

TESI DI LAUREA
IN
INGEGNERIA AEROSPAZIALE
INDIRIZZO SPAZIALE

**PROGETTO DI UN PROPULSORE AD EFFETTO HALL
SPERIMENTALE A BASSA POTENZA A PARAMETRI
VARIABILI**

Andreasebastian Daquino

Anno Accademico 2009-2010

T253





**Università degli Studi di Pisa
Facoltà di Ingegneria**

Tesi di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

**PROGETTO DI UN PROPULSORE AD EFFETTO HALL SPERIMENTALE
A BASSA POTENZA A PARAMETRI VARIABILI**

Candidato

Andresebastian Daquino

Relatori

Prof. M. Andrenucci

Ing. P. Rossetti

Ing. C. Ducci

Anno Accademico 2009-2010

A tutti coloro che, come me, non l'avrebbero mai detto

A mio nonno che avrebbe desiderato vedermi così

A me, che ce l'ho fatta!

St'omini vonnu sempa ma sannu

Hannu semp' e sapira i saperi

U ppecchi e tutti i misteri

SOMMARIO

Un approfondito lavoro di ricerca nel settore della propulsione elettrica condotto nell'ex Unione Sovietica, negli stati Uniti e, negli ultimi anni, anche in Europa, ha favorito l'impiego in campo spaziale dei propulsori ad effetto Hall soprattutto grazie all'introduzione di sistemi in grado di supportare la potenza elettrica necessaria alla loro alimentazione. Cresce inoltre l'interesse nei confronti di sistemi specializzati, come mini e micro satelliti, in grado di consentire notevoli risparmi in costi di lancio. Proprio la ricerca di propulsori adeguati alle dimensioni di tali satelliti apre nuove prospettive di studio verso un intervallo di potenze sino ad ora poco esplorato. Le ridotte geometrie di questi motori, sottoposti a intensi campi magnetici richiederanno necessariamente uno studio geometrico approfondito con l'adozione di particolari strategie tecnologiche che ne consentano lo smaltimento del calore.

Il seguente lavoro di tesi, sviluppato presso ALTA S.p.A., ha lo scopo di focalizzare l'attenzione sulle fasi di disegno, progettazione ed analisi mediante simulazioni agli elementi finiti, del comportamento di un propulsore ad effetto Hall sottoposto a variazioni di intensità della componente radiale del campo magnetico indotto nel traferro in un intervallo compreso tra $B_r = 10mT$ e $B_r = 80mT$.

La prima parte del lavoro riporta le leggi fondamentali che stanno alla base del funzionamento dei motori ad effetto Hall. Partendo poi da una geometria preliminare, ottimizzandone le simulazioni magnetiche, si cercherà di capire quali possano essere le modifiche geometriche e tecnologiche da apportare che ne consentano il raggiungimento di una configurazione magnetica ottimale. Ogni modello realizzato sarà comunque sottoposto ad analisi termica monitorando di volta in volta i valori massimi di temperatura raggiunti dai singoli componenti.

ABSTRACT

Electric Propulsion has been supported by experimental works done in the ex-USSR, USA and in the Europe thanks to development of space systems capable to provide enough energy for electric propulsion. Today the interest in small and micro satellites has strongly grown because they are cheap. These thrusters gives also the impulse to study devices of a new class of power not so much analysed until now. On the other hand these kind of Thrusters have particular heat dissipation problems caused by generation of a strong magnetic field in their compact device. These thermal problems will be only solved using an innovative configuration with technological improvements.

The present work investigates the design, the project and the analyses by numerical simulations of an Hall effect Thruster with magnetic field range between $B_r = 10mT$ and $B_r = 80mT$.

The first part of the thesis reminds fundamental laws concerning the Hall Thrusters. The first Thruster design is found on the base of initial requirements. The studies to research the optimal configurations is made between magnetic simulations after geometric changes. All Thruster designs is controlled by thermal analysis to check all elements temperatures after every magnetic simulation.

RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento particolare al Prof. Mariano Andrenucci per avermi concesso l'opportunità di svolgere presso ALTA una fantastica esperienza nell'ambito della ricerca in campo aerospaziale. Ringrazio l'Ing. Paola Rossetti per la sua disponibilità, l'Ing. Cosimo Ducci che con la sua pazienza e disponibilità ha saputo darmi preziosi consigli e l'Ing. Riccardo Albertoni per le numerose risposte alle mie altrettante domande. Desidero ringraziare inoltre tutti coloro che, seppur ignari, hanno contribuito al compimento di questo mio lungo cammino: la mia "Famiglia" che è sempre riuscita a sostenere la non poca onerosa vita universitaria e, nonostante la distanza, a farmi sentire a Casa; Michela, per essere entrata a far parte della mia Vita, per avermi capito, sostenuto e sopportato nei tanti momenti difficili; per avermi amato; Francesco, per essere diventato mio fratello ed aver incominciato con me questa meravigliosa esperienza; Manuel con cui ho condiviso momenti di gioia, studio ed ansia pre-esame; Ivo, Paolone, Gianne e tutti coloro i quali hanno trascorso con me giornate fatte di studio e relax. Marco, per avermi insegnato a vivere il mare; Ringhio, per aver apportato il giusto carico di distrazione nei momenti di svago. A tutti loro ed a tanti altri dico *grazie*, perché è anche un po' per loro se oggi sono *questo*.

INDICE

LISTA DELLE FIGURE

LISTA DELLE TABELLE

LISTA DEI SIMBOLI

1	INTRODUZIONE.....	1
1.1	Introduzione.....	1
1.2	Cenni storici e generalità.....	1
1.3	Propulsione spaziale: generalità.....	4
1.4	La propulsione elettrica.....	10
1.5	I propulsori ad effetto Hall.....	12
2	TEORIA DEL FUNZIONAMENTO DI UN MOTORE AD EFFETTO HALL.....	19
2.1	Introduzione.....	19
2.2	Particelle cariche in campi elettromagnetici.....	19
2.2.1	Moto di una particella in un campo elettrico uniforme: $B = 0$	20
2.2.2	Moto di una particella in un campo magnetico uniforme: $E = 0$	20
2.2.3	Moto di una particella in campi uniformi: $E \neq 0, B \neq 0$	22
2.3	Descrizione del propulsore ad effetto Hall.....	25
2.4	Influenza del campo magnetico.....	27
2.5	Processo di ionizzazione.....	28
2.6	Conduzione verso le pareti della camera.....	30
2.7	Influenza della parete della camera di accelerazione.....	31
2.8	Parametri di prestazione di un motore ad effetto Hall.....	33
2.9	Obiettivi e motivazioni della tesi.....	35
3	RICHIAMI DI ELETTOMAGNETISMO.....	39
3.1	Introduzione.....	39
3.2	Le equazioni di Maxwell.....	39

3.2.1	Legge di Gauss.....	41
3.2.2	Legge sull'assenza dei monopoli magnetici.....	42
3.2.3	Legge di Faraday.....	42
3.2.4	Legge di Ampere.....	43
3.3	Potenziale elettrico scalare e potenziale magnetico vettoriale.....	44
3.4	Interazione dei campi elettromagnetici con la materia.....	46
3.4.1	La polarizzazione elettrica.....	46
3.4.2	La magnetizzazione.....	47
3.5	Condizioni al contorno di B ed H.....	48
3.6	Diamagnetismo e paramagnetismo per materiali isotropi.....	49
3.7	Ferromagnetismo.....	50
3.8	Isteresi magnetica.....	52
3.9	Energia di campo magnetico.....	54
3.9.1	Ciclo di isteresi nei materiali ferromagnetici dolci	56
3.9.1	Ciclo di isteresi nei materiali ferromagnetici duri.....	56
3.10	Fattori che influenzano la qualità magnetica dei materiali.....	57
4	CIRCUITO MAGNETICO NEI MOTORI AD EFFETTO HALL.....	59
4.1	Introduzione.....	59
4.2	Panoramica storica.....	59
4.2.1	Il potenziale termalizzato ed influenza del gradiente assiale di B_r	60
4.3	Requisiti dei materiali del circuito magnetico.....	62
4.4	Requisiti del campo magnetico indotto.....	64
4.5	Il circuito magnetico.....	65
4.5.1	Circuito magnetico con magneti permanenti.....	67
5	Analisi magnetica preliminare.....	71
5.1	Introduzione.....	71
5.2	Fase di scelta della configurazione preliminare.....	71
5.2.1	Ipotesi e vincoli.....	73
5.2.2	Analisi preliminari.....	74
5.2.2.1	Generazione del campo.....	74
5.2.2.2	Scelta del cavo da utilizzare.....	75
5.2.2.3	Schematizzazione avvolgimenti.....	76
5.2.2.4	Caratteristiche dei materiali.....	76
5.3	Analisi magnetica.....	78
5.3.1	Condizioni al contorno.....	79

5.3.2	Assialsimmetria.....	80
5.3.3	Ipotesi per la simulazione con FEMM.....	81
5.4	Risultati analisi magnetica.....	81
5.4.1	Geometria di prima approssimazione.....	82
5.4.1.1	Risultati simulazione magnetica.....	84
5.5	Prova con magneti permanente.....	86

6 ANALISI TERMICA PRELIMINARE.....89

6.1	Introduzione.....	89
6.2	Problemi termici dei motori ad effetto Hall.....	89
6.3	Cenni di trasmissione del calore.....	92
6.4	Disegno CAD del motore.....	93
6.4.1	Configurazione semplificata.....	93
6.4.2	Disegno, materiali e caratteristiche.....	94
6.4.2.1	Complessivo.....	94
6.4.2.2	Base, poli ed espansioni polari.....	95
6.4.2.3	Schermi magnetici.....	95
6.4.2.4	Canale di accelerazione.....	95
6.4.2.5	Supporto ceramica.....	96
6.5	Analisi termica.....	96
6.5.1	Import geometria e definizione mesh	96
6.5.2	Condizioni iniziali.....	97
6.5.3	Carichi applicati.....	98
6.5.4	Definizione delle superfici radianti.....	99
6.5.5	Condizioni al contorno.....	103
6.6	Risultati.....	105
6.6.1	Schermo termico (o di radiazione).....	105

7 GEOMETRIA QUASI DEFINITIVA.....109

7.1	Introduzione.....	109
7.2	Accorgimenti geometrici.....	109
7.2.1	Elementi costruttivi e vincoli geometrici.....	110
7.3	Risultati simulazione magnetica.....	111
7.3.1	Analisi e confronto con bobine reali.....	115
7.4	Disegno CAD del motore	118
7.4.1	Complessivo.....	118
7.4.2	Canale di accelerazione.....	119
7.5	Risultati analisi termica.....	120

8	GEOMETRIA FINALE	123
8.1	Introduzione.....	123
8.2	Rielaborazione obiettivo	123
8.3	Analisi magnetica.....	125
8.3.1	Canale da 10mm.....	125
8.3.1.1	Carichi applicati.....	126
8.3.1.2	Risultati analisi magnetica.....	127
8.3.1.3	Confronto risultati in Comsol Multiphysics.....	128
8.3.2	Canale da 5.5mm.....	130
8.3.2.1	Carichi applicati.....	130
8.3.2.2	Risultati analisi magnetica.....	133
8.3.2.3	Confronto risultati in Comsol Multiphysics.....	135
8.4	Distribuzione di permeabilità relativa.....	136
8.5	Disegno CAD del motore	139
8.5.1	Disegno materiali e caratteristiche.....	139
8.5.2	Complessivo e componenti.....	140
8.5.4	Base.....	141
8.5.4	Canale di accelerazione.....	141
8.5.5	Supporto ceramica.....	142
8.5.6	Schermi magnetici ed espansioni polari.....	142
8.5.7	Schermo termico (o di radiazione).....	143
8.5.8	Anodo.....	143
8.5.9	Vincoli geometrici.....	144
8.6	Analisi termica.....	146
8.6.1	Import geometria e definizione mesh.....	146
8.6.2	Condizioni iniziali.....	147
8.6.3	Applicazione dei carichi.....	148
8.6.4	Definizione delle superfici radianti.....	149
8.6.5	Sistema di riferimento.....	156
8.6.6	Sistema di comando.....	156
8.6.7	Condizioni al contorno.....	157
8.7	Risultati analisi termica per il canale da 10mm.....	160
8.8	Risultati analisi termica per il canale da 5.5mm.....	162
8.9	Conclusioni.....	163
9	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	165

BIBLIOGRAFIA.....	167
--------------------------	------------

APPENDICI

A	INTERVALLO DI VARIAZIONE DEL CAMPO MAGNETICO INDOTTO NEL TRAFERRO.....	171
A.1	Soluzioni per il canale da 10mm.....	171
	A1.1 Campo da 80mT nel traferro.....	172
	A1.2 Campo da 70mT nel traferro.....	173
	A1.3 Campo da 60mT nel traferro.....	174
	A1.4 Campo da 50mT nel traferro.....	175
	A1.5 Campo da 40mT nel traferro.....	176
	A1.6 Campo da 30mT nel traferro.....	177
	A1.7 Campo da 20mT nel traferro.....	178
	A1.8 Campo da 10mT nel traferro.....	179
	A1.9 Analisi complessiva dei risultati ottenuti.....	180
A.2	Soluzioni per il canale da 5.5mm.....	181
	A2.1 Campo da 80mT nel traferro.....	181
	A2.2 Campo da 70mT nel traferro.....	182
	A2.3 Campo da 60mT nel traferro.....	183
	A2.4 Campo da 50mT nel traferro.....	184
	A2.5 Campo da 40mT nel traferro.....	185
	A2.6 Campo da 30mT nel traferro.....	186
	A2.7 Campo da 20mT nel traferro.....	187
	A2.8 Campo da 10mT nel traferro.....	188
	A2.9 Analisi complessiva dei risultati ottenuti.....	189
B	STUDIO SULLE ESPANSIONI POLARI.....	190
B.1	Prove per il canale da 5.5mm.....	190

ALLEGATI

LISTA DELLE FIGURE

Capitolo 1

Figura 1.1 - SPT e TAL a confronto. Si noti come il canale di accelerazione nei TAL sia più corto. Ciò comporta che parte dei processi di ionizzazione e accelerazione avvengano fuori dal motore tra i due elettrodi.....	2
Figura 1.2: Determinazione dell'impulso specifico ottimo per un propulsore elettrico.....	10
Figura 1.3: Schema motore ad effetto Hall	14
Figura 1.4: Schema motore ad effetto Hall	16
Figura 1.5a: Andamento del potenziale in un motore ad effetto Hall	17
Figura 1.5b: Campo elettrico auto-consistente in un motore ad effetto Hall	17
Figura 1.6: Propulsori HT-100 in prova nel laboratorio IV-4.....	18
Figura 1.7: A sinistra: (sparo) test di un propulsore da 5kW di Alta; A destra: propulsore in fase di montaggio in IV-4 ad Alta.....	18

Capitolo 2

Figura 2.1: Raggio di Larmor e velocità di deriva definita per particelle di carica negativa e positiva.....	24
Figura 2.2: Schema di funzionamento di un motore ad effetto Hall.....	25
Figura 2.3: Ionizzazione per unità di area dello Xe in Xe^+ e Xe^{++} per impatto con un elettrone.....	29
Figura 2.4: Struttura dello sheath della parete.....	31
Figura 2.5: Tipica struttura della curva di produzione degli elettroni secondari.....	32

Capitolo 3

Figura 3.1: Domini di Weiss prima e dopo l'allineamento con il campo magnetico esterno.....	50
Figura 3.2: Curva di magnetizzazione e della permeabilità relativa del ferro dolce ricotto, con ridotta percentuale di impurità.....	51
Figura 3.3: M - H di un ciclo "maggior" di isteresi di un materiale ferromagnetico.....	55
Figura 3.4: andamento B - H di un ciclo di isteresi di un materiale ferromagnetico.....	54
Figura 3.5: Curva di demagnetizzazione nel secondo quadrante.....	54
Figura 3.6: ciclo di isteresi per materiali ferromagnetici dolci.....	56
Figura 3.7: ciclo di isteresi per materiali ferromagnetici duri.....	56
Figura 3.8: Curve B-H dell'acciaio al C alle varie temperature.....	57
Figura 3.9: Permeabilità relativa del ferro dolce al variare della temperatura.....	58

Capitolo 4

Figura 4.1: Campo magnetico radiale e potenziale assiale.....	61
Figura 4.2: caratteristiche di magnetizzazione di alcuni materiali dolci.....	63
Figura 4.3 : effetto sulle linee di forza del campo magnetico in cui ci sia immerso un materiale diamagnetico(a), paramagnetico(b) o ferromagnetico(c).....	65.
Figura 4.4 : circuito elementare equivalente.....	66
Figura 4.5 : circuito elementare equivalente con traferro.....	67
Figura 4.6: punto di lavoro del ferromagnete.....	68
Figura 4.7: rotazione della retta di lavoro.....	68
Figura 4.8: calcolo del campo magnetico in un magnete permanente.....	70

Capitolo 5

Figura 5.1: procedura simulazioni.....	72
Figura 5.2: Curva B-H steel1010.....	77
Figura 5.3: Rappresentazione su Excel della curva B-H steel1010.....	77
Figura 5.4: Permeabilità relativa μ_r , steel1010.....	78
Figura 5.5: Procedura di analisi magnetica sistematica.....	79
Figura 5.6: geometria di prima approssimazione con Femm4.2.....	82
Figura 5.7: dominio e mesh.....	83
Figura 5.8: risultato simulazione magnetostatica con FEMM4.2 per la “configurazione semplificata”.....	84
Figura 5.9:: particolare della zona del traferro.....	84
Figura 5.10: Andamento della componente radiale del campo di induzione magnetica B dall'interno del canale fino alla sezione d'uscita per la “configurazione semplificata”.....	85
Figura 5.11: Andamento del gradiente della componente radiale del campo di induzione magnetica B dall'interno del canale fino alla sezione d'uscita per la “configurazione semplificata”.....	85
Figura 5.12: Circuito magnetico di prova con magnete permanente.....	87
Figura 5.13: Risultati analisi magnetica per il circuito magnetico di prova con magnete permanente.....	87
Figura 5.14: Andamento della componente radiale del campo di induzione magnetica B dall'interno del canale fino alla sezione d'uscita con magnete permanente.....	88

Capitolo 6

Figura 6.1: procedura simulazioni.....	91
Figura 6.2: Vista isometrica geometria preliminare.....	94
Figura 6.3: Vista in sezione geometria preliminare.....	95
Figura 6.4: vista geometria importata in Ansys	96
Figura 6.5: struttura mesh geometria preliminare.....	97

Figura 6.6: Rappresentazione grafica per l'applicazione della condizione al contorno di irraggiamento all'ambiente per l'elemento "base poli ed espansioni polari"	104
Figura 6.7: Rappresentazione grafica per l'applicazione della condizione al contorno di irraggiamento all'ambiente per l'elemento "ceramica"	104
Figura 6.8: Vista in sezione della rappresentazione grafica del campo di temperature per la soluzione del problema sottoposto a flusso termico nel canale e a calore generato negli avvolgimenti.....	105
Figura 6.9: Vista in sezione della rappresentazione grafica del campo di temperature per la soluzione del problema sottoposto a flusso termico nel canale e a calore generato negli avvolgimenti in presenza dello schermo termico.....	106
Figura 6.10: Particolare della vista in sezione della rappresentazione grafica del flusso di calore totale per la soluzione del problema sottoposto a flusso termico nel canale e a calore generato negli avvolgimenti.....	107

Capitolo 7

Figura 7.1 : configurazione quasi definitiva su Femm4.2.....	109
Figura 7.2: risultato simulazione magnetostatica con FEMM4.2.....	110
Figura 7.3:: particolare della zona del traferro ad 80mT.....	111
Figura 7.4: Andamento della componente radiale del campo di induzione magnetica B dall'interno del canale fino alla sezione d'uscita.....	111
Figura 7.5: Andamento del gradiente della componente radiale del campo di induzione magnetica B dall'interno del canale fino alla sezione d'uscita.....	112
Figura 7.6: Confronto tra gli andamenti della componente radiale del campo di induzione magnetica B dall'interno del canale fino alla sezione d'uscita per le due configurazioni...113	113
Figura 7.7: Confronto tra gli andamenti del gradiente della componente radiale del campo di induzione magnetica B dall'interno del canale fino alla sezione d'uscita per le due configurazioni.....	113
Figura 7.8: Flusso specifico di B per la configurazione quasi definitiva.....	114
Figura 7.9: geometria avvolgimenti reali su Femm4.2.....	115
Figura 7.10: particolare della zona del traferro.....	116
Figura 7.11: confronto tra gli andamenti della componente radiale del campo di induzione magnetica B dall'interno del canale fino alla sezione d'uscita.....	116
Figura 7.12: confronto tra gli andamenti del gradiente della componente radiale del campo di induzione magnetica B dall'interno del canale fino alla sezione d'uscita.....	117
Figura 7.13: Viste motore complessivo.....	118
Figura 7.14: Viste canale di accelerazione.....	119
Figura 7.15a: Vista frontale della rappresentazione grafica per la soluzione del campo di temperature del problema sottoposto a flusso termico nel canale e a calore generato negli avvolgimenti.....	120
Figura 7.15b: Vista posteriore della rappresentazione grafica per la soluzione del campo di temperature del problema sottoposto a flusso termico nel canale e a calore generato negli avvolgimenti.....	120

Figura 7.15c: Vista in sezione della rappresentazione grafica del campo di temperature per la soluzione del problema sottoposto a flusso termico nel canale e a calore generato negli avvolgimenti.....120

Capitolo 8

Figura 8.1: procedura simulazioni.....	122
Figura 8.2: Geometria con canale da 10mm rielaborata con FEMM4.2.....	123
Figura 8.3: Geometria e mesh con infittimento nelle regioni d'interesse.....	124
Figura 8.4: Risultati simulazione magnetica con FEMM4.2 per il canale da 10mm.....	125
Figura 8.5: Particolare della zona del traferro.....	126
Figura 8.6: Andamento della componente radiale del campo di induzione magnetica B dall'interno del canale fino alla sezione d'uscita.....	126
Figura 8.7: Andamento del gradiente della componente radiale del campo di induzione magnetica B dall'interno del canale fino alla sezione d'uscita.....	127
Figura 8.8: Confronto tra gli andamenti della componente radiale del campo di induzione magnetica B dall'interno del canale fino alla sezione d'uscita per le due configurazioni...127	127
Figura 8.9: Risultati simulazione magnetica con Comsol Multiphysics 3.5 per il canale da 10mm	128
Figura 8.10: Confronto tra gli andamenti della componente radiale del campo di induzione magnetica B dall'interno del canale fino alla sezione d'uscita in uscita da Femm4.2 e Comsol Multiphysics 3.5 per il canale da 10mm.....	129
Figura 8.11: Geometria con canale da 5.5mm rielaborata con FEMM4.2.....	130
Figura 8.12: Risultati analisi magnetica con FEMM4.2 per il canale da 5.5mm.....	131
Figura 8.13: Particolare della zona del traferro.....	131
Figura 8.14: Andamento della componente radiale del campo di induzione magnetica B dall'interno del canale fino alla sezione d'uscita.....	132
Figura 8.15: Andamento del gradiente della componente radiale del campo di induzione magnetica B dall'interno del canale fino alla sezione d'uscita.....	132
Figura 8.16: Risultati simulazione magnetica con Comsol Multiphysics 3.5 per il canale da 5.5mm.....	133
Figura 8.17: Confronto tra gli andamenti della componente radiale del campo di induzione magnetica B dall'interno del canale fino alla sezione d'uscita in uscita da Femm4.2 e Comsol Multiphysics 3.5 per il canale da 5.5mm.....	134
Figura 8.18: Flusso specifico di B sulla sezione del motore con canale da 10mm.....	135
Figura 8.19: distribuzione di permeabilità relativa sulla sezione del motore con canale da 10mm.....	135
Figura 8.20: Flusso specifico di B sulla sezione del motore con canale da 5.5mm.....	136
Figura 8.21: distribuzione di permeabilità relativa sulla sezione del motore con canale da 5.5mm.....	137
Figura 8.22a: Viste motore complessivo canale da 10mm.....	138
Figura 8.22b: Viste motore complessivo canale da 5.5mm.....	138
Figura 8.23: particolare anodo del motore HT-100C fornito da ALTA.....	142
Figura 8.24: vista isometrica e sistema di riferimento.....	144

Figura 8.25: struttura mesh del motore con canale da 10mm.....	145
Figura 8.26: Rappresentazione grafica per l'applicazione della condizione al contorno di irraggiamento all'ambiente per l'elemento "espansione polare esterna".....	156
Figura 8.27a: Rappresentazione grafica per l'applicazione della condizione al contorno di irraggiamento all'ambiente per l'elemento "ceramica".....	156
Figura 8.27b: Rappresentazione grafica per l'applicazione della condizione al contorno di irraggiamento all'ambiente per l'elemento "ceramica".....	157
Figura 8.28: Rappresentazione grafica per l'applicazione della condizione al contorno di irraggiamento all'ambiente per l'elemento "base".....	157
Figura 8.29a: Vista frontale della rappresentazione grafica per la soluzione del campo di temperature del problema sottoposto a flusso termico nel canale da 10mm e a calore generato negli avvolgimenti.....	158
Figura 8.29b: Vista posteriore della rappresentazione grafica per la soluzione del campo di temperature del problema sottoposto a flusso termico nel canale da 10mm e a calore generato negli avvolgimenti.....	158
Figura 8.29c: Vista in sezione della rappresentazione grafica del campo di temperature per la soluzione del problema sottoposto a flusso termico nel canale da 10mm e a calore generato negli avvolgimenti.....	159
Figura 8.29d: Vista in sezione della rappresentazione grafica del campo di temperature per la soluzione del problema sottoposto solo a calore generato negli avvolgimenti.....	159
Figura 8.30a: Vista in sezione della rappresentazione grafica del campo di temperature per la soluzione del problema sottoposto a flusso termico nel canale da 5.5mm e a calore generato negli avvolgimenti.....	160
Figura 8.30b: Vista in sezione della rappresentazione grafica del campo di temperature per la soluzione del problema sottoposto solo a calore generato negli avvolgimenti.....	161

LISTA DELLE TABELLE

Capitolo 1

Tabella 1.1: <i>Prestazioni tipiche di alcuni sistemi di propulsione</i>	5
Tabella 1.2 : <i>Caratteristiche tipiche dei propulsori elettrici</i>	6
Tabella 1.3 : <i>Valori dell'incremento di velocità per alcune missioni tipiche</i>	8

Capitolo 2

Tabella 2.1: <i>Dati sull'emissione secondaria di elettroni per vari materiali</i>	32
---	----

Capitolo 3

Tab. 3.1: <i>valori di suscettività magnetica per i diversi materiali</i>	51
--	----

Capitolo 4

Tabella 4.1: <i>Proprietà magnetiche di materiali ferromagnetici ad elevata permeabilità</i>	63
---	----

Capitolo 5

Tabella 5.1: <i>cavi da vuoto presi in considerazione per le prove</i>	75
Tabella 5.2: <i>Risultati Matlab7 “configurazione semplificata”</i>	86
Tabella 5.3: <i>Confronto risultati Matlab 7 per prova magnete permanente</i>	88

Capitolo 6

Tabella 6.1: <i>rappresentazione schematica “enclosure1”</i>	99
Tabella 6.2: <i>rappresentazione schematica “enclosure2”</i>	101
Tabella 6.3: <i>rappresentazione schematica “enclosure3”</i>	102
Tabella 6.4: <i>schema di procedura risolutiva del Radiosity solver method</i>	103

Capitolo 7

Tabella 7.1: Risultati Matlab7” configurazione quasi definitiva”.....	112
Tabella 7.2: Confronto risultati in uscita da Matlab7 per le due configurazioni “definitiva” e “semplificata”.....	114
Tabella 7.3: Risultati Matlab 7 avvolgimenti “reali” e “schematizzati”.....	117

Capitolo 8

Tabella 8.1: Risultati Matlab 7 configurazione “finale” e “quasi definitiva”.....	128
Tabella 8.2: Risultati Matlab 7 “Comsol” e “Femm” per il canale da 10mm.....	129
Tabella 8.3: Risultati Matlab 7 per il canale da 5.5mm.....	133
Tabella 8.4: Risultati Matlab 7 “Comsol” e “Femm” per il canale da 5.5mm.....	134
Tabella 8.5: rappresentazione schematica “enclosure1”.....	151
Tabella 8.6: rappresentazione schematica “enclosure2-3-4”.....	152
Tabella 8.7: rappresentazione schematica “enclosure5”.....	153
Tabella 8.8: rappresentazione schematica “enclosure6-7-8”.....	153
Tabella 8.9: rappresentazione schematica “enclosure9”.....	153
Tabella 8.10: schema di procedura risolutiva del “Radiosity solver method”.....	155

LISTA DEI SIMBOLI

A	area della sezione della camera	[m ²]
b_{ch}	larghezza della camera di accelerazione	[mm]
b_m	distanza di separazione tra le espansioni polari	[mm]
B	campo magnetico	[T] o [Gauss]
B_{max}	massimo del campo magnetico	[mT]
B_r	componente radiale del campo magnetico	[mT]
B_z	componente assiale del campo magnetico	[mT]
c_p	calore specifico a pressione costante	[J/(kg.K)]
d	distanza tra gli elettroni	[m]
D_e	diametro esterno della camera di accelerazione	[mm]
E	campo elettrico	[V/m]
	Modulo di Joung	[N/m ²]
f_n	frequenza naturale di vibrazione	[1/s]
fmm	forza magnetomotrice	[Aspire]
F_{ij}	fattore di vista	[-]
g	velocità relativa di collisione	[m/s]
g_0	accelerazione di gravità al suolo	[m/s ²]
h	coefficiente di scambio termico	[W/(m ² .K)]
H	campo magnetico	[T]
i	coefficiente di perdita elettronica	[-]
I	momento d'inerzia	[m ⁴]
I_B	corrente di ioni	[A]
I_D	corrente di scarica	[A]
I_e	corrente elettronica	[A]
I_s	impulso specifico	[s]
j	densità di corrente	[A/m ²]
k	conducibilità termica	[W/(m*K)]
K	costante elastica	[N/m]
Kn	numero di Knudsen	[-]
L_c	distanza assiale tra il punto di massimo campo	
L_{ch}	profondità del canale di accelerazione	[mm]
m_e	massa dell'elettrone	[kg]
M	massa dello ione	

M_g	massa del sistema di generazione di potenza	[kg]
n_e	densità di elettroni	[1/m ³]
n_N	densità di atomi neutri	[1/m ³]
p	pressione	[N/m ²]
P_D	potenza di scarica	[W]
q	carica elettrica	[C]
\dot{q}	flusso di calore	[W/m ²]
Q	ionizzazione per unità di area	[1/m ²]
r_L	raggio di Larmor	[m]
R	riluttanza	[1/H]
S	sezione del circuito magnetico	[m ²]
t	tempo	[s]
T	spinta	[N]
	temperatura	[K]
T_c	massima temperatura tollerabile in camera	[K]
T_e	temperatura elettronica	[K]
u_d	velocità di deriva	[m/s]
\cdot		
\underline{v}	vettore di accelerazione del satellite	[m/s ²]
\underline{v}	vettore della velocità di scarico	[m/s]
v_i	velocità degli ioni	[m/s]
V	potenziale	[V]
V_d	potenziale di scarica	[V]
W_{in}	potenza in ingresso al propulsore	[W]
W_{sp}	potenza specifica	[kW/N]
Z	grado di ionizzazione del propellente	[-]
α	massa specifica sistema di potenza	[kg/kW]
	coefficiente di dilatazione termica	[1/K]
β	parametro di Hall	[-]
Δt	durata della missione	[s]
Δv	variazione di velocità del satellite	[m/s]
ε	emissività	[-]
	deformazione di un materiale	[-]
μ_0	permeabilità magnetica nel vuoto	[N/A ²]
η_t	efficienza di spinta	[-]
Φ	flusso di un vettore	[-]
λ_D	lunghezza di Debye	[m]
λ_m	cammino libero medio	[m]
ν	coefficiente di Poisson	[-]

ν_c	frequenza di collisione	[1/s]
ω	frequenza di Larmor	[1/s]
ρ	densità	[kg/m ³]
σ	costante di Stefan Boltzman	[W/(m ² ·K ⁴)]