

PREFAZIONE

Il presente lavoro di tesi si inserisce nel contesto dell'iniziativa dell'Università di Napoli, la prima in ambito italiano ed in tutta l'area mediterranea, per lo studio e la realizzazione del microsatellite scientifico a tecnologia avanzata: SMART (Scientific Microsatellite for Advanced Research and Technology).

Il microsatellite universitario SMART va ad accrescere la sempre più vasta famiglia di quei satelliti progettati per la realizzazione di piccole missioni scientifiche e la verifica in volo di componenti e tecnologie destinate alle grandi missioni spaziali.

Pertanto, esso costituisce, per piccoli gruppi universitari, un valido supporto per mettere in pratica le nozioni apprese durante la carriera universitaria, nonché per sviluppare lo spirito di collaborazione necessario per la buona riuscita di un progetto.

Nel Capitolo I di questo lavoro di tesi verranno esposte le caratteristiche di progetto del satellite SMART, con una breve descrizione dei sottosistemi che lo compongono; tali caratteristiche permetteranno di definire le motivazioni che hanno portato a preferire, come dispositivi per il raggiungimento e il mantenimento dell'assetto del satellite, oltre le ruote d'inerzia, gli attuatori magnetici rispetto a quelli ad espulsione di massa.

L'obiettivo del lavoro è quello di studiare e progettare l'hardware di un sottosistema per il controllo magnetico dell'assetto e la sua disposizione a bordo del satellite SMART. A tale scopo, è necessario, innanzitutto, intendersi sul significato di controllo magnetico. Il controllo magnetico rappresenta quel sistema automatico concepito per il controllo dell'assetto dei satelliti di piccole dimensioni (categorie dei microsattelliti che hanno una massa compresa tra i 10 e i 100 Kg). Esso, prendendo come riferimento la direzione locale, lungo l'orbita, del campo magnetico terrestre (per mezzo di un sensore di campo triassiale che valuta le componenti del campo magnetico della Terra in un sistema di riferimento tridimensionale solidale al satellite), fornisce la legge oraria per la generazione delle coppie meccaniche necessarie affinché il satellite raggiunga e mantenga l'assetto desiderato in tutti i punti dell'orbita. Le coppie sono determinate dalle forze che derivano dall'interazione di dipoli magnetici presenti a bordo del satellite con il campo, quello terrestre, in cui essi sono immersi (teorema di Ampere). Una vasta panoramica sulle modalità di realizzazione del controllo magnetico, verrà fornita, nel Capitolo 2. In tale Capitolo sarà, inoltre, esposta una trattazione del più preciso modello matematico del campo geomagnetico (modello IGRF).

L'analisi dell'intensità del campo magnetico della Terra alla quota operativa del satellite SMART permette di individuare un limite per la

massima quota alla quale un tale tipo di controllo risulta efficace. In generale, possiamo ritenere che i satelliti in orbita bassa (LEO, Low Earth Orbit), che orbitano a quote comprese tra i 400 e i 1000 Km, siano i più indicati per l'utilizzazione di attuatori magnetici per il controllo d'assetto. A quote maggiori l'intensità del campo magnetico della Terra, decrescendo proporzionalmente a $\frac{1}{r^3}$ (con r distanza dal centro della Terra), richiede la presenza di dipoli magnetici molto intensi a bordo del satellite, nonché sensori del campo magnetico con risoluzioni molto elevate.

Dalla trattazione esposta nel Capitolo 2 si evince, dunque, quali debbano essere i dispositivi che permettono di realizzare il controllo magnetico. In particolare, sarà introdotto il concetto di attuatore magnetico e quello di magnetometro.

Per attuatore si intende, con un termine prelevato dalla terminologia tecnica anglosassone, quel dispositivo che sfrutta l'interazione con il campo magnetico terrestre nel quale esso è immerso, per generare coppie meccaniche di intensità adeguate alla realizzazione delle manovre per il raggiungimento dell'assetto desiderato del satellite. L'attuatore magnetico esibisce, infatti, per la legge di Ampere, un momento magnetico, di data intensità, direzione e verso, che, interagendo con il vettore campo magnetico della Terra, genera una coppia meccanica ortogonale al piano contenente i due vettori. Nel passato, in campo spaziale sono state utilizzate diverse configurazioni di attuatori magnetici a seconda che il controllo, per il quale sono state progettate, fosse passivo (barre permanentemente magnetizzate), oppure attivo (solenoidi alimentati con nucleo di aria o di materiale ferromagnetico alimentati).

Il magnetometro è un sensore del campo magnetico terrestre. In particolare, si tratta di un magnetometro a nucleo saturabile (fluxgate), vale a dire un sensore che, valutando il grado di saturazione del materiale del nucleo, dovuta ad un campo magnetico esterno (quello della Terra), determina la misura dell'intensità di tale campo. Utilizzando quattro avvolgimenti elettrici e due nuclei di materiale ferromagnetico (per determinare l'effetto fluxgate), esso misura l'intensità, la direzione ed il verso del campo su tre direzioni ortogonali e su di un asse ridondante.

Nel Capitolo 3 saranno esposte le basi teoriche che consentono di valutare gli effetti del campo magnetico sulla materia che esso avvolge. L'analisi teorica sarà sviluppata sulla base delle equazioni del magnetismo valide nel vuoto e nei mezzi materiali, in condizioni stazionarie (magnetostatica).

Le problematiche coinvolte nell'analisi dei problemi legati al comportamento isteretico non lineare del nucleo dell'attuatore conducono allo studio di un appropriato modello per la simulazione di tale comportamento. Nel Capitolo 4, pertanto, sarà sviluppato lo studio del modello di Preisach e la sua applicazione nel progetto dell'attuatore magnetico che risponde alle esigenze di controllo.

Nel Capitolo 5 sarà affrontato il problema dello sviluppo di un adeguato software di simulazione per il modello di Preisach. Sarà descritto il funzionamento di tale modello nonché le caratteristiche determinati del passaggio dal modello puramente matematico-teorico a quello numerico-applicativo. Sarà possibile capire se e quali materiali siano simulabili col modello di Preisach.

Infine, nel Capitolo 6, quello conclusivo, si darà un sunto applicativo al modello teorico trattato, e di valutare quindi l'effettiva funzionalità del software inteso come strumento ultimo per la simulazione del nucleo di materiale ferromagnetico che si desidera analizzare.

1. IL MICROSATELLITE SMART

1.1 Introduzione

Negli ultimi anni, il lancio di più di 400 microsattelliti ha dimostrato che essi costituiscono, per piccoli gruppi universitari, un mezzo concreto per la realizzazione di piccole missioni scientifiche e la verifica in volo di componenti e tecnologie destinate alle grandi missioni spaziali.

In tale contesto si inserisce l'iniziativa dell'Università di Napoli, la prima in ambito italiano ed in tutta l'area mediterranea, per lo studio e la realizzazione del microsattellite scientifico a tecnologia avanzata: SMART (Scientific Microsatellite for Advanced Research and Technology).

Lo sviluppo di SMART si inquadra in un progetto di promozione delle attività di ricerca universitaria, e rappresenta un programma significativo per il rilancio delle iniziative industriali attraverso il coinvolgimento diretto della PMI campana. Prova di questa nuova opportunità è che, per la realizzazione del modello ingegneristico del microsatellite, si è determinata una forte collaborazione tra le competenze scientifiche dei gruppi di ricerca universitari e le risorse produttive delle imprese ad alta tecnologia, rispondendo così ad una tendenza affermata come moderna esigenza, del mercato aerospaziale. Infatti, già da qualche tempo, una precisa domanda del mercato degli investimenti aerospaziali, riguarda la ricerca di Soluzioni tecnologiche innovative per i problemi tradizionali di ingombro strutturale e di elevati consumi di potenza caratteristici dei grandi satelliti.

Questa ricerca, con crescente coinvolgimento delle risorse umane e degli investimenti economici, ha determinato un forte impulso verso la miniaturizzazione dei sensori e dei componenti elettronici, segnando un importante passo avanti nello sviluppo di soluzioni alternative ai progetti di satelliti artificiali convenzionali; si è così oggi stabilmente affermata l'offerta di piccole piattaforme spaziali, per le quali i requisiti di massa e di potenza si sono fortemente ridotti, e con essi sia i costi che i rischi, tanto in fase di sviluppo dei microsatelliti quanto per le loro operazioni di lancio. Assistiamo in tal modo ad una spinta sempre maggiore per la realizzazione di piattaforme di piccole dimensioni, con tempi e costi di realizzazione ridotti. In questo moderno contesto applicativo, SMART rappresenta certamente una valida e pronta risposta all'evoluzione dell'ingegneria dei sistemi aerospaziali.

In questo capitolo saranno fornite alcune informazioni tecniche relative al microsatellite Universitario SMART.

In particolare, saranno descritti brevemente i vari sottosistemi che lo costituiscono, le caratteristiche strutturali ed il carico utile.

Verrà, infine, presentato il contesto in cui si inserisce il lavoro di tesi.

1.2 Descrizione del microsatellite

Il microsatellite scientifico SMART è il risultato di un progetto di ricerca congiunto tra il Dipartimento di Scienza e Ingegneria dello Spazio "Luigi G. Napolitano" dell'Università di Napoli "Federico II" (DISIS) e il Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale della Seconda Università di Napoli (DAE-SUN).

La realizzazione di SMART si colloca a valle di uno studio, iniziato negli anni precedenti, che ha avuto come obiettivo la definizione dei principali parametri costruttivi, sia per quanto riguarda la sua struttura sia per tutti i suoi impianti di bordo. In questa fase preliminare, le attività di ricerca hanno rappresentato un importante strumento di formazione dei gruppi coinvolti nella sperimentazione, consentendo il trasferimento alla didattica universitaria delle conoscenze e delle competenze di sistemistica e tecnologia spaziale, mediante esperienze dirette ed attività concrete.

1.2.1 Caratteristiche generali

La caratteristica configurazione modulare del microsatellite SMART garantisce un'ampia flessibilità progettuale ed una funzionalità dinamica tali da offrire un modello ingegneristico per lo sviluppo di un veicolo multi-missione, con un alloggiamento per il carico utile destinato alla realizzazione di obiettivi di vario tipo, che vanno dall'osservazione della Terra a quella del Sole o delle stelle.

Il microsatellite è destinato ad operare su orbite eliosincrone con quote comprese tra 400 e 1000 Km.

Le dimensioni del satellite sono 450x450x370 mm, per una massa totale di 50 Kg, con un design strutturale compatibile, in termini di massa e volume, con una vasta gamma di lanciatori, ed in particolare con il lanciatore europeo Ariane (ASAP) e quello indiano Indian Polar Satellite Launch Vehicle (PSLV).

La configurazione del satellite consiste in una struttura modulare che permette un'ottima flessibilità durante l'assemblaggio e una facile integrazione dei sottosistemi.

La struttura del «bus» consiste di un pannello in alluminio a nido d'ape (honeycomb) di 20 mm di spessore, alla base, su cui poggia una struttura reticolare, costituita da travi ad L (20x20x2 mm), che permette di scaricare sul piano base i carichi al lancio dei vari sottosistemi.

Per facilitare l'integrazione del carico utile, è stato previsto, lungo tutta l'altezza del satellite (370 mm), un modulo centrale cilindrico, in alluminio 7075-T6, con un diametro di 140 mm. Il volume destinato al carico utile è utilizzabile, in fase di test, per l'allestimento dell'interfaccia con il simulatore della dinamica d'assetto (simulatore di inerzia).

Per quanto riguarda l'utilizzazione operativa di SMART, è prevista l'installazione a bordo di carichi utili fino a 10 Kg per un consumo medio di potenza elettrica di 4 W.

Il satellite è stabilizzato sui tre assi con l'asse longitudinale del cilindro (asse di yaw del satellite) allineato con l'asse z0 del riferimento orbitante (riferimento ad assetto zero) e diretto quindi verso la Terra. Il sistema di

potenza elettrica di bordo è costituito principalmente da cinque pannelli solari, uno fissato al corpo del satellite sulla parte superiore e quattro dispiegabili. Questa configurazione consente di ottenere, sull'intero range di orbite eliosincrone previsto, la potenza elettrica richiesta sia dal «bus» che dal carico utile di SMART.

1.2.2 Sottosistema di potenza elettrica del satellite

Il sottosistema di controllo e distribuzione della potenza elettrica alimenta il carico utile e gli altri sottosistemi durante tutte le fasi della missione. L'alimentazione alle varie utenze avviene attraverso un sistema di controllo denominato «Power Control Unit» (PCU) che regola la tensione di alimentazione al bus a 28 V. La PCU controlla e regola la potenza fornita dalle celle solari, durante la fase illuminata dell'orbita, e quella fornita dalle batterie, durante la fase di eclisse. La PCU viene comandata dal sottosistema di trattamento dati OBDH (On-Board Data Handling), descritto più avanti, attraverso il quale si possono spegnere singoli sottosistemi in risposta ad un segnale di Telecomando (TC) o, automaticamente, quando si verifica una situazione di sovraccarico sul satellite. Moduli ridondanti permettono di ottenere un'affidabilità ed un'efficienza maggiore dell'85%: due Regolatori di Carica della Batteria BCR (Battery Charge Regulator), due Regolatori di Scarica della Batteria BDR (Battery Discharge Regulator) oltre a due Regolatori Shunt. Il sottosistema di potenza elettrica è in grado di fornire e mantenere una potenza media di 64 W, per mezzo di un'utilizzazione combinata delle batterie ricaricabili Ni-Cd e dei cinque pannelli solari.

1.2.3 Sottosistema di telecomunicazione del satellite

Il sottosistema di telecomunicazioni di SMART si compone di due elementi fondamentali: il rice-trasmittitore e l'antenna.

La ricezione di segnali di telecomando (uplink) e la trasmissione dei dati telemetrici e di stato (downlink) è affidata ad un ricetrasmettitore, di 1 W di potenza, che comprende un ricevitore, un trasmettitore, un diplexer e due antenne "patch".

Il ricevitore accetta segnali portanti modulati in fase da una sottoportante ad una frequenza di 16 KHz , modulata in Binary Phase-Shift Keying (BPSK) con dati di telecomando, in accordo con lo standard ESA. Le velocità dei dati sono comprese fra gli 8 bps e i 4 Kbps .

Il ricevitore accetta segnali portanti modulati in fase da una sottoportante ad una frequenza di 16 KHz ; la sottoportante, in accordo con lo standard ESA, è modulata in Binary Phase Shift Keying (BPSK) con dati di telecomando. Le velocità di trasmissione dei dati sono variabili tra gli 8 bps (bit per sec) e i 4 Kbps ; elevati data rates sono necessari per comunicazioni da orbite basse (LEO, Low Earth Orbit), per le quali, tipicamente, i tempi di contatto con le stazioni di terra sono dell'ordine di 10 minuti per passaggio, con 3-4 passaggi in un giorno in vista della ground station.

Per il trasmettitore, un amplificatore in uscita fornisce 1 W di potenza in banda 5 , con una modulazione BPSK (Binary Phase Shift Keying), in accordo con gli standard utilizzati.

Il sistema di rice-trasmissione si avvale per le comunicazioni da e verso la Terra, in alternativa ad una singola antenna conica che ricopre l'intera banda

di frequenze per l'uplink e per il downlink, di due antenne patch in banda S, con larghezze di banda centrate sulle frequenze selezionate per la ricezione e la trasmissione. L'antenna per il downlink opera nella banda 2200-2290 MHz e quella per l'uplink opera nella banda 2025-2110 MHz.

Il guadagno delle antenne è stato stimato essere di circa +1dB ad un angolo di 70 gradi di elevazione, e sale fino a +7 dB nel lobo principale in direzione del boresight del diagramma di radiazione. Questo diagramma di radiazione si rivela utile per le applicazioni in orbita bassa (LEO), dove l'acquisizione del segnale da parte della stazione di Terra inizia ad un angolo di elevazione di circa 10 gradi (misurato a partire dall'orizzonte locale).

1.2.4 Sottosistema di trattamento dei dati a bordo (OBDH)

La gestione delle informazioni di bordo avviene per mezzo di un sottosistema di trattamento dati basato su un processore centrale ridondato (transputer) che utilizza le risorse di un sistema operativo residente per la gestione dei bus interni e l'acquisizione dei dati dai sensori.

Per le funzioni di interpretazione delle sequenze di telecomando, generazione dei dati di telemetria, e acquisizione in tempo reale delle informazioni sullo stato dei vari sottosistemi componenti, l'OBDH utilizza un'unità di elaborazione (SPU, Space Processor Unit) costituita da un sistema a 32 bit, INMOS transputer T805 a 32 bit e 20 MHz, capace di elaborare, immagazzinare e formattare i dati scientifici e, del carico utile. Ciascuna SPU ha una capacità 1 Mb di ROM e 8 Mb di RAM, con un'unità di memoria di massa di 32 Mb, utilizzabile per software applicativo e per l'immagazzinamento di dati forniti dal carico utile (cioè dati di immagini

ottiche o radar). L'unità possiede le funzioni richieste per l'integrazione di tutte le attività del satellite. Le funzioni principali dell'OBDH possono essere così riassunte:

- inizializzazione dei sottosistemi;
- monitoraggio attivo dello stato del sottosistema, identificazione e diagnosi di guasti;
- decodifica e distribuzione dei segnali di telecomando agli attuatori o ai sottosistemi;
- codifica dei dati telemetrici e di quelli sullo stato del satellite, con immissione degli stessi nel canale downlink;
- generazione di riferimenti temporali a bordo, e implementazione di azioni telecomandate;
- possesso di un "sistema operativo" per supportare lo sviluppo di un software di bordo.

1.2.5 Sottosistema di controllo d'assetto

Il problema del controllo d'assetto può essere suddiviso in due fasi principali: l'acquisizione d'assetto, dopo la separazione dal lanciatore, e il controllo fine per il mantenimento dell'assetto durante la fase operativa o di «station keeping» della missione.

Per il sottosistema di controllo di assetto del microsatellite SMART vengono utilizzati sensori ed attuatori con consumo totale in potenza elettrica minore di 7 Watt.

La sensoristica d'assetto consiste in un magnetometro triassiale, per la misura del campo geomagnetico locale, in un sensore solare digitale biassiale per la determinazione dell'angolo di aspetto del Sole ed in due sensori d'orizzonte a stato solido per la misura degli angoli di pitch e roll in un riferimento solidale al satellite (terna body). La tecnica di acquisizione adottata si basa sull'efficacia delle coppie dovute all'interazione tra il campo magnetico della Terra e quello prodotto da dipoli a bordo del microsatellite. In questa fase, l'obiettivo che si desidera conseguire è quello di ridurre le velocità angolari iniziali del satellite; infatti, per effetto della messa in orbita (condizioni iniziali al lancio: $\alpha=0^\circ$, $\beta=-90^\circ$, $\gamma=0^\circ$), il satellite inizierà una rotazione con una velocità di circa $0^\circ/s$ intorno agli assi di pitch e di roll del riferimento solidale alla piattaforma.

Definito l'assetto del satellite in termini delle rotazioni del riferimento body rispetto a quello orbitante, il controllo d'assetto vero e proprio è realizzato impiegando un sistema di tre attuatori magnetici, il cui studio sarà oggetto del presente lavoro di tesi, e di tre ruote d'inerzia per la stabilizzazione attiva sui tre assi. Gli attuatori consistono, pertanto, di:

- tre bobine con nucleo di materiale ferromagnetico, per la generazione di coppie di controllo durante le fasi di acquisizione dell'assetto, di "station keeping" e di desaturazione delle ruote;
- tre ruote d'inerzia comandate da micromotori "brushless", per la stabilizzazione attiva sui tre assi durante la fase di controllo fine.

Le ruote d'inerzia sono state progettate e sviluppate ricorrendo ad una tecnica che, assegnati i requisiti della ruota in termini della massima coppia di reazione e del limite di saturazione della quantità di moto, rendesse minima

la massa e la potenza elettrica richieste. Il sistema delle tre ruote ha un peso complessivo minore di 1.5 Kg e un assorbimento di potenza medio di circa 3 W, inclusa l'elettronica di controllo.

1.3 Attività di integrazione e test del microsatellite

Per la verifica e la qualifica spaziale dei vari sottosistemi del satellite, è necessario eseguire su di essi una serie di test di laboratorio, che possono essere così schematizzati:

- test di funzionalità dei singoli sottosistemi;
- test di compatibilità ed integrazione;
- test ambientali, durante i quali il satellite è immerso in un ambiente simile a quello spaziale, che, viene riprodotto mediante opportuni impianti (simulatori solari e in termovuoto)
- test a vibrazione, durante il quale il satellite viene sollecitato, mediante tavole oscillanti, con vibrazioni simili, in ampiezza e frequenza, a quelle cui sarà sottoposto nel lanciatore;
- test di dinamica e controllo d'assetto, che viene effettuato con il simulatore d'inerzia.

I test di dinamica e controllo d'assetto rivestono un ruolo fondamentale nella progettazione del sottosistema per la misura ed il controllo dell'assetto del microsatellite, in quanto tale progettazione rappresenta certamente una delle fasi più delicate ed importanti del mission design. A valle dell'integrazione dei singoli componenti occorre, infatti, eseguire prove di

laboratorio orientate verso:

- la verifica del corretto funzionamento dell'hardware di misura e controllo;
- la verifica della logica e del software di controllo;
- l'analisi dell'interazione del sistema di controllo di assetto con la dinamica strutturale del microsatellite.

A tale scopo, le prove che si effettuano in laboratorio sono fondamentalmente di due tipi: statiche e dinamiche.

Le prove statiche consistono, essenzialmente, nella misura delle caratteristiche di risposta in frequenza dell'hardware (sensori ed attuatori) simulando, con un computer, la dinamica di assetto del satellite.

Le prove dinamiche hanno lo scopo di simulare, in modo sufficientemente realistico, le condizioni operative del sistema di controllo di assetto, analizzandone la risposta a condizioni iniziali e momenti di disturbo. Per questo, al fine di simulare adeguatamente le condizioni di assenza di gravità, i test vengono eseguiti mediante un simulatore di inerzia costituito da una sfera in alluminio sostenuta da un sistema a cuscinetto d'aria. Quest'ultima viene pompata attraverso l'estremità superiore del sostegno verticale sul quale poggia la sfera, che è fissata, dal lato superiore, ad un particolare attacco, situato internamente al satellite, nell'alloggiamento destinato al carico utile, assente durante il test. In questo modo, la sfera viene a trovarsi in prossimità del centro di massa del satellite, cosicché le rotazioni avvengono all'incirca attorno ad esso.

Il sistema di sospensione a cuscinetto d'aria conferisce libertà di rotazione

attorno a tre assi ortogonali con minimo attrito. I range di rotazione tipici del simulatore di assetto sono riportati di seguito:

- asse x: da $\pm 20^\circ$ a $\pm 45^\circ$;
- asse y: da $\pm 20^\circ$ a $\pm 45^\circ$;
- asse z: 360° .

Per la calibrazione e la verifica del magnetometro, che misura le componenti del campo geomagnetico su tre assi ortogonali solidali al satellite, e degli attuatori magnetici, che producono un vettore momento di dipolo magnetico diretto lungo il loro asse longitudinale, occorre riprodurre in laboratorio il campo magnetico, variabile lungo l'orbita, in cui il satellite si trova immerso durante la sua vita operativa.

Quindi, per una esecuzione corretta del test di dinamica e controllo d'assetto, occorre, oltre al simulatore d'inerzia ed ai dispositivi di simulazione delle sorgenti per il funzionamento dei sensori (lampada solare, campo stellare, disco terrestre), un impianto che sia in grado di annullare il campo magnetico locale a Terra (nel laboratorio) e simulare la variabilità di quello alla quota operativa.

Tutti i test di prova e collaudo del microsatellite vengono effettuati presso la camera pulita del DAE-SUN, che offre, per le operazioni di assemblaggio ed integrazione dei componenti spaziali, un ambiente sterile classe 10000 con valori controllati di temperatura ed umidità.

L'integrazione dei sottosistemi a bordo del microsatellite SMART è stata definita dai risultati di una recente ed innovativa esperienza di progetto che ha dimostrato la validità dell'utilizzo di una procedura numerica, mediante reti

neurali artificiali, per la disposizione automatica dei sottosistemi.

La disposizione risultante è tale che la terna geometrica del satellite, con origine nel centro di massa, coincide entro certi limiti con il riferimento centrale di inerzia.

1.4 Obiettivi del lavoro di tesi

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di studiare e, quindi, progettare l'attuatore magnetico per il microsatellite SMART. A tale scopo, provvederemo, innanzitutto, ad individuare il modello matematico più adeguato alla simulazione del comportamento del nucleo ferromagnetico dell'attuatore. Nei prossimi capitoli verranno presentati, pertanto, il modello di riferimento usato per il campo geomagnetico e le basi teoriche del controllo realizzato con l'ausilio degli attuatori magnetici. Successivamente verrà affrontato lo studio teorico, e l'implementazione numerica del modello di Preisach (per la simulazione del comportamento del nucleo ferromagnetico) e l'applicazione del modello nella progettazione dell'attuatore magnetico.

Il lavoro di tesi si completerà con un capitolo dedicato ai test-case in cui il modello sviluppato verrà applicato per la simulazione del comportamento di alcuni materiali, selezionati tra quelli usati a bordo di satelliti. Verrà esposto esaurientemente anche lo studio del software realizzato ad hoc e il suo funzionamento.

Lo scopo di questo lavoro è fornire uno strumento per la scelta e la modalità di utilizzo del materiale costituente il nucleo ferromagnetico dell'attuatore magnetico.

2. SISTEMA DI CONTROLLO MAGNETICO

2.1 Introduzione

La prima utilizzazione di attuatori magnetici, per la correzione dell'assetto dei satelliti in orbita bassa, risale al 1960 con il satellite TIROS-2. In quegli anni, infatti, Harold Perkel ideò un sistema di controllo d'assetto su tre assi per satelliti, utilizzando una singola ruota, a momento nominale non nullo e giunto cardanico fisso (momentum wheel), e alcuni attuatori magnetici, per controllare le componenti trasversali del vettore momento angolare. Il nome dato a questo nuovo modo di concepire il controllo d'assetto fu "Stabilite". Originariamente, come abbiamo detto, tale sistema fu applicato al programma per i satelliti meteorologici TIROS, ma è stato, successivamente, utilizzato sulla serie di satelliti ITOS.

Nelle prime missioni, le potenzialità del controllo magnetico non ebbero la possibilità di essere esplorate e apprezzate appieno a causa della necessità

del contatto a terra per le variazioni dello stato della bobina (intensità e/o polarità della corrente). La bobina restava accesa per un certo numero di orbite o di giorni, durante i quali l'asse di spin precessionava ad una velocità media molto bassa. Questo tipo di controllo fu definito controllo magnetico continuo (continuous torquing).

Il lancio del satellite TIROS-9, nel Gennaio 1965, vide una innovazione nel progetto del sistema di controllo magnetico. Attraverso un timer a bordo, la polarità della corrente nella bobina era commutata quattro volte nel giro di ciascuna orbita. Per questo motivo, tale sistema fu definito sistema di controllo magnetico per quarti d'orbita (o Quarter-Orbit Magnetic Attitude Control). Il QOMAC, sfruttando il fatto che il campo geomagnetico terrestre oscillasse con un periodo, approssimativamente, pari alla metà del periodo orbitale, convertiva la polarità della bobina in accordo con il campo geomagnetico. Entrambi i tipi di sistema sopra definiti, furono utilizzati sul satellite OSO-8.

Satelliti più recenti sono stati equipaggiati con sistemi di comando differito (Delayed Command Systems), nei quali una sequenza preselezionata di comandi sulla variazione dello stato della bobina, che ricopre un esteso periodo di tempo, è caricata nella memoria del computer di bordo, durante il passaggio su di una stazione sulla Terra ed eseguita nei tempi indicati, senza successivi contatti a terra.

I sistemi di controllo con attuatori magnetici possono essere utilizzati per tutti i satelliti che orbitano ad una quota bassa. Essi sono relativamente leggeri, non richiedono parti mobili, né complessità strutturale. Tutto ciò fa sì che il controllo magnetico sia indicato per le applicazioni spaziali; esso, comunque, richiede un significativo apporto di potenza elettrica, permette

solo manovre lente, a causa dei limiti di potenza, e la sua operatività dipende dalla configurazione del campo magnetico terrestre.

Esistono tre tipi di attuatori magnetici, attualmente, usati: magneti permanenti, bobine con nucleo in aria (elettromagneti) e bobine con nucleo di materiale ferromagnetico.

I magneti permanenti sono il tipo di attuatori magnetici più pesante e sono usati solo per la stabilizzazione passiva. Gli attuatori con nucleo di aria o di materiale ferromagnetico sono usati e per la stabilizzazione attiva e per le operazioni di manovra. Per i satelliti stabilizzati a spin, gli attuatori magnetici possono essere montati sia lungo l'asse di rotazione che perpendicolarmente ad esso. Le bobine disposte lungo l'asse di rotazione possono essere utilizzate solo per la ri-orientazione del satellite, in quanto la coppia di controllo che esse generano non è diretta lungo tale asse, mentre una bobina con il suo dipolo disposto nel piano di rotazione può essere utilizzata sia per la ri-orientazione che per il controllo della velocità angolare. I sistemi di controllo elettromagnetico prevedono la variazione della polarità della bobina in modo che, per interazione con il campo magnetico della Terra, si generi una coppia che permetta il raggiungimento dell'assetto desiderato.

Provvediamo, ora, a sottolineare le motivazioni che ci hanno portato a preferire, per il microsatellite SMART, un dispositivo di controllo magnetico, piuttosto che ad espulsione di massa. Ricordiamo, per inciso, che questi due dispositivi assieme alle ruote d'inerzia di reazione costituiscono le più comuni tecniche di controllo attivo dell'assetto dei satelliti.

I dispositivi ad espulsione di massa (gas jets oppure ion thrusters) sono efficienti nell'esecuzione delle manovre per l'acquisizione dell'assetto e

semplici da gestire; essi, comunque, sono costosi, sofisticati nella struttura e nell'impianto e di durata limitata dalla quantità di combustibile presente a bordo del veicolo. È da tenere presente, inoltre, che le taniche per il combustibile rappresentano un peso e un ingombro aggiuntivo per il carico del satellite nonché una notevole complicazione dal punto di vista del controllo dovuta alla fluidità del combustibile (problema dello "sloshing"). I sistemi di controllo d'assetto di questo tipo possono quindi anche essere causa di trasferimenti d'orbita indesiderati durante le manovre di riorientazione del satellite; per rendere minimo il moto traslatorio, dunque, i thrusters sono, solitamente, attivati in coppia; sono utilizzati, comunemente, sui veicoli stabilizzati a spin (in numero di almeno due) per le manovre d'assetto e per il controllo della velocità di rotazione. Di seguito si sintetizzano i vantaggi e gli svantaggi nell'uso dei diversi attuatori.

	Gas jet, thrusters	Attuatori magnetici	Ruote d'inerzia
Pro	Elevata accuratezza, permettono rapide manovre	Leggeri, privi di parti mobili, economici, poco elaborati e inesauribili.	Elevata accuratezza, inesauribili.
Contro	Esauribili, sofisticati e costosi	Poco accurati, coppia di controllo piccola	Meccanici, sofisticati e saturabili.

Entrambi i dispositivi possono, inoltre, essere utilizzati per l'operazione di desaturazione delle ruote d'inerzia, di cui è dotato il satellite. Le caratteristiche dei vari sistemi di controllo, consentono di giustificare la scelta effettuata del sistema di controllo con attuatori magnetici.

Parliamo, infatti, di un satellite della categoria dei microsatelliti con un peso di 50 Kg, per il quale requisiti come la leggerezza e l'inesauribilità sono

predominanti rispetto a tutti gli altri. Teniamo, infatti, a precisare che l'inesauribilità del dispositivo implica l'assenza di serbatoi di fluido, altrimenti necessari (gas jets e thrusters); i limiti di funzionamento sono imposti, quindi, solo dalla potenza elettrica che è possibile fornire agli attuatori magnetici.

2.2 Il campo magnetico della Terra

Le caratteristiche generali del campo magnetico della terra sono note da secoli. Nonostante ciò, uno studio sistematico può essere attribuito ai matematici tedeschi ed al fisico. Karl Gauss, nella prima parte del diciannovesimo secolo. Da quel periodo è stata accumulata una grande quantità di dati, prevalentemente forniti da missioni spaziali durante il 1960. In ogni caso questa quantità di dati è servita ad aumentare le conoscenze circa la descrizione del campo magnetico, ma non ha permesso di spiegare i fenomeni fisici che lo causano e che lo perturbano. Pertanto, in questo paragrafo saranno fornite informazioni circa la descrizione del campo e solo dove possibile sarà dato qualche accenno alle cause. Inizialmente, saranno fornite informazioni circa il campo magnetico principale, con particolare attenzione alla sua variabilità ed alle sue sorgenti. In seguito, sarà fatto qualche accenno alle perturbazioni del campo, principalmente quelle dovute al Sole. La trattazione verrà conclusa con un modello matematico del campo magnetico.

2.2.1 Il campo geomagnetico

Il campo geomagnetico può essere interpretato, con una approssimazione al primo ordine, come il campo generato da un dipolo magnetico. Nel 1975, il momento di dipolo magnetico era di $7.96 \cdot 10^{15}$ Wbm. Il polo Sud del dipolo

era nell'emisfero boreale a $\sim 78.60^\circ$ di latitudine Nord e 289.55° di longitudine Est. Esso si muove verso Ovest di circa 0.014 gradi/anno. L'intensità del campo si riduce dello 0.05% /anno.

Alcune osservazioni hanno mostrato che le sorgenti del campo sono sia al centro della Terra, sia sulla superficie e negli strati alti dell'atmosfera. La causa primaria può essere attribuita ad un sistema di correnti elettriche nell'interno fuso della Terra. Le variazioni in tali correnti sono responsabili della migrazione dei poli geomagnetici sulla superficie della Terra.

Un'altra teoria, sui moti secolari del campo geomagnetico, è che l'interno fuso ruota più lentamente del manto superficiale terrestre. I minerali ferromagnetici ed i metalli, distribuiti sulla superficie della Terra, forniscono una seconda sorgente del geomagnetismo. Questa seconda causa è responsabile di quelle anomalie magnetiche, che fanno allontanare il campo geomagnetico da quello generato da un dipolo. Infine, una terza sorgente del campo è associata con il moto delle particelle cariche negli strati alti dell'atmosfera (ionosfera). I moti di questi ioni positivi e negativi creano campi magnetici locali di diversa intensità che interferiscono con il campo principale.

Si definisce asse magnetico l'asse del dipolo immaginario che si può pensare posto al centro della Terra. Esso è inclinato rispetto all'asse di rotazione terrestre di 11.5° . Il piano ortogonale a tale asse è detto equatore magnetico. Lungo tale equatore l'intensità del campo raggiunge il valore di circa 0.3 Gauss. Essa aumenta al crescere della latitudine magnetica (distanza angolare misurata dall'equatore magnetico); in particolare, passando da 0° a 90° raddoppia.

Per quanto riguarda la direzione del campo, all'equatore geomagnetico esso è parallelo alla superficie della Terra, invece, ad una latitudine magnetica di 27° è inclinato di 45° sul piano orizzontale. Si osservi che, al crescere della quota, il campo diventa più regolare e si avvicina a quello generato da un dipolo magnetico. Il fatto che il campo magnetico ruota con la Terra è una chiara indicazione che esso è nato con la Terra.

Poiché il campo si origina all'interno della Terra, esso può essere descritto come la soluzione di un problema ai valori al contorno. A causa della natura sferica dei contorni della superficie terrestre, ha soluzione convenientemente espressa in armoniche sferiche:

$$V(r, \vartheta, \varphi) = R_T \sum_{n=1}^K \left(\frac{R_T}{r} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\Phi + h_n^m \sin m\Phi) P_n^m(\vartheta)$$

dove R_T è il raggio equatoriale terrestre (6378.4 Km); r, θ e φ sono, rispettivamente, la distanza dal centro della Terra, la coelevazione e la longitudine Est (figura 2-5); g e h sono detti coefficienti gaussiani; $P(\theta)$ sono dette funzioni di Legendre. Il termine $n=1$ è detto termine di dipolo, perché esprime il potenziale di un dipolo, quello $n=2$ di quadripolo, quello $n=3$ di ottopolo e così via.

Per usare questo modello, per il calcolo del campo in ogni punto dello spazio, occorre conoscere i coefficienti gaussiani. Un modo per calcolarli empiricamente è quello di effettuare un adattamento ai minimi quadrati dei dati del campo magnetico, usando i coefficienti come parametri. I dati sono costituiti da direzione e modulo del campo, ottenuti da una serie di osservazioni fatte anche da satellite.

Un set di coefficienti gaussiani fino al grado 8 e all'ordine 8

(rispettivamente n ed m nell'equazione) sono compresi nell'International Geomagnetic Reference Field (IGRF). Il modello include anche le derivate prime rispetto al tempo di questi coefficienti, in modo da considerare le variazioni secolari. A causa della mancanza di un'adeguata quantità di dati su un periodo di tempo sufficientemente lungo, l'accuratezza di questo, e di altri modelli, diminuisce con il tempo. Infatti, il set di dati riportati nel modello ha una validità limitata, in termini di tempo, quindi va aggiornato periodicamente. Dato che l'intensità del campo è inversamente proporzionale al cubo della distanza dal centro della Terra per il dipolo, alla quarta potenza per il quadripolo e così via. Quindi, a quote elevate, è possibile usare un grado di espansione in serie ridotto.

2.2.2 Perturbazioni del campo geomagnetico

La sorgente primaria della perturbazione del campo geomagnetico è il Sole. Quest'ultimo, costantemente emette plasma neutro, chiamato vento solare. Se consideriamo le linee del campo geomagnetico come quelle linee che in ogni punto sono tangenti al vettore campo magnetico terrestre, allora l'azione del vento solare è quella di distorcerle, soprattutto a quote elevate, cosicché il modello di multipolo del modello IGRF non è più valido a quelle quote (da 8 a 10 raggi terrestri). Siccome il plasma è altamente conduttivo, non permette al campo terrestre di penetrare, quindi, quest'ultimo viene compresso fino a che la densità di energia del plasma non uguaglia quella del campo magnetico. A questo punto, il plasma si disperde in maniera tale che le particelle cariche vengono intrappolate nel campo magnetico. Altre particelle scivolano lungo le linee del campo, provocando un allungamento di quest'ultimo, quasi a formare una coda come quella delle comete.

Quando il vento solare incontra il campo geomagnetico, si crea un'onda d'urto, poiché il vento solare si muove molto velocemente ed il campo non ha il tempo di adattarsi. Appena dietro quest'onda d'urto è una regione detta magnetosheath, essa è caratterizzata da una elevata turbolenza in termini di campo magnetico. In questa zona si hanno, infatti, brusche variazioni di intensità e di direzione del campo magnetico. Il confine tra la magnetosheath e la magnetosfera è detto magnetopause. La parte del campo magnetico terrestre che viene trascinata dal plasma è detta magnetotail. Il piano, che separa le linee del campo che vanno verso la Terra da quelle che si allontanano da essa, è chiamato neutral sheet.

Il campo geomagnetico viene monitorato continuamente da una serie di stazioni sulla Terra. Esse riportano l'attività magnetica osservata, come per esempio le tempeste magnetiche, in un indice, K, che rappresenta la deviazione del campo dal valore medio, tipico dei giorni di quiete. L'indice K è in scala logaritmica con K=0, la quiete, e K=9, il massimo disturbo che la stazione registra. I valori di K sono mediati e riportati ogni 3 ore. Questi valori per ciascuna delle 12 stazioni selezionate sono corretti in base alla latitudine della stazione e quindi mediati a fornire l'indice planetario, Kp. Questi indici sono pubblicati ogni mese sul Journal of Geophysical Research. Il valore di Kp è un buon indicatore del livello delle tempeste magnetiche e di quanto il campo si sta scostando dal modello descritto.

Il Sole è anche responsabile delle variazioni diurne del campo magnetico della Terra. La radiazione elettromagnetica solare ionizza alcuni atomi e molecole dell'atmosfera ad una quota di circa 100 Km, producendo lo strato-E della ionosfera. Il campo gravitazionale solare esercita una forza che permette a questi ioni ed elettroni di ascendere. L'interazione tra queste

particelle cariche ed il campo geomagnetico produce un complesso sistema di correnti che crea un campo magnetico locale. Questo effetto è molto pronunciato nella zona illuminata della Terra, esso causa uno scostamento dal campo magnetico interno di 20-40 nT, nelle regioni a media latitudine, e di 100-200 nT, nelle regioni all'equatore magnetico.

La Luna, anche, produce perturbazioni del campo geomagnetico, ma le variazioni dovute ad essa sono 1/30 di quelle dovute al Sole.

2.3 Basi teoriche del controllo magnetico

Gli attuatori magnetici sono costituiti da una bobina che può essere avvolta o meno attorno ad un nucleo di materiale ferromagnetico. Quando la bobina è alimentata, essa genera un momento di dipolo magnetico. Per meglio comprendere questo concetto, consideriamo un anello conduttore piano, che racchiude una certa area A , percorso da una corrente elettrica di intensità I . Si definisce momento magnetico m il vettore

$$\underline{m} = IAn$$

con \underline{n} versore normale al piano dell'anello. L'unità di misura di \underline{m} è nel SI. $A \cdot m^2$. Il verso positivo del momento magnetico è determinato con l'ausilio della regola della mano destra in base alla quale, la direzione del vettore \underline{m} è definita dalla direzione del pollice della mano destra quando le dita della stessa mano sono piegate nella direzione della corrente nella spira; ovvero il versore della normale alla spira è orientato in maniera tale che esso veda circolare la corrente in senso antiorario.

Il momento di dipolo magnetico, associato alla bobina, dipende dal

materiale racchiuso dalla stessa ed è dato da

$$\underline{d} = \mu \underline{m} = \mu_0 \mu_r \underline{m} \qquad m = N_s I A$$

dove μ è la permeabilità assoluta del materiale che costituisce il nucleo, μ_r la sua permeabilità relativa e μ_0 è la permeabilità assoluta del vuoto e vale $4\pi \times 10^{-7}$. Se il nucleo è d'aria, la permeabilità relativa è 1. L'unità di misura di \underline{d} è, dunque, Weber m.

È chiaro che per generare una richiesta intensità del vettore momento di dipolo sia necessaria una opportuna configurazione dei parametri che figurano, come la permeabilità del materiale del nucleo μ , da N e A , dove N è il numero di spire avvolte al nucleo mentre A è l'area della spira, e dall'intensità della corrente I circolante nell'avvolgimento. La scelta è dettata dai requisiti della missione ed è influenzata da considerazioni quali il peso, l'impegno di potenza e il volume richiesti dal dispositivo.

La scelta del materiale del nucleo è uno dei parametri di progetto importanti. I materiali ferromagnetici, quali il Permalloy (78% nichel, 22% ferro) e il Permendur (50% cobalto, 50% ferro), hanno una permeabilità molto alta e, quando usati come materiali per il nucleo, permettono una sostanziale riduzione dell'assorbimento di potenza così come della sezione e del volume occupato dall'attuatore. Nonostante ciò, i materiali ferromagnetici hanno una curva di magnetizzazione che satura a valori dell'intensità del campo magnetico esterno applicato relativamente bassi ed esibiscono non linearità ed isteresi. Inoltre, in tali materiali, la permeabilità è una funzione del valore dell'intensità del campo magnetico esterno applicato. Conseguentemente, quando si ha a che fare con i nuclei ferromagnetici, è difficile predire con accuratezza il momento di dipolo magnetico e, quindi,

essi sono di più difficile uso per il controllo d'assetto attivo.

La realizzazione di un dato momento di dipolo magnetico richiede che la bobina sia alimentata da una corrente di intensità costante. Il controllo della corrente è necessario per due ragioni: la resistenza degli avvolgimenti varia con la temperatura, e l'interazione con il campo magnetico esterno determina il problema della tensione indotta nell'avvolgimento.

Tornando all'aspetto prettamente analitico, il momento di dipolo magnetico, sviluppato dagli attuatori, interagisce con il campo magnetico della Terra, H_T , per generare coppie di controllo sul veicolo. La relazione vettoriale che esprime questa interazione è la seguente:

$$\underline{T}_{cm} = \underline{d} \times \underline{H}_T$$

dove T_{cm} è la coppia di controllo magnetico, la cui unità di misura è Nm. Da questa relazione si evince che la coppia che si esercita sulla spira tende ad allineare il vettore momento di dipolo magnetico, d , con la direzione del campo magnetico esterno, H_T .

Queste coppie possono essere usate per ridurre l'energia cinetica rotazionale dei satelliti all'uscita dal lanciatore (ciò può essere ottenuto con una legge di controllo del tipo "minus b-dot"), per controllare l'orientazione dell'asse di rotazione di satelliti stabilizzati a spin o per controllare satelliti stabilizzati intorno ai tre assi. Un serio inconveniente nell'utilizzazione degli attuatori magnetici è legato al fatto che le coppie generate hanno valori massimi bassi, in quanto dipendono dal campo magnetico della Terra. Il campo magnetico della Terra, infatti, è debole ed inoltre esso varia in modo inversamente proporzionale al cubo della distanza, r , dal centro della Terra.

L'intensità del campo magnetico della Terra è, infatti:

$$H_T = \frac{k}{r^3}$$

con $k = 7.96 \times 10^{15}/\mu_0$, costante magnetica della Terra. È importante dare un'idea dell'intensità delle coppie ottenibili: con un momento magnetico di ampiezza $m=20 \text{ Am}^2$, diretto perpendicolarmente al campo magnetico della Terra e ad una quota di 400 Km, la coppia ottenibile è $T_{cm} = 5.11 \times 10^{-4} \text{ Nm}$, se la bobina ha nucleo in aria. Infatti, la coppia massima vale

$$|T_{cm}|_{\max} = \frac{80\pi \cdot 10^{-7} \cdot 6.33 \cdot 10^{21}}{(6378400 + 400000)^3} N \cdot m = 5.11 \cdot 10^{-4} N \cdot m$$

Con lo stesso momento magnetico, ma ad una quota geostazionaria (circa 36000 m), la coppia ottenibile ammonterà a $T_{cm} = 2.1 \times 10^{-6} \text{ Nm}$. Poiché la condizione di perpendicolarità tra d e H_T non è mantenuta lungo l'intera orbita (per effetto della variabilità del campo magnetico terrestre), le coppie medie ottenibili con bobine con cuore in aria sono abbastanza basse. Il vantaggio di utilizzare bobine con cuore in materiale ferromagnetico ($\mu_r > 1$) sta nella possibilità di ottenere coppie amplificate di un fattore pari proprio alla permeabilità relativa del mezzo, cioè coppie tanto più elevate quanto maggiore è la permeabilità relativa del materiale considerato.

Un altro inconveniente è il seguente: un sistema di controllo che usa gli attuatori magnetici deve, generalmente, includere un magnetometro per la misura del campo magnetico della Terra; misura necessaria per l'implementazione della legge di controllo di assetto con attuatori magnetici. Ora, il campo magnetico prodotto dalla bobina potrebbe alterare la misura del magnetometro. Dunque, se considero la situazione più gravosa di tre

attuatori allineati con ciascuno dei tre assi del satellite, gli stessi dovrebbero essere montati in modo da non influenzare la misura di strumenti sensibili ai campi magnetici. Inoltre, essi andrebbero separati gli uni dagli altri al fine di evitare effetti di accoppiamento dovuti a mutua induzione .

2.4 Il controllo magnetico

In tale paragrafo vengono descritte, brevemente, le leggi di controllo utilizzate per il microsatellite SMART, allo scopo di ricavare gli input necessari alla progettazione degli attuatori.

Notiamo, a tal proposito, che per effetto del suo moto lungo l'orbita, il microsatellite SMART vede il campo magnetico terrestre variare in modulo e direzione, con una frequenza determinata principalmente dal periodo orbitale. In realtà, la variabilità delle componenti del campo di induzione magnetica terrestre nel sistema di riferimento body è da attribuirsi a diversi fattori:

- al moto orbitale del satellite con una velocità angolare $\omega=1.13 \times 10^{-3}$ rad/s, che determina una variabilità con un periodo $T=5554$ s;
- al moto di rotazione proprio della Terra, che avvenendo con una velocità angolare pari a $\Omega=7.29 \times 10^{-5}$ rad/s determina una variabilità periodica del campo con un periodo $T=86'145$ s;
- al moto rotatorio del satellite con velocità di $10^\circ/\text{s}$ intorno agli assi di pitch e di roll, per effetto della separazione dal lanciatore.

Gli attuatori magnetici rispondono ad una filosofia progettuale che vede il problema del controllo magnetico suddiviso in tre fasi principali:

- fase di acquisizione d'assetto (attitude acquisition), che inizia

al momento della separazione del satellite dal lanciatore;

- fase di "station keeping", durante la quale l'azione combinata o non delle tre ruote d'inerzia e degli attuatori magnetici, permette il controllo e il mantenimento dell'assetto del satellite;
- fase di desaturazione delle ruote d'inerzia (wheel momentum unloading).

Analizziamo nel dettaglio ciascuna di queste tre fasi.

2.4.1 Il controllo magnetico nella fase di acquisizione

Dopo la separazione dal lanciatore, deve essere realizzata l'acquisizione d'assetto per ridurre le velocità angolari iniziali del satellite. Infatti, inizialmente il microsatellite, per effetto della separazione dal lanciatore, ruoterà con una velocità di 10 grad/sec intorno agli assi di pitch e di roll. Viene utilizzata una tecnica di acquisizione d'assetto che sfrutta le coppie dovute all'interazione tra il campo magnetico prodotto da dipoli a bordo, del microsatellite, vale a dire gli attuatori magnetici, e quello della Terra.

Yaw, pitch, roll (°) 0, -90, 0

Yaw, pitch, roll (°/s) 0, 10, 10

Condizioni iniziali ai lancio, per gli assi di pitch, roll e yaw.

La tecnica di controllo ha due obiettivi:

- despin del moto rotatorio iniziale;

- eliminare il moto angolare del microsatellite rispetto al campo magnetico esterno.

Infatti, poiché l'orbita è eliosincrona, il suo piano è molto prossimo al piano di un'orbita che passa sul polo magnetico. Pertanto, può essere usato il controllo magnetico per allineare l'asse di pitch del satellite con la direzione normale al piano dell'orbita. In tal modo, per effetto del controllo, si osserverà solo una rotazione residua intorno all'asse di pitch, una volta per orbita, causata dalla variazione della direzione del campo magnetico.

Per realizzare i due obiettivi di cui sopra, sono stati usati due attuatori magnetici montati con i loro assi allineati con gli assi x e z del microsatellite. I momenti di dipolo, d , degli attuatori magnetici vengono variati usando la misura del campo magnetico terrestre, H_T , fornita dal magnetometro. L'applicazione di tale legge di controllo consente di ridurre l'energia cinetica rotazionale iniziale del satellite.

Da simulazioni numeriche risulta che, dopo un transitorio iniziale di 20 orbite, l'asse di pitch si allinea con la normale entro 30° , e la dinamica d'assetto è caratterizzata da rotazioni di roll e yaw di ampiezza massima 20° e da una rotazione intorno all'asse di pitch una volta per orbita.

La fase di acquisizione termina con il dispiegamento di un "boom" rigido per la stabilizzazione del satellite a gradiente di gravità. Il risultato del dispiegamento impulsivo è che gli angoli di pitch e roll esibiscono ampiezze comprese tra i $+15^\circ$ e i -15° .

2.4.2 Il controllo magnetico nella nella fase di “station keeping”

La tecnica adottata è innovativa nel senso che prevede la coppia di controllo ridistribuita con continuità tra le ruote d'inerzia e gli attuatori magnetici al fine di rendere minimo l'assorbimento di potenza elettrica durante il controllo d'assetto. In particolare, visto che il progetto delle ruote d'inerzia è stato già ottimizzato rispetto alla massa e al consumo di potenza, tale tecnica è usata, principalmente, per ottimizzare il progetto dell'attuatore magnetico. Per raggiungere questo scopo, la coppia richiesta per il controllo d'assetto è valutata, dapprima, usando leggi di controllo Proporzionale-Derivativo (PD) e la teoria del controllo ottimo. La coppia di controllo è, poi, ridistribuita con continuità tra le ruote e gli attuatori, lungo l'orbita, così che il consumo di potenza sia minimo.

2.4.3 Il controllo magnetico nella fase di desaturazione delle ruote d'inerzia

Una ruota d'inerzia di reazione (o reaction wheel) è progettata per operare con momento angolare nominale nullo. Per questo motivo, le ruote d'inerzia di reazione sono utilizzate, principalmente, per assorbire coppie cicliche e per immagazzinare, temporaneamente, le variazioni del momento angolare del satellite. Le coppie di disturbo secolari saturano la capacità di immagazzinamento di momento angolare da parte della ruote. L'uso delle ruote per il controllo d'assetto pone, dunque, il problema della rimozione di momento angolare che si ha quando si raggiunge il livello di saturazione delle ruote. La desaturazione delle ruote d'inerzia è, generalmente, realizzata mediante coppie esterne prodotte da gas jets oppure da attuatori magnetici. Abbiamo già dato una giustificazione della motivazione che ci ha condotto a

preferire i secondi rispetto ai primi. Nonostante ciò, considerando che il modulo e la direzione del campo magnetico terrestre variano lungo l'orbita, i sistemi di controllo magnetico hanno costanti di tempo molto elevate. Inoltre, l'efficienza del controllo magnetico dipende fortemente dall'inclinazione e dalla quota dell'orbita. Per questo motivo, è necessario analizzare attentamente le condizioni per la desaturazione delle ruote con sistemi magnetici.

Diamo, ora, un'idea della tecnica di controllo usata per SMART che permette di operare, contemporaneamente, la desaturazione delle ruote e garantire l'accuratezza del controllo d'assetto richiesto. Il vettore della coppia di controllo richiesta, T_c , è calcolato usando una legge di controllo di tipo Proporzionale-Derivativo, come segue:

$$\underline{T}_c = -\dot{\underline{h}}_w = -G\underline{x}$$

dove $\dot{\underline{h}}_w$ è la derivata temporale del vettore momento angolare della ruota, G è la matrice dei guadagni di dimensione (3x6) e \underline{x} è il vettore di stato del sistema, le cui componenti sono gli angoli d'assetto e le rispettive derivate:

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta & \gamma & \dot{\alpha} & \dot{\beta} & \dot{\gamma} \end{bmatrix}$$

La matrice dei guadagni del controllo, G , è ricavata usando la Teoria del Controllo Ottimo.

Al fine di mantenere l'accuratezza desiderata del controllo anche durante la fase di desaturazione delle ruote, la tecnica di controllo sviluppata permette di realizzare, contemporaneamente, la desaturazione delle ruote e il

controllo d'assetto del satellite. A questo scopo, deve essere verificata la seguente condizione:

$$\underline{T}_{cm} + \underline{T}_{cw} = \underline{T}_c$$

Quest'ultima equazione stabilisce che la somma vettoriale del vettore coppia di controllo magnetico, e del vettore coppia di controllo della ruota, deve essere uguale al vettore coppia di controllo richiesto. Va sottolineato che, affinché si realizzi la desaturazione di una ruota, i vettori coppia di controllo e momento angolare della ruota devono trovarsi nello stesso ottante dello spazio tridimensionale.

Il vettore coppia di controllo magnetico è definito dalla relazione,

$$\underline{T}_{cm} = \underline{d} \cdot \underline{H}_T$$

Sostituendo risulta:

$$\underline{T}_c \cdot \hat{B}_T = \underline{T}_{cw} \cdot \hat{B}_T$$

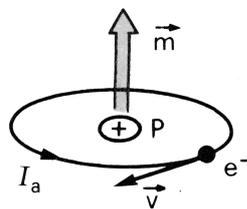
Quest'ultima equazione stabilisce che, per avere, simultaneamente, la desaturazione delle ruote e il controllo d'assetto del satellite, deve essere rispettata la seguente condizione: il vettore coppia di controllo richiesto e il vettore coppia di controllo della ruota devono avere la stessa componente nella direzione del campo magnetico.

3. MAGNETISMO NELLA MATERIA

3.1 Considerazioni introduttive generali

Quando della materia viene posta in una regione di spazio in cui sia presente un campo magnetico, essa ne subisce un'azione meccanica e contemporaneamente modifica il campo stesso. Quando si analizza il comportamento di materia in campo magnetico, emergono immediatamente delle differenziazioni che permettono di individuare tre famiglie di sostanze. Supponiamo, per esempio, di inserire parzialmente in un solenoide percorso da corrente dei campioni cilindrici di materiali diversi. Alcune sostanze (come ferro, cobalto, nichel, ecc.) vengono attratte con una forza molto intensa (dell'ordine della forza peso o più) verso l'interno del solenoide: queste sostanze vengono dette ferromagnetiche. Altre sostanze, risucchiate anch'esse

verso l'interno del solenoide, sono però attratte da una forza di molti ordini di grandezza inferiore rispetto al caso di sostanze ferromagnetiche: queste sostanze sono dette paramagnetiche (alluminio, platino, cromo, ecc.). Altre sostanze infine (cloruro di sodio, rame, piombo, zolfo, carbonio, argento, ecc.), soggette a forze dello stesso ordine di grandezza rispetto alle sostanze paramagnetiche, sono però respinte anziché attratte: queste sostanze sono dette diamagnetiche. L'interpretazione teorica dei fenomeni di magnetismo nella materia si basa sul notevole teorema di equivalenza di Ampere (1820) secondo cui, a grande distanza, una spira percorsa da corrente si comporta come un dipolo magnetico. Gli elettroni, che nel modello planetario dell'atomo orbitano intorno al nucleo, sono assimilabili in sostanza a spire microscopiche percorse da corrente (correnti microscopiche); e dunque ognuno di essi equivale a un dipolo magnetico.



In assenza di campo magnetico locale internamente alla materia, tutti questi dipoli microscopici sono orientati casualmente: il loro risultante, eseguito su un volumetto qualunque di materiale, è pertanto nullo, e il materiale non genera alcun effetto magnetico macroscopico. In presenza però di un campo magnetico locale nella materia, si generano dei fenomeni di polarizzazione: innanzitutto per orientamento, ma, come vedremo, anche a causa di fenomeni diversi. Il momento magnetico risultante di ogni porzione di materiale allora non è più nullo, e si presentano pertanto sia delle alterazioni

del campo magnetico esterno che delle azioni meccaniche sul materiale da parte del campo esterno stesso.

Formalmente, la presenza della materia introduce nelle equazioni della magnetostatica solo una modifica assai semplice rispetto al caso del vuoto. Tutto va come se si trattasse ancora di spazio vuoto con correnti di conduzione e con tanti circuiti microscopici di natura atomica, cioè accanto alla densità di corrente macroscopica \underline{J} compare anche la densità \underline{J}_m delle correnti microscopiche atomiche. In presenza di materia, le equazioni della magnetostatica divengono pertanto:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \underline{B} &= 0 \\ \nabla \times \underline{B} &= \mu_0 (\underline{J} + \underline{J}_m)\end{aligned}$$

La difficoltà sta nel fatto che mentre la densità \underline{J} delle correnti macroscopiche è di solito nota, lo stesso non si può dire della corrente microscopica \underline{J}_m cosicché queste equazioni non sono di grande utilità pratica.

Per poter risolvere tali equazioni, è dunque necessario trovare una relazione che leghi \underline{J}_m (opportunamente mediata, nel tempo e nello spazio, in modo da renderla congruente con la risoluzione temporale e spaziale degli strumenti di misura impiegati) a una grandezza macroscopica misurabile e dunque direttamente o indirettamente nota. Il mezzo che si introduce a tale scopo è il vettore polarizzazione magnetica \underline{M} e determineremo la relazione che lega \underline{M} a \underline{J}_m . Qualora la polarizzazione magnetica \underline{M} (oltre alla corrente macroscopica \underline{J}) sia esplicitamente nota, tali equazioni consentono, date le condizioni al contorno, di determinare il campo di induzione magnetica \underline{B} .

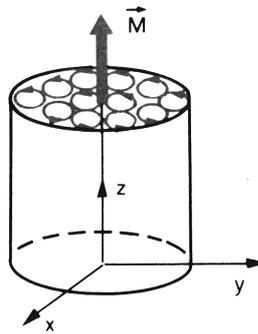
3.2 Magnetizzazione e sue relazioni con le correnti microscopiche

La materia in campo magnetico può essere pensata come un insieme di atomi o molecole dotati di momento magnetico complessivo non nullo. Ciò equivale a pensare all'esistenza, nella materia, di correnti atomiche microscopiche. Definiamo ora il vettore intensità di magnetizzazione o di polarizzazione magnetica M , esso è definito dalla relazione:

$$\underline{M} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{\Delta N} \underline{m}_i}{\Delta v} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta v} \underline{m}$$

dove Δv è un volumetto di materiale, ΔN il numero di dipoli magnetici microscopici in esso contenuti, \underline{m}_i , il valore (vettoriale) di tali momenti microscopici, ed \underline{m} il loro valor medio (vettoriale). M rappresenta, come si vede dalla sua definizione, il momento di dipolo magnetico posseduto dal materiale per unità di volume. Nel sistema S.I., M si misura in Ampere su metro (A/m).

Per vedere come M è legato alle correnti atomiche microscopiche, cominciamo col fare alcuni ragionamenti qualitativi riferendoci per semplicità al caso in cui il materiale in esame abbia forma cilindrica, e sia polarizzato lungo l'asse del cilindro stesso (M parallelo all'asse d del cilindro coincidente con l'asse z).



Ricordiamo che M rappresenta il momento di dipolo magnetico per unità di volume posseduto dal materiale; e che tale momento è il risultante dei momenti di dipoli atomici, assimilabili a microscopiche spire percorse da corrente cui si aggiungono i momenti di spin. In assenza di magnetizzazione, tali spire sono orientate in maniera del tutto casuale; ma quando M è diverso da zero, esse sono prevalentemente orientate col loro piano nella giacitura ortogonale ad M .

Supponiamo prima che M sia indipendente dalla posizione. Ci si rende conto immediatamente, allora, che internamente al materiale il valor medio delle correnti microscopiche è nullo: per esempio, su ogni piano ortogonale all'asse z , in ogni punto P si ha infatti, in media, perfetta compensazione fra le correnti dei dipoli che si trovano disposti simmetricamente rispetto a P . Si ha una corrente macroscopica media diversa da zero solo sulla superficie laterale del cilindro, dove la magnetizzazione subisce una discontinuità passando bruscamente dal valore M che essa ha internamente al materiale, al valore zero che essa ha esternamente. Tale corrente (attiva su una superficie, anziché su un volume) è convenientemente descritta da un vettore densità J_{ms} .

Se invece M non è uniforme internamente al materiale (cosicché la densità dei dipoli microscopici orientati vari lungo una direzione) allora anche internamente al materiale non vi è più compensazione fra le correnti fornite dai diversi dipoli. Internamente al materiale si ha una corrente microscopica J_{mv} mediamente diversa da zero, che somma il suo contributo a quello della densità di corrente superficiale J_{ms} .

Le equazioni che reggono il problema diventano:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \underline{B} &= 0 \\ \nabla \times \underline{B} &= \mu_0(\underline{J} + \nabla \times \underline{M})\end{aligned}$$

$$\nabla \times \left(\frac{\underline{B} - \mu_0 \underline{M}}{\mu_0} \right) = \underline{J} \Rightarrow \underline{H} = \frac{\underline{B} - \mu_0 \underline{M}}{\mu_0}$$

con $B = \mu H = \mu_0 \mu_r H$.

3.3 Proprietà macroscopiche dei materiali ferromagnetici

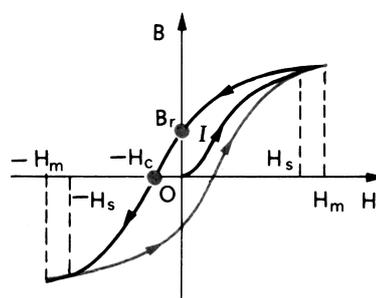
La fenomenologia dei processi di magnetizzazione dei materiali ferromagnetici è estremamente complessa e varia. Le relazioni che intercorrono fra B ed H e fra M ed H ($B=B(H)$; $M=M(H)$) non solo non sono lineari (come accade nei materiali dia- e paramagnetici) ma, come vedremo fra poco, non sono nemmeno univoche.

Per conseguenza, la relativa trattazione teorica è piuttosto complicata. Nella pratica, si è spesso costretti a ricorrere a metodi approssimati come il modello di Preisach, la cui validità e i cui limiti di applicabilità sono talvolta dubbi, tanto che è sempre consigliabile ricorrere alla verifica sperimentale a posteriori. Le proprietà magnetiche dei materiali ferromagnetici sono inoltre

dipendenti in misura critica dalle caratteristiche chimico-fisiche dei materiali: basta spesso variare di alcune parti per cento il contenuto di particolari impurità per cambiare radicalmente le proprietà di un materiale. Per conseguenza, è enorme la varietà dei materiali ferromagnetici; e ciò, mentre da un lato rende la fenomenologia assai varia, consente d'altro lato di produrre materiali con le proprietà più adatte ad ogni singola applicazione.

Effettuando misure su un materiale isotropo per il quale sia inizialmente $M=0$ (e dunque per il quale $B=0$ se $H=0$) si riscontra che B ed M assumono la stessa direzione (anche se non sempre lo stesso verso, come vedremo fra poco) rispetto ad H ; cosicché le relazioni $B(H)$ e $M(H)$ possono essere espresse in forma scalare, $B(H)$ ed $M(H)$, dove B , M ed H rappresentano le proiezioni di B , M ed H nella direzione di H , positivo nel verso inizialmente assunto da H stesso.

Qualitativamente, i risultati che si ottengono per la curva $B = B(H)$ hanno le seguenti caratteristiche. Inizialmente, B aumenta all'aumentare di H , seguendo un andamento del tipo della curva I mostrata in figura (curva di prima magnetizzazione).

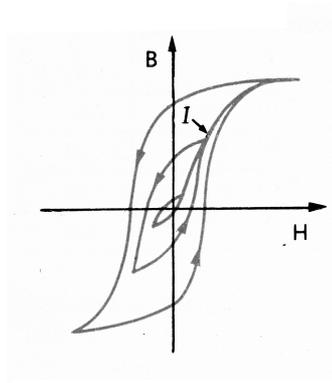


Da un certo valore massimo H_m in poi, B prende ad aumentare solo pro-

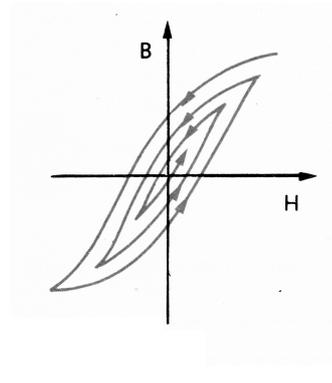
porzionalmente ad H : ciò significa che per $H = H_m$ la intensità di magnetizzazione M raggiunge praticamente il suo valore massimo asintotico (Magnetizzazione di saturazione). Facendo ora diminuire H , fino a che H si mantiene superiore a un certo valore, la curva $B(H)$ segue la stessa curva I che aveva seguito all'andata; ma per $H < H_m$, B si mantiene sempre al di sopra di tale curva. Per $H=0$, si ha $B=B_r > 0$. Il valore di M corrispondente è detto magnetizzazione residua.

Invertendo ora il segno di H , all'aumentare del suo valore assoluto, B (e dunque anche M) comincia a decrescere; per $H=-H_c$ si ha $B=0$. H_c è detto campo magnetico di coercizione. Osserviamo che in corrispondenza di H_c è $M=0$. Per $H < -H_c$, anche B diventa negativo. La curva completa è detta curva di isteresi. Facendo variare, con regolarità e continuità, H fra $-H_m$ e $+H_m$ la curva di isteresi si assesta su una forma ciclica piuttosto ben riproducibile detta ciclo di isteresi.

E evidente che per un materiale ferromagnetico, la permeabilità magnetica $\mu=B/H$ non solo non è costante (non è indipendente da H), ma non è nemmeno univocamente definita. Fissato H , μ dipende infatti anche dalla "storia" del materiale. Se anziché far variare H fra $\pm H_m$ lo si fa variare entro un intervallo più ristretto (e sempre simmetrico rispetto a zero: $-H_0 < H < +H_0$, con $H_0 < H_m$), si ottengono dei cicli più piccoli, sempre simmetrici rispetto all'origine, i cui vertici giacciono su una curva che ha un andamento prossimo alla curva di prima magnetizzazione.



Se si compiono con continuità dei cicli di ampiezza via via decrescente, la funzione $B(H)$ ha un andamento del tipo mostrato nella figura; essa va così convergendo progressivamente verso l'origine.



È questo un artificio spesso usato nella pratica per "smagnetizzare" un materiale: per riportarlo cioè, dopo averlo magnetizzato, nelle condizioni iniziali in cui era $B=0$ ed $M=0$ in corrispondenza di $H=0$. Naturalmente, è anche possibile far compiere al materiale dei cicli non simmetrici: una volta portato il materiale, attraverso i processi fin qui descritti, in una certa posizione H, B .

Da tutto quanto fin qui detto risulta chiaramente che fissato un certo valore di H applicato al materiale, il corrispondente valore di B non è univocamente determinato. Esso dipende infatti dalla "storia magnetica" del materiale: dal fatto che ci troviamo lungo la curva di prima magnetizzazione,

o sul ciclo di isteresi (e in questo caso, va specificato su quale "ramo"), o su un ciclo di ampiezza minore (simmetrico o no). Per descrivere le proprietà del materiale occorre fornire l'intera curva $B=B(H)$ (ed anzi tutte le varie curve summenzionate). In pratica, ci si limita spesso a fornire il grafico del ciclo di isteresi di saturazione (cioè relativo a $-H_m < H < +H_m$).

In molte applicazioni, la scelta dei materiali può essere fatta, almeno in prima istanza, in base alla conoscenza di un numero limitato di parametri: sono reperibili in letteratura delle tabelle che forniscono i parametri fondamentali per molti materiali. Ad esempio, si possono trovare tabulati per alcuni materiali speciali, oltre alla composizione, i seguenti dati: permeabilità differenziale relativa iniziale, permeabilità differenziale relativa massima (cioè nel punto di massima pendenza della curva $B=B(H)$), il campo magnetico di coercizione H_c , la magnetizzazione di saturazione l'area del ciclo di isteresi. Tuttavia per la nostra applicazione, la conoscenza di tali parametri è insufficiente. Infatti, l'applicazione considerata richiede la conoscenza di μ_r e quindi della storia magnetica del materiale. È necessario allora introdurre un modello per conoscere il valore di tale parametro in funzione del campo applicato nel tempo.

4. MODELLO DI PREISACH

4.1 Introduzione

Il processo di magnetizzazione consiste nell'applicazione al corpo di un campo magnetico variabile nel tempo $H(t)$. Diversi elementi caratterizzanti l'andamento di $H(t)$ influenzano la risposta del sistema. Fondamentalmente, le variazioni del campo magnetico producono delle variazioni del profilo di energia del corpo, come funzione spaziale, le quali a loro volta determinano il comportamento del sistema.

Il sistema tenderà a portarsi in una configurazione di energia minima. Nel caso in cui esista uno stato stabile, prossimo all'attuale di energia minore, questo potrà essere raggiunto se si verificheranno delle particolari condizioni.

La fenomenologia è sostanzialmente di tipo statistico e come descritto più avanti, consiste nel cosiddetto effetto Barkhausen. Tale effetto è l'interpretazione sperimentale del fenomeno del passaggio di stato che, nella fattispecie, consiste nella riorientazione del vettore dipolo magnetico elementare di un elemento del dominio del corpo. La magnetizzazione intesa come processo, va quindi vista come costituita da una successione di salti di Barkhausen.

I termini di energia che sono coinvolti nel fenomeno in esame sono l'energia libera ΔF che l'elemento possiede e l'energia dissipata in calore ΔE durante il salto. Come norma fisica è noto che per allontanare un sistema da una configurazione di equilibrio è necessario compiere del lavoro, così come un sistema che si porta in una configurazione di energia minore, libera in qualche modo l'energia superflua. Ebbene è quest'ultima l'energia dissipata durante un salto di Barkhausen.

Caratterizziamo le unità magnetiche del materiale con un determinato profilo di energia determinato dall'energia libera ΔF e dalla barriera energetica ΔE . Nel modello di Preisach, facciamo l'ipotesi che sotto determinate condizioni di campo agente e di stato di magnetizzazione, esista una determinata distribuzione di probabilità che vi siano nel corpo un certo numero di elementi che sia caratterizzato dai due livelli energetici ΔF , ΔE e che questa distribuzione sia nota a priori.

Questa distribuzione di probabilità può essere vista come derivata direttamente dalle equazioni di Brown quando la presenza di un disordine strutturale fornisce un insieme statisticamente ricco di stati metastabili attraverso i quali il sistema evolve durante il processo di magnetizzazione.

L'idea di Preisach fu quella di descrivere graficamente il problema generale dell'isteresi come la sovrapposizione di tante unità bi-stabili opportunamente collocate secondo la distribuzione suddetta nel cosiddetto piano di Preisach, permettendo, come più avanti sarà mostrato, di sviluppare una teoria pratica atta a simulare il fenomeno della magnetizzazione di un nucleo ferromagnetico.

Va qui precisato che la modellizzazione della distribuzione di probabilità di Preisach a priori, costituisce in se stessa una forzatura alla realtà delle cose che rende il modello utilizzabile come uno strumento di pura approssimazione ad una realtà fisica che tiene conto di ben altri elementi qui trascurati quali possono essere le imperfezioni strutturali, le condizioni di temperatura di funzionamento derivanti o meno dalle dissipazioni interne ecc.

4.2 Magnetizzazione

L'aspetto fondamentale del fenomeno della magnetizzazione consiste nel fatto che il campo magnetico applicato e il valore di magnetizzazione ottenuto, da soli, non bastano a descrivere completamente lo stato magnetico del materiale. Questa conclusione è ovvia se si considera il fatto che la magnetizzazione è definita come una media dei valori locali. Quindi una parte notevole dello stato completo del materiale viene persa proprio in questa operazione di media.

Osservando il fenomeno in una scala magnetica (oggetti domini magnetici di Weiss), lo stato del sistema sarà definito dalla struttura dei domini laddove più configurazioni sono possibili per medesimi valori di campo applicato e magnetizzazione. La causa di ciò consiste nel fatto che nel materiale ci sono

disordini strutturali, presenza dei grani nelle strutture poli-cristalline, dislocazioni e deformazioni reticolari, variazioni di composizione, separazioni di fasi, presenza di precipitati e tante altre imperfezioni. Tutte queste sorgenti di disordine, interagiscono con la magnetizzazione e contribuiscono a delineare un profilo di energia, in cui il sistema evolve, notevolmente complesso, con un numero molto alto di minimi locali e punti di sella. Ciascuna configurazione dei domini corrisponde ad un profilo di energia e in particolare ad un particolare minimo.

Se la temperatura è sufficientemente bassa e le barriere energetiche separanti i vari minimi sono abbastanza alte, lo stato del sistema rimarrà quello iniziale indefinitamente.

Nel momento in cui variamo il campo esterno, l'energia accoppiata alla magnetizzazione $-\mu_0MH$ cambia e con essa l'energia del sistema. In questo modo, qualunque situazione di equilibrio può, prima o poi, essere abbandonata. Ciò avviene nel momento in cui un punto di minimo del profilo di energia, diventa un punto di sella, di conseguenza la struttura dei domini diventa instabile e il sistema si porta spontaneamente in un altro stato stabile. Questo processo di riordinamento può tanto essere fortemente localizzato quanto può coinvolgere interi domini in parti consistenti del provino. Questo fenomeno va sotto il nome di Effetto Barkhausen.

4.3 Isteresi magnetica

L'isteresi è il cuore del funzionamento dei materiali magnetici. Ogni applicazione, dai motori elettrici ai trasformatori ai magneti permanenti, da dispositivi elettronici alla registrazione magnetica, hanno sostanziali

problematiche legate all'isteresi dei materiali.

La varietà delle condizioni di funzionamento coinvolte, mette in evidenza la ricchezza di fenomeni che possono nascere e condizionare il comportamento di differenti materiali.

La comprensione del meccanismo fisico responsabile di tale fenomeno e lo sviluppo di adeguati strumenti matematici capaci di modellarlo, sono stati oggetti di studio di fisici teorici e matematici per anni. È un esempio notevole di problema fisico-matematico di intricata complessità e allo stesso tempo il punto di partenza per un forte sviluppo tecnologico.

4.3.1 Cicli d'isteresi

Il ciclo di isteresi di un materiale è inteso come la funzione di trasferimento che mette in relazione la grandezza di input campo magnetico $H(t)$ con quella di output magnetizzazione $M(H)$. La relazione che lega queste due grandezze è estremamente complessa data la fenomenologia che essa rappresenta ed è caratterizzata, oltre che da non linearità, dal fatto che non è neanche univoca, nel senso che la relazione fra queste due grandezze dipende, talvolta fortemente, dalla "storia" che caratterizza quello che chiameremo, stato del sistema. Il campo magnetico H e la magnetizzazione M sono misurati in Ampere per metro [Am^{-1}], mentre il campo induzione magnetica e la polarizzazione magnetica $I = \mu_0 M$ sono misurati in Tesla [T]. μ_0 rappresenta la permeabilità del vuoto.

4.3.2 Domini magnetici (di Weiss)

I cicli d'isteresi possono assumere una varietà di forme estremamente ampia ed è interessante cercare di capire quali sono i meccanismi fisici di base che governano questa fenomenologia.

Una visione semplificata del problema può essere quella di considerare il materiale magnetico come un'insieme di momenti magnetici permanenti m_i di origine quantistico-meccanica cioè atomica. La situazione più semplice che si può immaginare è quella di un paramagnete ideale. Questo è un materiale in cui i momenti magnetici elementari non interagiscono fra loro, ma sono mossi indipendentemente dall'agitazione termica. Di conseguenza, essi si orientano casualmente nello spazio fornendo una magnetizzazione media netta pari a zero in qualunque pezzo macroscopico del materiale. Per ottenere una magnetizzazione diversa da zero, sarà necessario indurla applicando un campo magnetico esterno H . L'energia potenziale di ogni singolo momento magnetico vale $-\mu_0 m_i H$. Questa energia favorisce l'allineamento dei momenti lungo la direzione del campo magnetico. Di converso, l'agitazione termica tende a distruggere qualunque tipo di ordine si instauri nella struttura.

Per raggiungere un apprezzabile valore di magnetizzazione netta, bisogna applicare un campo la cui energia sia almeno comparabile in termini di intensità con l'energia termica, e cioè $\mu_0 \mu_B H \approx k_B T$.

Nel 1907, Weiss espose una teoria secondo la quale i materiali ferromagnetici, possono fornire un forte valore di magnetizzazione anche a bassi valori del campo magnetico applicato a causa del fatto che i momenti magnetici elementari non sono indipendenti come nel caso dei dia- e paramagnetici, ma sono fortemente legati da un campo interno H_w ,

denominato campo molecolare, proporzionale alla magnetizzazione stessa. Il campo molecolare produce un effetto di retroazione positiva dato che la presenza di una magnetizzazione netta diversa da zero in un punto del corpo, produce un campo H_w diverso da zero il quale a sua volta tende ad allineare i momenti magnetici intorno a se lungo la sua stessa direzione. Il risultato è che al di sotto di una determinata temperatura detta T_c (Temperatura di Curie), i momenti magnetici, spontaneamente tendono ad ordinarsi e il materiale subisce una "magnetizzazione spontanea" M_s .

L'introduzione del campo molecolare spiega la dipendenza dalla temperatura del fenomeno della magnetizzazione spontanea, ma fornisce altre difficoltà concettuali e cioè il fatto che non si spiegherebbe a questo punto il perché dell'intera fenomenologia dell'isteresi, visto che ci aspetteremmo sempre una magnetizzazione spontanea.

Weiss affrontò questa difficoltà ipotizzando l'esistenza di regioni all'interno del corpo dette Domini Magnetici (domini di Weiss). In ciascun dominio, il grado di allineamento dei momenti magnetici dipende dal campo molecolare, ma la direzione di magnetizzazione spontanea, può differire da un dominio all'altro sicché mediando il valore della magnetizzazione su un volume largo abbastanza da contenere un grande numero di domini di Weiss, si ottiene un valore di magnetizzazione media che può variare dal valore zero al valore massimo di magnetizzazione spontanea.

La varietà dei cicli di isteresi che si possono incontrare è quindi la diretta conseguenza del fatto che esiste un'altrettanto grande varietà di strutture caratterizzanti i domini magnetici dei materiali. Svariati fattori contribuiscono a caratterizzare un dominio magnetico, fra questi: Energia di Scambio (legata al campo molecolare); Anisotropia Microcristallina, che permette

l'allineamento dei momenti magnetici in alcune direzioni preferenziali; Energia Magnetostatica che tende a produrre un momento magnetico netto nullo.

Oltre a questi fenomeni interni, la magnetizzazione è legata al campo magnetico esterno dall'energia $-\mu_0MH$ che è maggiore per domini con magnetizzazione allineata col campo. Quando H varia nel tempo, il bilancio d'energia varia e avviene la ridisposizione dei domini. I domini la cui magnetizzazione si trova già più o meno allineata con il campo magnetico, sono favoriti dal punto di vista energetico e tendono ad espandersi prelevando elementi dai domini circostanti, i quali rimpiccioliscono fino a sparire.

Per grandi valori del campo magnetico, si provoca una situazione nella quale esiste praticamente un solo grande dominio all'interno del provino. Questa situazione è tale che la magnetizzazione diventa prossima al valore di magnetizzazione spontaneo.

Nel momento in cui il campo applicato si inverte, si formano nuovi domini magnetizzati inversamente i quali crescono progressivamente fino alla saturazione.

4.3.3 Proprietà dei cicli d'isteresi

I cicli d'isteresi possono presentarsi sotto le più svariate forme, ed è importante conoscere alcuni parametri che li caratterizzano. Quattro sono i parametri di estrema rilevanza in questo senso, e sono il Campo e la Magnetizzazione di Saturazione, la Magnetizzazione Residua e il Campo Coercitivo.

Campo e Magnetizzazione di Saturazione, rappresentano il valore del campo magnetico da applicare per magnetizzare completamente il provino e il valore di magnetizzazione ad esso corrispondente. Queste grandezze sono dette di saturazione perché i fenomeni caratterizzanti l'isteresi non avvengono più quando il campo applicato supera questo valore dato che il provino è ormai già completamente magnetizzato.

Magnetizzazione Residua. Essa rappresenta la magnetizzazione che possiede il corpo dopo che sia stato rimosso un campo magnetico precedentemente applicato sul provino vergine (demagnetizzato). Questa grandezza è rappresentativa del fatto che un materiale può essere magnetizzato spontaneamente, senza la necessità di un campo esterno applicato. L'ordine di tale grandezza è pari a quello della magnetizzazione di saturazione ma può diminuire parecchio in funzione di caratteristiche geometrico-strutturali.

Campo Coercitivo. È il campo che è necessario applicare al provino affinché il suo valore della magnetizzazione media risulti nullo partendo da una condizione di magnetizzazione residua. Il risultato dell'applicazione di tale campo, diversamente da come intuitivamente si può pensare, non è quello di demagnetizzare il provino, ma di generare al suo interno delle zone "contro-magnetizzate" tali che il bilancio netto della magnetizzazione dia un valore zero.

4.4 Salti di Barkhausen

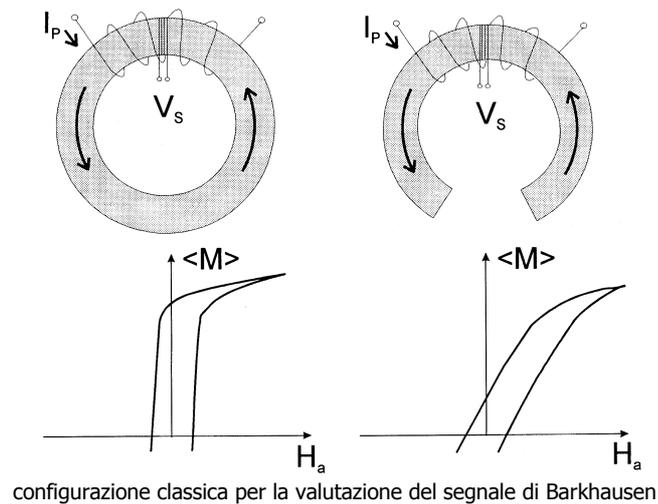
Lo stato di magnetizzazione di un nucleo ferromagnetico non può essere completamente descritto dal campo magnetico e dal valore della

magnetizzazione, in quanto quest'ultima può essere vista come un effetto mediato dei singoli contributi dati da ciascun elemento del nucleo. Molte informazioni, vengono tralasciate all'atto della mediazione dei vari contributi. In un dominio dimensionale di scala magnetica, lo stato è definito dalla struttura del dominio, nel quale, il disordine, dipende dalla presenza di grani nei poli-cristalli, dislocazioni e deformazioni del reticolo, variazioni della composizione, presenza di inquinanti, separazioni di fase, rugosità superficiale e altro. L'effetto di tutto ciò è un profilo di energia estremamente complicato con moltissimi minimi locali e punti di sella che rispecchiano la presenza del disordine strutturale. Ciascuna configurazione strutturale dei domini corrisponde ad un ben preciso stato legato ad uno dei minimi della funzione di energia. Se la temperatura è abbastanza bassa, e le barriere fra i minimi sono sufficientemente alte, il sistema rimarrà indefinitamente nello stesso stato iniziale. In ogni caso, ciò non risulta se si fa variare il campo magnetico nel tempo.

La magnetizzazione è accoppiata con il campo esterno dall'energia $-\mu_0MH$ che varia al variare del campo esterno H . La stabilità di ciascuno stato viene "rimossa" prima o poi al variare del campo agente H modificando il profilo della funzione di energia che trasforma un punto di minimo in un punto di sella, conducendo il sistema ad evolvere spontaneamente verso un altro stato.

Questa ridisposizione può essere localizzata in una porzione ben limitata del corpo passando da uno stato stabile ad un altro stato prossimo e stabile o può coinvolgere intere parti cospicue del corpo come può succedere ad esempio quando si nucleano nuovi domini di magnetizzazione inversa.

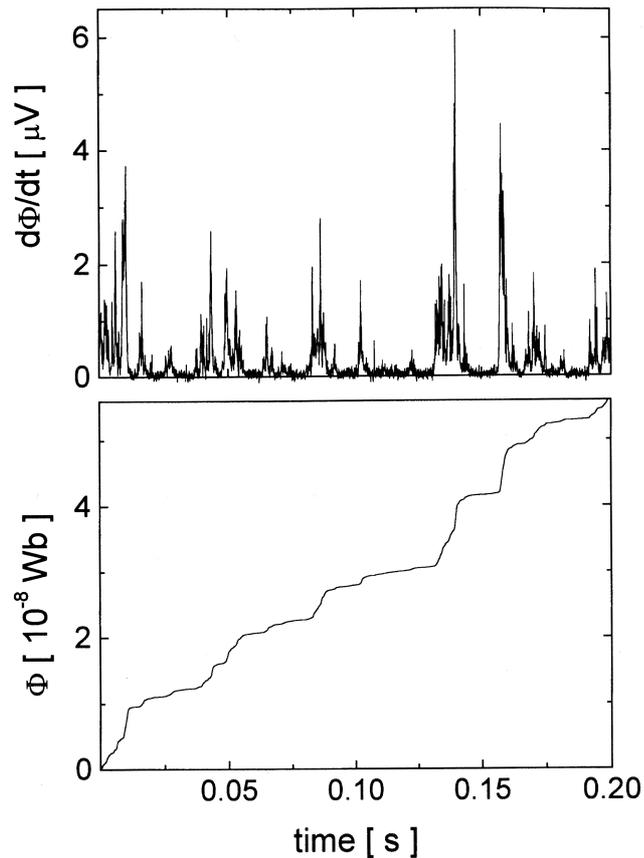
L'effetto di Barkhausen è chiaramente evidente quando si guarda alla struttura dettagliata della tensione indotta nell'avvolgimento secondario rappresentato in figura.



Quando il campo applicato varia lentamente, la tensione indotta appare avere un andamento come quello mostrato nella prossima figura. Si vede una sequenza casuale di picchi, denominati solitamente salti di Barkhausen. Il carattere stocastico del segnale, riflette la complessità del dominio e il disordine strutturale.

La tensione indotta fornisce l'andamento nel tempo di dM/dt . Supponiamo che la misura sia realizzata applicando un determinato andamento del campo dH/dt , allora il segnale di Barkhausen sarà proporzionale alla suscettività dM/dh lungo il ramo di curva di magnetizzazione che stiamo percorrendo nel punto in cui stiamo transitando.

L'integrazione nel tempo del segnale di Barkhausen, ci fornirà la struttura della curva di magnetizzazione $M(H)$. Il carattere intermittente del segnale di Barkhausen si trasforma nell'andamento a scalinata rappresentato in figura.



in alto: segnale di Barkhausen prelevato da un avvolgimento secondario sul nucleo magnetizzato
 in basso: integrale del segnale di Barkhausen (Forma a scalinata)

Le zone pressoché orizzontali, corrispondono a zone in cui la struttura del dominio è omogenea e le sollecitazioni magnetiche causano un accumulo di energia, quelle verticali, viceversa, corrispondono a punti dove la configurazione del dominio diventa instabile e quindi "salta" in un altro stato.

È da osservare che oltre al fatto che a ciascun valore del campo magnetico e della magnetizzazione possono essere associati più stati stabili, più stati completamente diversi dal punto di vista strutturale possono risultare equivalenti da un punto di vista statistico nelle loro proprietà medie. Quando diciamo cioè che lo stato del corpo è associato ad una determinata struttura del dominio, dovremmo più precisamente specificare che lo stato è associato

ad un insieme statistico delle strutture del dominio.

4.5 Unità bi-stabili di Preisach

Nel modello di Preisach, si effettua la notevole semplificazione di adottare come profilo di energia di un elemento, il semplice profilo di energia che è rappresentato in fig.1. esso offre una chiara rappresentazione dell'instabilità di Barkhausen.

L'equivalente del momento magnetico elementare nei domini magnetici del materiale va identificata nel modello con l'unità di Preisach che è assunta essere descritta da tale profilo energetico. Tale unità va identificata inoltre con una variabile di stato che sia in grado di descrivere la sua configurazione. L'assunzione è quella di un valore scalare m , che rappresenta la proiezione del momento magnetico dell'unità nella direzione del campo e va identificata caso per caso. Lo stato di questo sistema elementare è confinato nell'intervallo $-\Delta m \leq m \leq +\Delta m$ dove Δm rappresenta il valore dell'intensità del momento magnetico elementare.

L'energia libera dell'unità, $F_p(m)$, è determinata dai valori che assume in corrispondenza degli stati $-\Delta m, 0, +\Delta m$, questi valori sono $-\mu_0 h_u \Delta m$, $\mu_0 h_c \Delta m$, $\mu_0 h_u \Delta m$ dove h_u e h_c rappresentano dei campi appropriati. I punti sono connessi da linee rette, le quali forniscono i due gradienti di energia $h_u - h_c$ e $h_u + h_c$. Assumiamo infine che l'unità sia accoppiata linearmente al campo H nel senso che la stabilità è controllata dall'energia di Gibbs $G_p(m, H) = F_p(m) - \mu_0 H m$. Al variare del campo H e a seconda dei valori dei campi h_c, h_u , G_p è caratterizzato da uno o due minimi negli stati $\pm \Delta m$.

In tale modo, viene creata una regione di metastabilità che è a forma di cono con vertice nel punto $h_c=0, h_u=H$. Col variare di H nel tempo, la regione si sposta verticalmente nel piano di Preisach, le linee separatrici di campo, spazzano il semipiano e di conseguenza, le unità transitano da una regione all'altra. Dato che a ciascuna regione corrisponde un tipo di profilo energetico, le transizioni fra le regioni determineranno i passaggi di stato. Nel momento che un'unità passa nella regione I o III, il suo stato sarà univocamente determinato. La regione II può essere vista come una regione di indifferenza rispetto ai due stati, e cioè un'unità per cambiare di stato deve finire necessariamente in una delle due regioni I o III.

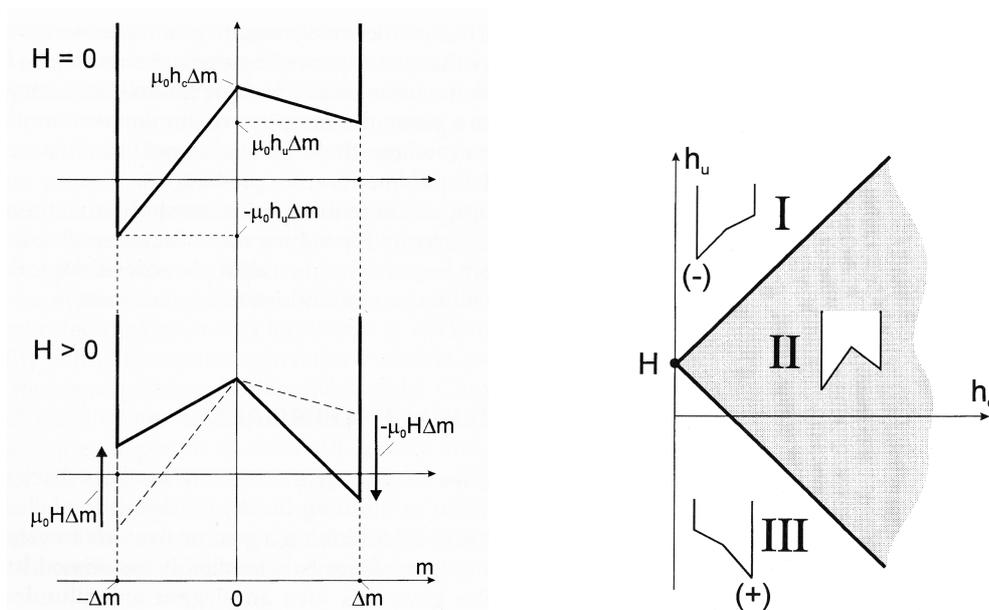


fig.1. In alto a sinistra, il profilo di energia libera F_p di una unità di Preisach, in basso l'energia di Gibbs relativa alla stessa unità in presenza di campo $H \neq 0$. a Destra, il piano di Preisach con la distinzione delle tre regioni di stabilità.

Le unità singole, descrivono quindi un individuale ciclo di isteresi rettangolare come mostrato in fig.2. con $\alpha = h_u + h_c$, $\beta = h_u - h_c$.

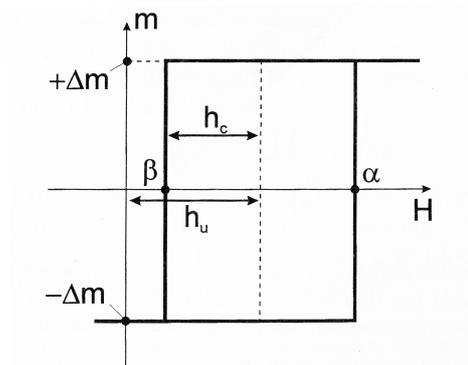


fig.2. Ciclo di isteresi elementare di una singola unità di Preisach.

4.6 Gruppi di unità di Preisach

Il quadro generale del processo di magnetizzazione come successione di salti di Barkhausen ha la sua corrispondenza nel modello di Preisach nell'assunzione che un dato sistema può essere descritto da un gruppo di unità di Preisach, distribuiti in un certo modo nel piano di Preisach, i quali saltano da uno stato all'altro in funzione del campo esterno agente H secondo le regole di stabilità già descritte.

Sappiamo quindi lo stato di ciascuna unità del sistema nelle regioni I e III. al fine di determinare lo stato magnetico del sistema, ci resta da determinare lo stato di quelle che si trovano nella regione II del piano di Preisach.

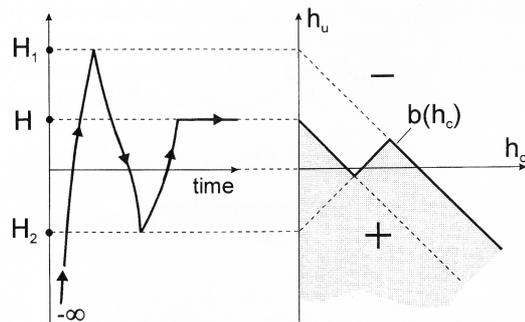


fig.3. A sinistra è rappresentata la storia del campo magnetico e a destra, il piano di Preisach con la conseguente definizione della linea di confine.

Per capire come sia possibile interpretare lo stato di tali unità, immaginiamo di provenire da un valore del campo H infinitamente negativo e di portarci nel tempo a dei valori H_1, H_2, H . Inizialmente, tutte le unità si trovano nella regione I (stato $-$), portando successivamente il campo al valore H_1 tutte le unità che si trovano al di sotto della linea $(+)$ sono transitate allo stato $+$. In questa situazione, nella regione II vi sono tutte unità che si trovano ancora nello stato iniziale $(-)$

Facendo variare il campo fino al valore H_2 , sarà la linea $(-)$ a causare i salti di Barkhausen e solo in una parte della regione II le unità cambieranno il loro stato abbandonando quello $(-)$ e passando allo stato $(+)$. Andamento che si ripete quando il campo applicato sarà riportato al generico valore H (fig.3.).

Il procedimento descritto è quello che Preisach ha utilizzato per costruire la linea di confine b , cosiddetta di Preisach, che rappresenta in sostanza, il riassunto essenziale della storia del campo che ha contribuito a magnetizzare l'intero nucleo. È proprio questa l'informazione necessaria affinché sia possibile definire gli stati di magnetizzazione delle singole unità di Preisach costituenti il corpo (fig.4.), grazie ai quali, mediando, sarà possibile ricavare

la magnetizzazione media del materiale.

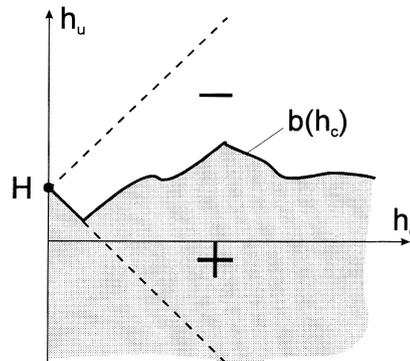


fig.4. generico stato possibile rappresentato nel piano di Preisach

4.7 Distribuzione di Preisach

Preso un sistema descritto da un gruppo di N unità di Preisach distribuite nel piano di Preisach, la magnetizzazione media del sistema, M , risulta essere la somma dei contributi delle singole unità del gruppo. Consideriamo la distribuzione statistica delle unità. Se $n(h_c, h_u)dh_cdh_u$ è il numero di unità di Preisach contenuto nell'elemento di piano dh_cdh_u allora si ha

$$\int_0^{\infty} dh_c \int_{-\infty}^{\infty} n(h_c, h_u) dh_u = N$$

in questo caso la magnetizzazione media del sistema data una storia $b(h_c)$ vale

$$M = \frac{1}{V} \int_0^{\infty} dh_c \left[\int_{-\infty}^{b(h_c)} \Delta m(h_c, h_u) n(h_c, h_u) dh_u - \int_{b(h_c)}^{+\infty} \Delta m(h_c, h_u) n(h_c, h_u) dh_u \right]$$

dove V rappresenta il volume del sistema. Con le seguenti posizioni

$$M_s = \frac{N \langle \Delta m \rangle}{V} \qquad p(h_c, h_u) = \frac{\Delta m(h_c, h_u) n(h_c, h_u)}{N \langle \Delta m \rangle}$$

si ottiene

$$M = M_s \int_0^{\infty} dh_c \left[\int_{-\infty}^{b(h_c)} p(h_c, h_u) dh_u - \int_{b(h_c)}^{+\infty} p(h_c, h_u) dh_u \right]$$

che rappresenta la legge costitutiva del materiale che riassume il comportamento del nucleo dato il suo stato $b(h_c)$ che tiene conto di tutta la storia.

La funzione $p(h_c, h_u)$ è detta distribuzione di Preisach ed è il fattore fondamentale da cui dipendono le caratteristiche d'isteresi del materiale. Tale distribuzione è una distribuzione di carattere simmetrico rispetto ad h_u e di conseguenza il valore della magnetizzazione diventa:

$$M = 2M_s \int_0^{\infty} dh_c \int_0^{b(h_c)} p(h_c, h_u) dh_u$$

questa ultima rappresenta il risultato fondamentale della teoria di Preisach, in quanto costituisce uno strumento completamente operativo che permette direttamente di calcolare il risultato richiesto $M(H(t))$.

4.8 Applicazione del modello

Nella costruzione della linea di confine del piano di Preisach, si vede che al variare del campo H , si costituiscono nuovi vertici della spezzata $b(h_c)$. Ciò avviene ogni qual volta si inverte il segno della variazione di $H(t)$ e cioè in corrispondenza dei minimi o dei massimi di $H(t)$. Durante questo processo,

alcuni vertici già esistenti possono essere "spazzati via", cancellati dal passaggio del campo. Questa proprietà del modello prende il nome di proprietà di cancellazione.

Dal momento in cui il campo comincia a variare in un senso, esiste un valore di tale campo (in corrispondenza dell'ultimo punto estremo) tale che quando il sistema torna in quel punto, si ritroverà nello stesso esatto stato di quando l'ha lasciato. Questa proprietà prende il nome di proprietà di memoria.

Un'ultima proprietà detta di congruenza, consiste nel fatto che a partire da sue stati di magnetizzazione diversa ($M' \neq M''$), e facendo variare ciclicamente il campo magnetico in un intervallo $[H', H'']$, si ottengono cicli sovrapponibili per traslazione.

Nell'applicazione del modello è necessario prevedere uno stato iniziale. Il fatto che il materiale abbia inizialmente un certo valore di magnetizzazione non permette da solo di descrivere quale forma della linea di confine sia quella esatta. Se supponiamo di utilizzare un provino nuovo o magneticamente "rigenerato" nel senso di aver portato la sua temperatura sopra la temperatura di Curie, allora stiamo ipotizzando di avere una distribuzione perfettamente uniforme dei dipoli elementari delle singole unità. A questa situazione corrisponde la condizione $b(h_C) = 0$. Da questa situazione, si può definire la curva di prima magnetizzazione del sistema che definisce appunto la relazione $M(H)$ per H che cresce dal valore nullo al valore di saturazione monotonamente su un provino demagnetizzato.

Per l'applicazione del modello è infine necessario definire la distribuzione di Preisach. Sono qui di seguito date tre distribuzioni fondamentali che

permettono di ottenere cicli d'isteresi fortemente diversificati al variare dei parametri σ_c , σ_u , H_0 . In fig.5. sono rappresentati dei cicli ottenuti con tali distribuzioni.

Distribuzione Lorentziana:

$$p(h_c, h_u) = \frac{2}{\pi(\sigma_c H_0)^2 \left(\frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{1}{\sigma_c} \right)} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{h_c + h_u - H_0}{\sigma_c H_0} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{h_c - h_u - H_0}{\sigma_c H_0} \right)^2 \right]}$$

Distribuzione Lognormale-Gaussiana:

$$p(h_c, h_u) = \frac{1}{2\pi\sigma_c\sigma_u H_0^2} \frac{H_0}{h_c} e^{-\frac{\ln^2 \frac{h_c}{H_0}}{2\sigma_c^2}} e^{-\frac{h_u^2}{2\sigma_u^2 H_0^2}}$$

Distribuzione Gaussiana-Gaussiana:

$$p(h_c, h_u) = \frac{1}{2\pi\sigma_c\sigma_u H_0^2} \frac{2}{\operatorname{erf}(\sigma_c \sqrt{2}) + 1} e^{-\frac{(h_c - H_0)^2}{2\sigma_c^2 H_0^2}} e^{-\frac{h_u^2}{2\sigma_u^2 H_0^2}}$$

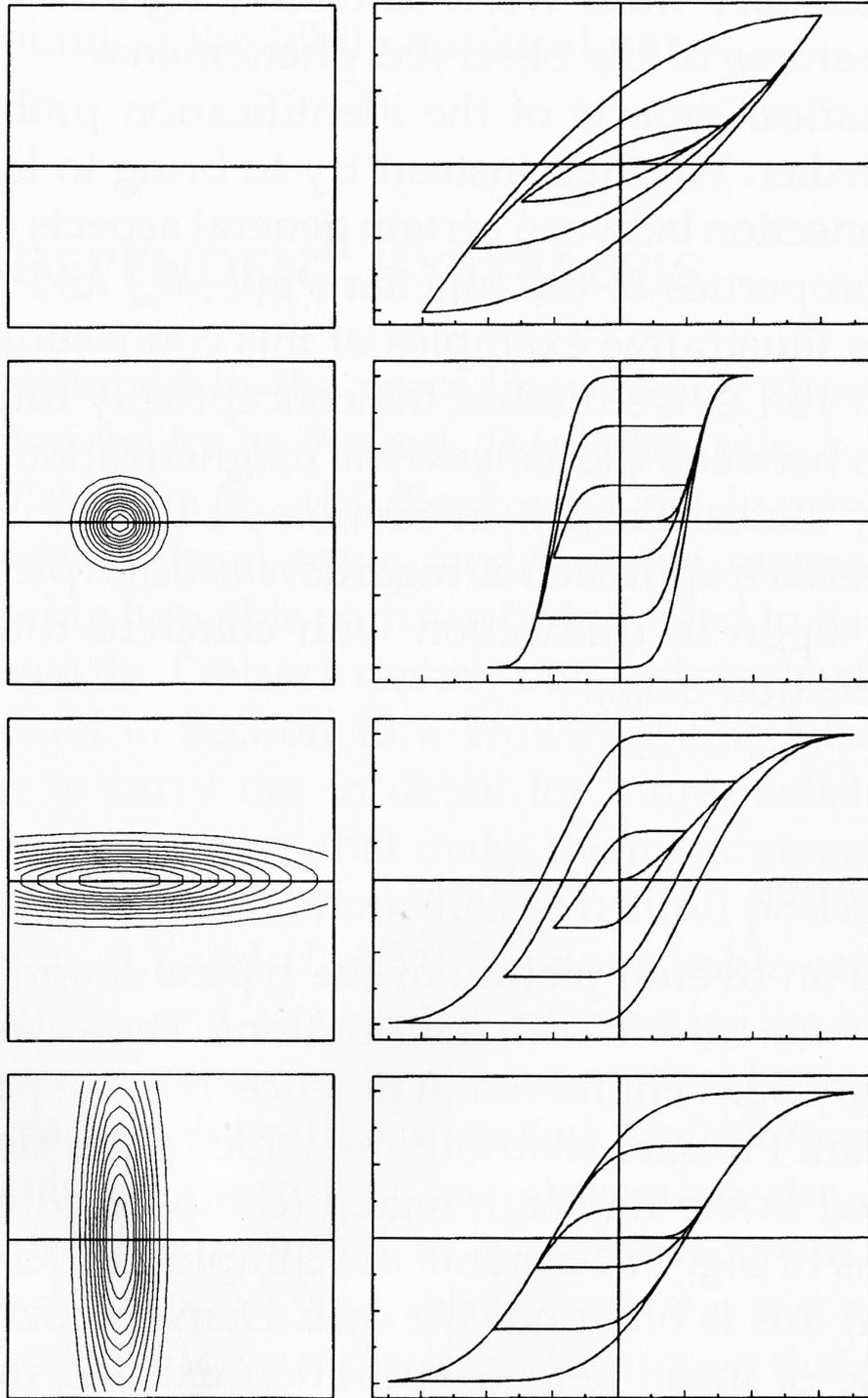


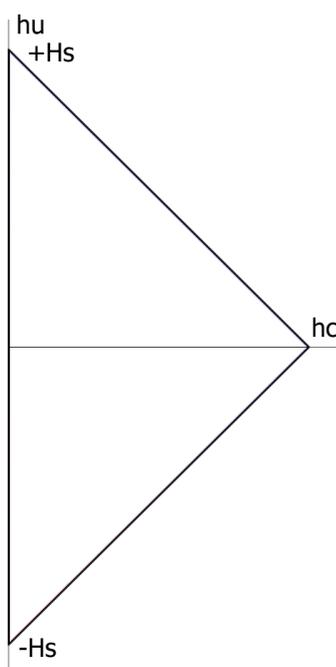
fig.5. cicli ottenuti con una distribuzione di Gaussiana-Gaussiana. Sulla sinistra sono rappresentate le distribuzioni tramite isolinee. Dall'alto 1. Costante ($\sigma_c \sigma_u \rightarrow \infty$) 2. ($\sigma_c=0.2, \sigma_u=0.2$) 3. ($\sigma_c=1, \sigma_u=0.2$) 4. ($\sigma_c=0.2, \sigma_u=1$)

4.9 Determinazione sperimentale della distribuzione di Preisach

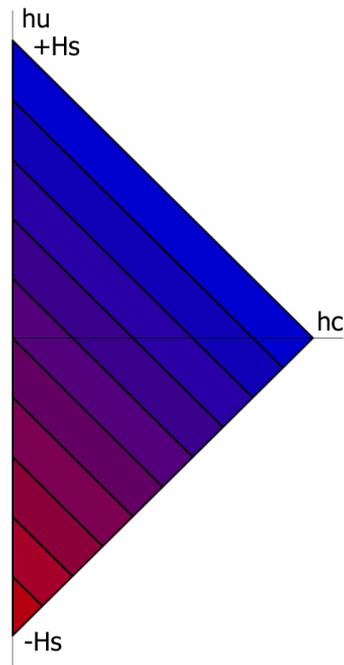
È chiaro che il punto cruciale nell'applicazione del modello di Preisach consiste nella scelta della distribuzione di Preisach.

La questione consiste nel fatto che non sempre abbiamo già a disposizione la distribuzione che desideriamo, e in particolare nel fatto che possiamo chiederci anche come sia possibile attuare questa corrispondenza. Ebbene tale problema può essere affrontato con una metodica piuttosto semplice.

Notiamo innanzitutto che l'area del piano di Preisach nella quale abbiamo interesse a determinare la distribuzione è quella triangolare rappresentata in figura. Questo perché al variare del campo applicato da $-H_s$ ad H_s , le regioni di switch delimitano proprio i due cateti del triangolo.

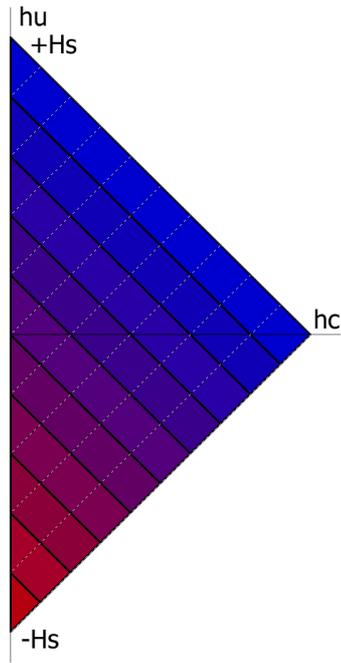


Se immaginiamo di far variare il campo H a intervalli regolari dal valore di $-H_s$ al valore $+H_s$, stessi, suddividiamo tale zona in strisce, le quali vengono per così dire spazzate al passaggio della zona di metastabilità. Questo significa che al variare del campo magnetico, le unità locate nelle strisce, vengono via via commutate allo stato (+).

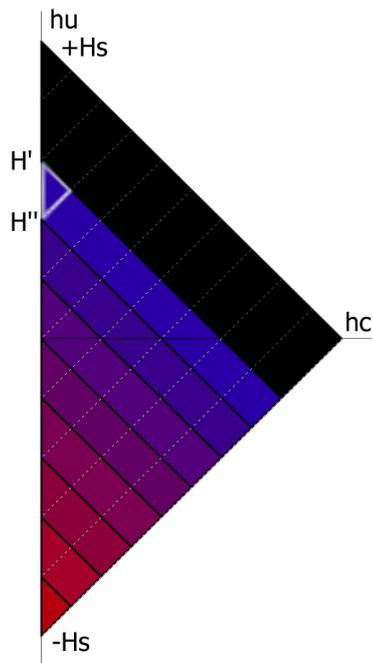


E' quindi chiaro come sia possibile mettere in relazione l'integrale della distribuzione di Preisach nelle varie aree con le variazioni di magnetizzazione dovute alle variazioni del campo magnetico applicato H .

Il problema è ora quello di distribuire il valore di tale integrale nelle strisce ottenute. Per fare ciò, invertiamo l'andamento del campo magnetico, le strisce vengono suddivise a loro volta in zone più piccole.



È immediato a questo punto mettere in relazione gli integrali di Preisach in queste areole con le variazioni ΔH , ΔM sulle curve di isteresi.



Ad esempio, facendo variare il campo da $-H_s$ a H' e poi fino ad H'' si può

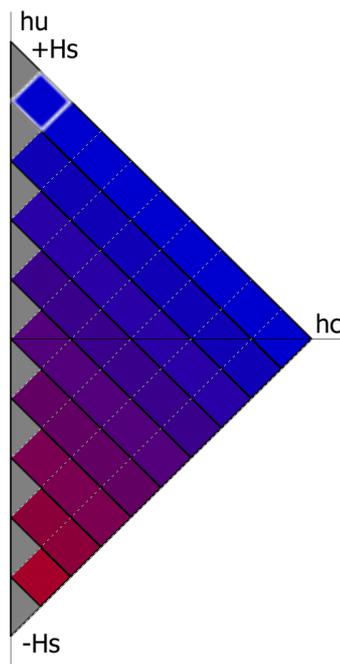
determinare direttamente il valore dell'integrale di Preisach nell'areola rappresentata in figura. Tale integrale vale ΔM .

Per conoscere il valore della distribuzione $p(h_c, h_u)$, si può pensare in prima approssimazione di "spalmare" uniformemente il valore di tale integrale sull'area corrispondente dando quindi una ricostruzione di tipo costante a zone "a scalini".

$$P(h_c, h_u) = I/A$$

dove I è il valore dell'integrale e A è l'area su cui esso è calcolato.

Così si può proseguire per ciascuna areola dell'area desiderata.



Se si sceglie di suddividere l'area in $n \times n$ parti, è necessario (per chiudere il sistema) disporre di n curve di inversione del primo ordine.

5. REALIZZAZIONE SOFTWARE

5.1 Introduzione

Appurate le potenzialità del modello di Preisach, nasce spontanea la domanda di quale possa essere l'utilità della sua applicazione dal punto di vista informatico. La complessità matematica che caratterizza il modello, e il fatto che il processo stesso di determinazione di ciò che rappresenta lo stato del sistema, rendono necessario il supporto dello strumento informatico.

Svariate sono le applicazioni alle quali possiamo pensare di applicare lo strumento che ci accingiamo a progettare. Si può pensare di utilizzare il modello per determinare le caratteristiche dei cicli cosiddetti minori del ciclo esterno d'isteresi. Questo perché le caratteristiche di tali cicli potrebbero, ed

in genere è così, differire da quelli esterni per quanto mediamente il comportamento magnetico, si discosta dalla linearità. Si può pensare inoltre di utilizzarlo per stimare il valore dello stato del nucleo ferromagnetico in ogni istante di tempo e in dipendenza dalla conoscenza dell'andamento del campo magnetico applicato. Un'altra applicazione potrebbe essere quella di conoscere per determinate condizioni iniziali, il valore del campo di coercizione relativo, e cioè il campo che porta il corpo ad una magnetizzazione netta. Tutte queste applicazioni, dalla più basilare alla più completa, hanno un forte bisogno di supporto informatico.

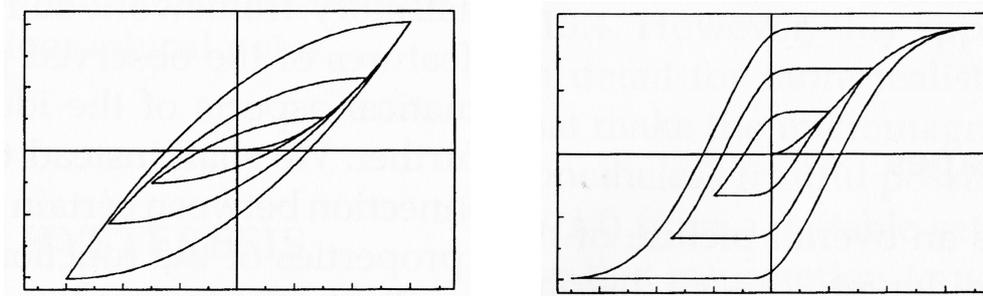
Il primo aspetto che può contribuire ad una scelta di progetto è la considerazione che il modello può fornire dei risultati precisi, relativi a determinate considerazioni, quindi si può pensare di capire determinati parametri aggiuntivi oltre a quelli che caratterizzano normalmente il ciclo d'isteresi esterno, per poi utilizzarli come caratteristiche specifiche del materiale. D'altro canto, l'idea di disporre a bordo del satellite di uno strumento capace di monitorare lo stato del nucleo, offrirebbe forti vantaggi in termini di efficienza e precisione nel controllo dello stato del nucleo magnetico e quindi dell'assetto.

È quest'ultimo aspetto quello più interessante dal punto di vista applicativo, ma va tenuto in conto, la necessità di disporre a bordo di un supporto hardware e software capace di gestire il modello in maniera appropriata.

5.2 Problematiche

Come abbiamo visto, il punto cruciale nella modellazione di Preisach

consiste nella determinazione della distribuzione di Preisach, è naturalmente a seconda della scelta operata che il modello sarà in grado di approssimare più o meno bene il comportamento reale del materiale. Questa scelta può essere fatta tenendo conto di particolari caratteristiche esibite dal ciclo d'isteresi esterno del materiale in quanto una distribuzione ad esempio può prestarsi meglio a cicli stretti e più rotondi altri viceversa più adatti a cicli più grossi e squadrati.



Sarà quindi necessario offrire all'utente, la possibilità di scegliere tra un numero di distribuzioni più o meno alto, quella che più si presta a descrivere il ciclo richiesto.

Una volta effettuata questa scelta, l'applicazione diventa concettualmente banale, ma sono da tenere in conto i notevoli tempi macchina necessari a operare il pesante carico matematico-numerico che contraddistingue il modello. La costruzione della Linea di confine di Preisach, è banale anche dal punto di vista operativo mentre il carico notevole di lavoro, si concentra sul calcolo dell'integrale

$$M = 2M_s \int_0^{\infty} dh_c \int_0^{b(h_c)} p(h_c, h_u) dh_u$$

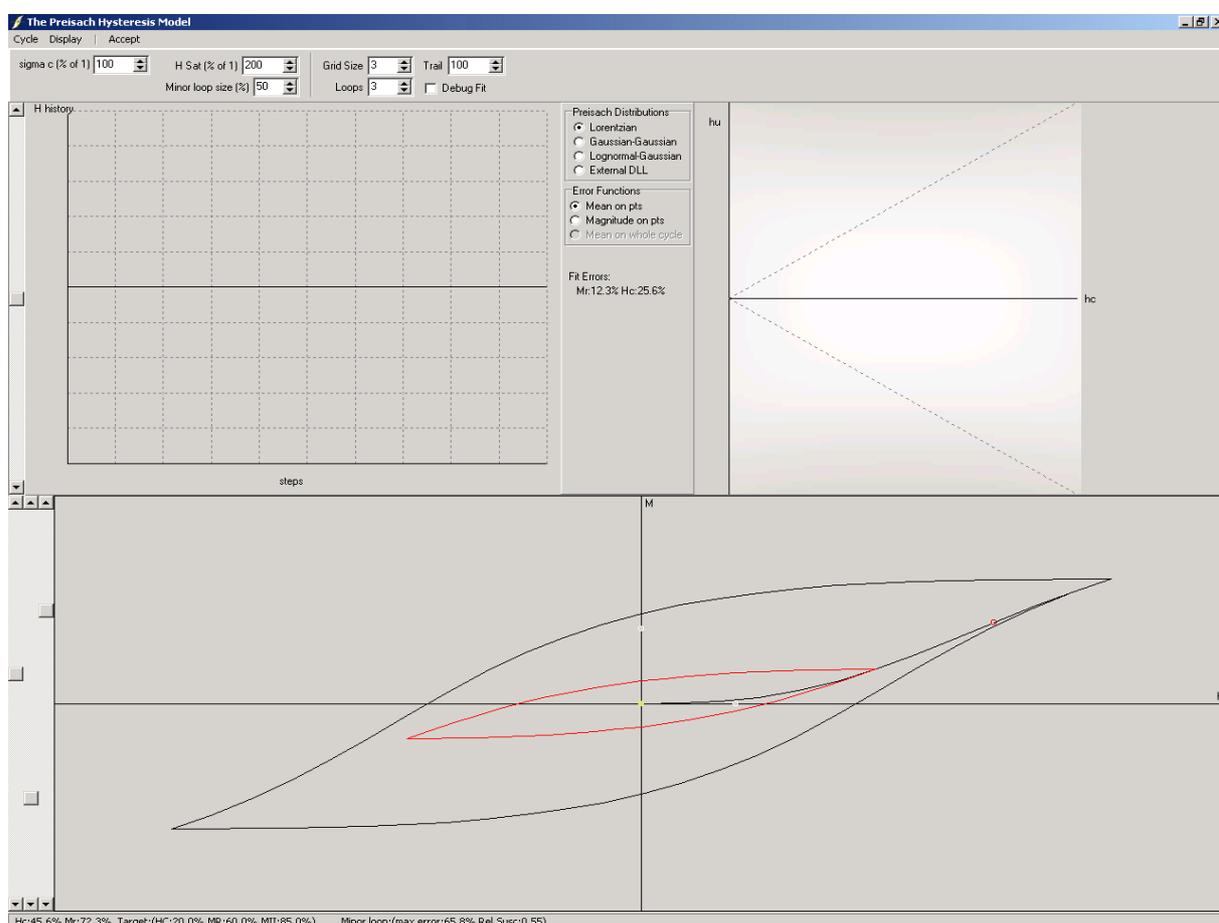
Questo va calcolato sull'area sottesa dalla linea di confine. Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, diventa allora rilevante la capacità di calcolo disponibile, relativamente al tempo caratteristico di acquisizione del controllo, in quanto i risultati della simulazione di Preisach devono essere disponibili per il dispositivo di controllo prima possibile.

5.3 Codice sviluppato

È stato sviluppato nell'ambito di questa tesi, un software ad hoc per l'applicazione del modello di Preisach. Tale codice, scritto in linguaggio Borland-Imprise Delphi 5.0 sotto una piattaforma Win32, si presta alla simulazione del ciclo di isteresi sia per la determinazione dei parametri caratteristici di un particolare ciclo, che per lo studio dei cicli interni di un determinato ciclo esterno.

5.3.1 Presentazione dell'interfaccia utente

Il programma all'avvio, si presenta con una interfaccia visuale come quella in figura,



come si vede, la schermata è suddivisa sostanzialmente in tre aree:

Il riquadro in basso, è quello in cui viene riportato il risultato dell'applicazione del campo magnetico H sul materiale con le caratteristiche scelte.

nel riquadro in alto a sinistra, è riportato quello che è l'andamento nella storia del campo magnetico H . Nel caso riportato in figura, l'andamento è quello fornito per descrivere il cicli d'isteresi interno e esterno rappresentati in figura, nonché la curva di prima magnetizzazione.

Nel riquadro, in alto a destra, è visualizzato il semipiano di Preisach nel quale è riportata sia la distribuzione di Preisach indicata con la gradazione di colore, sia la linea di confine (Boundary Line) che il cono delimitante la regione metastabile delle unità di Preisach definita nel capitolo precedente.

Al centro delle prime due aree grafiche, vi è un pannello contenente le più utilizzate distribuzioni di Preisach che sono Lorentziana, Gaussiana-Gaussiana, Lognormale-Gaussiana.

L'area sovrastante i riquadri, contiene delle caselle in cui sono modificabili i parametri delle distribuzioni di Preisach e alcuni dei parametri di visualizzazione del programma.

È riportata di seguito una tabella in cui è riassunta la presenza o assenza dei parametri nelle distribuzioni.

	σ_c	σ_u	H_0
Lorenziana	No	Si	Si
Gaussiana-Gaussiana	Si	Si	Si
Lognormale-Gaussiana	Si	Si	Si

Una caratterizzazione dell'influenza dei parametri sul comportamento isteretico del modello in funzione delle distribuzioni che ne derivano, può essere data in linea di massima in questo modo

σ_c Discostamento dei cicli interni da quelli esterni nel ramo discendente

$H < 0$ delle curve di desaturazione

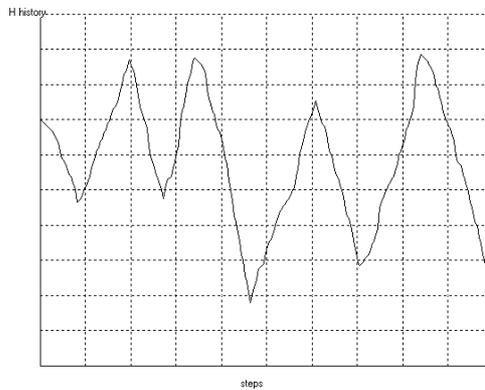
σ_u Forza di memoria (piattezza) del ramo discendente $H > 0$ delle curve di

desaturazione

H_0 Tendenza alla similitudine al comportamento bistabile di Preisach.

5.3.2 Funzionamento del programma

La barra di scorrimento a sinistra del primo riquadro simula il controllo della corrente nell'avvolgimento primario dell'attuatore la quale risulta proporzionale al campo magnetico H . Facendo scorrere questa barra, si cambia dunque il valore del campo. Questo nuovo valore viene memorizzato nella "storia" del campo magnetico in un vettore interno. La storia recente del campo, viene visualizzata a fianco.

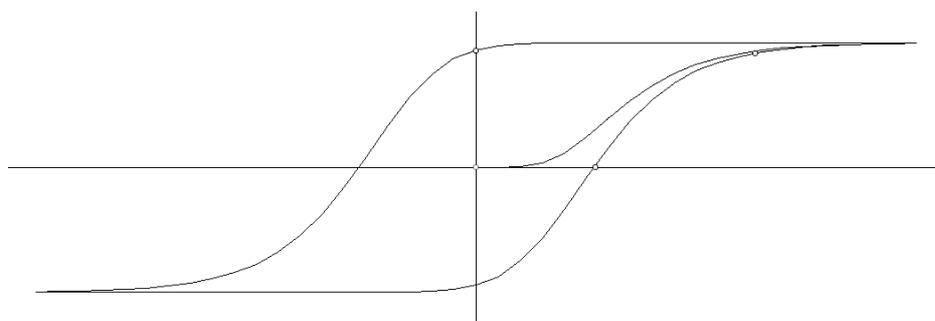
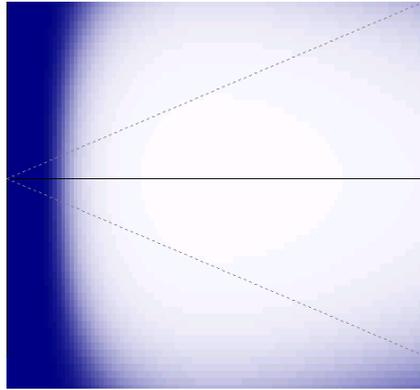


La conoscenza dell'andamento del campo, permette la costruzione della Boundary Line, che viene rappresentata nel riquadro a fianco sovrapposta alla distribuzione di Preisach. Nel riquadro è rappresentata inoltre, in un colore diverso e scala verticale diversa, il valore dell'integrale

$$\int_0^{b(h_c)} p(h_c, h_u) dh_u.$$

Tale funzione, è una linea funzione a sua volta di h_c . L'integrale che vogliamo ottenere è pari all'integrale di tale funzione in dh_c .

Il problema dell'integrazione è, come più volte detto, il punto cruciale dell'applicazione del modello di Preisach, dato che per la costruzione del ciclo e l'estrazione delle caratteristiche, è necessario determinarlo in corrispondenza di un alto numero di stati del sistema.



visualizzazione dello stato iniziale del sistema. $H=0$ $M=0$ (materiale demagnetizzato)

Per ognuno di questi stati, sarà necessario calcolare il valore di tale integrale, e a tale scopo, è stato introdotto un normogramma dinamico che permette di velocizzare notevolmente tale calcolo.

Nella procedura di calcolo, l'integrale viene eseguito come di norma con la formula dei trapezi, in un doppio ciclo. Il ciclo esterno, sulla variabile h_c , viene trattato convenzionalmente mentre, quello interno su h_u , viene fatto una sola volta per tutti i punti appartenenti all'area delimitata da:

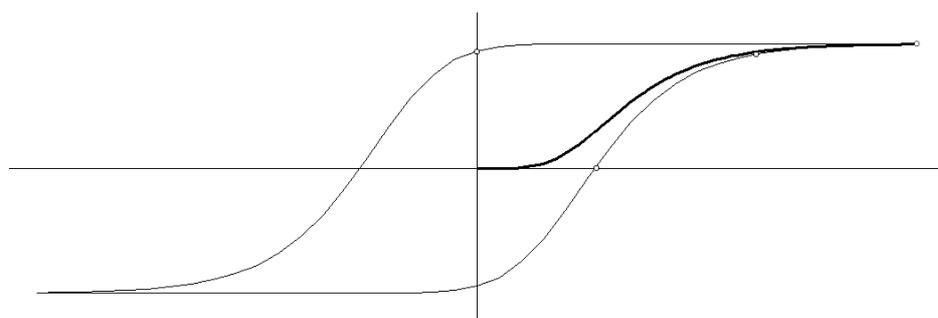
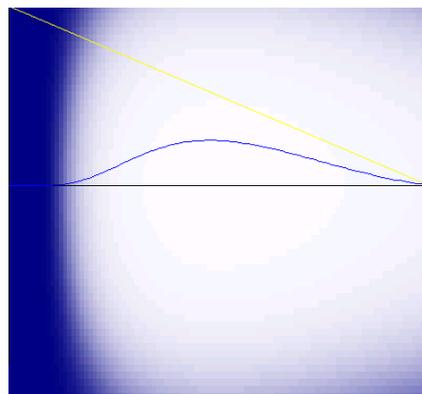
$$0 < h_c < H_s ; H - h_c < h_u < -H + h_c$$

in realtà essendo l'integrale simmetrico su h_u , esso viene calcolato solo per $h_u > 0$. Tale integrale viene sì calcolato tradizionalmente, ma viene poi riposto in un normogramma il quale viene poi aggiornato opportunamente in base alla variazione dei parametri caratteristici.

Una volta effettuato tale calcolo, il valore dell'integrale viene prelevato dal normogramma. Essendo per natura il normogramma, un insieme di valori localizzati in punti discreti dell'area considerata, l'operazione di prelievo viene effettuata con una interpolazione di tipo bilineare sui quattro valori appartenenti all'intorno del punto richiesto.

Vediamo al fine esplicativo cosa viene visualizzato nel momento in cui facciamo variare il valore del campo magnetico H .

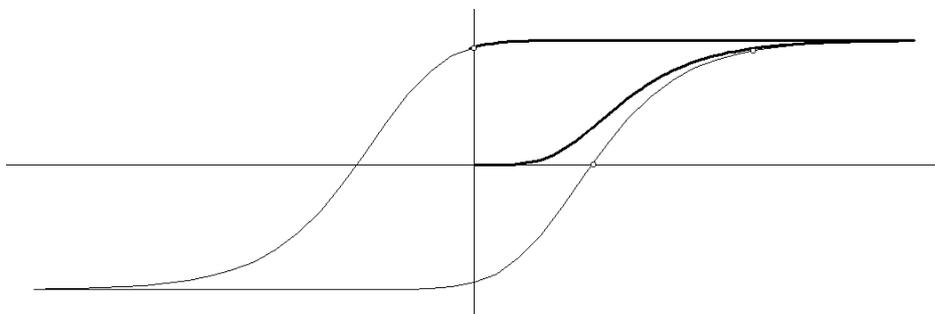
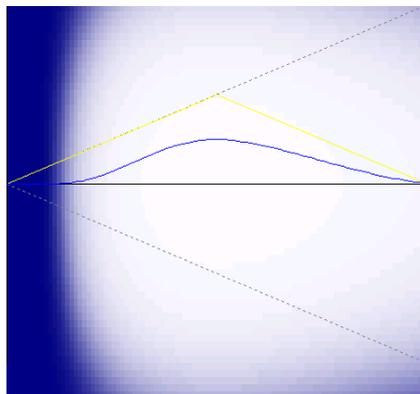
Quando portiamo il valore di H al suo corrispondente valore di saturazione, ci portiamo nel punto di magnetizzazione massima, corrispondente al vertice superiore destro del ciclo d'isteresi.



visualizzazione dello stato iniziale del sistema. $H=H_s$ $M=M_s$ (materiale demagnetizzato)

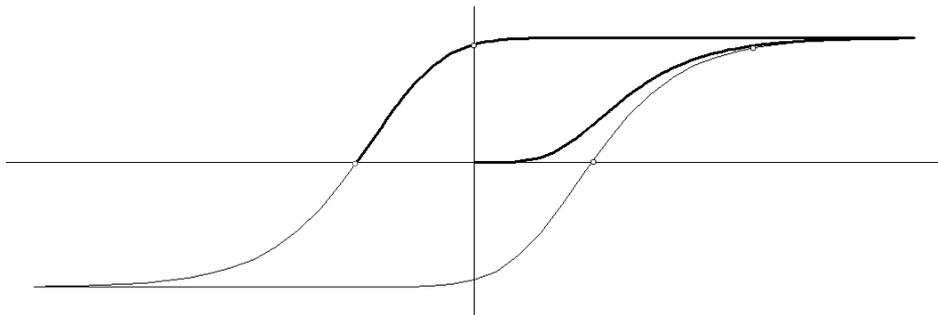
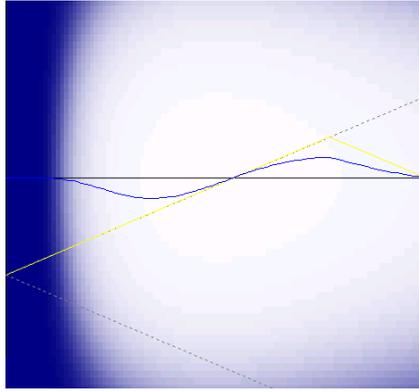
la linea spessa all'interno del ciclo è la curva di prima magnetizzazione del ciclo.

Riportando a zero il valore del campo applicato, ci portiamo al punto corrispondente al valore di magnetizzazione residua.



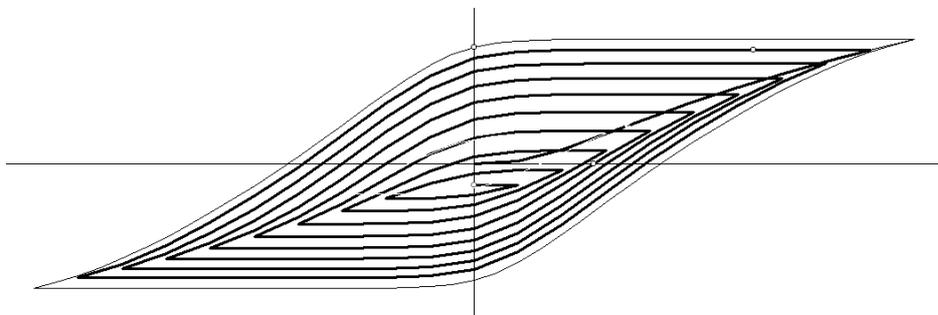
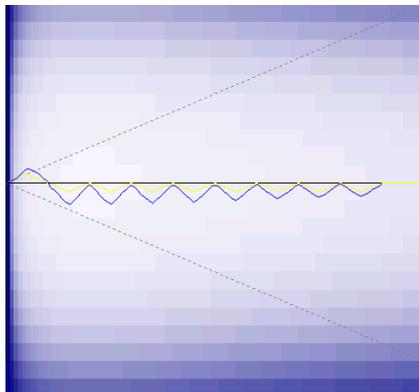
visualizzazione dello stato iniziale del sistema. $H=0$ $M=M_r$ (materiale magnetizzato)

da questo stato, discendendo ancora col valore del campo applicato, ci portiamo al punto di coercizione



visualizzazione dello stato iniziale del sistema. $H=-H_c$ $M=0$ (materiale magnetizzato netto 0)

Facendo variare il valore del campo ciclicamente con un'ampiezza via via decrescente, si ottiene un andamento del tipo mostrato in figura



andamento ciclico tipo processo di demagnetizzazione. La similitudine si può capire osservando nella figura in alto che la boundary line si porta quasi a sovrapporsi alla linea $h_u=0$.

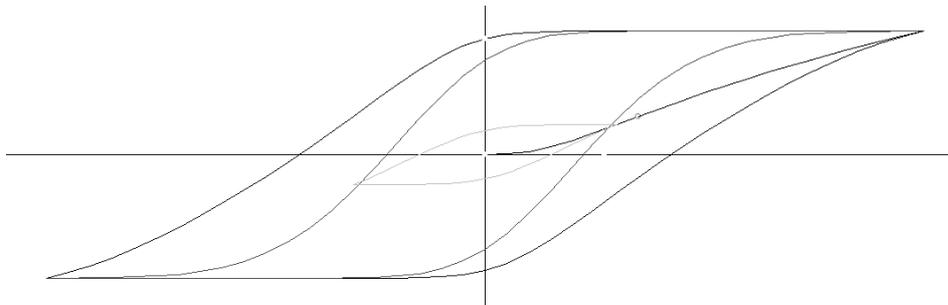
5.3.3 Operazione di Fit

Il programma prevede la possibilità di eseguire, data la distribuzione, un Fit di alcuni parametri personalizzabili dall'interfaccia.

In basso a sinistra, nella schermata, sono presenti tre scrollbar le quali controllano tre valori specifici:

- 1) Valore della Magnetizzazione Residua
- 2) Valore del campo di coercizione
- 3) Valore di magnetizzazione in un punto intermedio del ciclo

Il posizionamento di tali parametri, può essere fatto in base al ciclo "target" che rappresenta l'obiettivo che può essere importato nel riquadro in basso tramite la funzione di menu "Open...".



Visualizzazione opzionale del ciclo obiettivo da raggiungere.

Il processo di fit opera in questo modo: esegue uno scanning nel volume dei parametri, in una griglia, il cui numero di punti è controllato dal parametro Grid Size modificabile sulla schermata, del punto dello spazio dei parametri in cui il valore di una funzione d'errore è minimo. Scelto questo punto, effettua in un ciclo interno la stessa operazione di scanning ma stavolta in una griglia più fitta, collocata nel suo intorno. Questo processo di

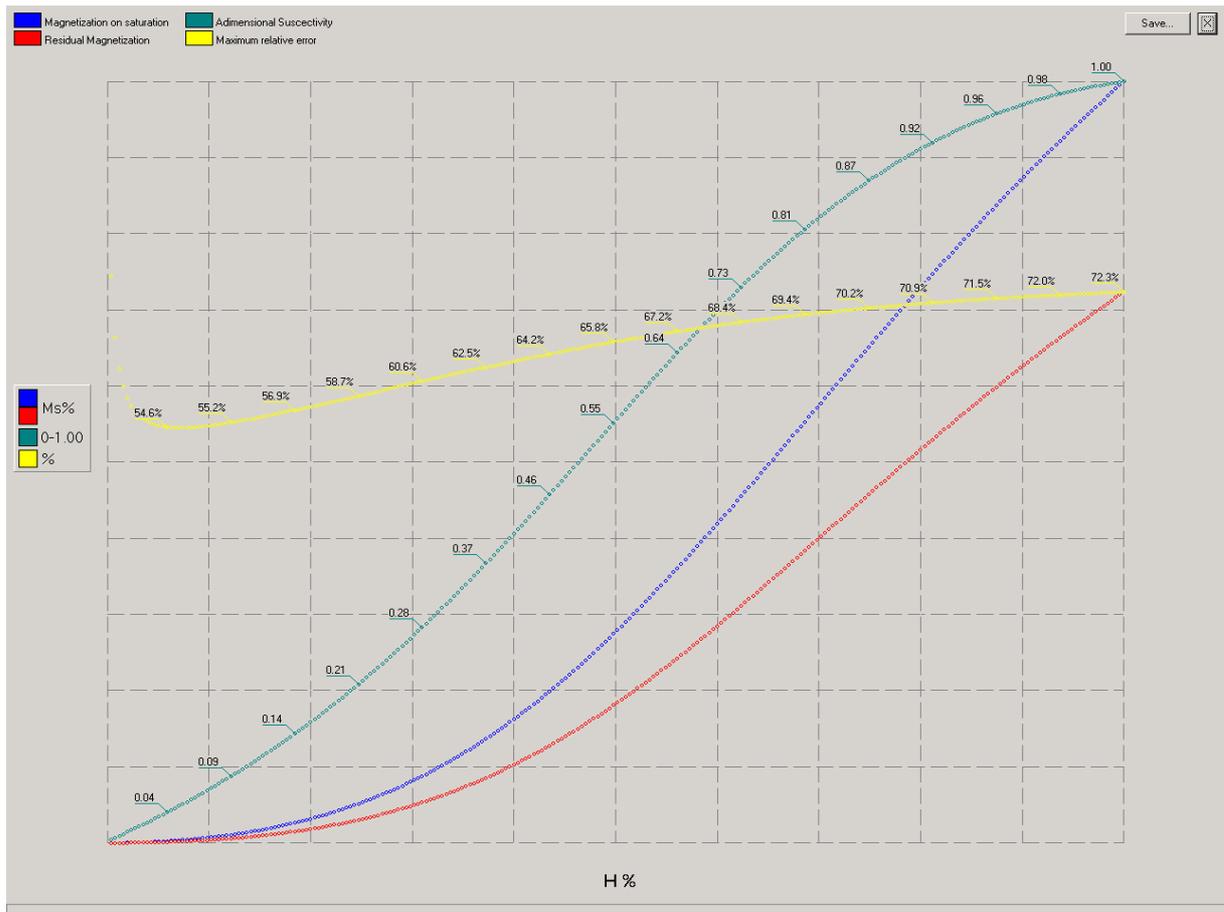
infittimento di griglia, viene ripetuto un numero di volte pari al valore, anch'esso controllabile a schermo, del parametro Loops.

L'opzione Debug Fit, permette di visualizzare il valore della funzione d'errore, la quale può essere selezionata da un set di funzioni predefinite, in ogni punto della griglia e di attendere la pressione di un tasto per continuare.

Il parametro trail, controlla il numero di punti della scia dell'andamento della linea "storica" che lega M ed H nel riquadro in basso.

Una volta operata la scelta del modello di distribuzione e dei parametri che lo contraddistinguono, il ciclo diventa operativo nel senso che da esso è possibile estrarre le caratteristiche che ci servono per effettuare le scelte di cui abbiamo parlato nel primo capitolo. A tale scopo, la funzione di menu "Accept", offre la visualizzazione di un grafico in cui sono rappresentate le curve di M_{sm} e di M_{rm} in funzione di H con $0 < H < H_s$ dove M_{sm} e M_{rm} rappresentano rispettivamente il valore di magnetizzazione di saturazione e di magnetizzazione residua dei cicli minori, corrispondenti a $-H'_s < H < +H'_s$ partendo da condizioni di nucleo magnetico vergine.

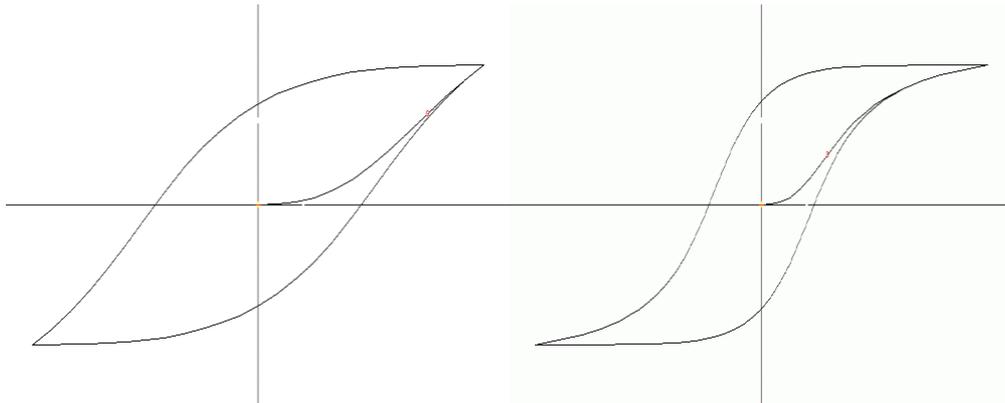
Il programma offre la possibilità di salvare questi risultati in un file da poter poi utilizzare in sede applicativa. I dati di magnetizzazione saturazione e residua dei cicli interni vengono scaricati in formato ASCII per cicli minori corrispondenti a valori del campo di saturazione pari a $(0-255)/255$ di H_s .



risultati dell'applicazione di Preisach ai cicli interni di un ciclo d'isteresi

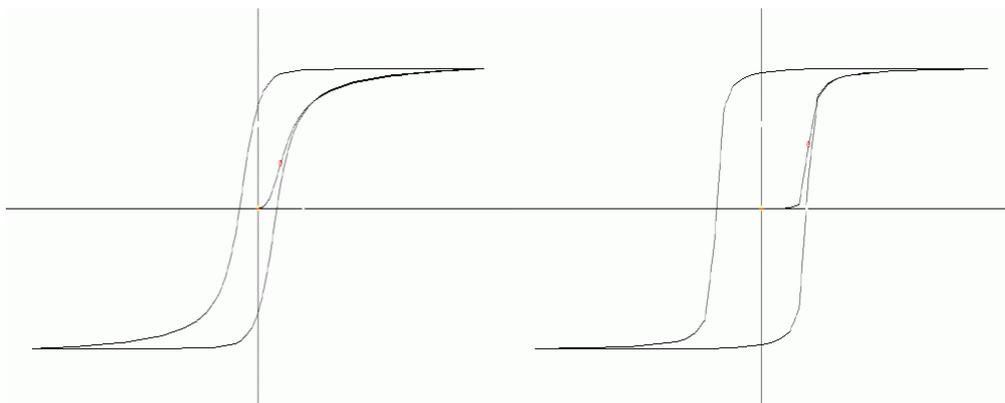
5.4 Applicazione del programma

Il programma è stato provato con diverse scelte delle distribuzioni e dei parametri caratteristici. Questo può essere utilizzato senza bisogno di ulteriori aggiunte per la simulazione dell'isteresi di materiali ferromagnetici dolci (facilmente magnetizzabili). Si prestano bene a questo scopo le distribuzioni fornite a corredo Lorentziana, Gaussiana e Lognormale. Sono svariati i tipi di cicli di isteresi che si possono ottenere, ne sono riportati di seguito alcuni



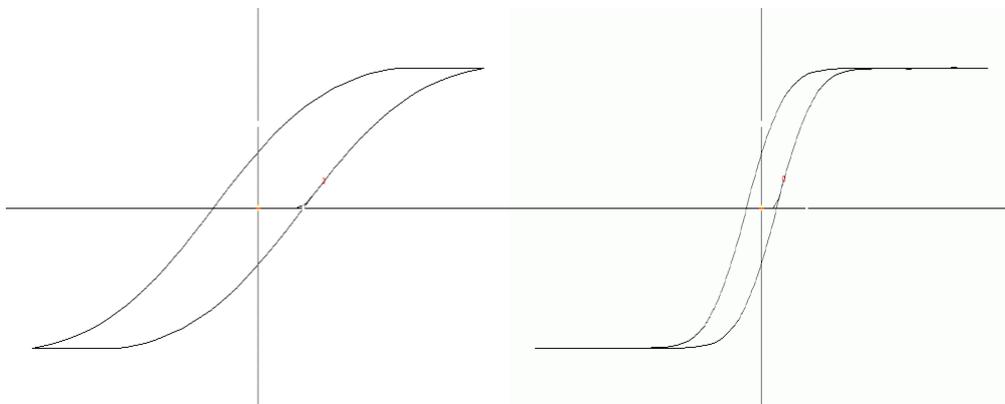
Model: Lorentzian Parameters: $\sigma_c=1$ $H_s=2$

Model: Lorentzian Parameters: $\sigma_c=1$ $H_s=4$



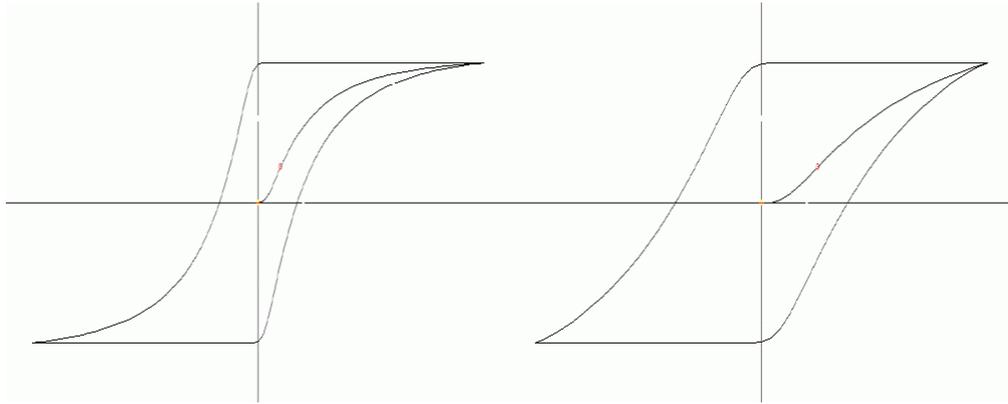
Model: Lorentzian Parameters: $\sigma_c=1$ $H_s=10$

Model: Lorentzian Parameters: $\sigma_c=0,1$ $H_s=4$

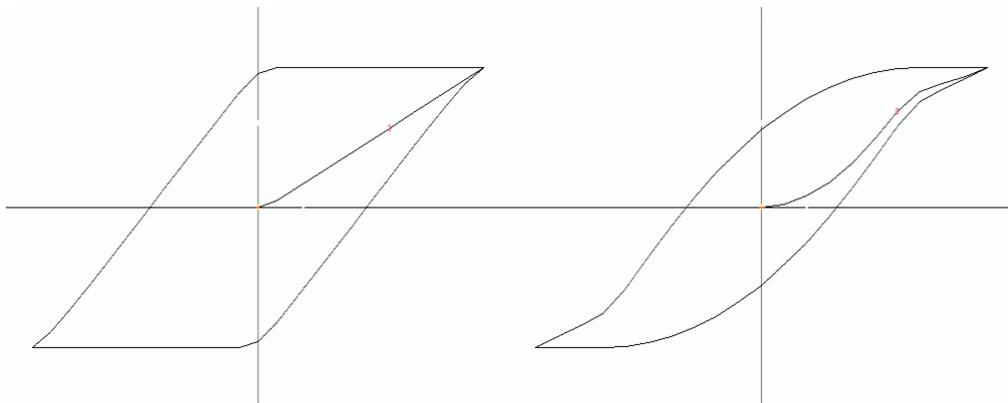


Model: Gaussian Parameters: $\sigma_c=1$ $\sigma_u=2$ $H_s=5$

Model: Gaussian Parameters: $\sigma_c=1$ $\sigma_u=2$ $H_s=20$



Model: Lognormal Parameters: $\sigma_c=1$ $\sigma_u=0,1$ $H_s=15$ Model: Gaussian Parameters: $\sigma_c=5$ $\sigma_u=0,5$ $H_s=5$



Model: Lognormal Parameters: $\sigma_c=10$ $\sigma_u=0,1$ $H_s=15$

Model: Numerical

6. VERIFICA SPERIMENTALE

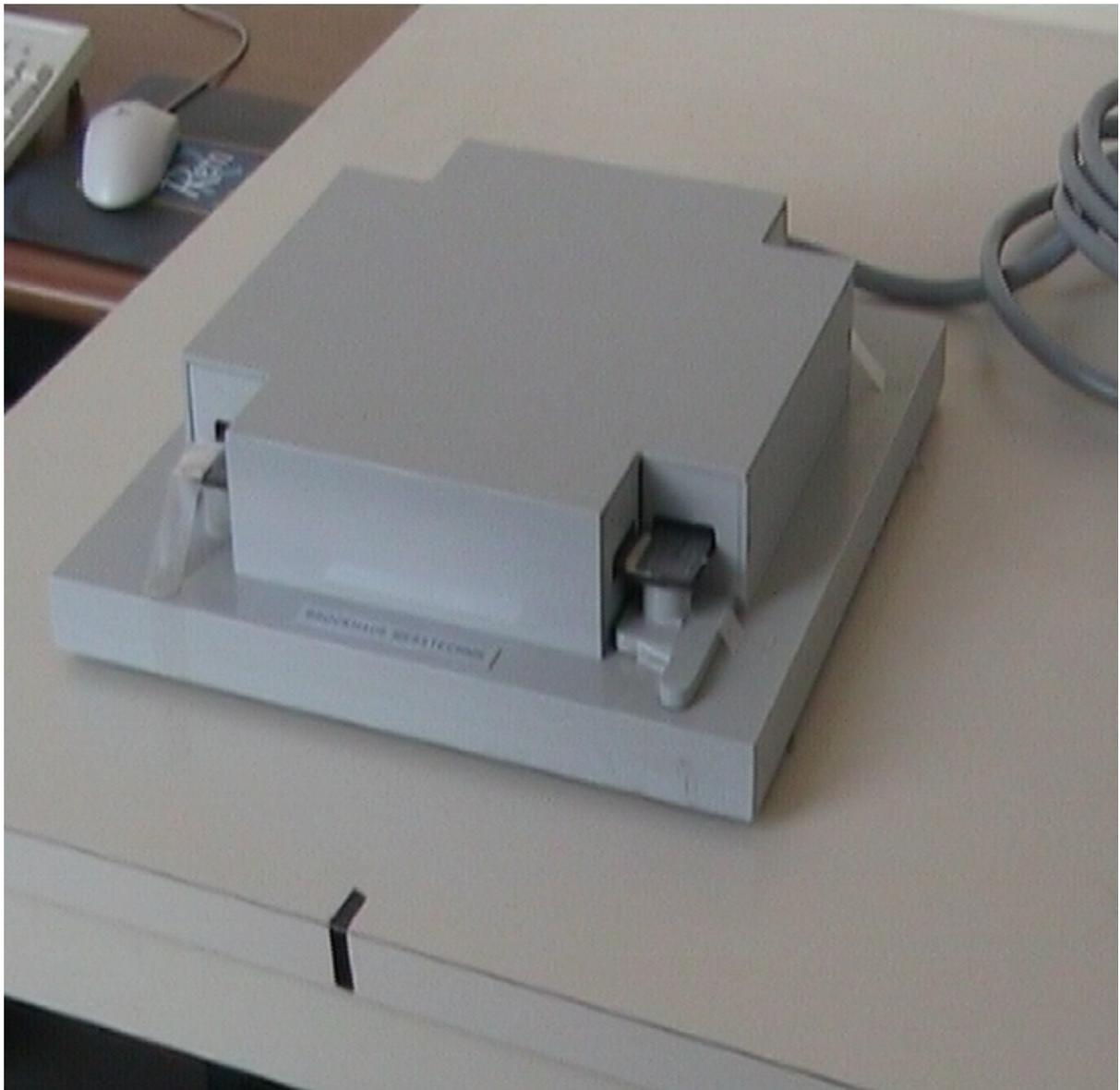
6.1 Applicazione sperimentale ad un materiale

Il modo più efficace per applicare il modello di Preisach consiste nel procurarsi una distribuzione di Preisach ad hoc per il materiale in esame. Nel capitolo 4 abbiamo visto come sia possibile ricavare tale distribuzione partendo da misurazioni effettuate in laboratorio. Ebbene per questo scopo sono state ricavate un numero di 41 curve di inversione del primo ordine su un provino di materiale ferromagnetico per registrazioni e quindi magneticamente molto duro (materiale utilizzato per gli Hard Disk).

Tali curve, sono state ricavate con un'apposita apparecchiatura, messa gentilmente a disposizione dal dipartimento di ingegneria elettrica di questo

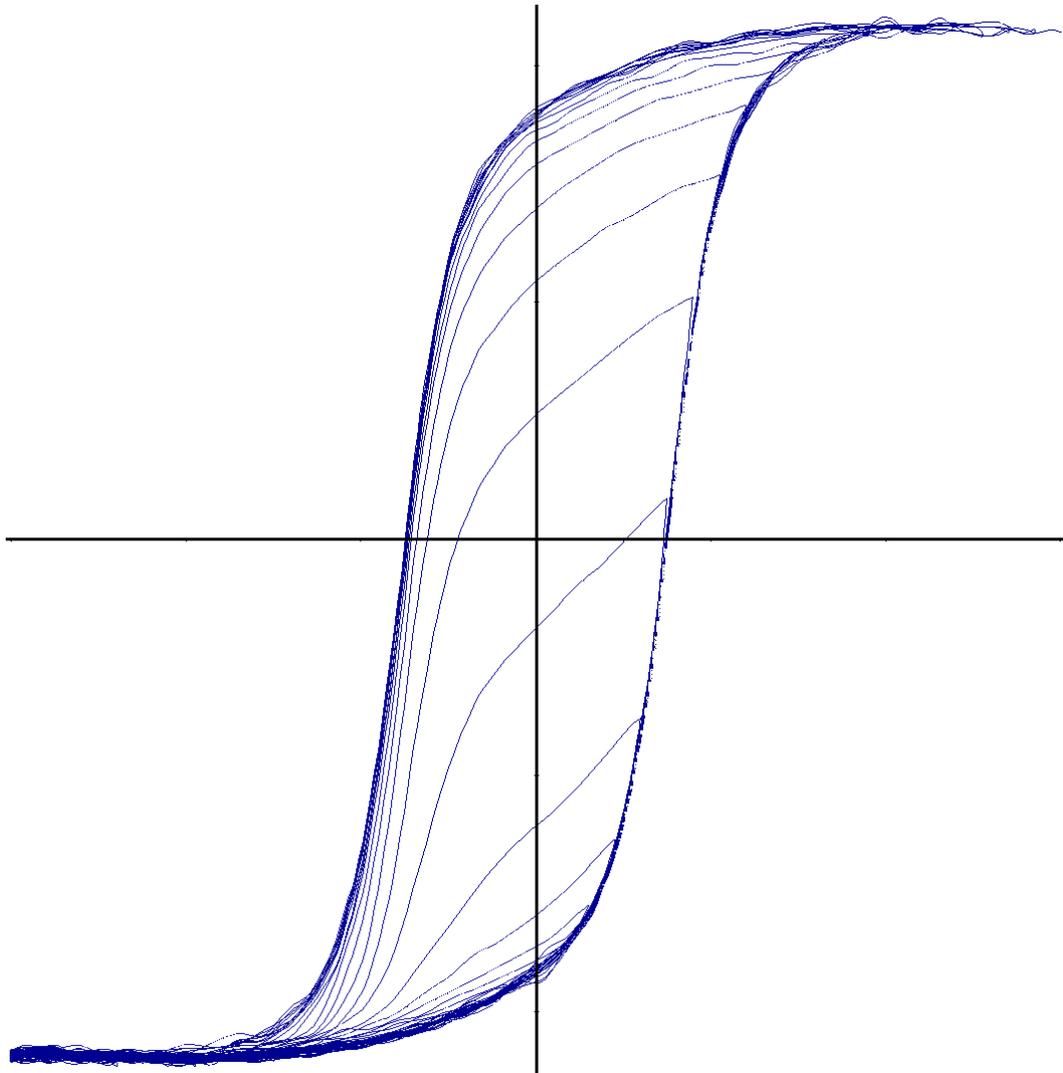
stesso ateneo. Tale dispositivo permette di effettuare misure su pezzi laminati di piccole dimensioni prima eccitati attraverso un circuito magnetico. In figura è rappresentata l'apparecchiatura utilizzata.

Tali strumenti sono stati utilizzati tramite un'interfaccia di rete che li collegava ad un PC dotato di un opportuno software pilota in grado di interagire con lo strumento.



dispositivo utilizzato per la determinazione sperimentale delle curve di inversione

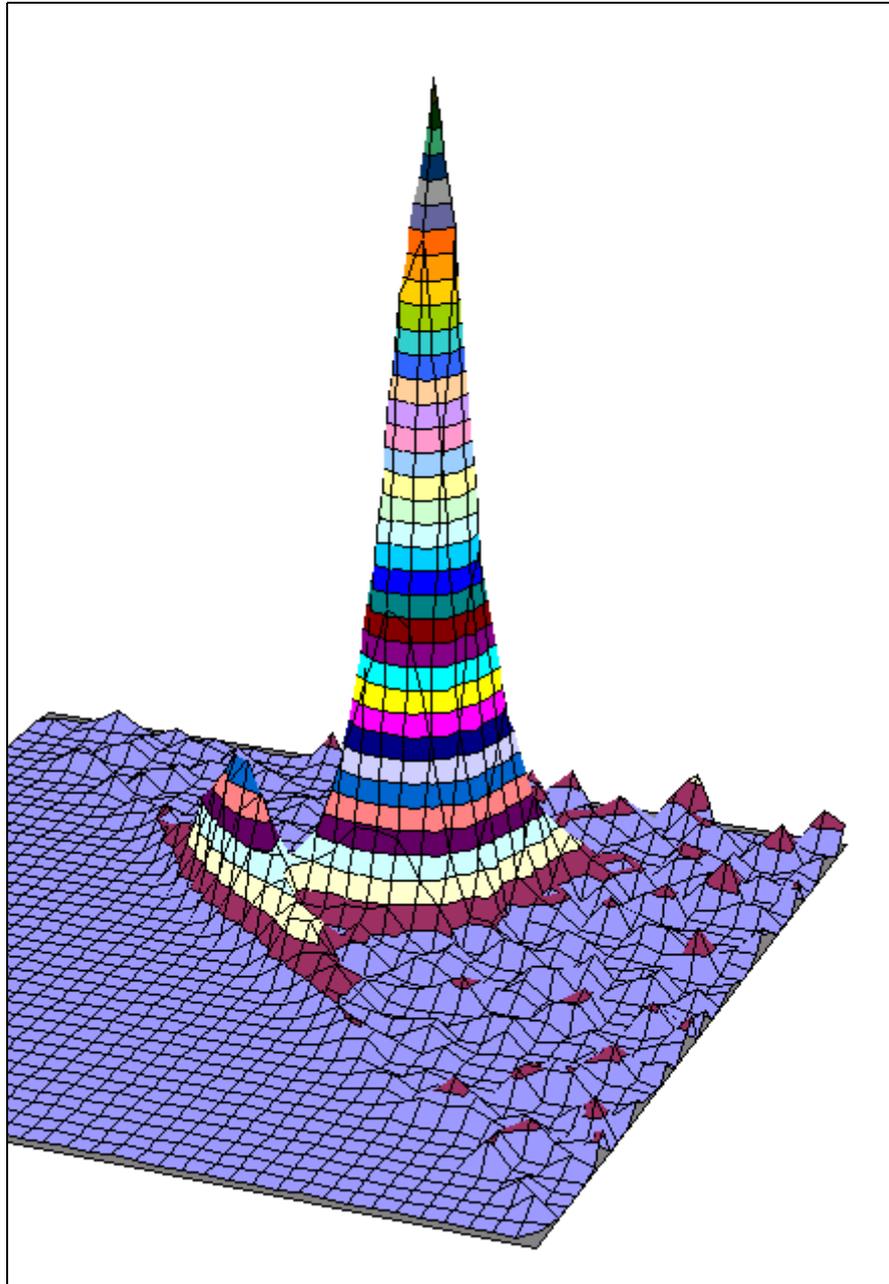
I dati ricavati sono rappresentati in figura. Le caratteristiche d'isteresi del provino, sono un forte campo coercitivo e una significativa magnetizzazione residua. Si nota inoltre una notevole velocità di saturazione del ciclo esterno.



curve di inversione del primo ordine di un materiale ferromagnetico duro a base di Cobalto

si nota la grande quantità di rumore, dovuto alle piccole dimensioni del pezzo testato. Da tali curve è stato possibile determinare la distribuzione di Preisach riportata nella seguente figura.

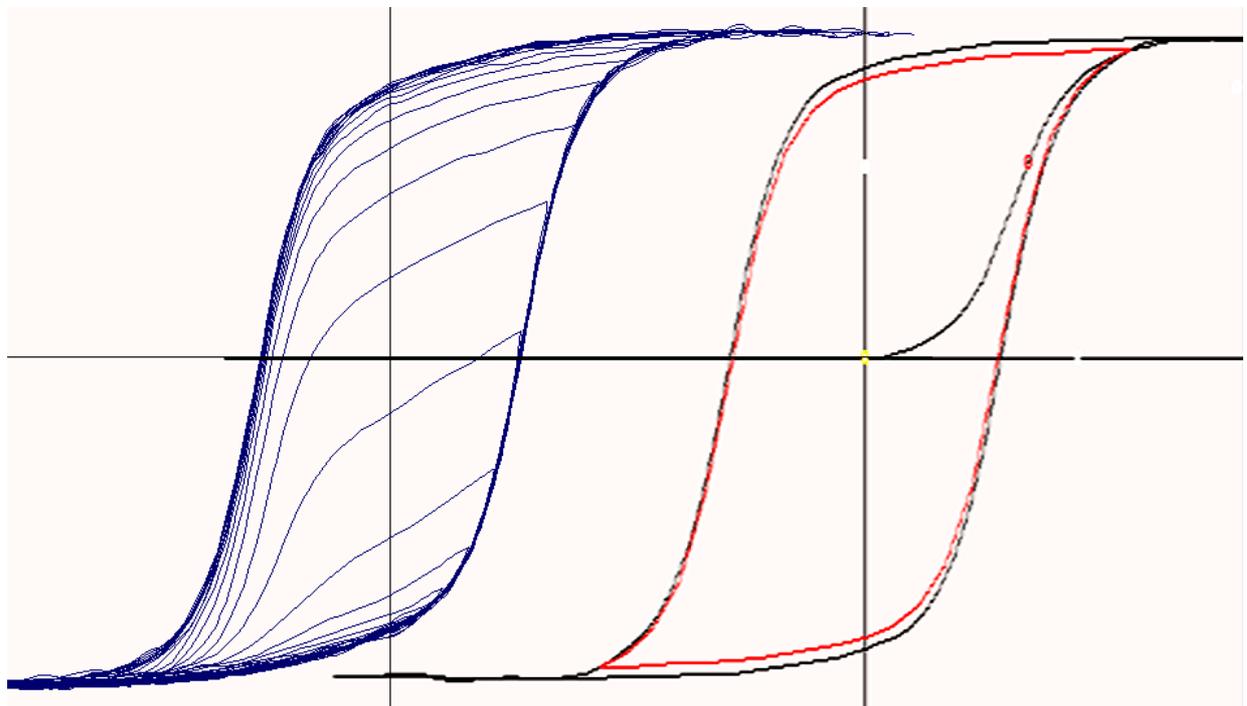
Tali dati, costituenti le n curve di inversione del primo ordine possono essere passati direttamente al programma con la funzione di acquisizione "acuire...". Il risultato della codifica della distribuzione di Preisach è riportato nella seguente figura.



distribuzione di Preisach dedotta dalle curve di inversione del primo ordine col procedimento sperimentale

si nota che tale distribuzione, contiene del rumore.

Ciononostante, si presta molto bene alla simulazione del materiale, fornendo il risultato seguente.



confronto fra il ciclo misurato (sinistra) e il ciclo simulato (destra)

le misure d'errore effettuate evidenziano un di scostamento massimo del ciclo simulato dal ciclo reale del 3.6 percento sul ciclo esterno.

A. LISTATO DEL PROGRAMMA

A.1 Il linguaggio di programmazione

Il codice è stato implementato sviluppato in Borland Imprise Delphi nella versione 5.0, in ambito Windows32. Il linguaggio è un OOP, object oriented pascal, e, oltre ad essere molto potente nella costruzione di interfacce ad alto impatto utente, si presta molto bene al trattamento di grosse mole di dati e all'elaborazione numerica. Un' ulteriore e fondamentale ragione che mi ha spinto a scegliere questo linguaggio è la leggibilità è interscambiabilità dei codici di natura Pascal, proverbialmente strutturati e intuitivi.

Il codice si struttura in procedure e funzioni di gestione dei vari eventi

visuali tipici dell'ambiente windows (bottoni, voci di menù ecc.). La struttura operativa, si articola sulla procedure HandleH che è il cuore del modello di Preisach dal punto di vista computazionale in quanto, è questo il modulo che si occupa della costruzione della cosiddetta boundary line. Un'altra funzione molto importante è quella del calcolo dell'integrale di Preisach, che nel codice viene implementata con un algoritmo che costruisce un normogramma dal quale poi attinge valori interpolati bilinearmente.

A.2 Listato del programma

Dichiarazioni e interfacciamento del codice.

```
unit uPreisach;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls, ExtCtrls, Grapher, Spin, ComCtrls, Math, Menus, Gauges;

Const Nmax=500;

type
  TForm1 = class(TForm)
    Panel1: TPanel;

    Grapher1: TGrapher;
    ScrollBar1: TScrollBar;
    Panel2: TPanel;
    sesc: TSpinEdit;
    Label2: TLabel;
    Timer1: TTimer;
    sehlp: TSpinEdit;
    Label3: TLabel;
    seK0: TSpinEdit;
    Label4: TLabel;
    StatusBar1: TStatusBar;
    T1: TScrollBar;
    T2: TScrollBar;
    Panel3: TPanel;
    Label5: TLabel;
    sesu: TSpinEdit;
    PaintBox2: TImage;
    BkGnd: TImage;
    PaintBox1: TPaintBox;
    OpenFileDialog2: TOpenDialog;
    MainMenu1: TMainMenu;
    Button1: TMenuItem;
    Button2: TMenuItem;
    Reset1: TMenuItem;
    Fit: TMenuItem;
    st: TMenuItem;
    sp: TMenuItem;
    Display1: TMenuItem;
    minor: TSpinEdit;
    Label6: TLabel;
    T3: TScrollBar;
    N1: TMenuItem;
    Accept1: TMenuItem;
    segs: TSpinEdit;
    Label1: TLabel;
    Button3: TButton;
    CheckBox1: TCheckBox;
    seil: TSpinEdit;
    Label7: TLabel;
    Bevel1: TBevel;
    PopupMenu1: TPopupMenu;
    SaveCycle1: TMenuItem;
    ShowHideTarget1: TMenuItem;
    SaveDialog1: TSaveDialog;
    OpenCycle1: TMenuItem;
    GroupBox1: TGroupBox;
    rbLorentzian: TRadioButton;
    rbGaussian: TRadioButton;
    rbLognormal: TRadioButton;
    rbExt: TRadioButton;
```

```

GroupBox2: TGroupBox;
Mag3: TRadioButton;
MeanW: TRadioButton;
Mean3: TRadioButton;
Gauge: TGauge;
Label8: TLabel;
errc: TLabel;
Timer2: TTimer;
Button4: TButton;
Save1: TMenuItem;
N2: TMenuItem;
N3: TMenuItem;
Import1: TMenuItem;
Export1: TMenuItem;
OpenDialog1: TOpenDialog;
SaveDialog2: TSaveDialog;
Hys: TPaintBox;
OpenDialog3: TOpenDialog;
Acquire1: TMenuItem;
OpenDialog4: TOpenDialog;
rbAcquire: TRadioButton;
procedure ScrollBar1Change(Sender: TObject);
procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure FormResize(Sender: TObject);
procedure sehChange(Sender: TObject);
procedure Timer1Timer(Sender: TObject);
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure sehlpChange(Sender: TObject);
procedure HysMouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
  Y: Integer);
procedure T1Change(Sender: TObject);
procedure FitClick(Sender: TObject);
procedure stClick(Sender: TObject);
procedure rbClick(Sender: TObject);
procedure spClick(Sender: TObject);
procedure Button2Click(Sender: TObject);
procedure Accept1Click(Sender: TObject);
procedure Button3Click(Sender: TObject);
procedure SaveCycle1lick(Sender: TObject);
Procedure resetH;
Procedure NewError(eMr,eHc:Double);
procedure Timer2Timer(Sender: TObject);
procedure Button4Click(Sender: TObject);
procedure OpenCycle(Sender: TObject);
procedure SaveCycle(Sender: TObject);
procedure rbExtClick(Sender: TObject);
procedure Acquire1Click(Sender: TObject);
private
Norm:Array[0..Nmax,0..Nmax] Of Real;
Hf:TDataSet;
bl,idhc,txl,ml:Array[Byte] Of Record x,y:Double End;
hl,xl:Array[Word] Of Record x,y:Double End;
blp,txlp:Byte;
hlp,maxhlp,MaxExt:Word;
H,M,hc,hu,sc,su,H0,K0,TMR,THC,TM2,RMR,RHC,MLS,Kmax,lsc,lsu:Double;
Drawn,Continue,ModelChanged:Boolean;
MTXL:Record x,y:Double End;
errs:String;
Counts:Word;
Halter>Welcome,Doable,Acquired:Boolean;
DLLName:String;
Procedure DrawGraphs;
Procedure EvalExternal(WDraw:Boolean;Sender:TObject);
Procedure HandleH;
Function fg(hc,hu:Double):Double;
Procedure LoadHys(FN:String);
Function PickNorm(hc,hu:Double):Real;
Function PickMap(hc,hu:Double):Real;
Procedure MakeNorm;
Function OpenDLL(s:String):Boolean;
{ Private declarations }
public

```

```

{ Public declarations }
fd:Array[Byte] Of Record x,y:Double End;
Map,Map_,Map0:Array[Byte,Byte] Of Real;
SmoothingFactor:Real;
Symmetrize,Positivize:Boolean;
nMap:Byte;
Procedure EvalPd;
end;
Tpd=Function(hc,hu,sc,su,H0:Double):Double;StdCall;
TInfo=Function:pChar;

var
Form1: TForm1;
pd:Tpd;
pdInfo,Hpsc,Hpsu,HpH0:TInfo;
HHandle:Integer;
HLoaded:Boolean;

```

Inizio implementazione

implementation

uses uResult, uWelcome, uOptions;

{ \$R *.DFM }

```

const R0=255;
      G0=255;
      B0=255;

```

Evento: Cambio del valore della corrente di avvolgimento

```

procedure TForm1.ScrollBar1Change(Sender: TObject);
begin
H:=-ScrollBar1.Position*H0*K0/100;

HandleH;
DrawGraphs;
end;

```

Gestione di un nuovo valore del campo magnetico

```

procedure TForm1.HandleH;
Var I,J:Integer;
    ri:Double;
begin
For I:=255 DownTo 1 Do Hf[I,0]:=Hf[I-1,0];
Hf[0,0]:=H;
bl[blp].x:=0;
bl[blp].y:=H;
Inc(blp);
If (bl[0].x<=Abs(H))Or(blp<2) Then
Begin
bl[0].x:=Abs(H);
bl[0].y:=0;
bl[1].x:=0;
bl[1].y:=H;
blp:=2;
End;
For J:=0 To blp-1 Do
Begin
If (bl[J].y)>(+H+bl[J].x) Then
Begin
bl[J].x:=(bl[J].x+bl[J].y-H)/2;
bl[J].y:=H+bl[J].x;
End;
If (bl[J].y)<(+H-bl[J].x) Then

```

```

Begin
  bl[J].x:=(bl[J].x-bl[J].y+H)/2;
  bl[J].y:=H-bl[J].x;
End;
End;
If blp>2 Then While (bl[blp-1].y-bl[blp-2].y)*(bl[blp-3].y-bl[blp-2].y)<1e-6 Do
Begin
  bl[blp-2]:=bl[blp-1];
  Dec(blp);
End;
M:=0;
For I:=0 To 100 Do
Begin
  J:=0;
  hc:=bl[0].x*I/100;
  idhc[I].x:=hc;
  While (hc<bl[J+1].x)And(J<(blp-2)) Do Inc(J);
  ri:=(bl[J].x-bl[J+1].x);
  If ri<>0 Then hu:=bl[J+1].y+(bl[J].y-bl[J+1].y)/ri*(hc-bl[J+1].x) Else hu:=bl[I+1].y;
  idhc[I].y:=PickNorm(hc,hu);
  M:=M+idhc[I].y*bl[0].x/100;
End;
hl[hlp].x:=H;
hl[hlp].y:=M;
Inc(hlp);
end;

```

Procedura di importazione cicli

```

Procedure TForm1.LoadHys(FN:String);
Var f:TextFile;
    s:String;
    n,Ta,Tb,Tc:Double;
    c_ :Integer;
Begin
  AssignFile(f,FN);
  {$I-}
  ReSet(f);
  {$I+}
  txlp:=0;
  MTXL.x:=0;
  MTXL.y:=0;
  If IOResult=0 Then
  Begin
    While Not EOF(f) Do
    Begin
      ReadLn(f,s);
      Val(s,n,c);
      c_:=Round(n);
      Val(Copy(s,1,c-1),n,c_);
      txl[txlp].x:=n;
      If n>MTXL.x Then MTXL.x:=n;
      Delete(s,1,c);
      Val(s,n,c);
      c_:=Round(n);
      Delete(s,1,c);
      Val(s,n,c);
      If c<>0 Then Val(Copy(s,1,c-1),n,c_);
      txl[txlp].y:=n;
      If n>MTXL.y Then MTXL.y:=n;
      Inc(txlp);
    End;
    For c:=0 To txlp-1 Do txl[c].x:=(txl[c].x-(txl[0].x+txl[txlp-1].x)/2);
    MTXL.x:=(MTXL.x-(txl[0].x+txl[txlp-1].x)/2);
    CloseFile(f);
    MeanW.Enabled:=True;
  End;
  st.Enabled:=True;
  st.Checked:=True;
  c:=0;
  Repeat Inc(c) Until (txl[c].x<0)Or(c>=txlp);

```

```

TMR:=(txl[c-1].y-(txl[c].y-txl[c-1].y))/(txl[c].x-txl[c-1].x)*(txl[c-1].x);
Repeat Inc(c) Until (txl[c].y<0)Or(c>=tblp);
THC:=(txl[c-1].x-(txl[c].x-txl[c-1].x))/(txl[c].y-txl[c-1].y)*(txl[c-1].y);
Repeat Inc(c) Until (txl[c].x<(THC-(Mtbl.x+THC)/2))Or(c>=tblp);
TM2:=(txl[c-1].y-(txl[c].y-txl[c-1].y))/(txl[c].x-txl[c-1].x)*(txl[c-1].x-(THC-(Mtbl.x+THC)/2));
Ta:=TMR/Mtbl.y;
Tb:=-THC/Mtbl.x;
Tc:=-TM2/Mtbl.y;
ResetH;
T1.Position:=Round(1000-Ta*1000);
T2.Position:=Round(1000-Tb*1000);
T3.Position:=Round(1000-Tc*1000);
T1Change(Form1);
End;

```

Inizializzazione stato

```

procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
begin
  errs:="";
  Welcome:=False;
  blp:=0;
  H0:=1;
  Maxhlp:=sehlp.Value;
  FormResize(Sender);
  ModelChanged:=True;
  Drawn:=False;
  Counts:=0;
  HLoaded:=False;
  DLLName:="";
end;

```

Evento: Aggiornamento del display

```

procedure TForm1.FormResize(Sender: TObject);
Var I:Integer;
begin
  Panel1.Height:=Height Div 2-15;
  Hys.Height:=Height Div 2-33;
  Hys.Width:=Width-58;
  paintbox2.Width:=Width Div 2-15-Panel3.Width Div 2;
  Grapher1.Width:=Width Div 2-15-Panel3.Width Div 2;
  PaintBox1.Top:=PaintBox2.Top;
  PaintBox1.Left:=PaintBox2.Left;
  PaintBox1.Width:=PaintBox2.Width;
  PaintBox1.Height:=PaintBox2.Height;
  EvalExternal(True,Sender);
  For I:=0 To maxhlp Do
  Begin
    hl[I].x:=0;
    hl[I].y:=0;
  End;
  For I:=0 To 100 Do
  Begin
    idhc[I].x:=0;
    idhc[I].y:=0;
  End;
  hlp:=0;
  H:=0;
  M:=0;
  blp:=0;
  ResetH;
  Hys.UpDate;
  DrawGraphs;
end;

```

Evento: Modifica dei parametri

```
procedure TForm1.sehChange(Sender: TObject);
begin
  Form1.Caption:='The Preisach Hysteresis Model';
  Drawn:=False;
end;
```

Procedura di calcolo dei cicli esterno e interno

```
procedure TForm1.EvalExternal(WDraw:Boolean;Sender:TObject);
Var I,J,N,Ws,Hs:Integer;
    C,R,G,B:Byte;
    x:Real;
begin
  K0:=seK0.Value/100;
  MaxExt:=Round(SeK0.Value*0.02)*10+20;
  If MaxExt>200 Then MaxExt:=200;
  If MaxExt<40 Then MaxExt:=40;
  N:=MaxExt Div 5;
  sc:=sesc.Value/100;
  su:=sesu.Value/100;
  MLS:=K0*minor.Value/100;
  blp:=0;
  H:=MLS;
  HandleH;
  ml[0].x:=H;
  ml[0].y:=M;
  For I:=1 To 20 Do
  Begin
    H:=MLS*(1-I/10);
    HandleH;
    ml[I].x:=H;
    ml[I].y:=M;
  End;
  For I:=1 To 20 Do
  Begin
    H:=MLS*(-1+I/10);
    HandleH;
    ml[20+I].x:=H;
    ml[20+I].y:=M;
  End;

  blp:=0;
  xl[0].x:=0;
  xl[0].y:=0;
  For I:=1 To N Do
  Begin
    H:=K0*H0*I/N;
    HandleH;
    xl[I].x:=H;
    xl[I].y:=M;
  End;
  For I:=1 To 2*N Do
  Begin
    H:=-K0*H0*(I/N-1);
    HandleH;
    xl[N+I].x:=H;
    xl[N+I].y:=M;
  End;
  For I:=1 To 2*N Do
  Begin
    H:=+K0*H0*(I/N-1);
    HandleH;
    xl[3*N+I].x:=H;
    xl[3*n+I].y:=M;
    If (xl[3*n+I].y>0)And(xl[3*n+I-1].y<0) Then
    Begin
```

```

RHC:=xl[3*n+I-1].x-xl[3*n+I-1].y*(xl[3*n+I].x-xl[3*n+I-1].x)/(xl[3*n+I].y-xl[3*n+I-1].y);
End;
End;
RMR:=xl[2*N].y;
If WDraw Then
Begin
BkGnd.Top:=paintbox2.Top;
BkGnd.Left:=paintbox2.Left;
BkGnd.Width:=paintbox2.Width;
BkGnd.Height:=paintbox2.Height;
Ws:=BkGnd.Width;
Hs:=BkGnd.Height;
BkGnd.Canvas.Brush.Color:=clBtnFace;
BkGnd.Canvas.Pen.Color:=clBtnFace;
BkGnd.Canvas.Rectangle(1,0,Ws,Hs*2);
Ws:=Hs;
For I:=0 To 150 Do For J:=-50 To 50 Do With BKGnd.Canvas Do
Begin
R:=ColorToRGB(clBtnFace) Mod 256;
G:=ColorToRGB(clBtnFace) shr 8 Mod 256;
B:=ColorToRGB(clBtnFace) shr 16 Mod 256;
x:=fg(I*K0/100,J*K0/50);
If x>=0 Then
Begin
C:=Round(510/Pi*ArcTan(50*x));
R:=R+Round(C/255*Integer(R0-R));
G:=G+Round(C/255*Integer(G0-G));
B:=B+Round(C/255*Integer(B0-B));
Pen.Color:=TColor(R+G shl 8+B shl 16);
End Else Pen.Color:=clTeal;
Brush.Color:=Pen.Color;
MoveTo(Ws Div 12+Round(Ws*I/120),Hs Div 2-Round(Hs*J/100));
Rectangle(PenPos.x,PenPos.y-2,PenPos.x+Ws Div 120+1,Penpos.y+3);
End;
PaintBox2.Picture.Bitmap.Assign(BkGnd.Picture.Bitmap);
End;
Doable:=(xl[maxext].y>1e-6);
If not Doable Then xl[maxext].y:=1;
Accept1.Enabled:=Doable;
Save1.Enabled:=Doable And Not Acquired;
Export1.Enabled:=Doable;
NewError(Abs(TMr-RMr/xl[Maxext].y),Abs(THc-RHc/K0));
ResetH;
end;

```

Funzione di calcolo del valore di $p(hc,hu)$

```

Function TForm1.fg(hc,hu:Double):Double;
Begin
Result:=0;
If rbGaussian.Checked Then Result:=Exp(-Sqr(hc-H0)/2/Sqr(sc*H0))*Exp(-Sqr(hu)/2/Sqr(su*H0))/(6*sc*su*Sqr(H0));
If hc>0 Then If rbLognormal.Checked Then Result:=Exp(-Sqr(Ln(hc/H0))/2/Sqr(sc))*Exp(-Sqr(hu)/2/Sqr(su*H0))/(6*sc*su*Sqr(H0));
If rbLorentzian.Checked Then Result:=1/(1+Sqr((hc+hu-H0)/(sc*H0)))/(1+Sqr((hc-hu-H0)/(sc*H0)))/(6*Sqr(sc*H0));
If rbExt.Checked Then Result:=pd(hc,hu,sc,su,K0);
If rbAcquire.Checked Then Result:=PickMap(hc,hu);
End;

```

Procedura di tracciamento dei grafici

```

procedure TForm1.DrawGraphs;
Var I,J,Ws,Hs,x0,y0:Integer;
R,G,B:Byte;
midhc:Double;
FoundFlex:Boolean;
Canv:TCanvas;

Procedure Line(x0,y0,x1,y1:Double);

```

```

Begin
Hs:=paintbox2.Height;
Ws:=Hs;
If sp.Checked Then Canv:=paintbox2.Canvas
  Else Canv:=paintbox1.Canvas;
With Canv Do
Begin
  MoveTo(Ws Div 12+Round(Ws*x0/K0*10/12),Hs Div 2-Round(Hs*y0/K0/2));
  LineTo(Ws Div 12+Round(Ws*x1/K0*10/12),Hs Div 2-Round(Hs*y1/K0/2));
End;
End;

begin
With Grapher1 Do
Begin
xmin:=0;
ymin:=-K0;
xMax:=1;
yMax:=K0;
yData:=1;
xData:=255;
DataSet:=Hf;
PaintGraph;
End;
If sp.Checked Then Canv:=paintbox2.Canvas
  Else Canv:=paintbox1.Canvas;
With Canv Do
Begin
pen.Color:=clBtnFace;
Rectangle(0,0,paintbox2.Width,paintbox2.Height);
pen.Color:=clBlack;
pen.Style:=psSolid;
Line(0,-K0,0,K0);
Line(0,0,K0,0);
pen.Color:=clGray;
pen.Style:=psDot;
Line(0,H,K0,H+K0);
Line(0,H,K0,H-K0);
pen.Color:=clRed;
pen.Style:=psSolid;
TextOut(paintbox2.Height-30,paintbox2.Height Div 2-6,'hc');
TextOut(15,15,'hu');
For I:=0 To blp-2 Do Line(bl[I].x,bl[I].y,bl[I+1].x,bl[I+1].y);
Line(bl[blp-1].x,bl[blp-1].y,0,H);
Line(K0,0,bl[0].x,0);
pen.color:=clBlue;
midhc:=0;
For I:=0 To 99 Do If Abs(idhc[I].y)>midhc Then midhc:=Abs(idhc[I].y);
midhc:=midhc/K0/0.9;
If midhc=0 Then midhc:=1;
For I:=0 To 99 Do Line(idhc[I].x,idhc[I].y/midhc,idhc[I+1].x,idhc[I+1].y/midhc);
End;
If Doable Then With Hys.Canvas Do
Begin
Ws:=Hys.Width;
Hs:=Hys.Height;
pen.Color:=clBlack;
Brush.Color:=clBtnFace;
Rectangle(0,0,Ws,Hs);
pen.Color:=clBlack;
MoveTo(Ws Div 2,0);
LineTo(Ws Div 2,Hs);
TextOut(Ws-12,Hs Div 2-15,'H');
MoveTo(0,Hs Div 2);
LineTo(ws,Hs Div 2);
TextOut(Ws Div 2+4,2,'M');
R:=ColorToRGB(clBtnFace) Mod 256;
G:=ColorToRGB(clBtnFace) shr 8 Mod 256;
B:=ColorToRGB(clBtnFace) shr 16 Mod 256;
If hlp>maxhlp Then hlp:=0;
J:=0;
Pen.Width:=3;

```

```

For I:=0 To maxhlp-1 Do
Begin
R:=R+Round(I/255*Integer(R0-R));
G:=G+Round(I/255*Integer(G0-G));
B:=B+Round(I/255*Integer(B0-B));
pen.Color:=TColor(R+G shl 8+B shl 16);
J:=(I+hlp)Mod(maxhlp);
If I=0 Then MoveTo(Ws Div 2+Round(Ws*0.4*hl[J].x/xl[MaxExt].x),Hs Div 2-Round(Hs*0.3*hl[J].y/xl[MaxExt].y))
Else LineTo(Ws Div 2+Round(Ws*0.4*hl[J].x/xl[MaxExt].x),Hs Div 2-Round(Hs*0.3*hl[J].y/xl[MaxExt].y));
End;
Pen.Width:=1;
FoundFlex:=False;
For I:=0 To MaxExt Do
Begin
Pen.Color:=clBlack;
If I=0 Then MoveTo(Ws Div 2+Round(Ws*0.4*xl[I].x/xl[MaxExt].x),Hs Div 2-Round(Hs*0.3*xl[I].y/xl[MaxExt].y))
Else LineTo(Ws Div 2+Round(Ws*0.4*xl[I].x/xl[MaxExt].x),Hs Div 2-Round(Hs*0.3*xl[I].y/xl[MaxExt].y));
If Not FoundFlex And (I<MaxExt Div 5) Then If ((xl[I].y-xl[I-1].y)>(xl[I+1].y-xl[I].y)) Then
Begin
FoundFlex:=True;
Pen.Color:=clRed;
Ellipse(penpos.x-3,penpos.y-3,penpos.x+4,penpos.y+4);
End;
End;
Pen.Color:=clYellow;
Ws:=Ws Div 2+Round(Ws*0.4*hl[J].x/xl[MaxExt].x);
Hs:=Hs Div 2-Round(Hs*0.3*hl[J].y/xl[MaxExt].y);
ellipse(Ws-3,Hs-3,Ws+4,Hs+4);
Pen.Color:=clRed;
Ws:=Hys.Width;
Hs:=Hys.Height;
Pen.Color:=clWhite;
MoveTo(Ws Div 2,Hs Div 2-Round(Hs*0.3*TMR));
Ellipse(PenPos.x-3,PenPos.y-3,PenPos.x+4,PenPos.y+4);
MoveTo(Ws Div 2+Round(Ws*0.4*THC),Hs Div 2);
Ellipse(PenPos.x-3,PenPos.y-3,PenPos.x+4,PenPos.y+4);
MoveTo(Ws Div 2+Round(Ws*0.2+Ws*0.2*THC),Hs Div 2-Round(Hs*0.3*TM2));
If Not rbLorentzian.Checked Then Ellipse(PenPos.x-3,PenPos.y-3,PenPos.x+4,PenPos.y+4);
Pen.Color:=clBlue;
If st.Checked Then
For I:=0 To 2*TXLP-1 Do
Begin
x0:=Round(Ws*0.4*tl[I Mod TXLP].x/MTXL.x*K0/xl[MaxExt].x);
y0:=Round(Hs*0.3*tl[I Mod TXLP].y/MTXL.y);
If I>=TXLP Then
Begin
x0:=-x0;
y0:=-y0;
End;
If I=0 Then MoveTo(Ws Div 2+x0,Hs Div 2-y0)
Else LineTo(Ws Div 2+x0,Hs Div 2-y0);
End;
Pen.Color:=clRed;
For I:=0 To 40 Do
Begin
x0:=Round(Ws*0.4*ml[I].x/xl[MaxExt].x);
y0:=Round(Hs*0.3*ml[I].y/xl[MaxExt].y);
If I=0 Then MoveTo(Ws Div 2+x0,Hs Div 2-y0)
Else LineTo(Ws Div 2+x0,Hs Div 2-y0);
End;
End;
end;

```

Evento: timer di controllo

```

procedure TForm1.Timer1Timer(Sender: TObject);
begin
If Not Welcome Then
Begin
Welcome:=True;

```

```

Form3.ShowModal;
Drawn:=False;
Timer1Timer(Sender);
End;
If Drawn Then Exit;
ScrollBar1.Position:=0;
EvalExternal(False,Sender);
FormResize(Sender);
T1Change(Sender);
HysMouseMove(Sender,[],Hys.Width Div 2,Hys.Height Div 2);
Drawn:=True;
end;

```

Procedura Reset dei parametri

```

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
  blp:=0;
  sesc.Value:=100;
  sesu.Value:=100;
  seK0.Value:=200;
  Drawn:=false;
end;

```

```

procedure TForm1.sehlpChange(Sender: TObject);
begin
  maxhlp:=sehlp.Value;
  FormResize(Sender);
end;

```

Evento: Movimento del Mouse sul ciclo d'isteresi (aggiornamento della status bar)

```

procedure TForm1.HysMouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
  Y: Integer);
Var s,s_:String;
    x0,y0:Double;
begin
  StatusBar1.SimpleText:=' Cycle not evaluable';
  If Not Doable Then Exit;
  x0:=(X-Hys.Width div 2)/Hys.Width/0.4*xl[MaxExt].x;
  y0:=(-Y+Hys.Height Div 2)/Hys.Height/0.3*xl[MaxExt].y;
  Str(x0/K0*100:2:1,s);
  Str(y0/xl[MaxExt].y*100:2:1,s_);
  s:=' H:'+s+' M:'+s_+'%';
  If y0/xl[MaxExt].y>1.05 Then s:="";
  Str(RHC/xl[MaxExt].x*100:0:1,s_);
  s:=s+' Hc:'+s_+'%';
  Str(RMR/xl[MaxExt].y*100:0:1,s_);
  s:=s+' Mr:'+s_+'%';
  Str(THC*100:2:1,s_);
  s:=s+' Target:(HC:'+s_);
  Str(TMR*100:2:1,s_);
  s:=s+'%,MR:'+s_+'%,';
  Str(TM2*100:2:1,s_);
  s:=s+'MII:'+s_+'%';

  If ml[0].y>1e-6 Then
  Begin
    Str(ml[10].y/ml[0].y*100:2:1,s_);
    s:=s+' Minor loop:(max error:'+s_+'%';
    Str(ml[0].y/ml[0].x/xl[maxext].y*K0:0:2,s_);
    s:=s+' Rel.Susc:'+s_+'');
  End;
  StatusBar1.SimpleText:=s;
end;

```

Evento: Posizionamento dei punti di fit

```
procedure TForm1.T1Change(Sender: TObject);
begin
  TMR:=(1000-T1.Position)/1000;
  THC:=(1000-T2.Position)/1000;
  TM2:=(1000-T3.Position)/1000;
  NewError(Abs(TMr-RMr/xl[Maxext].y),Abs(THc-RHc/K0));
  DrawGraphs;
  HysMouseMove(Sender,[],Hys.Width Div 2,Hys.Height Div 2);
end;
```

Evento: Show/Hide target

```
procedure TForm1.stClick(Sender: TObject);
begin
  st.Checked:=Not st.Checked;
  DrawGraphs;
end;
```

Evento: Cambio di modello di distribuzione

```
procedure TForm1.rbClick(Sender: TObject);
begin
  Fit.Enabled:=True;
  Acquired:=False;
  Label2.Visible:=True;
  Label2.Caption:='sigma c(% of 1)';
  Label4.Visible:=True;
  Label4.Caption:='H Sat (% of 1)';
  Label5.Visible:=Not rbLorentzian.Checked;
  Label5.Caption:='sigma u(% of 1)';
  sesc.Visible:=True;
  sesu.Visible:=Not rbLorentzian.Checked;
  seK0.Visible:=True;
  DLLName:='';
  ModelChanged:=True;
  sehchange(Sender);
  If sender<>nil Then
  If HLoaded Then
  Begin
    rbExt.Caption:='External DLL';
    FreeLibrary(HHandle);
    HLoaded:=False;
  End;
end;
```

Evento: Show/Hide Preisach Distribution

```
procedure TForm1.spClick(Sender: TObject);
begin
  sp.Checked:=Not sp.Checked;
  DrawGraphs;
end;
```

Evento: Impot Cycle...

```
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
  If OpenFileDialog1.Execute Then LoadHys(OpenDialog1.FileName);
  ResetH;
```

```

H:=0;
blp:=0;
HandleH;
ScrollBar1.Position:=0;
DrawGraphs;
end;

```

Procedura evento: Fit del ciclo

```

procedure TForm1.FitClick(Sender: TObject);
Var I,J,K,L,ToI,ToJ,gs:Integer;
    A,ds,e,e_,sco,suo,K0o,scp,sup,MS,MR,HCo,dh:Double;
    HH,MM,SS:Byte;
    s,s_:String;

```

```

Procedure CalculateCycle;
Begin
blp:=0;
H:=K0;
HandleH;
MS:=M;
H:=0;
HandleH;
MR:=M;
dh:=K0;
HCo:=0;
Repeat
dh:=dh/2;
If M>0 Then HCo:=HCo-dh
Else HCo:=HCo+dh;
blp:=0;
H:=K0;
HandleH;
H:=HCo;
HandleH;
Until (Abs(M/Ms)<1e-3)Or(dh<1e-4);
HCo:=-HCo/K0;
End;

```

```

begin
Counts:=0;
Button4.Show;
Halter:=False;
Gauge.Show;
errc.Caption:="";
e_:=10000;
gs:=segs.Value;
sco:=1;
suo:=1;
K0o:=1;
A:=30;
scp:=A*0.1111111;
sup:=scp;
If seil.Value<1 Then seil.Value:=1;
If seil.Value>6 Then seil.Value:=6;
For K:=0 To seil.Value-1 Do
Begin
A:=A/10;
ToI:=gs;
ToJ:=gs;
If not sesc.Visible Then ToI:=-ToI;
If not sesu.Visible Then ToJ:=-ToJ;
For I:=-gs To ToI Do For J:=-gs To ToJ Do If Not Halter Then
Begin
Gauge.Progress:=Round((J+gs+(I+gs)*(2*gs+1)+K*(Sqr(2*gs+1)))/(Seil.Value*Sqr(2*gs+1)-1)*100);
Gauge.update;
HH:=Counts Div 3600;
MM:=Counts Div 60-HH*60;
SS:=Counts Mod 60;

```

```

Str(HH:0,s_);
Str(MM:0,s);
s:=s_+'!'+s;
Str(SS:0,s_);
s:='Elapsed '+s+'!'+s_+' (Stop)';
Button4.Caption:=s;
sc:=scp+I/gs*A;
su:=sup+J/gs*A;
K0:=20;
ds:=K0;
CalculateCycle;
Repeat
  Application.ProcessMessages;
  ds:=ds/2;
  If HCo<THC Then K0:=K0-ds
    Else K0:=K0+ds;

  CalculateCycle;
Until (Abs(THC-HCo)<1e-3)Or(K0<1e-2)Or(ds<A/1000);
e:=0;
If MeanW.Checked Then
Begin
  For L:=0 To txlp-1 Do
  Begin
    H:=txl[L].x/Mtxl.x*K0;
    HandleH;
    e:=e+Abs(M-txl[L].y/Mtxl.y*Ms);
  End;
End Else
If Mean3.Checked Then e:=Abs(HCo-THC)+Abs(MR/MS-TMR)
  Else If Mag3.Checked Then e:=Sqr(HCo-THC)+Sqr(MR/MS-TMR);
If (Not rbLorentzian.Checked)And(Not MeanW.Checked) Then
Begin
  blp:=0;
  H:=K0;
  HandleH;
  H:=-K0+(K0-HCo*K0)/2;
  HandleH;
  If Mean3.Checked Then e:=e+Abs(M/MS+TM2)
    Else If Mag3.Checked Then e:=e+Sqr(M/MS+TM2);
End;
If e<e_ Then
Begin
  e_:=e;
  sco:=sc;
  suo:=su;
  K0o:=K0;
End;

If (CheckBox1.Checked)And Not Halter Then
Begin
  Continue:=False;
  sesc.Value:=Round(sc*100);
  sesu.Value:=Round(su*100);
  seK0.Value:=Round(K0*100);
  Str(e:0:4,s);
  Button3.Caption:='Continue:(err:'+s+')';
  Button3.Left:=CheckBox1.Left+16;
  Button3.Enabled:=true;
  Button3.Show;
  Drawn:=False;
  Repeat
    Application.ProcessMessages;
  Until Continue;
  Button3.Enabled:=False;
End;

End;
scp:=sco;
sup:=suo;

```

```

End;
Button3.Hide;
Button4.Hide;
Gauge.Hide;
seK0.Value:=Round(scp*100);
If not rbLorentzian.Checked Then sesu.Value:=Round(sup*100);
seK0.Value:=Round(K0o*100);
Drawn:=False;
end;

```

Funzione di prelevamento del valore dell'integrale di Preisach dal normogramma del sistema

```

function TForm1.PickNorm(hc, hu: Double): Real;
Var I0,J0:Integer;
    x,y,x0,x1,x2,x3:Real;
begin
If (K0<(Kmax/5))Or(K0>Kmax)Or(lsc<>sc)Or(lsu<>su)Or ModelChanged Then
Begin
Kmax:=K0;
lsc:=sc;
lsu:=su;
MakeNorm;
ModelChanged:=False;
End;
Result:=0;
If hu=0 Then Exit;
x:=hc/Kmax*Nmax;
y:=Abs(hu)/Kmax*Nmax;
I0:=Floor(x);
J0:=Floor(y);
x0:=(1-x+I0)*(1-y+J0);
x1:=(x-I0)*(1-y+J0);
x2:=(1-x+I0)*(y-J0);
x3:=(x-I0)*(y-J0);
x:=x0*Norm[I0,J0]+x1*Norm[I0+1,J0]+x2*Norm[I0,J0+1]+x3*Norm[I0+1,J0+1];
If hu>0 Then Result:=+x
Else Result:=-x;
end;

```

Procedura di costruzione del normogramma di sistema

```

procedure TForm1.MakeNorm;
Var I,J:Integer;
begin
For I:=0 To Nmax Do For J:=0 To Nmax-I Do
Begin
Norm[I,J]:=fg(I/NMax*Kmax,J/NMax*Kmax);
If J>0 Then Norm[I,J]:=Norm[I,J]+Norm[I,J-1];
End;
end;

```

Procedura evento Accept (Valutazione dei cicli interni)

```

procedure TForm1.Accept1Click(Sender: TObject);
Var I:Integer;
begin
ScrollBar1.Position:=0;
blp:=0;
H:=0;
HandleH;
For I:=0 To 255 Do
Begin
H:=I/255*K0;
HandleH;
end;

```

```

fd[I].x:=M/xl[maxext].y;
H:=0;
HandleH;
fd[I].y:=M/xl[maxext].y;
End;
Form2.ShowModal;
ResetH;
blp:=0;
H:=0;
HandleH;
DrawGraphs;
end;

```

Evento: debug fit continue

```

procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
begin
Continue:=True;
end;

```

Procedura Export cycle...

```

procedure TForm1.SaveCycle1lick(Sender: TObject);
Var f:TextFile;
    I:Integer;
begin
If SaveDialog1.Execute Then
Begin
AssignFile(f,SaveDialog1.FileName);
ReWrite(f);
For I:=0 To Round(MaxExt*0.4) Do
Begin
WriteLn(f,xl[I+MaxExt Div 5].x:0:3,' 1 ',xl[I+MaxExt Div 5].y:0:3);
End;
CloseFile(f);
End;
end;

```

Procedura cancella la storia di H

```

procedure TForm1.resetH;
Var I:Integer;
begin
For I:=0 To 255 Do Hf[I,0]:=0;
For I:=0 To maxhlp Do
Begin
hl[I].x:=0;
hl[I].y:=0;
End;
end;

```

Procedura di aggiornamento del display di fit error

```

procedure TForm1.NewError(eMr, eHc: Double);
Var s:String;
begin
Str(eMr*100:2:1,s);
errs:='Mr:'+s;
Str(eHc*100:2:1,s);
errs:=errs+'% Hc:'+s+'% ';
errc.Caption:=errs;
end;

```

Evento: Timer di controllo

```
procedure TForm1.Timer2Timer(Sender: TObject);
begin
  Inc(Counts);
end;
```

Evento: fit stop

```
procedure TForm1.Button4Click(Sender: TObject);
begin
  HALter:=True;
end;
```

Procedura evento: Open cycle...

```
procedure TForm1.OpenCycle(Sender: TObject);
Var f:TextFile;
    c:Integer;
    s:String;
Begin
  If OpenFileDialog2.Execute Then
  Begin
    AssignFile(f,OpenDialog2.FileName);
    {$I-}
    ReSet(f);
    {$I+}
    ReadLn(f,c);
    Case c Of
      0 : rbLorentzian.Checked:=True;
      1 : rbGaussian.Checked:=True;
      2 : rbLognormal.Checked:=True;
      3 : Begin ReadLn(f,DLLName);rbExt.Checked:=True; End;
    End;
    ReadLn(f,c);
    sesc.Value:=c;
    ReadLn(f,c);
    sesu.Value:=c;
    ReadLn(f,c);
    seK0.Value:=c;
    CloseFile(f);
    s:=OpenDialog2.FileName;
    While Pos('\',s)>0 Do Delete(s,1,Pos('\',s));
    Form1.Caption:='The Preisach Hysteresis Model - '+s;
    Reseth;
    H:=0;
    blp:=0;
    HandleH;
    ScrollBar1.Position:=0;
    DrawGraphs;
  End;
end;
```

Procedura evento: Sve cycle...

```
procedure TForm1.SaveCycle(Sender: TObject);
Var f:TextFile;
    s:String;
begin
  If SaveDialog2.Execute Then
  Begin
    AssignFile(f,SaveDialog2.FileName);
    {$I-}
    ReWrite(f);
```

```

{$I+}
If rbLorentzian.Checked Then WriteLn(f,'0');
If rbGaussian.Checked Then WriteLn(f,'1');
If rbLognormal.Checked Then WriteLn(f,'2');
If rbExt.Checked Then Begin WriteLn(f,'3');WriteLn(f,DLLName);End;
WriteLn(f,sesc.Value);
WriteLn(f,sesu.Value);
WriteLn(f,seK0.Value);
CloseFile(f);
s:=SaveDialog2.FileName;
While Pos('\',s)>0 Do Delete(s,1,Pos('\',s));
Form1.Caption:='The Preisach Hysteresis Model - '+s;
End;
end;

```

Evento: selezione di una DLL esterna per la distribuzione di Preisach.

```

procedure TForm1.rbExtClick(Sender: TObject);
begin
If HLoaded Then
Begin
HLoaded:=False;
FreeLibrary(HHandle);
End;
If DLLName<>" Then
Begin
If Not OpenDLL(DLLName) Then rbLorentzian.Checked:=True;
End
Else If Not (OpenDialog3.Execute)Or Not OpenDLL(OpenDialog3.FileName) Then rbLorentzian.Checked:=True;
Fit.Enabled:=sesu.Visible Or sesc.Visible Or seK0.Visible;
end;

```

Procedura di apertura di una DLL.

```

Function TForm1.OpenDLL(s:String):Boolean;
Var I:Integer;
    s_:Array [0..255] Of Char;
begin
Result:=False;
For I:=0 To Length(s)-1 Do s_[I]:=s[I+1];
s_[Length(s)]:=#0;
DLLName:=s;
HHandle:=LoadLibrary(@s_);
if HHandle<>0 then
begin
@pdInfo:=GetProcAddress(HHandle,'pdInfo');
@pd:=GetProcAddress(HHandle,'pd');
@Hpsc:=GetProcAddress(HHandle,'ParameterA');
@Hpsu:=GetProcAddress(HHandle,'ParameterB');
@HpH0:=GetProcAddress(HHandle,'ParameterC');
if @pd<>nil then
Begin
rbClick(nil);
Label2.Visible:=False;sesc.Visible:=False;
Label5.Visible:=False;sesu.Visible:=False;
Label4.Visible:=False;seK0.Visible:=False;
Result:=True;
s:='External DLL';
If @pdInfo<>nil Then s:=pdInfo;
rbExt.Caption:=s;
If @Hpsc<>nil Then
Begin
s:=Hpsc;
If s<>" Then
Begin
Label2.Caption:=s+' (% of 1)';
Label2.Visible:=True;
sesc.Visible:=True;

```

```

End;
End;
If @Hpsu<>nil Then
Begin
s:=Hpsu;
If s<>" Then
Begin
Label5.Caption:=s+' (% of 1)';
Label5.Visible:=True;
sesu.Visible:=True;
End;
End;
If @HpH0<>nil Then
Begin
s:=HpH0;
If s<>" Then
Begin
Label4.Caption:=s+' (% of 1)';
Label4.Visible:=True;
seK0.Visible:=True;
End;
End;
HLoaded:=True;
End;
end;
end;

```

Procedura evento: Acquisizione delle curve di inversione del primo ordine e costruzione della distribuzione di Preisach. Salvataggio della distribuzione nel file "acquired.txt"

```

procedure TForm1.Acquire1Click(Sender: TObject);
Var f:TextFile;
    Hsp,Msp,Hsp_,Msp_,Max:Real;
    I,J:Integer;

Procedure GetHM;
Var Code,Code_:Integer;
    s:String;
Begin
Hsp_:=Hsp;
Msp_:=Msp;
ReadLn(f,s);
Val(s,Hsp,Code);
Val(Copy(s,1,Code-1),Hsp,Code_);
Delete(s,1,Code);
Val(s,Msp,Code);
End;

begin
Max:=0;
nMap:=0;
If OpenFileDialog4.Execute Then
Begin
AssignFile(f,OpenDialog4.FileName);
Reset(f);
ReadLn(f,nMap);
For I:=0 To nMap Do For J:=0 To nMap Do Map[I,J]:=0;
Hsp:=0;
Msp:=0;
For I:=0 To nMap-1 Do
Begin
Repeat GetHM; Until Hsp<Hsp_;
For J:=I To nMap-1 Do
Begin
Map[I,J]:=Msp_-Msp;
If Map[I,J]>Max Then Max:=Map[I,J];

```

```

If (I>0) Then Map[I-1,J]:=Map[I-1,J]-Map[I,J];
GetHM;
If IOEResult<>0 Then
Begin
  CloseFile(f);
  Exit;
End;
End;
End;
CloseFile(f);
End;
If Max<1e-6 Then Exit;
For I:=0 To nMap-1 Do For J:=0 To nMap-1 Do Map[I,J]:=Map[I,J]/Max;
Map0:=Map;
OkBottomDlg.ShowModal;
Acquired:=True;
rbAcquire.Checked:=True;
Label2.Visible:=False;seSc.Visible:=False;
Label5.Visible:=False;sesu.Visible:=False;
Label4.Visible:=False;seK0.Visible:=False;
AssignFile(f,'Acquired.txt');
ReWrite(f);
For I:=0 To nMap-1 Do
Begin
  For J:=0 To nMap-1 Do Write(f,Map[I,J],#9);
  WriteLn(f);
End;
CloseFile(f);
rbExt.Caption:='External DLL';
Fit.Enabled:=False;
ModelChanged:=True;
sehchange(Sender);
end;

```

Funzione di prelievo della funzione di distribuzione dalla mappa acquisita.

```

function TForm1.PickMap(hc, hu: Double): Real;
Var x,y,x0,x1,x2,x3:Real;
    i,j:Integer;
begin
  hu:=hu+K0/nMap;
  x:=nMap/2*((-hu-hc)/K0+1);
  y:=nMap/2*((-hu+hc)/K0+1);
  i:=Floor(x);
  j:=Floor(y);
  x0:=(1-x+i)*(1-y+j);
  x1:=(x-i)*(1-y+j);
  x2:=(1-x+i)*(y-j);
  x3:=(x-i)*(y-j);
  If ((x>nMap)Or(y>nMap)Or(x<0)Or(y<0)) Then Result:=0
    Else Result:=x0*Map[i,j]+x1*Map[i+1,j]+x2*Map[i,j+1]+x3*Map[i+1,j+1];
end;

```

Procedura di calcolo della distribuzione dati i parametri, symmetrize, positivize e smoothing factor.

```

procedure TForm1.EvalPd;
Var I,J,I_,J_:Integer;
begin
  Map:=Map0;
  If Symmetrize Then
  For I:=0 To nMap-1 Do For J:=0 To nMap-1-I Do
  Begin
    Map[I,J]:=Map[I,J]+Map[nMap-1-J,nMap-1-I];
    Map[nMap-1-J,nMap-1-I]:=Map[I,J];
  End;
  If SmoothingFactor>0 Then
  Begin
    For I:=0 To nMap-1 Do For J:=0 To nMap-1 Do

```

```

Begin
  Map_[I,J]:=0;
  For I_=-3 To 3 Do For J_=-3 To 3 Do
    If ((I+I_)In[0..nMap])And((J+J_)In[0..nMap]) Then
      Map_[I,J]:=Map_[I,J]+Map[I+I_,J+J_]*Exp(-(Sqr(I_)+Sqr(J_))/smoothingfactor);
    End;
  Map:=Map_;
End;
If Positivize Then For I:=0 To nMap-1 Do For J:=0 To nMap-1 Do If Map[I,J]<0 Then Map[I,J]:=0;
end;

end.

```