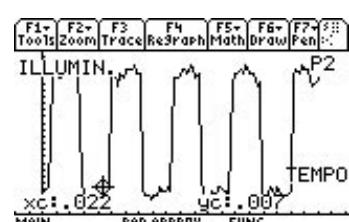


Figura 11: Segnale di luce con onda quadra con LED a 47 Hz (periodo = 0.022 s)

La misura mostrata in figura indica che il tempo di risposta dei recettori della retina dell'osservatore è dell'ordine di una decina di millisecondi.

Una variazione sul tema può essere: studiare se il tempo caratteristico che misuriamo dipende dalla lunghezza d'onda della luce percepita (usando LED di diversi colori) o se dipende dalla sua intensità (variando la corrente che attraversa il diodo agendo sulla ampiezza dell'onda quadra).

Appendice

Le lampade ad incandescenza

Le lampade ad *incandescenza* per illuminazione d'ambiente vengono alimentate in corrente alternata (a 50 Hz, frequenza di rete), mentre quelle tascabili ("torce luminose") che impiegano batterie, sono alimentate in corrente continua.

La stessa lampada a filamento può essere alimentata indifferentemente da una tensione continua o alternata purché la differenza di potenziale massima sia di valore adeguato: la luce viene infatti prodotta come effetto secondario del riscaldamento del filamento (effetto Joule).

La potenza dissipata per effetto Joule su un tratto di conduttore di resistenza R , ai cui capi è applicata una differenza di potenziale (tensione) V , vale $W=V^2/R$.

Utilizzando la legge di Ohm $V=RI$, ove I è la corrente che attraversa R , tale potenza si può esprimere alternativamente anche come $W=VI= RI^2$.

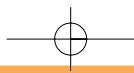
La resistenza a regime di una lampada a filamento di potenza W , alimentata da una tensione nominale V , si può quindi calcolare come $R=V^2/W$.

Tale valore non è tuttavia quello che si misura utilizzando un comune ohmetro: infatti quando la lampada è alimentata la potenza sviluppata riscalda il filamento (che è poco accoppiato termicamente all'ambiente dato che ha una piccolissima superficie e il raffreddamento per convezione prodotto dal gas contenuto nel bulbo è poco efficace).

L'effetto risultante è un rapido aumento della temperatura con conseguente aumento della resistenza elettrica (che può facilmente decuplicare il valore assunto a temperatura ambiente): la resistività dei metalli cresce infatti circa in modo proporzionale alla temperatura assoluta, con un coefficiente che per il tungsteno è dell'ordine di 0.5% per grado, e la temperatura di lavoro del filamento di una lampadina è di solito superiore ai 2500 K.

La temperatura della sorgente è legata alla qualità della luce emessa: il picco dello spettro (distribuzione dell'energia luminosa sulle diverse lunghezze d'onda) si sposta a lunghezze d'onda inferiori al crescere della temperatura (Legge di Wien). Un limite superiore è imposto dalla necessità di restare lontani dalla temperatura di fusione del filamento (che per il tungsteno è 3620 K).

Lo spettro della luce emessa è continuo: l'intensità in funzione della lunghezza d'onda è quella dello spettro detto "di corpo nero" $I(\lambda)=a\lambda^5/[\exp(b/\lambda T)-1]$, con a e b costanti, e T temperatura assoluta.



Uno studio RTL dell'emissione luminosa di lampade diverse

continua

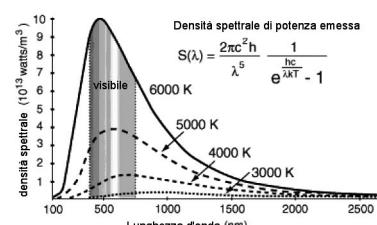


Figura 12: Lo spettro di corpo nero a diverse temperature

Il fenomeno dell'emissione di luce da parte di un materiale caldo è un fenomeno molto generale: anche buona parte dell'energia rilasciata da un ferro da stirto è luce, con uno spettro piccato nell'infrarosso, cioè luce non visibile all'occhio umano.

Poiché la luce prodotta da lampade ad incandescenza nasce dal riscaldamento del filamento e dal suo successivo raffreddamento per irraggiamento, il processo ha una *inerzia* proporzionale alla capacità termica del filamento: il filamento alimentato da un impulso di corrente non emette nel visibile finché la sua temperatura non supera un valore di soglia e poi l'emissione continua finché la temperatura scende sotto quella soglia.

Le lampade a scarica nei gas

Le lampade a scarica nei gas funzionano invece in modo del tutto diverso: si tratta di luce emessa da atomi di una miscela di gas che vengono eccitati da una scarica elettrica in un tubo. La scarica consiste in un flusso di elettroni che, accelerati dalla differenza di potenziale tra gli elettrodi, collidono con gli atomi del gas producendo ionizzazione ed eccitazione a livelli energetici elevati: quando gli atomi tornano allo stato fondamentale emettono un fotone con lunghezza d'onda corrispondente alla differenza di energia tra stato eccitato e stato fondamentale.

La luce emessa (*luminescenza*) ha quindi uno spettro a righe. Il colore della luce emessa dipende dalla miscela di gas (tipica dei tubi al neon è la luce rossa, tipica dei tubi al sodio la luce gialla).

La miscela nelle lampade a luce bianca è di solito composta di alogenuri metallici e vapori di mercurio, ed il tubo è ricoperto internamente di un film che contribuisce all'emissione luminosa mediante *fluorescenza*⁵.

L'emissione luminosa in tal caso avviene in due tempi: la scarica si esaurisce in tempi molto brevi e l'energia impartita agli elettroni dal campo elettrico di rete (dovuto alla differenza di potenziale di 220V tra gli elettrodi) viene convertita in fotoni a piccola lunghezza d'onda; parte di questi fotoni viene assorbita dagli atomi del film che riveste l'interno del tubo e riemessa a lunghezza d'onda maggiore (*fluorescenza*), con uno spettro continuo. Piccola parte dell'energia elettrica viene convertita in energia termica: le lampade a fluorescenza sono sorgenti di luce " fredde".

LED (Light Emitting Diode): una sorgente di luce senza inerzia

Anche i LED, diodi emettitori di luce, sono sorgenti luminose fredde. Ma sono assai più veloci sia ad accendersi che a spegnersi.

Il meccanismo di emissione di fotoni è infatti diverso: sono gli stessi elettroni di conduzione che emettono fotoni di lunghezza d'onda λ corrispondente alla banda di energia proibita (E_g =Energy Gap) caratteristica del materiale di cui è fatta la giunzione $\lambda=1.24/E_g$ ($\mu\text{m}/\text{eV}$).

Di conseguenza i LED emettono con uno spettro a banda stretta (luce colorata)

Esistono LED che emettono nell'infrarosso, nel rosso, giallo, verde e blu.

Recentemente sono stati costruiti anche singoli⁶ LED che emettono luce bianca, evidentemente non monocromatica: in tal caso il processo assomiglia a quello delle lampade a fluorescenza, con eccitazione di atomi di fosforo da parte di luce blu emessa da un LED con giunzione di InGaN (Nitruro di Gallio e Indio).

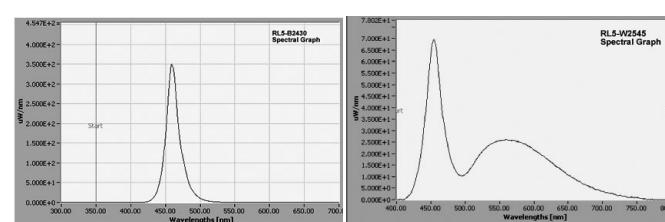


Figura 13: Spettri d'emissione di LED blu e bianco , rispettivamente

Una caratteristica comune a tutti i LED è che la fotoemissione avviene solo quando la corrente che attraversa la giunzione va dal terminale "P" (anodo) al terminale "N" (catodo): in queste condizioni si dice che il diodo è polarizzato "direttamente". Come in qualsiasi diodo, se la tensione cambia segno (polarizzazione inversa), la corrente che attraversa la giunzione è trascurabile: il diodo infatti funziona da raddrizzatore (conduce solo in un verso).

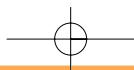
I fotodiodi: "LED che funzionano all'incontrario"...

Tutti i diodi (giunzioni PN) percorsi da corrente emettono fotoni, anche se solo nei LED la struttura del diodo è fatta in modo da ottimizzare l'emissione di tali fotoni.

Il fenomeno è anche reversibile: se fotoni di energia superiore ad E_g colpiscono la giunzione PN, essi possono venire assorbiti e produrre una tensione ai capi della giunzione, o una "foto-corrente" se il dispositivo è chiuso su una resistenza.

Diodi ottimizzati per evidenziare questa foto-corrente vengono detti fotodiodi (e quando sono ottimizzati per massimizzare la potenza elettrica prodotta dalla luce incidente vengono detti "celle fotovoltaiche").

Si è detto che il processo di emissione fotoelettrica nei LED è veloce: altrettanto veloce è il processo inverso e quindi i fotodiodi sono sensori di luce rapidi, adatti a misurare luce modulata ad alta frequenza. Il sensore di luce Texas è un fototransistor, molto simile ad un fotodiodo.



Uno studio RTL dell'emissione luminosa di lampade diverse

continua

G. TORZO
ICIS-CNR, INFM
Dipartimento di Fisica-Università di Padova
torzo@padova.infm.it

B. PECORI
Dipartimento di Fisica-Università di Bologna
pecori@adf.unibo.it

Note

- 1) Si tratta di esperimenti utilizzati in un corso di formazione per insegnanti "Piccole tecnologie per l'insegnamento della fisica", organizzato da A. Orlandoni per ADT-IRRE Emilia-Romagna nel dicembre 2003 a Bologna.
- 2) Diversamente dalle fotoresistenze che, pur offrendo sensibilità maggiori, hanno tempi di risposta dell'ordine di

decine o centinaia di millisecondi, e che per questa ragione sono ormai usate solo come elemento sensibile in interruttori crepuscolari o in esposimetri per macchine fotografiche.

3) Scaricabile dal sito <http://www.fisica.uniud.it/irdis/> oppure dalla pagina www.padova.infm.it/torzo/torzo.html. (Purtroppo la versione registrata nel CD-ROM ADT 2003 contiene un errore individuato e corretto durante la stampa del CD).

4) Le lampade a scarica sono costruite in modo simmetrico: la nube di elettroni che innesca la scarica è di solito prodotta da un minuscolo filamento posto accanto ad entrambi gli elettrodi, che, riscaldato dalla tensione di alimentazione, emette elettroni per effetto termoelettronico.

5) La luce emessa dagli atomi di mercurio eccitati è luce ultravioletta, che a sua volta eccita gli atomi di fosforo del rivestimento interno del tubo. Il fosforo si dissecchia emettendo una banda nel visibile.

6) I primi LED a luce bianca erano composti di tre emettitori (blu, verde e rosso).

Il CATESM (*Centro di Ateneo per le Tecnologie Educative e Sistemi Multimediali*) dell'Università della Basilicata con il Patrocinio di ADT (Associazione per la Didattica con le Tecnologie) www.adt.it organizza a

**Ferrandina (MT), Fraz. Borgo Macchia, SS 407,
nei giorni 9-10-11-12 dicembre 2004 il**

3° CONVEGNO NAZIONALE MATEMATICA, FORMAZIONE SCIENTIFICA E NUOVE TECNOLOGIE

**Concepire, insegnare la Matematica e le Scienze per le future applicazioni:
argomenti e metodi**

Comitato scientifico
M.Cerasoli, M.Fasano, M. Pertichino, M.Polo,

**L'iscrizione avviene durante il convegno. Sono gradite le iscrizioni in anticipo
al seguente indirizzo: enea@unibas.it**

**Chi desidera tenere una comunicazione di 20 minuti deve farne richiesta entro
il 30 settembre 2004 a uno dei seguenti indirizzi:
fasano@unibas.it oppure mceraso@tin.it**

**Sono previsti gli atti del convegno. Per informazioni sugli alberghi
convenzionati consultare la pagina delle news su www.unibas.it/catesm. Al
termine del convegno verrà rilasciato da ADT un attestato per un massimo di
n° 24 ore di aggiornamento in base alla CM 376, prot. 15218, del 23-12-1995
e successive modifiche.**

Per ulteriori informazioni contattare: labcatesm@unibas.it.