

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Elettrica



Analisi Sperimentale e Modellizzazione di un Generatore
Termoelettrico per il Recupero Energetico del calore disperso da Gas
a Bassa Entalpia.

Relatore: Prof. Francesco CASTELLI DEZZA

Tesi di Laurea di:

Flavio TOCCI Matr. 765398

Anno Accademico 2013 - 2014.

INDICE

Indice	2
Indice Figure e Tabelle.....	4
Abstract.....	8
Introduzione	10
Capitolo 1	
Storia della Termoelettricità	14
1.1 Scoperta del fenomeno e Primi studi: Da Volta a Lenz	15
1.2 La Prima rinascita del Termoelettrico: da W. Thomson alle Prime applicazioni	17
1.3 La seconda Rinascita del Termoelettrico: Dalle Applicazioni Aerospaziali ai materiali nanostrutturati	18
Capitolo 2	
Trattazione Classica dei fenomeni Termoelettrici.....	21
2.1 Effetto Seebeck	22
2.2 Effetto Peltier	24
2.3 Effetto Thomson.....	26
2.4 Effetto Joule.....	27
2.5 Relazione di Kelvin: Legame tra gli effetti termoelettrici	27
Capitolo 3	
Trattazione Moderna dei fenomeni Termoelettrici.....	31
3.1 Il Motore Termoelettrico	32
3.2 La Termodinamica del non equilibrio	34
3.3 Coefficienti Termoelettrici	37
3.4 Entropia per Portatore di Carica.....	40
3.5 Relazioni fondamentali tra Fenomeni Termici e Fenomeni Elettrici	42
Capitolo 4	
TEG:ThermoElectric Generator.....	44
4.1 Il Modulo Termoelettrico.....	45
4.2 Modello Circuitale di un generatore Termoelettrico	48
4.2.1 Bilancio Energetico	49
4.2.2 Modello Elettrico	53
4.3 Calcolo dei parametri Costitutivi del modello	55
4.4 Modello Simulink di un Generatore Termoelettrico	61
4.4.1 Circuito Termico	63
4.4.2 Circuito Elettrico	64
4.5 Efficienza di un generatore Termoelettrico	68

Capitolo 5	
Convertitori DC/DC.....	77
5.1 Premessa.....	78
5.2 Duty Cycle e tecniche di Modulazione.....	79
5.2 Convertitori DC/DC Buck/ Step Down.....	82
5.2.1 Modalità di conduzione continua.....	86
5.2.2 Modalità di conduzione discontinua.....	88
5.2.3 Ripple sulla Tensione e sulla corrente in Uscita.....	90
5.3 Convertitore DC/DC Step Up/Boost.....	92
5.3.1 Modalità di conduzione continua.....	92
5.3.2 Modalità di conduzione discontinua.....	95
5.3.3 Ripple sulla Tensione in Uscita.....	96
5.4 Convertitore Buck-Boost.....	97
5.5 Confronto fra i vari convertitori.....	97
Capitolo 6	
Algoritmi MPPT.....	99
6.1 Algoritmo di P&O: Perturba e Osserva.....	100
6.1.1 Controllo diretto sul Duty Cycle.....	101
6.1.2 Controllo diretto sulla corrente.....	103
6.1.3 Controllo diretto sulla Tensione.....	105
6.2 Algoritmo IC: Conduttanza Incrementale.....	106
6.3 Semplice Accoppiamento modulo e Carico.....	109
Capitolo 7	
Set Up Sperimentale.....	110
7.1 Set Up Sperimentale.....	111
7.2 Generatore di Calore.....	112
7.3 Circuito di raffreddamento.....	115
7.4 Generatore Termoelettrico.....	119
7.5 Sistema di Acquisizione delle Misure.....	126
7.5.1 Scheda acquisizione segnali di temperatura.....	127
7.6.2 Scheda di Sviluppo OLIMEX- STM32H107.....	129
Capitolo 8	
Analisi dei dati Sperimentali.....	133
8.1 Temperature a regime termico.....	135
8.2 Curve Caratteristiche del TEG: V-I e P-V.....	137
8.2 Calcolo del Rendimento di conversione del generatore termoelettrico e interpretazione dati sperimentali.....	141
Conclusioni.....	148
Bibliografia.....	150

INDICE FIGURE E TABELLE

Fig. 1 Dati statistici estratti dai Report annuali di Terna S.p.A

Fig. 2 Applicazioni termoelettriche nel campo dell'Automotive e della medicina.

Fig. 3 Strumento usato da Seebeck per osservare la deflessione di una bussola (a) dovuta alla corrente termoelettrica indotta riscaldando la giunzione di due materiali diversi (n e o).

Fig. 4 Il primo generatore termoelettrico alimentato da una lampada ad olio, commercializzato nel in 1948 URSS

Fig. 5 Particolare dell'RTG installato sulla sonda Cassini, NASA

Fig.6 Incremento di portatori liberi di carica in funzione del gradiente di temperatura secondo la statistica di Fermi-Dirac.

Fig.7 Con riferimento ai gradienti di temperatura e di tensione in figura, materiali drogati di tipo n avranno , materiali drogati di tipo p avranno .

Fig.8 Modulo Termoelettrico che converte calore in energia elettrica

Fig.9 Circuito Termodinamico dell'effetto Peltier Relativo, tra due conduttori A e B.

Fig.10 Modulo Termoelettrico che converte una corrente elettrica in una potenza termica controllabile.

Fig.11 (a) Gradienti termici opposti in un singolo conduttore. (b) Gradiente termico causato dall'effetto Thomson

Fig.12 Correlazione tra motore termico ed effetto termoelettrico

Fig.13 Schematizzazione di un modulo Termoelettrico

Fig.14 Struttura di Base di un modulo termoelettrico formato da materiali semiconduttori

Fig.15 Applicazioni Termoelettriche

Fig.16 Schema di principio di un modulo termoelettrico connesso ad un carico R_L

Fig.17 Circuito termico equivalente

Fig.18 Circuito equivalente TEG

Fig.19 Circuito elettrico di un TEG sotto le condizioni di massimo trasferimento di Potenza

Fig.20 Modello Simulink del modulo termoelettrico

Fig.21 Modello circuitale termico del lato caldo del TEG

Fig. 21 Curve Caratteristiche del generatore termoelettrico TEG1-12611-6.0 della TEGTEC

Fig.22 Modello circuitale termico del lato caldo del TEG

Fig.23 Modello circuitale Elettrico TEG

Fig. 24 Curva PV, Simulata

Fig. 25 Curva PI, Simulata e reale

Fig. 26 Curva Vi, Simulata e reale

Fig.27 Indice di merito Z di alcuni tra i più comuni materiali termoelettrici n e p

Fig.28 Sistema di conversione DC/DC

Fig.29 Chopper DC e tensione V_o regolata

Fig.30 Generatore di onda di controllo PWM

Fig.31 Convertitore Buck

Fig.32 Andamento forme d'onda convertitore Buck in conduzione continua.

Fig.33 Caratteristica di un convertitore DC/DC con $V_d=cost$

Fig.34 Caratteristica di un convertitore DC/DC con $V_o=cost$.

Fig.35 Convertitore DC/DC Step-Up (Boost)

Fig.36 Andamento della tensione V_o nel caso reale e in quello ideale senza perdite.

Fig.37 Andamento delle forme d'onda di un convertitore DC/DC Boost

Fig.38 Convertitore Buck-Boost

Fig.39 Sfruttamento dell'interruttore nei convertitori DC-DC

Fig.40 Diagramma PI TEG GM250-241-10-12 della European Thermonamics, simulato

Fig.41 Algoritmo di MPPT con controllo diretto del Duty Cycle

Fig.42 Algoritmo P&O con controllo diretto della corrente

Fig.43 Algoritmo P&O con controllo diretto della tensione

Fig.44 Diagramma PV TEG GM250-241-10-12 della European Thermonamics simulato

Fig.45 Algoritmo Conduttanza Incrementale

Fig.46 Foto di insieme del banco di prova nelle ultime fasi di assemblaggio

Fig.47 Particolare del bruciatore e del termo-soffiatore

Fig.48 Particolare sonda K installata per misurare temperatura in uscita dei fumi

Fig.49 Particolare sonda K a vite

Fig.50 Particolare dello scambiatore di calore.

Fig.51 Particolare dello scambiatore di calore.

Fig.52 Particolare della pompa di ricircolo e del dissipatore

Fig.53 Disposizione sonde K sul lato freddo

Fig.54 Particolare del sensore di portata FLOWMETER VISIO2000 e del sensore di temperatura acqua

Fig.55 TEG1-12611-6.0

Fig.56 Disegno costruttivo della cella TEG1-12611-6.0

Fig.57 Schema elettrico del banco di prova

Fig.58 Circuito equivalente del generatore

Fig.59 Sistema di misura

Fig.60 Schema di principio sistema di acquisizione misure, il MUX I2C converte il protocollo 1-wire in protocollo seriale, acquisito dalla CPU.

Fig.61 Scheda acquisizione termocoppie

Fig.62 Schema elettronica MAX31850

Fig.63 Sonda di temperatura acqua e temperatura ambiente con DS18B20 integrato.

Fig.64 Immagine della Scheda OLIMEX STM32H107

Fig.65 Schermata di acquisizione e visualizzazione misure

Fig.66 Moduli termoelettrici e generatore in funzione

Fig.67 Grafici di temperatura, tensione del Banco di Prova.

Fig.68 Pannello HMI, con TEG a regime termico

Fig.69 Grafici funzionamento del TEG con temperatura a regime. (l'incremento di tensione e il successivo decremento sono transitori di inserzione di un carico)

Fig. 70 Particolare sulle resistenze di carico utilizzate.

Fig. 71 Parametri del TEG durante l'inserzione/disinserzione delle resistenze di carico

Fig. 72 Grafico V-I del generatore TEG, ricavato dai dati sperimentali

Fig. 73 Grafico P-V ricavato dai dati sperimentali

Fig.74 Modellizzazione dell'esperimento con analisi FEM, Software Autodesk CFD

Fig. 75 Schermata di acquisizione dati

Fig. 76 Grafici P-V a confronto: In rosso il grafico P-V ideale, in blu il grafico P-V simulato delle condizioni dell'esperimento, in verde il grafico P-V dell'esperimento

Fig. 77 Grafici V-I a confronto: In rosso il grafico V-I ideale, in blu il grafico V-I simulato delle condizioni dell'esperimento, in verde il grafico V-I dell'esperimento.

Fig. 78 Foto del camino dell'impianto a biogas Agrifer dove verrà installato il generatore termoelettrico.

Tab.1 Tabella comparativa tra parametri elettrici e termici

Tab.2 Proprietà dei materiali termoelettrici

Tab.3 Tabella con le proprietà dei moduli termoelettrici in commercio.

ABSTRACT

L'obiettivo del progetto è di analizzare sperimentalmente le performance elettriche di un generatore termoelettrico. La tesi è composta da una prima parte prevalentemente teorica, in cui si analizzerà l'effetto termoelettrico, seguendo dapprima una trattazione classica dei fenomeni termoelettrici per poi passare ad un'analisi "moderna" con la termodinamica del non equilibrio di Onsager. La seconda parte della tesi è concentrata sulla modellizzazione del generatore termoelettrico in ambiente Matlab Simulink. Nella terza ed ultima parte, prevalentemente sperimentale, viene presentata la configurazione del banco di prova e si confrontano i dati sperimentali ottenuti con il modello software proposto.

The aim of this project is to analyse by experimentation the electrical performance of a thermoelectric generator. The script is composed of a first, mainly theoretical part, in which the thermoelectric effect will be the basis of the analysis of the thermoelectric phenomena from a classical point of view; further there will be a shifting towards a "modern" analysis using the thermodynamics of the non-equilibrium of Onsager. The second part of the thesis is focused on the modelling of the thermoelectric generator in Matlab Simulink. In the third and last part, mostly experimental, the configuration of the test bench is shown, and the experimental data obtained is compared with the software proposed model.

INTRODUZIONE

In un contesto globale in cui è sempre maggiore la richiesta di energia elettrica, spinta dalla crescita economica esponenziale da parte dei BRIC + M, le “fonti di energia sostenibile” suscitano sempre maggiore interesse.

In Italia la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili è stata del 25,6% nel 2012, con una forte espansione delle fonti eolica e soprattutto fotovoltaica. In particolare, grazie alla spinta dei sistemi di incentivo delle fonti rinnovabili, la produzione eolica ha raggiunto i 13,3 miliardi di kWh (+36,4%), mentre la produzione fotovoltaica ha toccato il risultato di 18,9 miliardi di kWh, con un incremento pari a +74,7% rispetto all’anno precedente.

Produzione Elettrica in Italia 2012

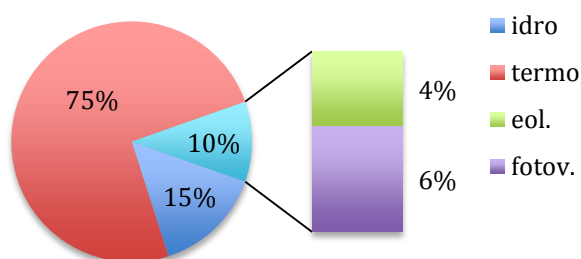


Fig. 1 Dati statistici estratti dai Report annuali di Terna S.p.A

Nonostante i dati di crescita molto positivi, l'energia da fonti rinnovabili copre ancora meno di un quarto della richiesta di energia nazionale; il motivo è da ricercarsi prevalentemente nel costo elevato di queste tecnologie, ancora lontane dalla famosa "Grid Parity", con i concorrenti "fossili".

Sebbene siano state sfruttate numerose fonti di energia rinnovabile, esiste un'altra energia sostenibile e a basso costo: il calore.

Quasi il 60% della totale energia prodotta a livello mondiale è persa sotto forma di calore.

Visto l'enorme potenziale, si sta vivendo un forte interesse verso la ricerca di tecnologie economiche per la conversione diretta della "Waste Heat" in energia elettrica (TEG), ma fin ora ha trovato applicazione solo in settori di nicchia.

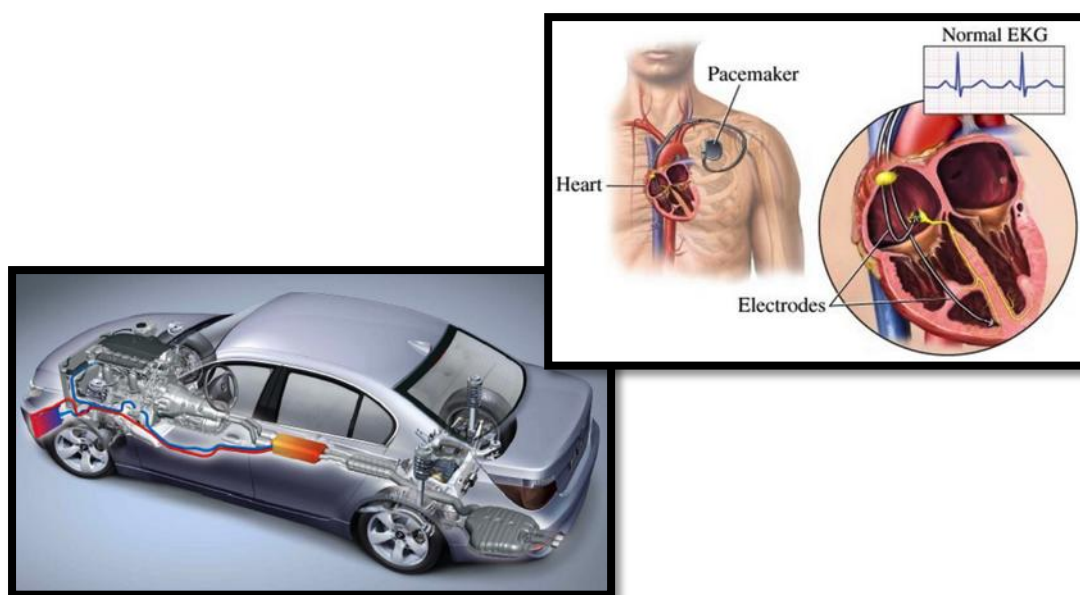


Fig. 2 Applicazioni termoelettriche nel campo dell'Automotive e della Biomedicina

L'applicazione di dispositivi di recupero energetico TEG nel settore della grande generazione di energia rappresenta un nuovo step evolutivo per quanto riguarda il rendimento complessivo del sistema di produzione da fonti "fossili".

La conversione del calore (energia povera) per la produzione di energia elettrica (energia pregiata) impiega tipicamente un processo di combustione di energia chimica e l'impiego di un generatore per la produzione di energia elettrica.

Il rendimento di tali sistemi di conversione è la variabile principale da considerare in termini di valutazione e pianificazione dell'investimento e discrimina le scelte tecniche in particolare riguardo l'impiego dei vari cicli termodinamici.

Una prima valutazione per inquadrare il problema può essere fatta in relazione a una centrale termoelettrica tradizionale dove, per ogni 100 unità di energia chimica utilizzata (tipicamente gas naturale, derivati del petrolio o carbone) vengono ricavate ca. 40 unità di energia elettrica.

L'aumento di tale rendimento di conversione può avvenire tramite l'impiego di cicli combinati gas-vapore ma comunque si scontra con limiti superiori imposti dai sempre maggiori costi d'impianto.

Una soluzione per l'aumento del rendimento complessivo dell'impianto senza l'onere di una riconversione, può nascere dall'utilizzo del calore proveniente dai gas di scarico del processo di combustione.

La produzione di energia termica da fumi esausti trova già ampia applicazione negli impianti di cogenerazione con motori endotermici, dove l'inserimento di uno scambiatore fumi/acqua permette di produrre acqua calda che poi verrà impiegata per diversi utilizzi, dal teleriscaldamento alla produzione di calore per scopi industriali.

L'utilizzo di queste soluzioni si scontra tuttavia con l'effettiva convenienza in termini economici e quindi con la sostenibilità dell'investimento.

La vendita del calore per teleriscaldamento rappresenta da un lato una prospettiva interessante soprattutto per quanto riguarda il contenimento delle spese e perdite delle singole utenze, ma diviene un investimento difficile in zone già urbanizzate dove la concorrenza con la tradizionale rete di distribuzione del gas naturale tende a limitarne la diffusione.

Un'ulteriore considerazione va fatta in merito alla qualità dell'energia che si va a produrre, infatti come già accennato, il calore rappresenta da un punto di vista termodinamico, un tipo di energia degradato o poco pregiato e quindi meno appetibile anche dal mercato.

L'energia elettrica invece assume un'importanza crescente e si presenta come fonte insostituibile per le innumerevoli applicazioni dei dispositivi elettronici.

E' evidente come la prospettiva di offrire una conversione diretta del calore in differenza di potenziale e quindi corrente elettrica sia una prospettiva interessante per un mondo sempre più affamato di consumi elettrici e interessato all'ottimizzazione della produzione, all'investimento in nuovi sistemi di accumulo e all'efficientamento della distribuzione sul territorio.

Il progetto presentato è orientato all'analisi in ambiente Matlab Simulink del funzionamento dei generatori TEG e alla verifica sperimentale del modello matematico proposto.

Il lavoro getta le basi per il progetto di tesi del collega e amico Nicola Loss dell'università degli studi di Trento che tratta lo studio di fattibilità di un sistema innovativo di cogenerazione applicabile ai fumi esausti di generatori termici di grandi dimensioni con la finalità di studiare oltre alla soluzione tecnica anche la competitività dell'investimento

CAPITOLO 1

STORIA DELLA

TERMOELETTICITÀ

La termoelettricità è un ramo della fisica che riunisce e studia i diversi fenomeni di conversione del calore in elettricità e viceversa che si verificano in tutti i materiali, correlando il flusso di calore che vi transita alla corrente elettrica che li percorre. Anche se questo fenomeno è presente in tutti i materiali, solo nei così detti “materiali termoelettrici” il fenomeno diventa apprezzabile e sfruttabile.

1.1 SCOPERTA DEL FENOMENO E PRIMI STUDI: DA VOLTA A LENZ

La nascita della termoelettricità viene oggi collocata il 10 febbraio 1794, quando Alessandro Volta rivelò il collegamento esistente fra calore ed elettricità osservando come, riscaldando le estremità di un arco metallico, si ottenesse una "tensione elettrica" destinata a scomparire con il suo raffreddamento.

Il primo fenomeno termoelettrico scoperto fu l'effetto Seebeck. Nel 1821, durante un esperimento, il fisico T.J. Seebeck, notò che, in un circuito costituito da conduttori metallici o semiconduttori diversi (rame e bismuto) ma collegati fra loro, una differenza di temperatura generava una deviazione dell'ago magnetico di una bussola.

Seebeck pensò che questo fenomeno fosse correlato con il magnetismo terrestre.

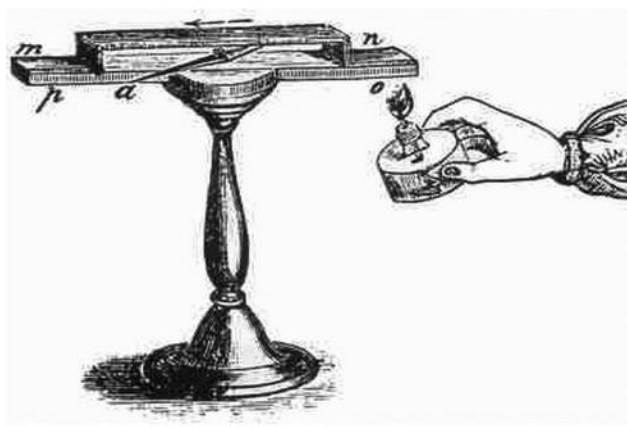


Fig. 3 Strumento usato da Seebeck per osservare la deflessione di una bussola (a) dovuta alla corrente termoelettrica indotta riscaldando la giunzione di due materiali diversi (n e o).

Nel 1823, il fisico danese Hans Christian Ørsted, tuttavia dimostrò che l'effetto era causato da un flusso di cariche negative in movimento che, per la legge di Ampere, provocano il campo magnetico responsabile della deviazione dell'ago della bussola.

La differenza di potenziale a cui si portano i due metalli è proporzionale alla differenza di temperatura.

$$\Delta V \propto \Delta T$$

La costante di proporzionalità α prende il nome di Coefficiente di Seebeck, ed è espressa in μVK^{-1} .

$$\alpha(T) = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

Gli studi di Seebeck portarono a costruire nel 1823 la prima termopila, con un rendimento di conversione del 3%, comparabile con il rendimento di molti motori a vapore. La termopila, grazie alla sua tensione molto stabile, fu usata successivamente dal fisico tedesco Georg Simon Ohm per studiare il legame tra tensione e corrente in un circuito.

Il secondo effetto termoelettrico fu scoperto nel 1834 da un orologiaio francese, Jean Charles Athanase Peltier; in un conduttore costituito da due metalli diversi, una differenza di potenziale elettrico genera una differenza di temperatura (che non può essere ricondotta all'effetto Joule).

Il calore assorbito o generato era proporzionale alla corrente, attraverso un coefficiente di proporzionalità, chiamato coefficiente di Peltier

Più tardi, nel 1838, il fisico russo Heinrich Lenz, dimostrò che la produzione o l'assorbimento di calore sulla giunzione dipendevano dal verso della corrente, e con un semplice esperimento riuscì a congelare e scongelare dell'acqua posta in un incavo ricavato su una giunzione tra bismuto e rame.

1.2 LA PRIMA RINASCITA DEL TERMOELETRICO: DA W. THOMSON ALLE PRIME APPLICAZIONI

Gli studi sulla termoelettricità, dopo un'interruzione di circa vent'anni causata dall'entusiasmo che suscitarono le ricerche di Laplace ed Ampere sull'elettromagnetismo, trovarono nuovo slancio con il fisico britannico William Thomson (Lord Kelvin), il quale riuscì, nel 1851, in primis, a correlare l'effetto Seebeck e l'effetto Peltier e, successivamente, scoprì un terzo effetto termoelettrico: l'effetto Thomson.

Un conduttore omogeneo con le estremità a temperatura diversa (T_1 e T_2) e percorso da una corrente elettrica, cede o assorbe calore a seconda che il flusso termico e la corrente siano coincidenti o opposti.

Le prime applicazioni delle teorie di Thompson ci furono solo a partire dal 1909 grazie al fisico tedesco Edmund Altenkirch.

I risultati delle sue ricerche portarono alla definizione di un indice di merito, con la quale classificare i materiali termoelettrici, "la figura di merito z ".

$$z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} \quad \left[\frac{1}{K} \right]$$

dove

α : Coefficiente di Seebeck o Potere Termoelettrico [μVK^{-1}]

σ : Conducibilità elettrica [Sm^{-1}]

λ : Conducibilità termica [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]

o anche usata nella sua forma adimensionale zT , moltiplicata per la temperatura assoluta T .

Un buon materiale termoelettrico deve possedere un elevato indice di merito. Questo implica che per una data temperatura, il materiale deve avere un coefficiente di Seebeck molto alto, una conducibilità termica molto bassa (per mantenere la differenza di temperatura sulla giunzione) e una bassissima resistenza elettrica (per minimizzare le perdite per effetto Joule).

1.3 LA SECONDA RINASCITA DEL TERMoeLETTRICO: DALLE APPLICAZIONI AEROSPAZIALI AI MATERIALI NANOSTRUTTURATI

Lo sviluppo delle applicazioni termoelettriche è iniziato nei primi anni '30, con l'avvento dei materiali termoelettrici semiconduttori, principalmente ad opera della scuola russa.

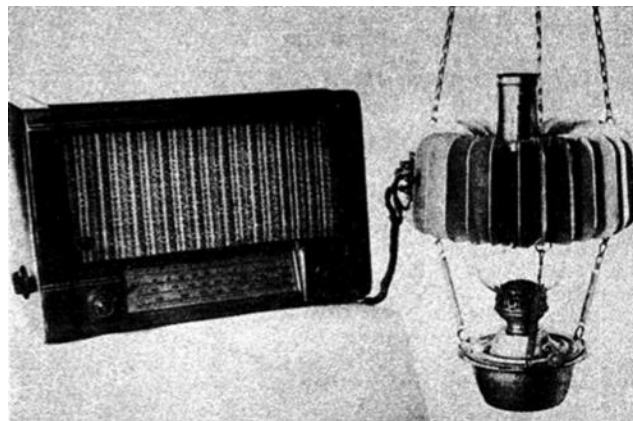


Fig. 4 Il primo generatore termoelettrico alimentato da una lampada ad olio, commercializzato nel in 1948 URSS.

L'assenza di parti in movimento rendeva questi generatori silenziosi e affidabili, ideali per dispositivi militari da campo o sensori; sono state sviluppate numerose applicazioni essenzialmente per il settore militare ed aerospaziale che sono tuttora rigorosamente segrete (*Radioisotope Thermoelectric Generators usati dalla NASA in molte missioni spaziali: Apollo, Pioneer, Viking, Voyager*).

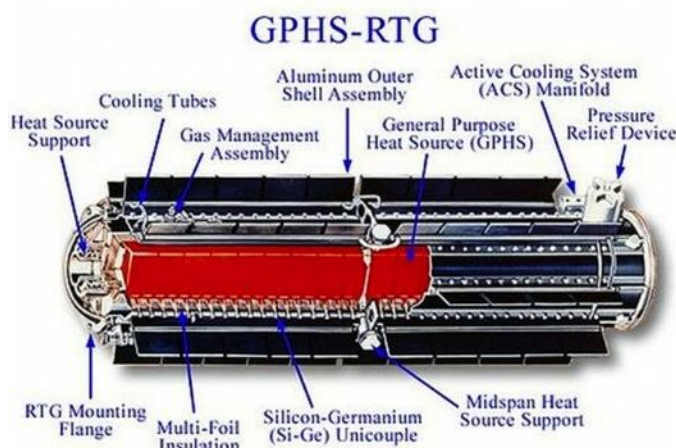


Fig. 5 Particolare dell'RTG installato sulla sonda Cassini, NASA

In occidente, in particolare negli U.S.A., l'attività di ricerca e sviluppo della termoelettricità è iniziata nell'immediato dopoguerra, ed è stata intensa fino all'inizio degli anni '60, quando oltre 100 società erano attive in questo settore. Dieci anni più tardi, la termoelettricità vedeva impegnate solo una decina di società, fino ad arrivare a solo due industrie, Melcor e Marlow, attive all'inizio degli anni '90.

Questo progressivo disimpegno era motivato dalla constatazione che, nonostante la scoperta di nuovi materiali, l'efficienza dei generatori termoelettrici rimaneva invariabilmente un ordine di grandezza inferiore rispetto a quanto erroneamente previsto alla fine degli anni '50.

Nel 1970 è nata la "International Thermoelectric Society" che riunisce tutti i più grandi esperti di termoelettricità e la promuove, presentando tutte le innovazioni tecnologiche in un meeting internazionale che si tiene annualmente dal 1970 nelle più grandi capitali del mondo.

A partire dal 1993 si è nuovamente acceso l'interesse per la termoelettricità. Questa volta, a spingere l'attività di ricerca è una previsione teorica: l'efficienza dei dispositivi termoelettrici può essere notevolmente incrementata (raggiungendo rendimenti fino al 17%) attraverso l'impiego di sistemi a bassa dimensionalità, cioè facendo ricorso a materiali termoelettrici nano strutturati. Parallelamente, il costo di produzione dei moduli termoelettrici è in continua discesa oltre che per motivi fisiologici del mercato, anche grazie a studi accademici, che porteranno alla definizione di nuovi standard costruttivi a basso costo, e renderanno oltremodo vantaggioso l'utilizzo di questa tecnologia nella conversione diretta del calore in energia elettrica.

CAPITOLO 2

TRATTAZIONE CLASSICA DEI FENOMENI TERMOELETTRICI

Prima di analizzare equazioni matematiche complesse utilizzate per ingegnerizzare i generatori termoelettrici è necessario comprenderne i meccanismi fisici che stanno alla base.

Obiettivo del seguente capitolo è chiarire la natura dei fenomeni termoelettrici e fornire la base teorica per i capitoli successivi.

2.1 EFFETTO SEEBECK

Sperimentalmente si è osservato che, in ogni materiale conduttore sottoposto ad un gradiente di temperatura si genera tra il polo caldo ed il polo freddo una differenza di potenziale proporzionale al gradiente stesso.

$$\Delta V \propto \Delta T$$

Il fenomeno è dovuto ad un incremento di portatori liberi di cariche nel materiale, funzione del gradiente di temperatura secondo la statistica di Fermi-Dirac.

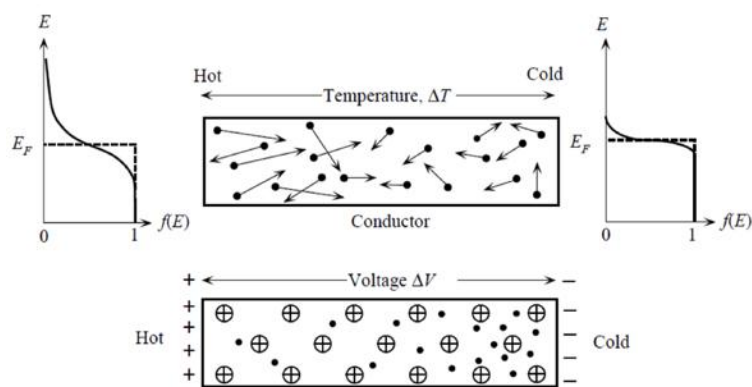


Fig.6 Incremento di portatori liberi di carica in funzione del gradiente di temperatura secondo la statistica di Fermi-Dirac.

Il coefficiente di proporzionalità α , è detto *coefficiente di Seebeck Assoluto* (espresso in $\mu V K^{-1}$) e poichè ad un campo elettrico è associato un potenziale elettrostatico secondo la:

$$\mathbf{E} = -\nabla V \tag{2.1}$$

Si può scrivere:

$$\alpha = \frac{E}{\nabla T} = -\frac{\nabla V}{\nabla T} = -\left. \frac{dV}{dT} \right|_T \quad (2.2)$$

La corrente di diffusione è pari alla somma delle correnti di elettroni e di lacune. Tali correnti sono parallele e hanno segno opposto, i campi da essi generati tendono a cancellarsi.

$$\mathbf{E}_{el} + \mathbf{E}_{lacune} = \mathbf{E} = -\nabla V \quad (2.3)$$

Un materiale caratterizzato da un elevato coefficiente di Seebeck deve possedere una densità di portatori maggioritari di tipo *p* o *n*, altrimenti i campi generati tenderebbero ad annullarsi. Interpretando le relazioni (2.2) e (2.3) è possibile dedurre che il segno del coefficiente di Seebeck dipende strettamente dal tipo di portatori maggioritari del conduttore.

Un conduttore avente portatori di carica maggioritari di tipo *p* (flusso di *lacune*) avrà coefficiente di Seebeck positivo, mentre materiali con portatori maggioritari di tipo *n* (flusso di “*elettroni*”) avranno un coefficiente di Seebeck negativo.

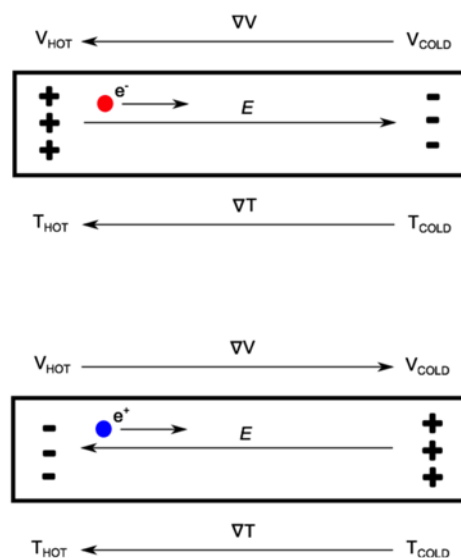


Fig.7 Con riferimento ai gradienti di temperatura e di tensione in figura, materiali drogati di tipo *n* avranno $\alpha < 0$, materiali drogati di tipo *p* avranno $\alpha > 0$.

Per sfruttare concretamente l'effetto Seebeck è necessario saldare due conduttori insieme. Un unico conduttore sarebbe soggetto ad un gradiente di temperatura locale, ma la differenza di temperatura tra i suoi estremi sarebbe nulla, generando cioè una f.e.m complessivamente nulla.

L'effetto Seebeck è reversibile, nel senso che cambiando il segno del gradiente termico cambia il verso di circolazione della corrente di diffusione, ma non il modulo.

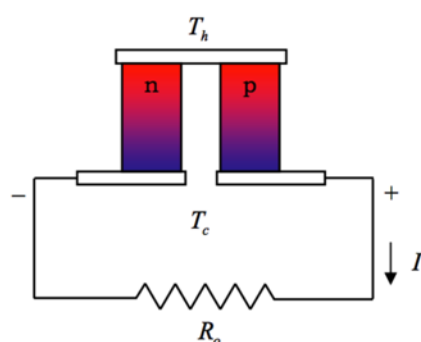


Fig.8 Modulo Termoelettrico che converte calore in energia elettrica

2.2 EFFETTO PELTIER

La giunzione tra due conduttori diversi percorsi da una corrente I , assorbe o genera calore a seconda dal verso della corrente. L'effetto Peltier è causato da una variazione di entropia dei portatori di carica quando attraversano una giunzione tra materiali conduttori differenti.

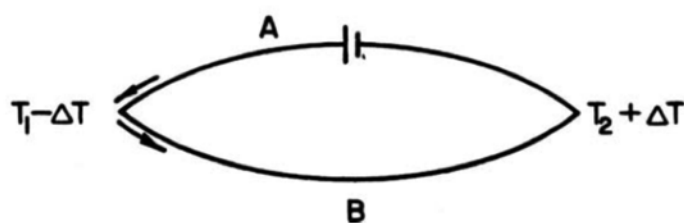


Fig.9 Circuito Termodinamico dell'effetto Peltier Relativo, tra due conduttori A e B.

La potenza termica generata o assorbita è proporzionale alla corrente che circola nel circuito.

$$\frac{dQ}{dt} \propto I$$

Il coefficiente di proporzionalità π è espresso in V e, come nel caso dell'effetto Seebeck, è definito *coefficiente di Peltier Assoluto* quando si riferisce ad un solo materiale conduttore e *coefficiente di Peltier Relativo* π_{AB} quando si riferisce ad una coppia di elementi. La potenza termica sviluppata è:

$$\frac{dQ}{dt} = \pi_{AB}(T) \cdot I \quad (2.4)$$

Dove:

$$\pi_{AB} = \pi_B - \pi_A$$

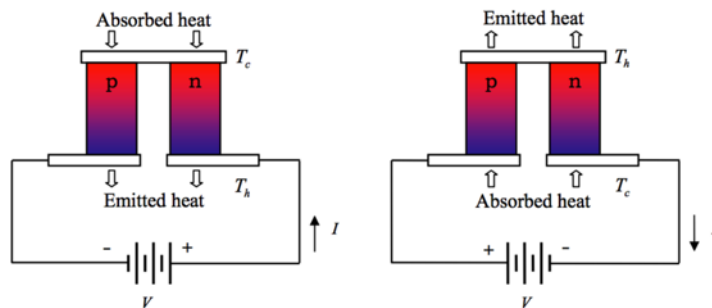


Fig.10 Modulo Termoelettrico che converte una corrente elettrica in una potenza termica controllabile.

Anche l'effetto Peltier è reversibile, nel senso che, a parità di altre condizioni, invertendo il senso della corrente I nel circuito s'invertono i sensi di scambio dei flussi termici di Peltier.

2.3 EFFETTO THOMSON

L'effetto Thomson è un fenomeno termoelettrico che si manifesta in conduttore omogeneo percorso da corrente, le cui estremità si trovano a temperatura diversa. Il conduttore cede o assorbe calore a seconda che il verso della corrente e del flusso termico siano coincidenti o opposti.

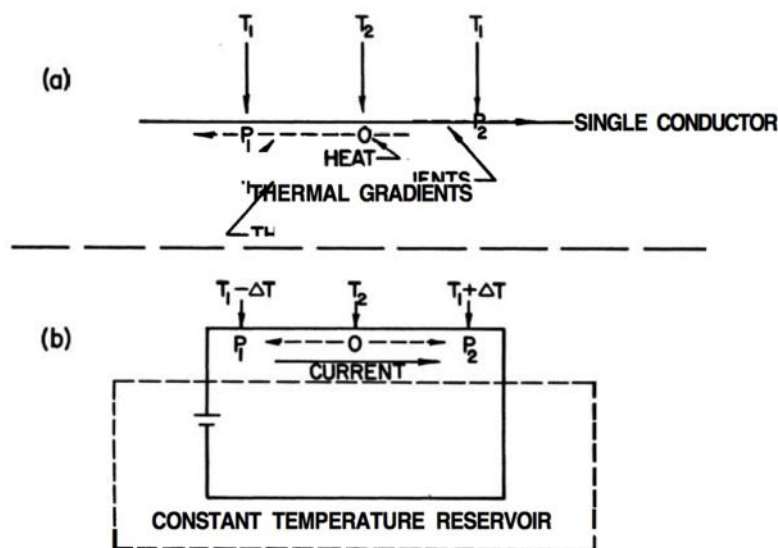


Fig.11 (a) Gradienti termici opposti in un singolo conduttore.

(b) Gradiente termico causato dall'effetto Thomson

La potenza termica assorbita o generata per unità di lunghezza è proporzionale al prodotto tra la corrente che circola nel circuito e il gradiente di temperatura.

$$\dot{Q} \propto I \cdot \nabla T$$

Il coefficiente di proporzionalità τ , è chiamato *coefficiente di Thomson*. La potenza termica generata è:

$$\frac{dQ}{dt} = \tau(T) \cdot I \cdot \nabla T \quad (2.5)$$

2.4 EFFETTO JOULE

L'effetto Joule è un fenomeno fisico largamente conosciuto che associa la corrente circolante in un conduttore con l'energia termica emessa. La potenza P dissipata per effetto Joule da un conduttore percorso da corrente è proporzionale alla tensione applicata V e alla corrente I che lo percorre secondo la:

$$P = VI \quad (2.5)$$

che per un resistore di resistenza R , ricorrendo alla legge di Ohm, si reduce :

$$P = \frac{V^2}{R} = RI^2 \quad (2.6)$$

dunque il calore ∂Q ceduto all'ambiente in un tempo ∂t è pari:

$$\partial Q = RI^2 \partial t \quad (2.7)$$

2.5 RELAZIONE DI KELVIN: LEGAME TRA GLI EFFETTI TERMOELETTRICI

Al fine di comprendere il fenomeno della termoelettricità, è fondamentale conoscere le relazioni termodinamiche che legano i vari fenomeni.

La seguente analisi è essenzialmente la stessa che fece Thomson.

Supponiamo di trascurare le perdite per effetto Joule del circuito e quindi le irreversibilità.

Consideriamo un circuito isolato, costituito da due conduttori diversi isotropi e omogenei, A e B collegati come in figura (fig.9). Le giunzioni tra i due materiali, lato "freddo" a temperatura T e "caldo" a temperatura $T + \Delta T$, sono mantenute costanti da due riserve di calore con capacità termica infinita.

La tensione, dovuta all'effetto Seebeck relativo, generata dalla differenza di temperatura è E_{AB} .

Il coefficiente di Seebeck relativo dei due conduttori può essere espresso come:

$$\alpha_{AB} = \left. \frac{dE_{AB}}{dT} \right|_T \quad (2.8)$$

L'energia elettrica può essere espressa come:

$$I \cdot E_{AB} = I \cdot \frac{dE_{AB}}{dT} \cdot \Delta T \quad (2.9)$$

e, per unità di corrente che circola nel circuito termoelettrico

$$E_{AB} = \frac{dE_{AB}}{dT} \cdot \Delta T \quad (2.10)$$

Gli altri fattori che influenzano un circuito termoelettrico sono: l'Effetto Peltier, l'effetto Thomson, lo scambio termico tra giunzione calda e giunzione fredda e le perdite per effetto Joule. Supponendo di trascurare questi ultimi due termini. Associamo un segno "più" all'energia termica assorbita e un segno "meno" all'energia termica liberata.

Per l'Effetto Peltier

$$\begin{array}{ll} \text{Energia assorbita dalla giunzione calda} & Q = \pi_{AB}(T + \Delta T) \\ \text{Energia liberata dalla giunzione fredda} & Q = -\pi_{AB}(T) \end{array}$$

Per l'Effetto Thomson

$$\begin{array}{ll} \text{Energia assorbita dal conduttore B} & Q = \tau_B(\Delta T) \\ \text{Energia liberata dal conduttore A} & Q = -\tau_A(\Delta T) \end{array}$$

Avendo ipotizzato il circuito come un sistema chiuso ideale senza irreversibilità, possiamo applicare il principio di conservazione dell'energia:

$$\frac{dE_{AB}}{dT} \cdot \Delta T = \pi_{AB}(T + \Delta T) - \pi_{AB}(T) + \tau_B(\Delta T) - \tau_A(\Delta T)$$

Dividendo entrambi i membri per ΔT

$$\frac{dE_{AB}}{dT} = \frac{\pi_{AB}(T+\Delta T) - \pi_{AB}(T)}{\Delta T} + \tau_B - \tau_A \quad (2.11)$$

Se ora facciamo tendere a zero il ΔT , otteniamo la relazione che lega il coefficiente di Seebeck relativo della termocoppia con i coefficienti di Thomson e di Peltier.

$$\alpha_{AB} - \frac{d\pi_{AB}}{dT} - (\tau_B - \tau_A) = 0 \quad (2.12)$$

Questa equazione mette in relazione l'effetto Seebeck con l'effetto Peltier e Thomson, sottolineando come l'effetto Seebeck sia presente nel circuito indipendentemente dalla corrente che vi circola, mentre gli effetti Thomson e Peltier, in assenza di generatori esterni, dipendono dalla presenza dell'effetto Seebeck.

Applicando ora il secondo principio della termodinamica; assumendo sempre che i processi siano reversibili, chiamiamo T_b la temperatura della giunzione calda e T_a la temperatura della giunzione fredda :

$$\oint dS = \oint \frac{dQ}{dT} = 0 \quad (2.13)$$

$$\frac{(\pi_{AB})_b}{T_b} I - \frac{(\pi_{AB})_a}{T_a} I + I \int_{T_a}^{T_b} \frac{\tau_A - \tau_B}{T} dT = 0 \quad (2.14)$$

dove i primi due termini corrispondono all'entropia emessa ed assorbita dalla giunzioni fredda e calda, mentre il terzo rappresenta l'entropia associata allo scambio di calore lungo il conduttore.

Dividendo per T, e derivando rispetto a T si ottiene:

$$\frac{d\pi_{AB}}{dT} - \frac{\pi_{AB}}{T} + \tau_A - \tau_B = 0 \quad (2.15)$$

Possiamo risolvere il sistema costituito dalle equazioni (2.13) e (2.10).

Sommando ambo i membri delle equazioni otteniamo:

$$\alpha_{AB} = \frac{\pi_{AB}}{T} \quad (2.16)$$

Derivando la (2.14) rispetto a T, si ottiene

$$\frac{1}{T} \frac{d\pi_{AB}}{dT} - \frac{\pi_{AB}}{T^2} = \frac{d\alpha_{AB}}{dT} \quad (2.17)$$

sostituendo la (2.15) nella (2.13), si ottiene la relazione che lega coefficiente di Seebeck e coefficiente di Thomson:

$$\frac{d\alpha_{AB}}{dT} = \frac{\tau_A - \tau_B}{T} \quad (2.18)$$

La grandezza relativa α_{AB} è considerata come la differenza fra due grandezze assolute, α_A e α_B .

Questi valori sono stati ottenuti sperimentalmente confrontando il materiale con un campione di *Pb* molto puro, il quale per temperature vicine allo zero si comporta come un superconduttore con $\alpha = 0$.

Conoscendo il coefficiente assoluto di Seebeck per il *Pb* si può ricavare il valore assoluto di α per qualsiasi altro conduttore termoelettrico.

CAPITOLO 3

TRATTAZIONE MODERNA DEI FENOMENI TERMOELETTRICI

Lo scopo del seguente capitolo è fornire un'analisi più generale dei fenomeni termoelettrici utilizzando le leggi della termodinamica moderna. Nel primo paragrafo si presenterà l'analogia esistente tra motore termico e motore termoelettrico, si introdurrà poi il concetto di equilibrio quasi statico alla base della termodinamica del non equilibrio con la quale si ricaveranno le espressioni generalizzate della *legge di Ohm*, *legge di Fourier*, *Effetto Seebeck*, *Effetto Thomson*, *Effetto Peltier* e le relazioni di Kelvin generalizzate. Infine si ricavano le relazioni fondamentali per lo studio della termoelettricità.

3.1 IL MOTORE TERMOELETTRICO

Per un approccio intuitivo alla termodinamica della termoelettricità è utile analizzare le similitudini tra un materiale termoelettrico e un motore classico. In entrambi i casi l'entropia è trasportata da un fluido. Nel caso del sistema termoelettrico il fluido è un gas di elettroni di carica e^- , detto gas di Fermi per la natura fermionica delle particelle.

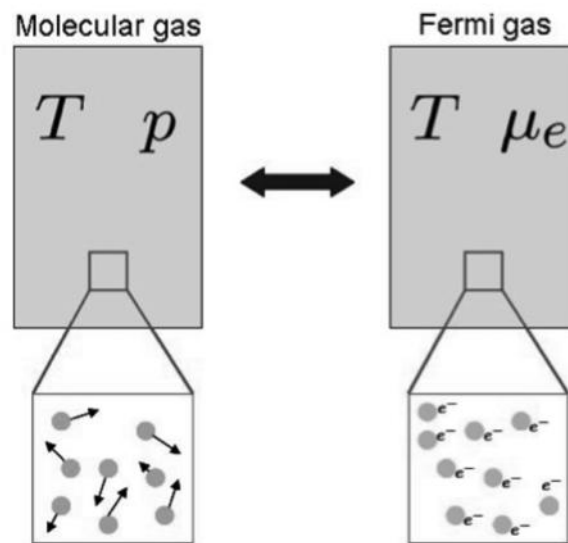


Fig.12 Correlazione tra motore termico ed effetto termoelettrico

In prima approssimazione si può trattare il gas di Fermi come un gas perfetto, in cui le particelle non interagiscono tra di loro. La "pressione parziale" p del fluido può essere correlata con il potenziale elettrochimico μ_e , espresso come:

$$\mu_e = \mu_c + eV \quad (3.1)$$

Dove μ_c è il potenziale chimico, e è la carica e V il potenziale elettrico, mantenendo un lato a temperatura T_c e l'altro a $T_h > T_c$, si induce nella cella un gradiente di temperatura. Dalla teoria cinetica dei gas si ricava che nel lato caldo si hanno velocità medie maggiori e densità di particelle minori, rispetto al lato freddo.

Poiché la cella è elettricamente isolata, non si osserva passaggio netto di cariche elettriche. Al contrario si sperimenta un flusso di calore dal lato caldo a quello freddo. L'esistenza di un flusso di calore non nullo implica che il sistema si trova in uno stato di non equilibrio termodinamico. La presenza di un gradiente di temperatura induce uno spostamento di cariche dal lato freddo a quello caldo producendo una differenza di potenziale.

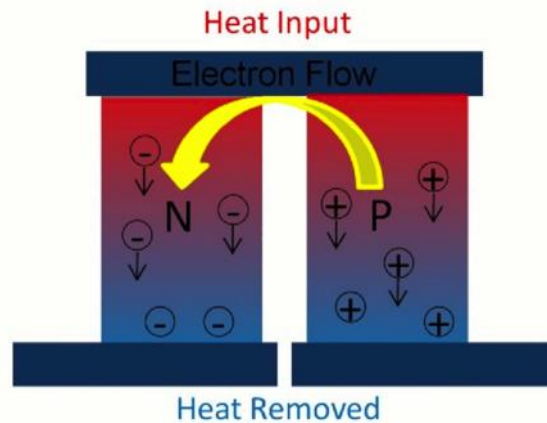


Fig.13 Schematizzazione di un modulo Termoelettrico

Si osservi inoltre che poiché il flusso di carica netto è nullo, i flussi da caldo a freddo e da freddo a caldo devono bilanciarsi perfettamente. Da ciò segue necessariamente l'accoppiamento tra flussi di calore e di corrente elettrica. Per quanto questo esempio sia molto semplice contiene tutti gli ingredienti della termoelettricità. Nel caso ideale di ciclo reversibile e in assenza di produzione di entropia, il sistema si comporta come un ciclo di Carnot. *In cui le trasformazioni isoterme si hanno nelle giunzioni fredde e calde, e le due trasformazioni adiabatiche si trovano nei due rami tra giunzione calda e fredda.* Nella realtà il processo è irreversibile ed è caratterizzato da una produzione di entropia. Le principali sorgenti di entropia sono il trasferimento di calore non isoterma e il trasferimento di cariche non adiabatico tra lato freddo a quello caldo. Nei tratti non adiabatici l'entropia è creata per effetto delle collisioni tra particelle e per effetto delle interazioni tra particelle e fononi. L'entropia è trasportata proprio dal gas di Fermi.

3.2 LA TERMODINAMICA DEL NON EQUILIBRIO

La termodinamica del non equilibrio è un ramo della termodinamica che studia i sistemi termodinamici che variano nel tempo, scambiando con l'ambiente circostante massa ed energia. Per introdurre la termodinamica del non equilibrio, iniziamo con il considerare i principi fondamentali della termodinamica classica.

Il primo principio della termodinamica afferma che l'energia di un sistema termodinamico non si crea né si distrugge, ma si trasforma, passando da una forma a un'altra. L'energia termica ∂Q assorbita da un sistema può essere quindi espressa:

$$\partial Q = dU + \partial A - \mu dn \quad (3.2)$$

dove dU è la variazione di energia interna, ∂A è il lavoro compiuto dal sistema "contro" le forze esterne, μ è il potenziale chimico e dn è la variazione del numero di particelle del sistema.

Il secondo principio della Termodinamica Classica afferma che:

$$TdS \geq \partial Q \quad (3.3)$$

se la trasformazione è reversibile allora la relazione (3.2) avrà il segno di uguale, per tutti gli altri processi sarà una disuguaglianza stretta; T è la temperatura assoluta, dS è la variazione di Entropia del sistema.

La teoria della termodinamica classica descrive compiutamente solo i sistemi termodinamici ideali in assenza d'irreversibilità. Per tutte quelle trasformazioni non ideali in cui cioè si ha un incremento di entropia locale, la termodinamica classica indica solo la possibile evoluzione del sistema mediante la disuguaglianza (3.3).

Per analizzare le trasformazioni irreversibili, la teoria della termodinamica del non equilibrio si basa sul concetto di *equilibrio termodinamico locale o quasi equilibrio termodinamico*.

Per spiegare questa ipotesi, supponiamo di suddividere un sistema termodinamico in volumi elementari, grandi abbastanza da contenere un elevato numero di particelle. Lo stato di questi elementi può essere caratterizzato mediante i parametri termodinamici di temperatura, pressione, volume ecc. Questi volumi elementari si trovano in uno stato di equilibrio locale, anche se complessivamente il sistema si trova in una condizione di non equilibrio globale. Quest'affermazione porta a un'importante estensione del secondo principio della termodinamica, che può essere espresso anche in termini di densità di flussi di energia, calore e massa.

$$J_S = \frac{J_Q}{T} \quad (3.4)$$

Dove J_S è il flusso di entropia, J_Q il flusso di energia termica e T la temperatura assoluta.

Da questa relazione deriva una analisi termodinamica continua della materia, valida solo per trasformazioni vicine all'equilibrio termodinamico.

Scriviamo ora il primo principio della termodinamica in funzione della densità di flusso di energia, di massa e di calore.

$$J_E = J_Q + \mu_E J_N \quad (3.5)$$

La termodinamica del non equilibrio afferma che a questi flussi sono associati dei potenziali termodinamici le cui forze possono essere espresse:

$$\mathbf{F}_N = \nabla \left(-\frac{\mu_e}{T} \right); \quad \mathbf{F}_E = \nabla \left(\frac{1}{T} \right) \quad (3.6)$$

Il legame lineare tra le forze e la densità di flussi può essere espresso:

$$\begin{bmatrix} J_N \\ J_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{NN} & L_{NE} \\ L_{EN} & L_{EE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nabla \left(-\frac{\mu_e}{T} \right) \\ \nabla \left(\frac{1}{T} \right) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Dove $L_{NE} = L_{EN}$ per il principio di reciprocità di Onsager. La simmetria degli elementi diagonali della matrice cinetica $[L]$, è una conseguenza del *principio di minima produzione di entropia per sistemi in condizioni di non equilibrio*.

Da un punto di vista microscopico l'uguaglianza dei termini diagonali di $[L]$, implica che questi processi sono localmente reversibili, cioè *Onsager ha dimostrato che in un intorno dell'equilibrio le trasformazioni termodinamiche irreversibili si possono considerare come reversibili localmente*.

Riscriviamo ora la relazione (3.7) mostrando la densità flussi termici e il potenziale termodinamico.

$$J_Q = J_E - \mu_e J_N \quad (3.8)$$

L'equazione (3.6) diventa quindi

$$\nabla \left(-\frac{\mu_e}{T} \right) = -\frac{1}{T} \nabla(\mu_e) - \mu_e \nabla \left(\frac{1}{T} \right) \quad (3.9)$$

Sostituendo la (3.8) e la (3.9) nella (3.7) si ottiene:

$$\begin{bmatrix} J_N \\ J_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{1}{T} \nabla(\mu_e) \\ \nabla \left(\frac{1}{T} \right) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Dove $L_{12} = L_{21}$ e i coefficienti cinetici diventano:

$$L_{11} = L_{NN}; \quad L_{12} = L_{NE} - \mu_e L_{NN}; \quad L_{22} = L_{EE} - 2\mu_e L_{EN} + \mu_e^2 L_{NN} \quad (3.11)$$

Mostriamo infine la dipendenza del campo elettrico \mathbf{E} in funzione del potenziale elettrochimico:

$$\mathbf{E} = -\frac{\nabla\mu_e}{e} = -\frac{\nabla\mu_c}{e} - \nabla V \quad (3.12)$$

3.3 COEFFICIENTI TERMOELETTRICI

I coefficienti termoelettrici possono essere ricavati dalle espressioni delle densità dei flussi di calore e di massa.

Consideriamo la funzione (3.10), e supponiamo la T =costante durante la trasformazione, la densità di corrente \mathbf{J} può essere espressa :

$$\mathbf{J} = \frac{-eL_{11}}{T} \nabla\mu_e \quad (3.13)$$

dove $\mathbf{J} = e\mathbf{J}_N$. La relazione (3.13) può essere considerata una generalizzazione della *legge di Ohm*, dove la conducibilità elettrica isoterma è data da:

$$\sigma_T = \frac{e^2}{T} L_{11} \quad (3.14)$$

Se consideriamo invece un flusso termico, sotto le ipotesi di un trasporto di carica nullo, otteniamo:

$$\mathbf{J} = 0 = -L_{11} \left(\frac{1}{T} \nabla\mu_e \right) + L_{12} \nabla \left(\frac{1}{T} \right) \quad (3.15)$$

L'espressione della densità di flusso di calore quindi diventa:

$$\mathbf{J}_Q = \frac{1}{T^2} \left(\frac{L_{21}L_{12} - L_{11}L_{22}}{L_{11}} \right) \nabla T \quad (3.16)$$

L'espressione ricavata non è altro che la *legge di Fourier generalizzata*.

La conducibilità termica in assenza di correnti elettriche può essere espressa come:

$$k_J = -\frac{1}{T^2} \left(\frac{L_{21}L_{12} - L_{11}L_{22}}{L_{11}} \right) \quad (3.17)$$

Infine ricaviamo la *conducibilità termica* quando il gradiente del potenziale elettrochimico è zero (circuitto chiuso):

$$J_{QE} = \frac{L_{22}}{T^2} \nabla T \quad \text{con } k_E = \frac{L_{22}}{T^2} \quad (3.18)$$

Consideriamo ora la presenza di tutti e tre gli effetti e definiamo il coefficiente di Seebeck come il rapporto tra il gradiente del potenziale elettrochimico e il gradiente di temperatura:

$$-\frac{1}{e} \nabla \mu_e \stackrel{\text{def}}{=} \alpha \nabla T = \mathbf{E}|_{J=0} \quad (3.19)$$

Sostituendo la (3.19) nella relazione (3.15) si ottiene l'espressione del coefficiente di Seebeck in funzione dei coefficienti della matrice $[L]$:

$$\alpha = \frac{1}{eT} \frac{L_{12}}{L_{11}} \quad (3.20)$$

Consideriamo ora una trasformazione isoterma, le relazioni (3.10) diventano:

$$\mathbf{J} = eL_{11} \left(-\frac{1}{T} \nabla \mu_e \right), \quad J_Q = L_{21} \left(-\frac{1}{T} \nabla \mu_e \right) \quad (3.21)$$

Si ottiene quindi:

$$J_Q = \frac{1}{e} \frac{L_{12}}{L_{11}} \mathbf{J} \quad (3.22)$$

Il coefficiente di Peltier π , è dato dalla:

$$J_Q = \pi J, \quad \pi = \frac{1}{e} \frac{L_{12}}{L_{11}} \quad (3.23)$$

Confrontando la (3.23) con la (3.20) si ricava la prima relazione di Kelvin:

$$\pi = \alpha T \quad (3.24)$$

Ricaviamo ora la relazione tra il coefficiente di Thomson con i coefficienti di Seebeck e Peltier. Consideriamo il flusso termico complessivo, causato sia dalla presenza di una corrente elettrica che dalla presenza di un gradiente di temperatura:

$$J_Q = \alpha T J - k_J \nabla T \quad (3.25)$$

Calcoliamo la divergenza della (3.25), si ottiene:

$$\nabla J_Q = \nabla(\alpha T J - k_J \nabla T) = T J \nabla \alpha + \alpha \nabla T J + \alpha T \nabla J + \nabla(-k_J \nabla T) \quad (3.26)$$

Analizzando la (3.26) si può affermare che :

- Il termine $\alpha T \nabla J$ è uguale a zero per il principio di conservazione della carica;
- Il termine $T J \nabla \alpha$ è correlato all'effetto Thomson e all'effetto Peltier;
- Il termine $\alpha \nabla T J$ è legato all'energia prodotta e alle perdite;
- Il termine $\nabla(-k_J \nabla T)$ è legato alle variazioni della conducibilità termica in funzione della produzione o assorbimento di calore;

Consideriamo solo il termine $TJ\nabla\alpha$, è legato sia all'effetto Thomson (gradiente locale di temperatura), che all'effetto Peltier. Utilizzando la relazione (3.24)

$$TJ\nabla\alpha = TJ\nabla\left(\frac{\pi}{T}\right) = TJ\left(\frac{1}{T}\nabla\pi - \frac{1}{T^2}\pi\nabla T\right) = J(\nabla\pi - \alpha\nabla T) \quad (3.27)$$

Si può affermare quindi che l'effetto Thomson e l'effetto Peltier sono causati dallo stesso effetto fisico. Analizzando la relazione (3.27) si nota che:

- Considerando una trasformazione isoterma, si ottiene l'effetto Peltier:

$$J(\nabla\pi - \alpha\nabla T) = J(\nabla\pi)$$

- Se si considera un materiale omogeneo sottoposto ad un gradiente di temperatura, si ottiene l'espressione l'effetto Thomson:

$$J(\nabla\pi - \alpha\nabla T) = J\left(\frac{d\pi}{dT} - \alpha\right)\nabla T = \tau J\nabla T \quad (3.28)$$

Con:

$$\frac{d\pi}{dT}\nabla T = \pi\nabla T \quad \text{e} \quad \tau = \frac{d\pi}{dT} - \alpha \quad (3.29)$$

3.4 ENTROPIA PER PORTATORE DI CARICA

La relazione che lega i coefficienti di Peltier, Seebeck e Thomson mostra che le relazioni ricavate non sono altro che diverse espressioni della medesima quantità: *L'entropia trasportata da ogni particella.*

Utilizzando la relazione esistente tra motore termico e motore termoelettrico, possiamo analizzare un singolo portatore di carica che si muove nelle diverse trasformazioni di un ciclo di Carnot.

Nei rami adiabatici della trasformazione si ha un trasferimento di entropia dal lato caldo a quello freddo, e viceversa, in una sorta di ciclo convettivo in cui la carica si comporta come portatore di entropia.

Ricaviamo l'espressione della densità di flusso di entropia J_S sostituendo nella (3.4) l'espressione (3.10):

$$J_S = \frac{1}{T} \left[L_{21} \left(-\frac{1}{T} \nabla \mu_E \right) + L_{22} \nabla \left(\frac{1}{T} \right) \right] \quad (3.30)$$

Sostituiamo l'equazione (3.13) nella relazione appena trovata e otteniamo:

$$J_S = \frac{L_{21}}{TeL_{11}} J + \frac{1}{T} L_{22} \nabla \left(\frac{1}{T} \right) \quad (3.31)$$

Da questa relazione possiamo notare che la densità di flusso di entropia dipende da due fattori, uno di origine elettrochimica e l'altro di origine termica.

L'entropia trasportata per unità di carica è quindi definita come:

$$S_N = \frac{L_{21}}{L_{11}T} \quad (3.32)$$

Confrontando la (3.20) con la (3.32) possiamo scrivere la relazione che lega il coefficiente di Seebeck con la quantità S_N :

$$S_N = e\alpha \quad (3.33)$$

3.5 RELAZIONI FONDAMENTALI TRA FENOMENI TERMICI E FENOMENI ELETTRICI

Utilizzando l'espressione dell'entropia per portatore di carica appena ricavata (3.32) possiamo esprimere i coefficienti della matrice $[L]$ in funzione dei coefficienti termoelettrici.

$$\begin{cases} L_{11} = \frac{\sigma_T T}{e^2} \\ L_{12} = L_{21} = \frac{T^2}{e^2} \sigma_T S_N \\ L_{22} = \frac{T^3}{e^2} \sigma_T S_N^2 + T^2 k_j \end{cases} \quad (3.34)$$

Le espressioni di Osnager diventano quindi:

$$\mathbf{J} = -\sigma_T \left(\frac{\nabla \mu_e}{e} \right) + \frac{T^2}{e^2} \sigma_T S_N \nabla \left(\frac{1}{T} \right) \quad (3.35)$$

$$\mathbf{J}_Q = -T \sigma_T S_N \left(\frac{\nabla \mu_e}{e} \right) + \left(\frac{T^3}{e^2} \sigma_T S_N^2 + T^2 k_j \right) \nabla \left(\frac{1}{T} \right) \quad (3.36)$$

Distinguiamo quindi la conducibilità termica in assenza di gradiente di potenziale elettrochimico e la conducibilità termica in assenza di trasporto di cariche:

$$\begin{cases} k_J = -\frac{1}{T^2} \left(\frac{L_{21} L_{12} - L_{11} L_{22}}{L_{11}} \right) \\ k_E = \frac{L_{22}}{T^2} \end{cases} \quad (3.37)$$

Sostituendo nella (3.37) le espressioni dei coefficienti L_{ij} ; otteniamo una relazione tra queste due conducibilità termiche.

$$k_E = T \alpha^2 \sigma_T + k_J \quad (3.38)$$

Riscriviamo ora l'espressione (3.35) in funzione del campo elettrico \mathbf{E} e il gradiente di temperatura ∇T .

$$\mathbf{E} = -\frac{\nabla\mu_e}{e} \quad (3.39)$$

$$\nabla\left(\frac{1}{T}\right) = \frac{1}{T^2}\nabla T \quad (3.40)$$

Si ottiene l'espressione fondamentale che lega i fenomeni termici con quelli elettrici in un materiale.

$$\begin{aligned} \mathbf{J} &= \sigma_T \mathbf{E} - \sigma_T \alpha \nabla T \\ \mathbf{J}_Q &= \alpha T \mathbf{J} - k_J \nabla T \end{aligned} \quad (3.41)$$

La prima equazione ci fornisce la relazione tra densità di corrente campo elettrico e gradiente di temperatura. La seconda equazione ci fornisce un'espressione del totale flusso di energia termica transitante, il primo termine è proporzionale alla densità di corrente ed è causato dall'effetto Peltier; il secondo termine invece è proporzionale a $\nabla\left(\frac{1}{T}\right)$ ed è dovuto alla trasmissione di calore per conduzione.

CAPITOLO 4

TEG:

THERMOELECTRIC GENERATOR

Lo scopo del seguente capitolo è analizzare i moduli termoelettrici utilizzati per la generazione di energia elettrica, fornire un modello circuitale termico ed elettrico con il quale ricavare l'espressione del rendimento di conversione. Si presenteranno le formule per estrarre gli input del modello a partire dalle schede tecniche dei generatori termoelettrici.

Si analizzeranno da un punto di vista qualitativo le possibili ottimizzazioni dei parametri termici ed elettrici del generatore per raggiungere il punto di ottimo della curva di rendimento. Nell'ultima parte del capitolo si analizzeranno i generatori termoelettrici in commercio.

4.1 IL MODULO TERMOELETRICO

Un modulo termoelettrico è costituito da N coppie di materiali termoelettrici di tipo p e n connessi elettricamente in serie a una resistenza di carico R_L . I materiali di tipo p avranno coefficiente di Seebeck positivo mentre i materiali di tipo n avranno coefficiente negativo. Il coefficiente di Seebeck della termocoppia $\alpha_{pn} = \alpha_p - \alpha_n$ sarà quindi positivo.

Le N coppie sono tenute insieme da due piastre di materiale isolante (per evitare di mettere in corto circuito tutte le giunzioni), costituito generalmente da materiale ceramico che le mette in parallelo termico. La ceramica riveste un ruolo fondamentale in quanto, deve possedere una conduttività termica estremamente elevata pur mantenendo una bassissima conducibilità elettrica. I materiali comunemente utilizzati sono l'*Allumina o Ossido di Alluminio* (Al_2O_3), il *Nitruro di Alluminio* (AlN) o l'*Ossido di Berillio* (BeO).

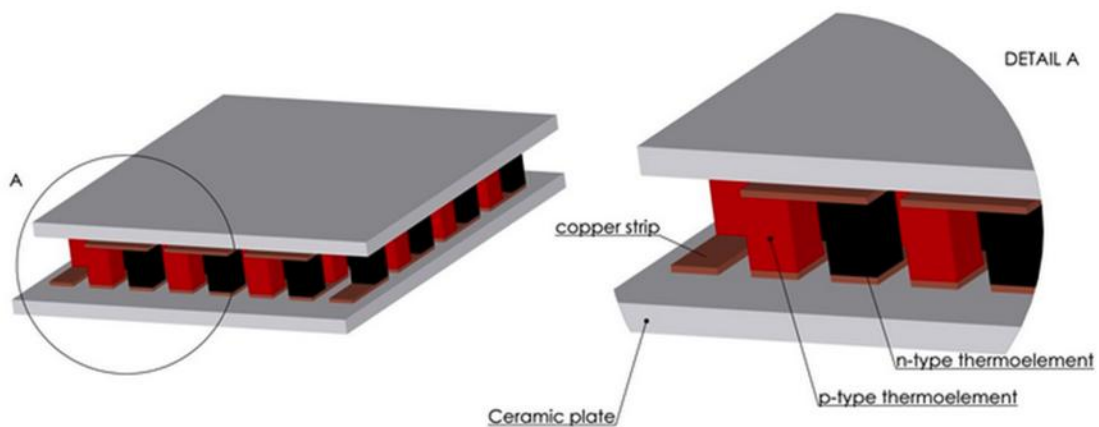


Fig.14 Struttura di Base di un modulo termoelettrico formato da materiali semiconduttori

Il modulo termoelettrico può essere usato per tre applicazioni:

- | | | |
|-------------------------|---|--------------------------------|
| 1. Per riscaldare | - | TEH (Thermoelectric Heater) |
| 2. Per refrigerare | - | TEC (Thermoelectric Cooler) |
| 3. Per produrre energia | - | TEG (Thermoelectric Generator) |

Queste configurazioni differiscono per come sono polarizzate le barre di materiale termoelettrico p e n .

Nel funzionamento come TEH e TEC, i termoelementi sono polarizzati da una differenza di potenziale, tale configurazione consente di controllare la differenza di temperatura tra le due piastre.

Nel funzionamento come TEG invece si utilizza l'effetto opposto, i termoelementi sono polarizzati da un gradiente di temperatura che produce una differenza di potenziale ai capi dei conduttori.

Con riferimento alla fig.15 La corrente I è considerata positiva se va dalla giunzione calda a quella fredda (materiale di tipo p). Le potenze termiche Q_H e Q_C sono considerate positive rispettivamente per flussi termici che entrano e che escono dall'elemento termoelettrico.

In fig.15 sono schematizzate le tre configurazioni di funzionamento di un modulo termoelettrico, le grandezze termiche sono in grigio mentre le grandezze elettriche sono in nero.

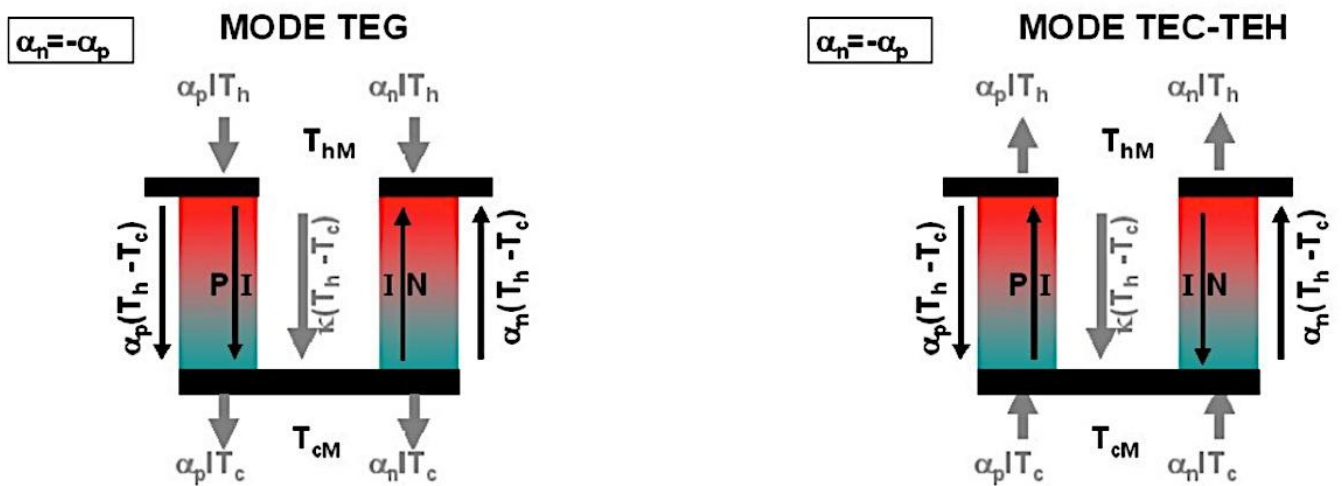


Fig.15 Applicazioni Termoelettriche.

Si possono distinguere le differenti differenze di potenziale:

- $\alpha_{pn}(T_{Hj} - T_{Cj})$ Tensione dovuta all'effetto Seebeck;
- $T_{Hj} - T_{Cj}$ Differenza di temperatura tra le due giunzioni;

e i flussi di potenza termica:

- $\alpha_{pn}T_{out}I$ Flusso di potenza termica dovuto all'effetto Peltier;
- $K_{pn}\Delta T$ Flusso di potenza termica trasmessa per
conduzione;

4.2 MODELLO CIRCUITALE DI UN GENERATORE TERMOELETTRICO

In un generatore termoelettrico l'energia termica è trasmessa da una fonte di calore a temperatura T_H alla giunzione calda a temperatura T_{Hj} , mentre la giunzione fredda a temperatura T_{Cj} trasferisce calore all'ambiente a temperatura T_C .

Generalmente i generatori termoelettrici sono realizzati utilizzando un unico materiale drogato rispettivamente n e p per i due termoelementi. I parametri di conducibilità elettrica e termica dei due elementi possono allora essere a buona ragione supposti identici. Si suppone inoltre che il coefficiente di Seebeck $\bar{\alpha}_{pn}$ sia il coefficiente di Seebeck medio $\frac{\alpha_{pn}(T_{Hj}) + \alpha_{pn}(T_{Cj})}{2}$ (per eliminare la dipendenza dalla temperatura); la resistività elettrica ρ e la conducibilità termica dei materiali k , siano costanti al variare della temperatura (per le termocoppie p-n la resistività elettrica e termica complessiva è data dalla media dei due materiali).

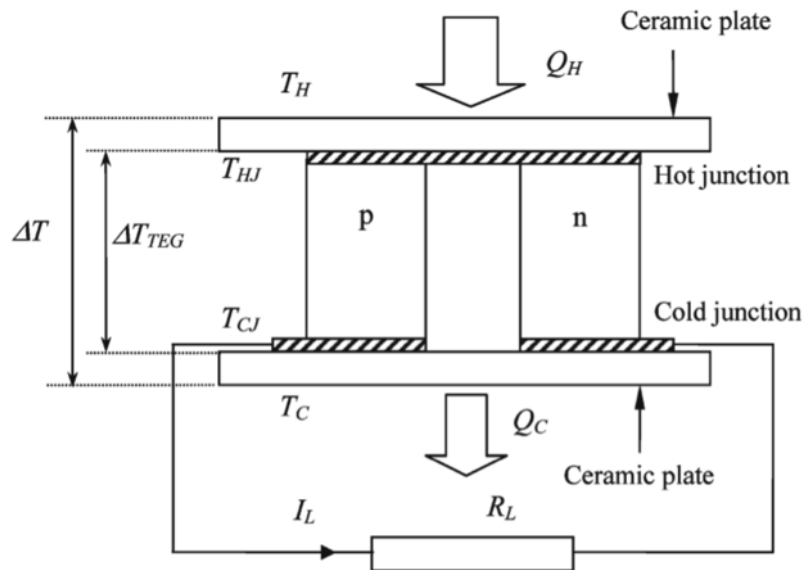


Fig.16 Schema di principio di un modulo termoelettrico connesso ad un carico R_L .

Supponendo di trascurare la resistenza elettrica e termica di contatto delle giunzioni, il trasferimento di calore per convezione ed irraggiamento all'interno del modulo termoelettrico e la resistenza termica delle piastre ceramiche. Con riferimento alla figura 16, la corrente I_L che circola nel circuito è:

$$I_L = \frac{V_G}{R_{in}+R_L} = \frac{\bar{\alpha}_{pn}(T_{HJ}-T_{CJ})}{R_{in}+R_L} \quad (4.1)$$

dove R_{in} è la resistenza elettrica interna del modulo ed è data dalla:

$$R_{in} = \frac{2N\rho h}{A_{leg}} \quad (4.2)$$

dove h e A_{leg} sono rispettivamente l'altezza e l'area di ogni singolo termoelemento.

4.2.1 Bilancio Energetico

Si supponga il dispositivo realizzato in modo tale da scambiare potenza termica solo attraverso la piastra "calda" e quella "fredda". La potenza termica Q_H , trasferita dalla sorgente di calore alla giunzione calda attraverso la piastra ceramica superiore, e la potenza termica Q_C trasferita dalla giunzione fredda all'ambiente attraverso la piastra ceramica inferiore, sono date rispettivamente da:

$$Q_H = (T_H - T_{HJ})K \quad (4.3)$$

$$Q_C = (T_{CJ} - T_E)K \quad (4.4)$$

La potenza termica scambiata alla giunzione calda/fredda è data dalla somma della potenza termica prodotta per effetto Peltier, della potenza termica trasferita per conduzione, della potenza termica dissipata per effetto Joule e della potenza prodotta per effetto Thomson.

Supponendo di trascurare quest'ultimo effetto, le espressioni della potenza termica scambiata diventano:

$$Q_{Hin} = -\bar{\alpha}_{pn}(T_{HJ} - T_{CJ})I_L + K_{in}(T_{HJ} - T_{CJ}) - \frac{I_L^2 R_{in}}{2} \quad (4.5)$$

$$Q_{Cout} = -\bar{\alpha}_{pn}(T_{HJ} - T_{CJ})I_L + K_{in}(T_{HJ} - T_{CJ}) - \frac{I_L^2 R_{in}}{2} \quad (4.6)$$

Si sottolinea che la Q_{Hin} e la Q_{Cout} hanno segno opposto; la corrente è stata considerata positiva quando va dalla giunzione calda a quella fredda, l'effetto Peltier dunque andrà a sottrarre potenza termica lato caldo e lo trasferirà sul lato freddo del TEG. Si è supposto inoltre che una parte della potenza dissipata per effetto joule sia dissipata lato caldo e una parte sia dissipata sul lato freddo del TEG.

K_{in} è la conducibilità interna del modulo, data da:

$$K_{in} = \frac{2kNA_{leg}}{h} \quad (4.7)$$

dove

N : numero di termocoppie;

k : Conducibilità termica del materiale termoelettrico;

h : altezza della singola termocoppia;

A_{leg} : Area di un ramo della termocoppia;

Ricaviamo ora un semplice circuito equivalente termico ricordando la similitudine circuitale che c'è tra parametri termici ed elettrici .

THERMAL QUANTITIES	UNITS	ANALOGOUS ELECTRICAL QUANTITIES	UNITS
Heat, q	W	Current, I	A
Temperature, T	K	Voltage, V	V
Thermal Resistance, Θ	K W ⁻¹	Resistance, R	Ω
Heat capacity, C	J K ⁻¹	Capacitance, C	F
Absolute zero temperature	0 K	Ground	0 V

Tab.1 Tabella comparativa tra parametri elettrici e termici

A partire dalle equazioni (4.5) e (4.6) si ricava la rappresentazione circuitale equivalente delle grandezze termiche.

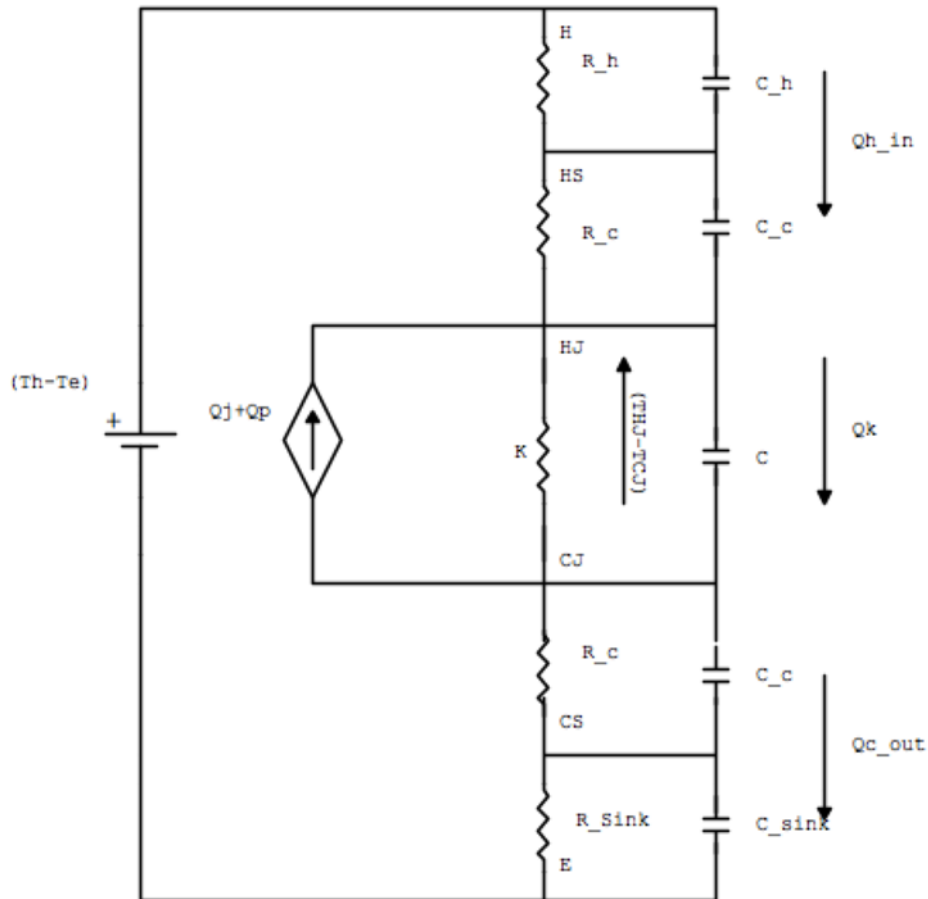


Fig.17 Circuito termico equivalente

Dove:

- **T_h** è la temperatura della superficie calda in [K];
- **T_e** è la temperatura della superficie del dissipatore in [K];
- **R_h , C_h** sono rispettivamente la resistenza di contatto e la capacità termica della superficie di contatto fra la sorgente ed il lato caldo della piastra ceramica, in [W/K];
- **R_c , C_c** sono rispettivamente la resistenza e la capacità termica della piastra ceramica, in [W/K] la resistenza e in [J/K] la capacità termica ;

- **R sink, C sink**: sono rispettivamente la resistenza di contatto e la capacità termica del dissipatore, in $[W/K]$ la resistenza e in $[J/K]$ la capacità termica ;
- **K, C** sono rispettivamente la conduttanza e la capacità termica della giunzione, in $[K/W]$ la resistenza e in $[J/K]$ la capacità termica ;
- **Q_p** è il calore trasferito per effetto peltier, in $[W]$;

$$Q_p = \bar{\alpha}_{pn}(T_{CJ} - T_{HJ})I$$

- **Q_j** è il calore dissipato per effetto joule dal modulo in $[W]$;

$$Q_j = RI^2$$

4.2.2 MODELLO ELETTRICO

Il circuito equivalente elettrico del TEG è costituito da un generatore controllato di tensione e da due resistenze in serie, una interna al modulo termoelettrico e una di “carico”, espressa come una semplice resistenza.

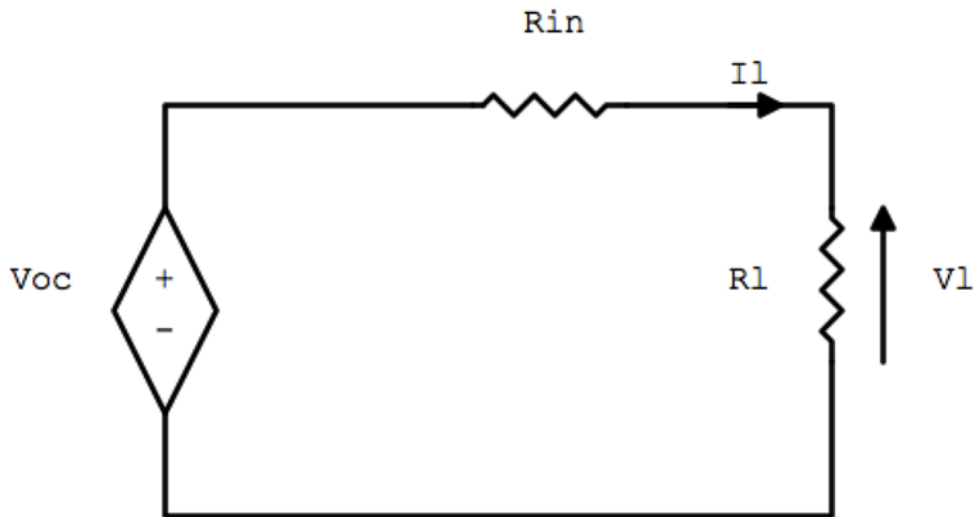


Fig.18 Circuito equivalente TEG

La potenza elettrica prodotta è data :

$$P_{prod} = Q_{H_{in}} - Q_{C_{out}} = \bar{\alpha}_{pn}(T_{HJ} - T_{CJ})I_L - I_L^2 R_{in} \quad (4.8)$$

Utilizzando la relazione di Seebeck, la tensione a circuito aperto del generatore termoelettrico è data da:

$$V_{oc} = \bar{\alpha}_{pn}(T_{HJ} - T_{CJ}) \quad (4.9)$$

Definiamo il coefficiente m come il rapporto tra la resistenza di carico e la resistenza interna del circuito termoelettrico.

$$m = \frac{R_L}{R_{in}} \quad (4.10)$$

Scriviamo ora le espressioni della tensione e della corrente in funzione del parametro m :

$$V_L = V_{oc} \frac{R_L}{R_{in} + R_L} = V_{oc} \frac{m}{m+1} \quad (4.11)$$

$$I_L = \frac{V_{oc}}{R_{in} + R_L} = \frac{V_{oc}}{(m+1)R_{in}} \quad (4.12)$$

$$P_{prod} = \frac{V_{oc}^2}{R_{in}} \frac{m}{(m+1)^2} = \frac{\Delta T^2 \alpha^2 A_{TE}}{\rho l} \frac{m}{(m+1)^2} \quad (4.13)$$

A partire dall'equazione 4.13, supponendo di tenere costanti sia la geometria del generatore e sia la differenza di temperatura, si può definire il fattore di potenza termoelettrico come:

$$P.F = \frac{\alpha^2}{\rho} = \alpha^2 \sigma \quad (4.14)$$

4.3 CALCOLO DEI PARAMETRI COSTITUTIVI DEL MODELLO

I produttori di TEG generalmente forniscono i seguenti parametri per definire le specifiche tecniche dei propri prodotti:

- T_{C_MAX}, T_{H_MAX} Massima temperatura a cui può essere sottoposto il lato freddo e caldo del TEG, generalmente il lato freddo ha una temperatura massima limitata dalla temperatura di fusione della lega saldante (sensibilmente più bassa di quella del lato caldo) usata per connettere le giunzioni $p-n$ ai cavi di potenza. Valori tipici sono:
 - $T_{H_MAX} = 100\text{ }^{\circ}\text{C fino a } 800\text{ }^{\circ}\text{C};$
 - $T_{C_MAX} = 50\text{ }^{\circ}\text{C fino a } 190\text{ }^{\circ}\text{C}$
- P_{mL} : Potenza massima trasferibile al carico nelle condizioni di carico accoppiato;
- V_{mL} : Tensione sul carico in caso di carico accoppiato (massimo trasferimento di potenza);
- V_{oc} : Tensione a vuoto del generatore termoelettrico;
- η_{max} : Rendimento massimo di conversione ($m = m_{\eta}$);
- η_{mL} : Rendimento nelle condizioni di massimo trasferimento di potenza ($m = 1$);

Partendo da questi dati è possibile ricavare tutti i parametri necessari al modello circuitale fin qui presentato.

Iniziamo con il calcolare la **resistenza interna** del modulo termoelettrico, ricordando che la condizione di massimo trasferimento di potenza si ha quando la resistenza interna del generatore e la resistenza del carico sono perfettamente uguali.

$$R_{in} = R_L \quad (4.15)$$

La resistenza interna del modulo può essere quindi calcolata dalla potenza massima e dalla tensione del modulo nelle condizioni di carico accoppiato:

$$R_{in} = \frac{V_{mL}^2}{P_{mL}} \quad (4.16)$$

Il **coefficiente di Seebeck** medio del generatore termoelettrico, $\bar{\alpha}_{pn}$, può essere valutato a partire dal seguente circuito nelle condizioni di massimo trasferimento di potenza.

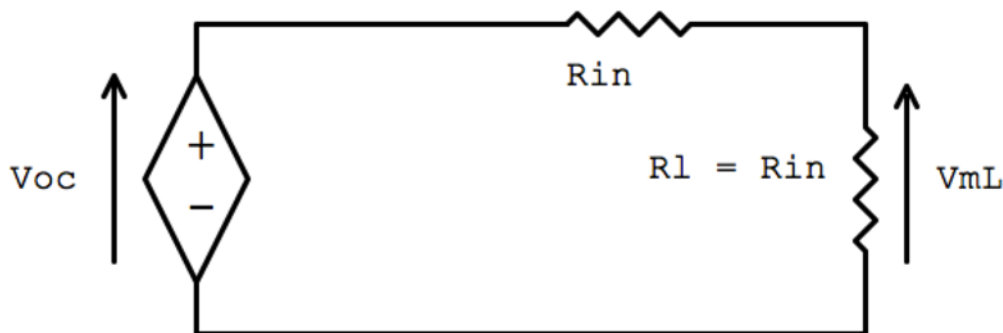


Fig.19 Circuito elettrico di un TEG sotto le condizioni di massimo trasferimento di potenza

$$V_{oc} = \bar{\alpha}_{pn}(T_{HJ} - T_{CJ}) \quad (4.17)$$

$$V_{oc} = 2V_{mL} \quad (4.18)$$

$$\bar{\alpha}_{pn} = \frac{2V_{mL}}{T_{HJ} - T_{CJ}} \quad (4.19)$$

Per calcolare la **resistenza termica (Θ_{in})** del generatore termoelettrico dobbiamo prima di tutto ricavare l'espressione dell'efficienza di conversione in funzione della resistenza termica.

Partiamo con il considerare che la potenza elettrica generata può essere espressa come una frazione della potenza termica che attraversa il TEG:

$$\eta_{mL} = \frac{I^2 R_{in}}{Q_{Hin}} \quad (4.20)$$

Ricordando che $m = \frac{R_L}{R_{in}}$, la corrente I può essere espressa come:

$$I = \frac{\bar{\alpha}_{pn}(T_{HJ}-T_{CJ})}{(m+1)R_{in}} \quad (4.21)$$

l'efficienza può essere quindi espressa come:

$$\eta = \frac{I^2 R_{in}}{Q_{Hin}} = \frac{2Zm(T_{HJ}-T_{CJ})^2}{2(1+m)^2 + Z(T_{HJ} + 2mT_{HJ} + T_{CJ})} \quad (4.22)$$

Se sostituiamo nella (4.22) la condizione di massimo trasferimento di potenza al carico ($m=1$), si ottiene:

$$\eta(m = 1) = \eta_{mL} = \frac{I^2 R_{in}}{Q_{Hin}} = \frac{2Z(T_{HJ}-T_{CJ})^2}{8 + Z(T_{HJ} + 2T_{HJ} + T_{CJ})} \quad (4.23)$$

Esprimendo la (4.23) in funzione di η_{mL} :

$$Z = \frac{8\eta_{mL}}{T_{HJ}(2-3\eta_{mL}) - T_{CJ}(2+\eta_{mL})} \quad (4.24)$$

Nel caso in cui il costruttore fornisca il rendimento massimo di conversione del TEG η_{max} , la relazione che lega il carico con la resistenza interna del generatore è data dalla (4.16), sostituendo questa espressione nella (4.23) otteniamo:

$$\eta_{max} = \eta(m = m_\eta) = \frac{T_{HJ} - T_{CJ}}{T_{HJ}} \frac{m_\eta - 1}{m_\eta + \frac{T_{CJ}}{T_{HJ}}} \quad (4.25)$$

Esprimendo la (4.33) in funzione del rendimento massimo, si ottiene:

$$m_\eta = \frac{\frac{T_{CJ} + \eta_c}{T_{HJ} + \eta_{max}}}{\frac{\eta_c}{\eta_{max}} - 1} \quad (4.26)$$

Dove con η_c si è espresso il rendimento del ciclo di Carnot ideale:

$$\eta_c = \frac{T_{HJ} - T_{CJ}}{T_{HJ}}$$

Ricordando che:

$$m_\eta = \sqrt{1 + \frac{1}{2} Z (T_{HJ} + T_{CJ})}$$

Ricaviamo l'espressione dell'indice di merito Z in funzione del rendimento massimo:

$$Z = \frac{2}{T_{HJ} + T_{CJ}} \left[\left(\frac{\eta_c T_{HJ} + \eta_{max} T_{CJ}}{\eta_c T_{HJ} - \eta_{max} T_{CJ}} \right)^2 - 1 \right] \quad (4.27)$$

Una volta calcolato l'indice di merito, la resistenza termica, la si calcola a partire dall'espressione dell'indice di merito Z.

$$Z = \frac{\bar{\alpha}_{pn}^2 \Theta_{in}}{R_{in}}$$

$$\Theta_{in} = \frac{R_{in}}{\bar{\alpha}_{pn}^2} Z \quad (4.28)$$

Gli ultimi parametri da ricavare per poter utilizzare il modello di TEG presentato nel paragrafo 4.3 sono **le capacità termiche** degli elementi che costituiscono il generatore: piastre ceramiche, sorgente calda e dissipatore. Partiamo col riportare l'espressione generale della capacità termica:

$$C = c\rho v \quad (4.29)$$

dove

- c è il calore specifico del materiale, espresso in $\frac{kJ}{kgK}$;
- ρ è la densità del materiale, espressa in $\frac{kg}{m^3}$;
- v è il volume, espresso in m^3 ;

METALS ↓	SEEBECK COEFFICIENT $\mu V/\cdot K$	DENSITY gm/cm^3	THERMAL EXPANSION COEFF. $10^{-7}/\cdot C$	THERMAL CONDUCTIVITY $W/cm/\cdot C$	SPECIFIC HEAT $J/gm/\cdot C$	RESISTIVITY $\Omega\text{-cm}$
SILICON	440	2.34	260	1.3	0.710	10.00
GERMANIUM	300	5.32	590	0.58	0.310	0.100
IRON	19	7.87	118	80	0.450	9.700E-6
TUNGSTEN	7.5	19.3	45	1.82	0.134	5.490E-6
GOLD	6.5	19.32	140	310	0.129	2.340E-6
SILVER	6.5	10.49	180	429	0.233	1.591E-6
COPPER	6.5	8.96	170	401	0.385	1.724E-6
LEAD	4	11.36	290	45	0.129	2.050E-5
ALUMINIUM	3.5	2.70	230	250	0.902	2.650E-6
CARBON	3	8.96	65	47	0.839	3.000E-3
NICKEL	-15	8.9	130	91	0.540	6.850E-6
CONSTANTAN	-35	8.9	149	22	0.401	4.890E-5
BISMUTH	-72	9.8	166	7.86	0.123	115.0E-6

Tab.2 Proprietà dei materiali termoelettrici

In fondo al capitolo è presentata una tabella che riporta i dati caratteristici dei TEG attualmente in commercio da tre delle più grandi aziende produttrici (Hi-Z, European Thermodynamics, Marlowe Industries , Altec e TEGTEC). Si è notato che i materiali più utilizzati sono i Bi_2Te_3 grazie al loro elevato indice di merito a basse temperature (fig.27), il volume dei termoelementi è pressoché costante a meno di piccole variazioni nei vari TEG analizzati, fatte queste considerazioni per non appesantire la trattazione la capacità termica viene trascurata in quanto lo scopo della trattazione è quello di analizzare solo il comportamento a regime del sistema, a valle dei transitori termici ed elettrici.

4.4 MODELLO SIMULINK DI UN GENERATORE TERMOELETTRICO

Utilizzando i modelli circuitali sin qui presentati, si è elaborato un modello Simulink per il generatore termoelettrico che ne simula il comportamento a regime a partire dalle condizioni al contorno.

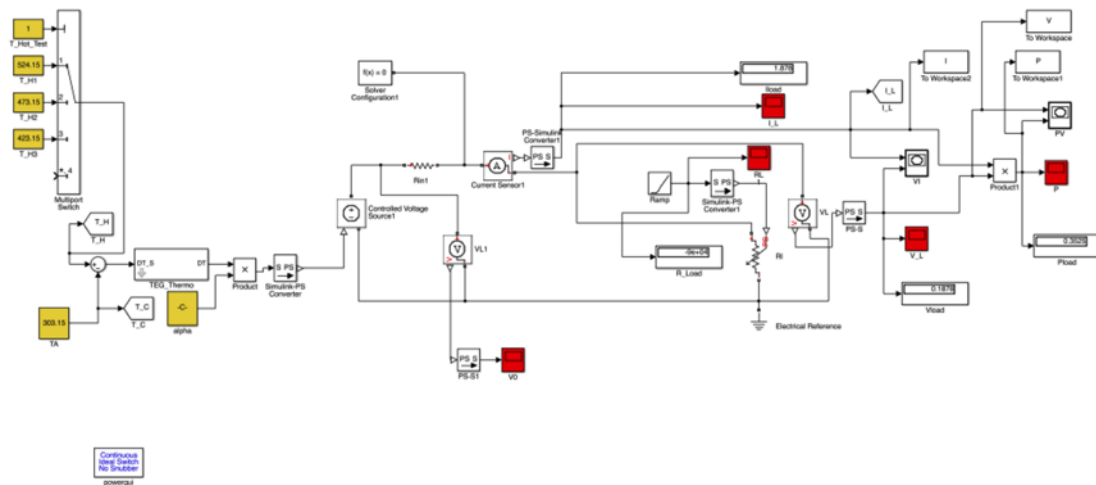
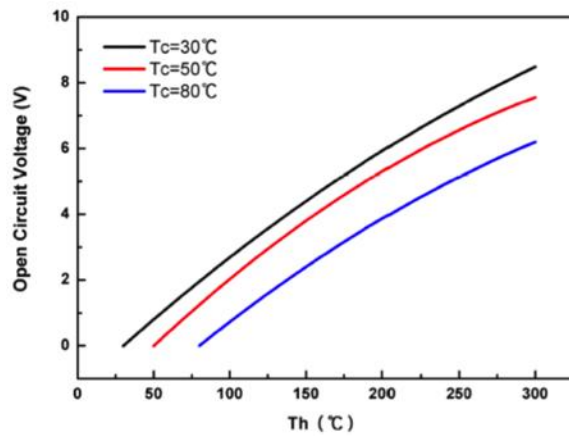


Fig.20 Modello Simulink modulo termoelettrico

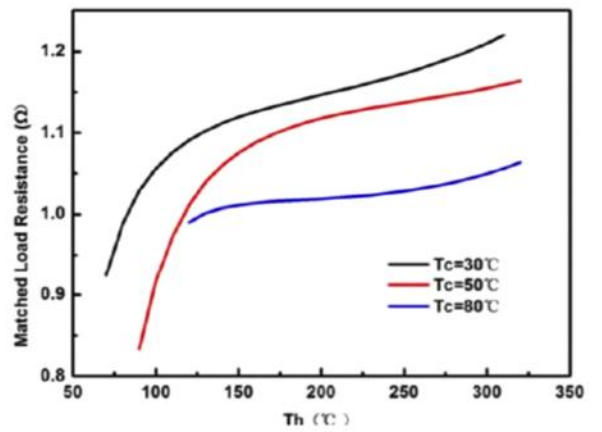
Tutte le simulazioni sono riferite ai dati di targa di un modulo termoelettrico “standard” in Bi_2Te_3 della TEGTEC Inc. modello TEG1-12611-6.0. I dati forniti dal costruttore sono i seguenti:

T_H [°C]	300
T_c [°C]	30
V_{oc} [V]	8.4
R_{in} [Ω]	1.2
V_{ml} [V]	4.2
I_{ml} [A]	3.4
P_{ml} [W]	14.6

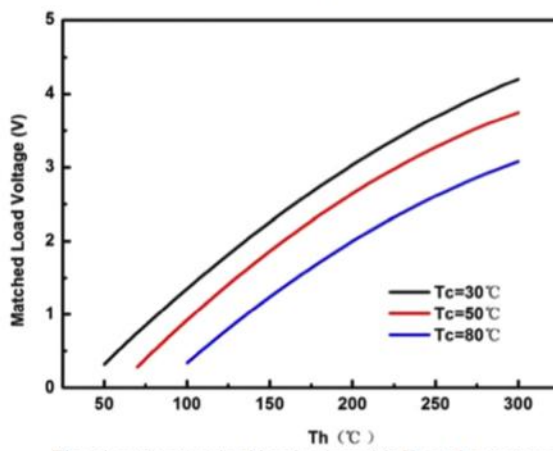
I dati inseriti nel modello sono riportati nella tabella in fondo al capitolo.



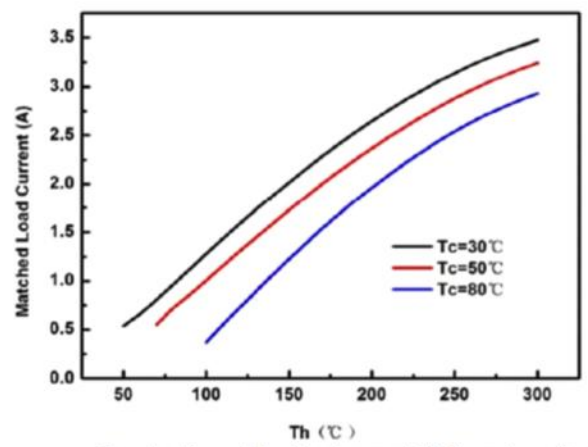
The chart for open circuit voltage Vs T_h under various T_c



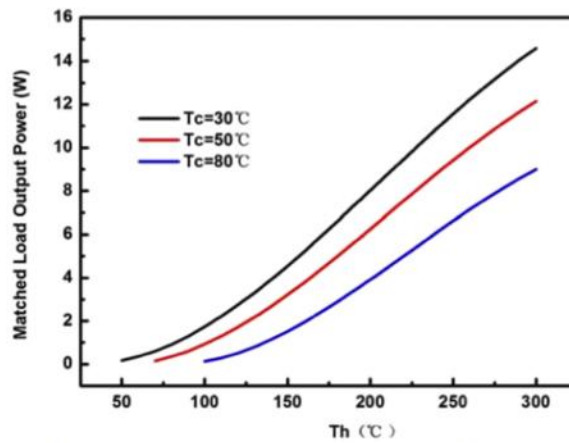
The chart for matched load resistance Vs T_h under various T_c



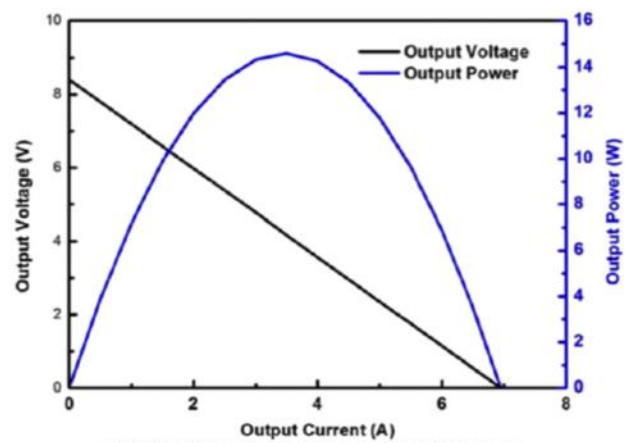
The chart for matched load voltage Vs T_h under various T_c



The chart for matched load current Vs T_h under various T_c



The chart for matched load output power Vs T_h under various T_c



The chart for output voltage and output power Vs output current under $T_h=300^\circ\text{C}$ and $T_c=30^\circ\text{C}$

Fig. 21 Curve Caratteristiche del generatore termoelettrico TEG1-12611-6.0 della TEGTEC

4.4.1 CIRCUITO TERMICO

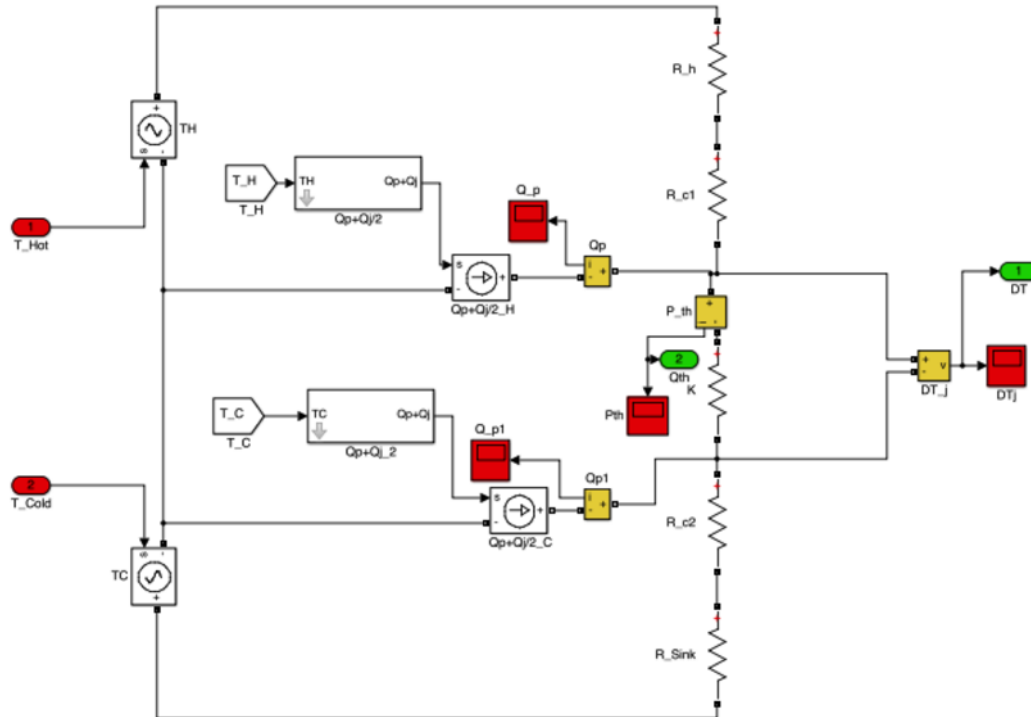


Fig.22 Modello circuitale termico del lato caldo del TEG

Il modello circuitale proposto, fornisce una rappresentazione a parametri concentrati del circuito termico, composto da materiale termoelettrico, piastre in ceramica e resistenze di contatto.

Il modello ha come ingressi la temperatura della superficie calda (a contatto con la sorgente di calore) e la temperatura dello scambiatore di calore. L'uscita del modello termico è la potenza termica a regime transiente nel modulo e la differenza di temperatura alla quale viene sottoposta la giunzione *p-n*.

La potenza transiente nella giunzione è data da:

$$Q_{Hin} = \bar{\alpha}_{pn}(T_{CJ} - T_{HJ})I_L + K_{in}(T_{HJ} - T_{CJ}) - I_L^2 R_{in}$$

La differenza di temperatura alla quale viene sottoposta la giunzione è:

$$DT_j = \frac{Q_{Hin}}{K_{in}}$$

4.4.2 CIRCUITO ELETTRICO

Il DT_j , in uscita del modello termico, è usato come ingresso nel modello elettrico, e moltiplicato per il coefficiente di Seebeck medio della cella, fornisce la sua tensione a vuoto. Nel modello è inserito un carico variabile, per ricreare le curve caratteristiche della cella e confrontarla con i dati del costruttore.

La tensione a vuoto e la potenza elettrica estratta dal modulo termoelettrico sono date da:

$$V_{oc} = \bar{\alpha}_{pn}(T_{HJ} - T_{CJ})$$

$$P_{prod} = Q_{H_{in}} - Q_{C_{out}} = \bar{\alpha}_{pn}(T_{HJ} - T_{CJ})I_L - I_L^2 R_{in}$$

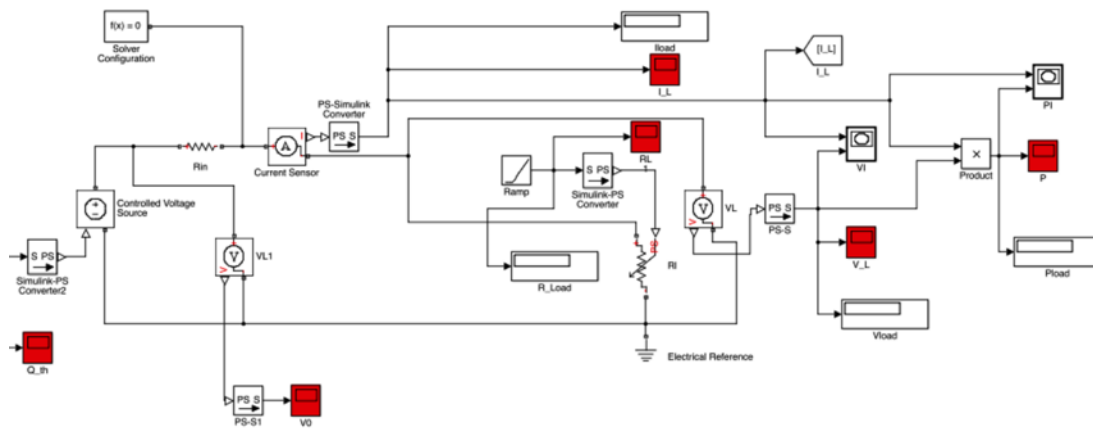


Fig.23 Modello circuitale Elettrico TEG

Si analizzano le curve caratteristiche del generatore al variare del carico.

Il grafico Potenza – Tensione, così come il grafico Potenza – Corrente, mostrati in fig. 24 e fig. 25, sono parabolici e presentano un massimo assoluto nel centro della curva. Come si può dedurre dai grafici esisterà uno e un solo carico per la quale il generatore funzionerà alla sua massima potenza. Più avanti saranno discusse le tecniche utilizzabili per variare il carico visto dal generatore e farlo funzionare nella condizione di massimo.

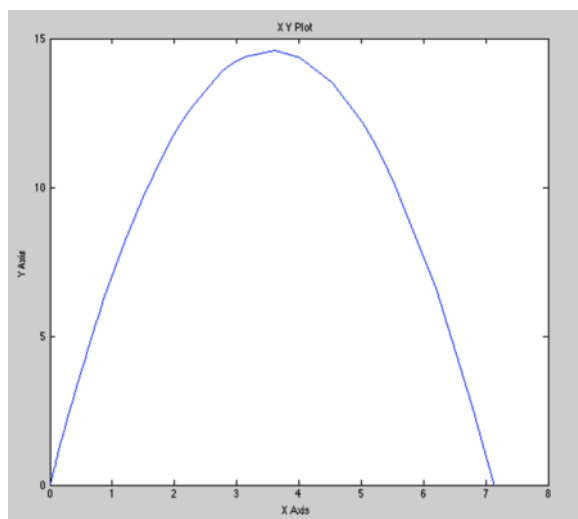


Fig. 24 Curva PV, Simulata

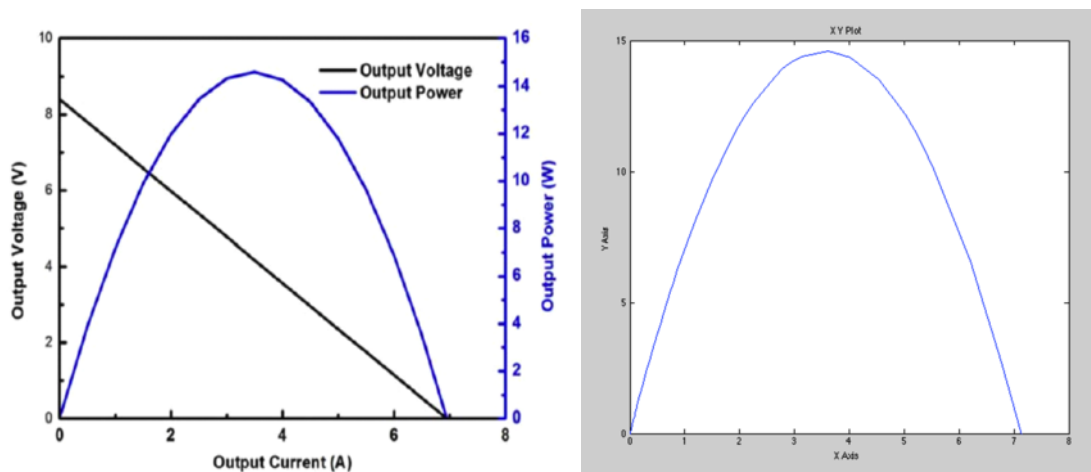


Fig. 25 Curva PI, Simulata e reale

La curva tensione-corrente è di tipo lineare, tensione e corrente sono strettamente collegati e il loro rapporto, pari alla somma tra la resistenza di carico e la resistenza interna del modulo, rimane costante.

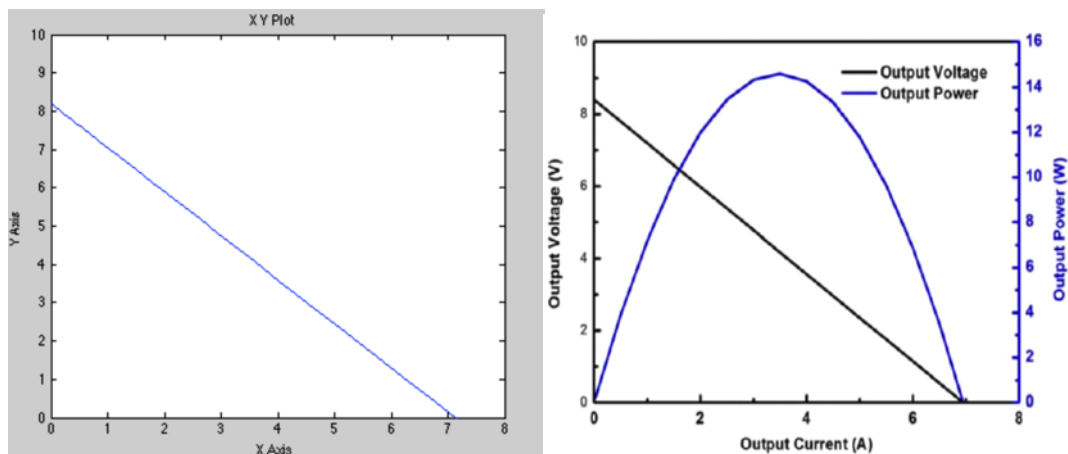


Fig. 26 Curva V_i , Simulata e reale

Di seguito verrà analizzato il comportamento dei moduli termoelettrici al variare della potenza termica transigente. Le simulazioni sono state effettuate con i dati di targa del modulo TEG GM250-241-10-12 European Thermonamics, riportati nella tabella in fondo al capitolo.

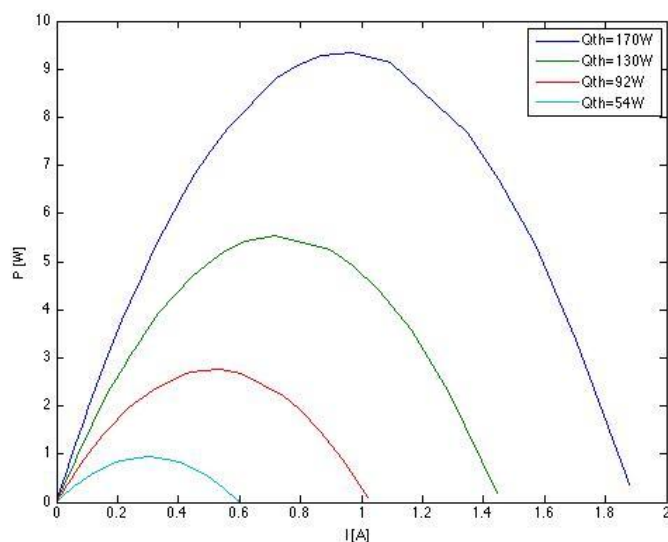


Diagramma PI TEG GM250-241-10-12 della European Thermonamics, simulato al variare della potenza termica

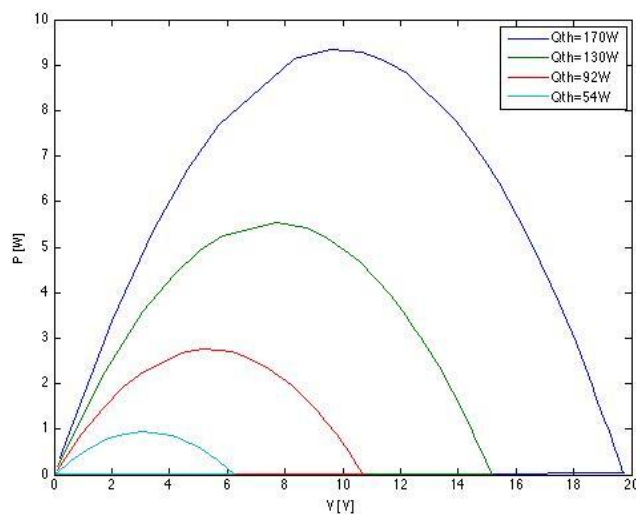


Diagramma PV TEG GM250-241-10-12 della European Thermonamics, simulato al variare della potenza termica transitante

Come si può vedere dalle curve P-V, P-I e V-I, al variare della potenza termica transitante, risultano traslate verso l'origine, il generatore termoelettrico riduce tutti i suoi parametri caratteristici, tensione a vuoto, corrente di corto circuito e potenza massima.

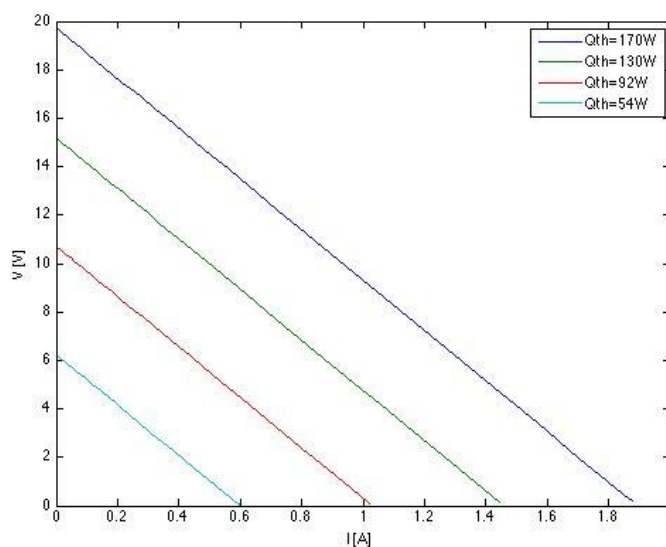


Diagramma V-I al variare della potenza transitante, della European Thermonamics

4.5 EFFICIENZA DI UN GENERATORE TERMOELETRICO

L'efficienza di conversione del generatore termoelettrico può essere espressa dal rapporto tra la potenza elettrica prodotta e la potenza termica in ingresso alla giunzione a temperatura maggiore.

$$\eta = \frac{P_{pro}}{Q_{H_{in}}} = \frac{\Delta T}{T_{Hj}} \left[\frac{m}{m+1 + \frac{(m+1)^2}{ZT_{Hj}} - \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T_{Hj}}} \right] \quad \text{con } Z \text{ "Indice di Merito"} \quad (4.30)$$

Iniziamo con il considerare che il rendimento η è dato dal prodotto di un rendimento ideale del ciclo di Carnot $\frac{\Delta T}{T_{Hj}}$ (rendimento limite) per un fattore che tiene conto delle irreversibilità $\frac{m}{m+1 + \frac{(m+1)^2}{ZT_{Hj}} - \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T_{Hj}}}$.

Per massimizzare il rendimento è quindi necessario rendere quest'ultimo coefficiente il più prossimo ad 1, agendo sui parametri Z , T_{Hj} e ΔT e m .

- "Indice di Merito Z": Considerando gli altri parametri costanti per migliorare il rendimento si possono utilizzare materiali con indice di merito Z elevati. Il coefficiente Z , è un parametro caratteristico del materiale termoelettrico (non dipende dalla geometria) ed è definito come:

$$Z = \frac{\bar{\alpha}_{pn}^2}{K_{in}R_{in}} \quad (4.31)$$

Il generatore termoelettrico deve essere costituito da termoelementi che hanno coefficiente di Seebeck elevato, ridotta conducibilità termica e bassa resistività elettrica.

Nella maggior parte dei metalli e non metalli la conducibilità elettrica e termica sono strettamente correlate; per ottenere conversioni efficienti (8-10%) i TEG in commercio utilizzano semiconduttori opportunamente drogati, appartenenti alla famiglia dei tellururi (es. Tellururo di Bismuto), ma sono molto costosi e rari (più rari del Platino). Altri materiali comunemente usati sono il PbTe e il SiGe. Lo zT di questi materiali però è ancora inferiore ad 1, vincolando di fatto la massima efficienza di conversione dei TEG.

$$\eta_{MAX} = \frac{\Delta T}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1+zT}-1}{\sqrt{1+zT}+1} \quad (4.32)$$

Le nano tecnologie hanno permesso di creare nuovi materiali termoelettrici a bassa dimensionalità (*Superlattici*) che promettono di arrivare a $zT > 3$, di fatto incrementando notevolmente il rendimento di conversione delle celle stesse. I materiali termoelettrici nano strutturati, utilizzano materiali largamente disponibili e a basso costo, e riducono notevolmente il costo per watt della tecnologia.

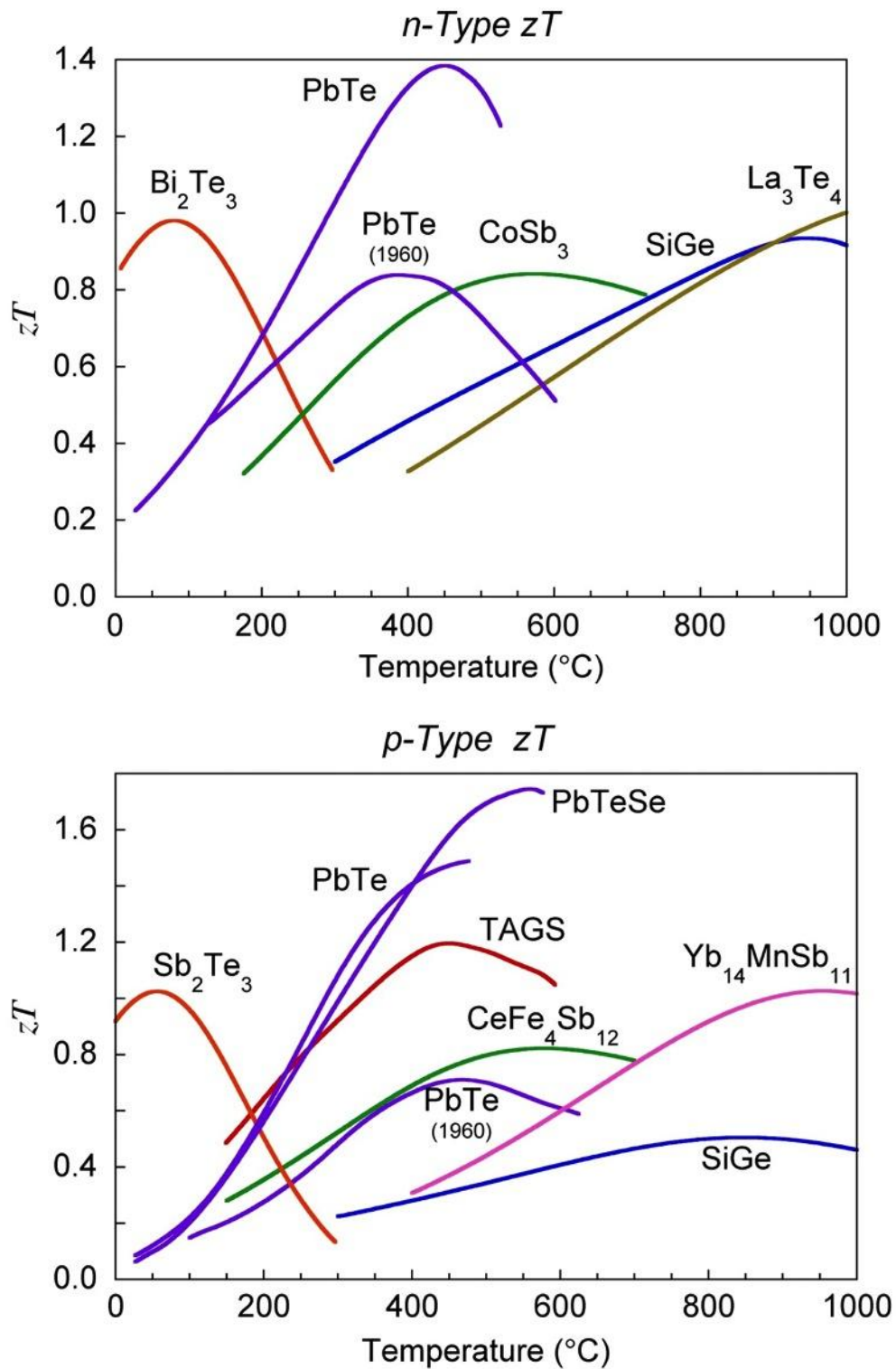


Fig.27 Indice di merito Z di alcuni tra i più comuni materiali termoelettrici n e p

- “Rapporto m tra resistenza di carico e resistenza interna” Supponiamo di variare solo m , si può identificare un valore di m che massimizza il rendimento.
 - “Massima Efficienza”: Uguagliando a zero la derivata rispetto ad m della 4.14, si ottiene il valore di m_η che massimizza il rendimento di conversione:

$$m_\eta = \sqrt{1 + \frac{1}{2}Z(T_{Hj} + T_{Cj})} \quad (4.33)$$

Da cui sostituendo nella 4.14, deriva un rendimento massimo pari a:

$$\eta_{max} = \frac{\Delta T}{T_{Hj}} \frac{m_\eta - 1}{m_\eta + \frac{T_{Cj}}{T_{Hj}}} \quad (4.34)$$

Variare il rapporto m , supponendo che la resistenza interna non possa cambiare (R_{in} costante), vuol dire variare la resistenza R_L del circuito “visto” dal generatore termoelettrico. Questa resistenza è data dal rapporto $\frac{V_{out}}{I_L}$, utilizzando un convertitore DC/DC o DC/AC e un algoritmo di MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) si possono variare tensione e corrente (agendo sugli angoli di accensione delle valvole, caso DC/AC o sul *duty cycle*, caso DC/DC) “modificando” la resistenza vista dal generatore termoelettrico, facendolo quindi lavorare “sempre” a R_{Lopt} a cui corrisponde il massimo rendimento.

- “Temperatura di lavoro del giunto freddo e del giunto caldo”. Maggiore è la differenza di temperatura, e in particolare maggiore è la temperatura del giunto caldo, e maggiore è l’efficienza del dispositivo.

- Consideriamo la derivata rispetto a m dell'equazione 4.13, e ugualiamola a zero. Il valore di m che massimizza la potenza è:

$$m_p = 1 \quad (4.35)$$

da cui segue sostituendo l'equazione 4.17 nella 4.13, una potenza massima erogabile dal generatore di:

$$P_{max} = \frac{V_{oc}^2}{4R_{in}} = \frac{[\bar{\alpha}_{pn}(T_{Hj}-T_{Cj})]^2}{4R_{in}} \quad (4.36)$$

in accordo con il teorema di massima potenza trasferibile al carico.

Come si può facilmente intuire dall'equazione 4.18, la potenza massima estraibile dal generatore termoelettrico dipende dal quadrato della differenza di temperatura tra le due piastre; maggiore è la differenza di temperatura (e quindi la potenza termica scambiata tra la piastra "calda" e quella "fredda") e maggiore sarà la potenza elettrica estratta dal modulo.

All'aumentare della potenza termica in ingresso, aumentano però, i problemi riguardanti la dissipazione di calore lato freddo, per mantenere il gradiente di temperatura costante, per questo nella pratica i generatori termoelettrici sono

progettati per soddisfare la condizione, $m_\eta = \sqrt{1 + \frac{1}{2}Z(T_{Hj} + T_{Cj})}$, con la massima potenza elettrica estratta a parità di potenza termica in ingresso.

TEG ANALYSIS FROM MANUFACTURES (EUROPEAN THERMODYNAMICS, HI-Z, MARLOWE INDUSTRIES, ALTEC E TEGTEC)

C o	S	Model	DT [T]	TH	T C	Pml [W]	Rml [Ω]	Voc [V]	Iml [A]	Vml [V]	Qin [W]	H [mm]	L [mm]	T [mm]	η %	A [cmg]	α _m	Z	Øm	TEG
E T	U K	31-28-12	220	250	30	7,81	0,18	2,4	6,52	1,2	156,2	30	30	3,5	5,00 %	9	1,09E-02	1,15E-03	1,7467	Bi2Te ₃
E T	U K	49-45-30	220	250	30	13,23	0,23	3,96	6,68	1,98	264,6	62	62	5,8	5,00 %	38,44	1,80E-02	1,15E-03	0,8198	Bi2Te ₃
E T	U K	49-45-25	220	250	30	15,23	0,26	3,96	7,69	1,98	304,60	62,00	62,00	5,30	5,00 %	38,44	1,80E-02	1,15E-03	0,9267	Bi2Te ₃
E T	U K	31-14-10	220	250	30	2,50	0,36	1,90	2,63	0,95	50,00	20,00	20,00	3,00	5,00 %	4,00	8,64E-03	1,15E-03	5,5739	Bi2Te ₃
E T	U K	127-28-10	220	250	30	28,30	0,40	6,90	8,20	3,45	566,00	62,00	62,00	4,00	5,00 %	38,44	3,14E-02	1,15E-03	0,4696	Bi2Te ₃
E T	U K	31-28-35	220	250	30	2,75	0,58	2,54	2,17	1,27	55,00	30,00	30,00	6,30	5,00 %	9,00	1,15E-02	1,15E-03	5,0249	Bi2Te ₃
E T	U K	31-14-16	220	250	30	1,90	0,70	2,30	1,65	1,15	38,00	20,00	20,00	3,00	5,00 %	4,00	1,05E-02	1,15E-03	7,3962	Bi2Te ₃
E T	U K	127-28-12	220	250	30	25,50	0,76	8,80	5,80	4,40	510,00	62,00	62,00	4,00	5,00 %	38,44	4,00E-02	1,15E-03	0,5485	Bi2Te ₃
E T	U K	71-14-10	220	250	30	6,10	0,79	4,40	2,80	2,20	122,00	30,00	30,00	3,40	5,00 %	9,00	2,00E-02	1,15E-03	2,2808	Bi2Te ₃
E T	U K	71-10-12	220	250	30	3,00	1,47	4,20	1,40	2,10	60,00	23,00	23,00	3,40	5,00 %	5,29	1,91E-02	1,15E-03	4,6578	Bi2Te ₃
E T	U K	71-14-16	220	250	30	4,17	2,05	5,85	1,43	2,93	83,40	30,00	30,00	3,40	5,00 %	9,00	2,66E-02	1,15E-03	3,3482	Bi2Te ₃
E T	U K	127-14-10	220	250	30	9,90	2,49	9,93	2,00	4,96	198,00	40,00	40,00	3,40	5,00 %	16,00	4,51E-02	1,15E-03	1,4115	Bi2Te ₃
E T	U K	127-10-12	220	250	30	5,90	2,60	7,90	1,50	3,95	118,00	30,00	30,00	3,40	5,00 %	9,00	3,59E-02	1,15E-03	2,3285	Bi2Te ₃
E T	U K	71-10-16	220	250	30	2,30	2,70	5,00	0,90	2,50	46,00	23,00	23,00	3,40	5,00 %	5,29	2,27E-02	1,15E-03	6,0366	Bi2Te ₃
E T	U K	127-14-16	220	250	30	6,99	3,65	10,11	1,38	5,05	139,80	40,00	30,00	3,40	5,00 %	12,00	4,60E-02	1,15E-03	1,9960	Bi2Te ₃

TEG: Thermoelectric Generator

Co	S	Model	DT [T]	TH	T C	Pml [W]	Rml [Ω]	Voc [V]	Iml [A]	Vml [V]	Qin [W]	H [mm]	L [mm]	T [mm]	η %	A [cmq]	α_m	Z	Θ_m	TEG
ET	UK	127-10-15	220	250	30	4,02	6,89	10,52	0,76	5,26	80,40	30,00	30,00	3,70	5,00 %	9,00	4,78E-02	1,15E-03	3,4798	Bi2Te3
ET	UK	161-12-20	220	250	30	3,27	9,70	11,25	0,58	5,60	65,00	40,00	40,00	4,00	5,03 %	16,00	5,11E-02	1,16E-03	4,3174	Bi2Te3
ET	UK	241-10-12	220	250	30	9,32	10,41	19,70	0,95	9,85	186,40	40,00	40,00	3,40	5,00 %	16,00	8,95E-02	1,15E-03	1,4993	Bi2Te3
ET	UK	241-10-16	220	250	30	7,29	13,38	19,76	0,74	9,88	145,80	40,00	40,00	3,40	5,00 %	16,00	8,98E-02	1,15E-03	1,9153	Bi2Te3
ET	UK	161-12-40	220	250	30	1,90	18,90	12,00	0,32	6,00	38,00	40,00	40,00	6,80	5,00 %	16,00	5,45E-02	1,15E-03	7,3361	Bi2Te3
ET	UK	449-10-12	220	250	30	14,85	19,78	34,28	0,86	17,14	297,00	54,00	54,00	3,70	5,00 %	29,16	1,56E-01	1,15E-03	0,9408	Bi2Te3
ET	UK	449-10-16	220	250	30	12,00	25,88	35,32	0,68	17,66	240,00	54,00	54,00	3,80	5,00 %	29,16	4,00E-02	1,15E-03	0,5485	Bi2Te3
MI	US A	12-6-01L	180	230	50	6,16	4,56	9,51	1,20	5,30	122,47	40,13	40,13	3,91	5,03 %	16,10	1,61E-01	1,15E-03	1,1595	Bi2Te3
MI	US A	12-8-01L	180	230	50	7,95	3,46	9,43	1,51	5,25	159,96	40,13	40,13	3,60	4,97 %	16,10	5,28E-02	1,50E-03	2,4545	Bi2Te3
MI	US A	12-2,5-01L	180	230	50	2,71	10,47	9,56	0,51	5,33	52,12	30,00	30,00	4,00	5,20 %	9,00	5,24E-02	1,48E-03	1,8639	Bi2Te3
MI	US A	12-4-01L	180	230	50	4,05	6,83	9,45	0,77	5,26	86,17	30,00	30,00	3,40	4,70 %	9,00	5,31E-02	1,57E-03	5,8332	Bi2Te3
Hi-Z	US A	HiZ-2	200	230	30	2,00	4,00	6,53	0,80	3,30	44,44	29,00	29,00	4,30	4,50 %	8,41	5,25E-02	1,37E-03	3,4021	Bi2Te3
Hi-Z	US A	HiZ-9	200	230	30	9,00	1,15	6,50	2,90	3,28	200,00	62,00	62,00	6,51	4,50 %	38,44	3,26E-02	1,13E-03	4,2443	Bi2Te3
Hi-Z	US A	HiZ-14	200	230	30	14,00	0,15	3,50	8,00	1,65	311,11	62,00	62,00	5,10	4,50 %	38,44	3,25E-02	1,13E-03	1,2315	Bi2Te3
Hi-Z	US A	HiZ-20	200	230	30	20,00	0,30	5,00	8,00	2,38	444,44	75,00	75,00	5,10	4,50 %	56,25	1,75E-02	1,13E-03	0,5540	Bi2Te3

TEG: Thermoelectric Generator

Co	S	Model	DT [T]	TH	T C	Pml [W]	Rml [Ω]	Voc [V]	Iml [A]	Vml [V]	Qin [W]	H [mm]	L [mm]	T [mm]	η %	A [cmq]	α _m	Z	Øm	TEG
Altec	UA	1060	270	300	30	8,00	2,88	9,6	1,7	4,8	123	40,00	40,00	4,00	6,50 %	16,00	3,55E-02	1,27E-03	2,9007	Bi2Te3
Altec	UA	1061	270	300	30	8,00	0,72	4,8	3,40	2,40	123	40,00	40,00	4,00	6,50 %	16,00	1,78E-02	1,27E-03	2,9007	Bi2Te3
Altec	UA	1062	270	300	30	8,00	0,18	2,4	6,80	1,20	123	40,00	40,00	4,00	6,50 %	16,00	8,88E-03	1,27E-03	2,9007	Bi2Te3
Altec	UA	1063	270	300	30	8,00	0,05	1,2	13,50	0,60	123	40,00	40,00	4,00	6,50 %	16,00	4,44E-03	1,27E-03	2,9007	Bi2Te3
Altec	UA	1064	270	300	30	8,00	0,01	0,56	28,40	0,28	123	40,00	40,00	4,00	6,50 %	16,00	2,07E-03	1,27E-03	2,9007	Bi2Te3
Altec	UA	1065	270	300	30	4,90	0,22	2,08	4,70	1,04	75	30,00	30,00	4,00	6,50 %	9,00	7,70E-03	1,27E-03	4,7359	Bi2Te3
Altec	UA	1066	270	300	30	4,90	0,05	1,02	9,60	0,51	75	30,00	30,00	4,00	6,50 %	9,00	3,78E-03	1,27E-03	4,7359	Bi2Te3
Altec	UA	1067	270	300	30	4,90	0,02	0,68	14,40	0,34	75	30,00	30,00	4,00	6,50 %	9,00	2,52E-03	1,27E-03	4,7359	Bi2Te3
Altec	UA	1068	270	300	30	4,90	0,01	0,34	28,00	0,17	75	30,00	30,00	4,00	6,50 %	9,00	1,26E-03	1,27E-03	4,7359	Bi2Te3
Altec	UA	1069	270	300	30	8,00	0,61	4,4	4,10	2,20	123	30,00	60,00	4,00	6,50 %	18,00	1,63E-02	1,27E-03	2,9007	Bi2Te3
Altec	UA	1070	270	300	30	8,00	0,13	2	8,20	1,00	123	30,00	60,00	4,00	6,50 %	18,00	7,40E-03	1,27E-03	2,9007	Bi2Te3
Altec	UA	1071	270	300	30	8,00	0,05	1,3	12,50	0,65	123	30,00	60,00	4,00	6,50 %	18,00	4,81E-03	1,27E-03	2,9007	Bi2Te3
Altec	UA	1072	270	300	30	8,00	0,01	0,64	25,00	0,32	123	30,00	60,00	4,00	6,50 %	18,00	2,37E-03	1,27E-03	2,9031	Bi2Te3
Altec	UA	1073	270	300	30	7,20	0,00	0,32	45,20	0,16	130	30,00	60,00	4,00	5,54 %	18,00	1,18E-03	1,03E-03	2,6216	Bi2Te3
Altec	UA	1074	270	300	30	16,50	0,88	7,6	4,30	3,80	250	60,00	60,00	4,00	6,60 %	36,00	2,81E-02	1,30E-03	1,4352	Bi2Te3
Altec	UA	1075	270	300	30	16,50	0,22	3,8	8,60	1,90	253	60,00	60,00	4,00	6,52 %	36,00	1,41E-02	1,28E-03	1,4126	Bi2Te3

Co	S	Model	DT [T]	TH	T C	Pml [W]	Rml [Ω]	Voc [V]	Iml [A]	Vml [V]	Qin [W]	H [mm]	L [mm]	T [mm]	η %	A [cmq]	α_m	Z	Θ_m	TEG
Altec	UA	1076	270	300	30	16,10	0,10	2,6	12,50	1,30	247	60,00	60,00	4,00	6,52 %	36,00	9,62E-03	1,28E-03	1,4467	Bi2Te3
Altec	UA	1077	270	300	30	16,10	0,06	2	16,50	1,00	247	60,00	60,00	4,00	6,52 %	36,00	7,40E-03	1,28E-03	1,4467	Bi2Te3
Altec	UA	1078	270	300	30	16,10	0,02	1,2	25,00	0,60	247	60,00	60,00	4,00	6,52 %	36,00	4,44E-03	1,28E-03	1,4467	Bi2Te3
Altec	UA	1079	270	300	30	14,00	0,01	0,62	44,00	0,31	254	60,00	60,00	4,00	5,51 %	36,00	2,30E-03	1,03E-03	1,3401	Bi2Te3
Altec	UA	1080	270	300	30	13,80	0,00	0,34	79,20	0,17	250	60,00	60,00	4,00	5,52 %	36,00	1,26E-03	1,03E-03	1,3620	Bi2Te3
Altec	UA	1081	270	300	30	37,00	2,00	17,2	4,30	8,60	570	90,00	90,00	4,00	6,49 %	81,00	6,37E-02	1,27E-03	0,6261	Bi2Te3
Altec	UA	1082	270	300	30	37,00	0,76	10,6	7,00	5,30	570	90,00	90,00	4,00	6,49 %	81,00	3,92E-02	1,27E-03	0,6261	Bi2Te3
Altec	UA	1083	270	300	30	31,80	0,25	5,6	11,40	2,80	578	90,00	90,00	4,00	5,50 %	81,00	2,07E-02	1,03E-03	0,5886	Bi2Te3
Altec	UA	1084	270	300	30	33,00	0,06	2,78	22,00	1,39	555	90,00	90,00	4,00	5,95 %	81,00	1,03E-02	1,13E-03	0,6261	Bi2Te3
TEC	US A	12611-6.0	270	300	30	14,60	1,20	8,4	3,40	4,20	365	56,00	56,00	4,00	4,00 %	31,36	3,11E-02	6,97E-04	0,8641	Bi2Te3
TEC	US A	12610-5.1	270	300	30	5,10	3,00	7,8	1,30	3,90	113	40,00	40,00	4,00	4,51 %	16,00	2,89E-02	8,05E-04	2,8923	Bi2Te3
TEC	US A	12611-8.0	270	300	30	13,00	1,80	9,5	2,70	4,80	325	56,00	56,00	4,00	4,00 %	31,36	3,52E-02	6,97E-04	1,0134	Bi2Te3
TEC	US A	T1268-4.3	270	300	30	5,20	5,40	10,7	1,00	5,30	115	35,00	35,00	4,00	4,52 %	12,25	3,96E-02	8,06E-04	2,7728	Bi2Te3
TEC	US A	1263-4.3	270	300	30	5,20	5,40	10,7	1,00	5,30	115	30,00	30,00	4,00	4,52 %	9,00	3,96E-02	8,06E-04	2,7728	Bi2Te3
TEC	US A	199-4.3	270	300	30	7,50	5,70	13,4	1,12	6,70	152	40,00	40,00	4,00	4,93 %	16,00	4,96E-02	8,97E-04	2,0750	Bi2Te3

Tab.3 Tabella con le proprietà dei moduli termoelettrici in commercio.

CAPITOLO 5

CONVERTITORI DC/DC

Come si è visto nel capitolo precedente per ottimizzare il funzionamento di un TEG è possibile far lavorare il “modulo” alla massima potenza possibile per ogni dato valore di potenza termica (MPP – Punto di Massima Potenza) attraverso vari metodi di tracking simili a quelli usati negli impianti fotovoltaici. Gli algoritmi di MPPT, sono di tipo ricorsivo e agiscono sulla logica di controllo dello switch dei convertitori DC/DC fino al punto di funzionamento alla massima potenza.

Lo scopo del seguente capitolo è di analizzare i vari tipi di convertitori DC/DC esistenti e valutarne vantaggi e svantaggi nell'utilizzo con un TEG.

Ogni convertitore è analizzato attraverso simulazioni in ambiente Simulink.

5.1 PREMESSA

I convertitori DC/DC sono molto usati negli alimentatori stabilizzati a corrente continua e negli azionamenti per motori dc.

Generalmente l'ingresso di questi convertitori è una tensione non regolata, nel caso in esame la tensione è generata dal modulo termoelettrico ed è proporzionale al gradiente di temperatura sul TEG.

Il convertitore ha il duplice compito di mantenere costante la tensione al carico e di variare la resistenza di ingresso vista dal generatore così da inseguire il punto a massima potenza.

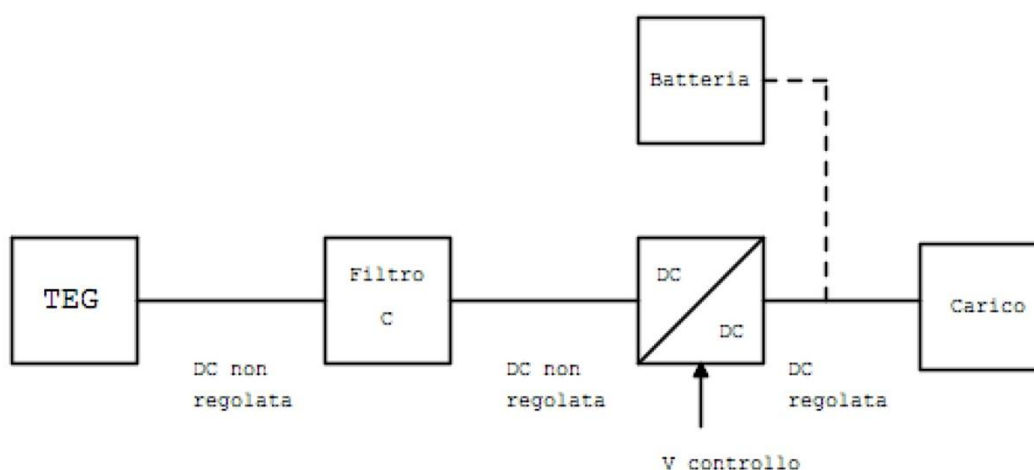


Fig.28 Sistema di conversione DC/DC

Saranno trattati i seguenti convertitori dc/dc:

- Convertitore Buck (*abbassatore*);
- Convertitore Boost (*elevatore*);
- Convertitore Buck-Boost (*abbassatore/elevatore*);

I convertitori sono considerati in regime permanente. Gli *switch* considerati ideali e si possono trascurare le perdite negli elementi induttivi e capacitivi.

Si fa l'ipotesi che la resistenza interna alla sorgente sia nulla e che la tensione non abbia ripple significativi.

Nello stadio di uscita un piccolo filtro è trattato come parte integrante del convertitore DC/DC. Il carico è rappresentato come una resistenza equivalente.

5.2 DUTY CYCLE E TECNICHE DI MODULAZIONE

In un convertitore DC/DC, la tensione media in uscita deve essere regolata in modo da eguagliare il livello desiderato, anche se la tensione di ingresso e il carico variano. I convertitori DC/DC a commutazione utilizzano uno o più interruttori per trasformare la corrente continua da un livello all'altro.

Analizziamo il semplice circuito in figura (fig.29), è costituito da un generatore di tensione continua, uno switch e una resistenza.

Il valore medio V_o della tensione in uscita v_o dal convertitore è regolata agendo sui tempi di chiusura ed apertura dell'interruttore (t_{on} e t_{off}).

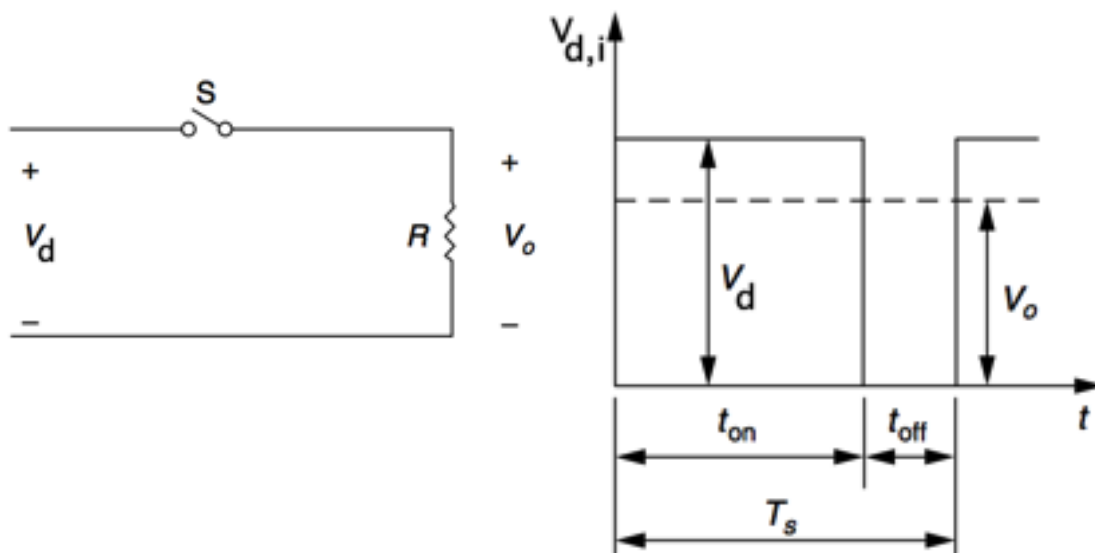


Fig.29 Chopper DC e tensione V_o regolata

Esistono vari metodi per il controllo della tensione in uscita:

1. Un metodo molto usato per controllare la tensione di uscita utilizza una frequenza di commutazione costante $f_s = \frac{1}{T_s}$, con $T_s = t_{on} + t_{off}$, e modifica la durata di chiusura dell'interruttore t_{on} . Questa tecnica è detta *PWM (Pulse Width Modulation)* poiché viene controllata la larghezza dell'impulso di comando dell'interruttore e quindi il fattore di utilizzazione per periodo dell'interruttore (*Duty Cycle*).

Il *duty cycle* è definito come il rapporto tra il tempo di conduzione dell'interruttore (t_{on}) e il periodo di *switching* (T_s):

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (5.1)$$

La variazione di t_{on} non comporta alcun costo in termini di potenza, ottenendo una variazione del valore medio, quindi è come se si realizzasse un amplificatore lineare.

La potenza dissipata sullo switch nel periodo T_s è data da: $P = V_{SAT} i_L$. Dove con V_{SAT} indichiamo la tensione di saturazione del dispositivo utilizzato come switch, ad esempio per un BJT $V_{SAT} = 1 \div 4 V$.

La potenza dissipata per commutazione sullo switch risulta molto contenuta, pertanto questa tecnica di conversione permette di ottenere rendimenti molto elevati. Generalmente si predilige la modulazione PWM perché una frequenza di commutazione fissa permette un accurato filtraggio delle armoniche che producono, ripple sulle forme d'onda all'ingresso e in uscita del convertitore.

Nella commutazione con frequenza costante (PWM) il segnale di comando dell'interruttore, che regola il suo stato di aperto o chiuso, è generato confrontando una tensione di controllo ($v_{control}$) con una tensione ripetitiva.

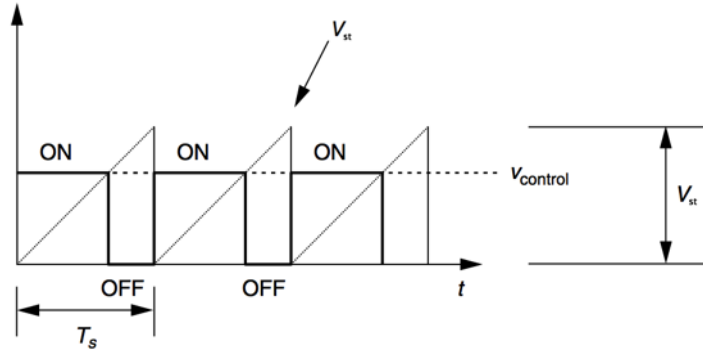


Fig.30 Generatore di onda di controllo PWM

La frequenza dell'onda ripetitiva determina la frequenza di commutazione (varia da pochi kHz a alcune centinaia di kHz).

Quando la tensione di controllo è più grande della tensione ripetitiva, il segnale che comanda l'interruttore diventa alto e ne determina la chiusura, in caso contrario l'interruttore rimane aperto. Analizzando la fig. 30 si può esprimere il *duty cycle* in funzione della $v_{control}$ e del valore di picco della V_{st} della tensione ripetitiva.

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{v_{control}}{V_{st}} \quad (5.2)$$

2. Un'altra tecnica di controllo della tensione prevede di tenere fissa la t_{on} di chiusura dell'interruttore e variare la T_s ed è detta *PFM (Pulse Frequency Modulation)*. La limitazione principale della modulazione PFM sta nel fatto che non è possibile avere una variazione del valore medio del 100%, poiché per fare ciò accorrerebbe una frequenza nulla o infinita, inoltre mentre nella modulazione PWM la frequenza è fissa, e quindi conosciamo con esattezza il contenuto armonico che può essere filtrato, con la modulazione PFM non si ha un contenuto armonico costante e perciò l'attenuazione delle armoniche in uscita è meno efficace.

Nel funzionamento con modulazione PFM bisogna anche tener conto di un limite sulla massima frequenza di switching dell'interruttore, all'aumentare di essa aumenta la potenza dissipata durante il tempo di commutazione che per i dispositivi reali risulta finito e per alcuni è molto influente, come per i GTO che hanno tempi elevati di accensione e spegnimento e quindi un'elevata potenza dissipata in commutazione.

3. L'ultima tecnica è la modulazione *PRM (Pulse Rate Modulation)* che agisce direttamente sul rapporto di intermittenza.

5.2 CONVERTITORI DC/DC BUCK/ STEP DOWN

Il convertitore DC/DC Buck genera una tensione media V_0 di uscita più bassa della tensione in ingresso V_d . Concettualmente il circuito di base è quello di fig.32, in cui l'interruttore ideale alimenta un carico puramente resistivo. La tensione media al carico sarà quindi:

$$V_0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_0(t) dt = \frac{1}{T_s} V_d t_{on} = V_d D$$

sostituendo la (5.2) si ottiene:

$$V_0 = V_d \frac{v_{control}}{V_{st}} = k v_{control}$$

Nelle applicazioni reali però il circuito considerato ha due svantaggi:

1. Nella pratica il carico è induttivo; anche con un carico resistivo c'è sempre associata un'induttanza parassita. Questo significa che l'interruttore va a commutare in maniera quasi istantanea su l'induttanza parassita; la tensione ai capi dell'induttore quindi può assumere valori molto elevati:

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (5.3)$$

Questa tensione che si propaga sia al carico che allo switch (MOSFET,BJT,IGBT, GTO ecc.), che nel caso reale ha una massima tensione applicabile ai morsetti, e quindi se non si adottano opportuni accorgimenti, il rischio di rottura dello switch è molto elevato.

A tal scopo si inserisce un diodo di ricircolo molto rapido (*recovery time* dell'ordine dei nano secondi) che permetta alla corrente dell'induttore di non interrompersi quando lo switch è aperto, evitando quindi sovratensioni nel circuito.

2. La tensione di uscita del convertitore oscilla tra zero e V_d , e questo non è accettabile nella maggior parte delle applicazioni. Le variazioni sulla tensione di uscita vengono attenuate inserendo un filtro passa-basso (filtro L-C).

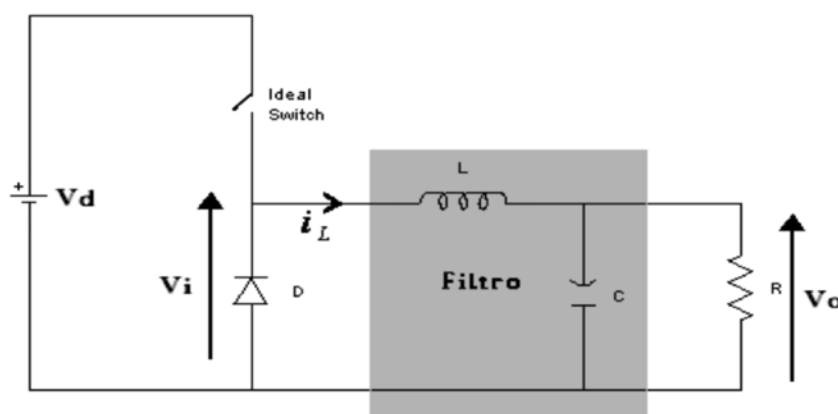


Fig.31 Convertitore Buck

Valutiamo la funzione di trasferimento del filtro nel dominio "S".

$$\frac{V_0(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{s^2 LC + 1} = \frac{1}{\frac{s^2}{\omega_0^2} + 1} \quad (5.4)$$

Dove:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Valutiamo ora le armoniche con lo sviluppo in serie di Fourier della tensione in uscita.

La componente continua è calcolata come la media della tensione V_0 nel periodo di switch, in funzione del *rapporto di intermittenza* (duty cycle)

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} :$$

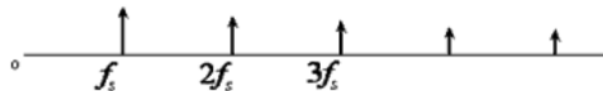
$$V_0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_0(t) dt = \frac{1}{T_s} V_d t_{on} = V_d D \quad (5.5)$$

$$v_0(t) = \frac{V_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} V_{0kc} \cos(kt) + V_{0ks} \sin(kt) \quad (5.6)$$

dove V_{0kc} e V_{0ks} sono le ampiezze delle sinusoidi e delle cosinusoidi, valutiamo ora questi valori e calcoliamone il valore efficace:

$$V_{0kc} = \frac{2}{T_s} \int_0^{T_s} v_0(t) \cos(k2\pi f_s t) dt = \frac{V_d}{2k\pi} \sin(2\pi kD) \quad (5.7)$$

$$V_{0ks} = \frac{2}{T_s} \int_0^{T_s} v_0(t) \sin(k2\pi f_s t) dt = \frac{V_d}{2k\pi} [1 - \cos(2\pi kD)] \quad (5.8)$$



Il valore efficace di ogni armonica k-esima è dato da :

$$V_{0k} = \sqrt{V_{0kc}^2 + V_{0ks}^2} = \frac{V_d}{k\pi} \sin(k\pi D) \quad (5.9)$$

Il filtro deve essere scelto in modo tale da avere :

$$\omega_0 \ll \omega_s \quad \text{quindi} \quad f_0 \ll f_s \quad (5.10)$$

A questo punto riveste notevole importanza la scelta di T_s e quindi di f_s . Infatti se f_s è piccola (T_s grande) allora per soddisfare la (5.9) anche la frequenza di taglio del filtro f_0 deve essere piccola, per far questo occorre avere L e C con valori molto grandi, ma ciò comporterebbe una dinamica molto lenta del sistema, nonché un elevato costo per realizzare il filtro.

Di contro non possiamo scegliere nemmeno una f_s molto grande (T_s piccolo) perché gli switch reali hanno tempi di commutazione finiti, inoltre a frequenze troppo elevate i conduttori di collegamento si comportano da antenne portando a problemi di compatibilità elettromagnetica con i dispositivi elettronici nelle vicinanze.

La scelta di f_s determina la scelta del filtro imponendo la f_0 , in particolare la scelta della frequenza di taglio del filtro è specifica del progetto e dipende dal ripple che si ritiene ammissibile sulla tensione di uscita del convertitore.

Per potenze fino al MW si possono raggiungere frequenze dell'ordine dei KHz come accade nell'azionamento dei treni metropolitani. Per potenze dell'ordine delle decine di KW si raggiungono frequenze dell'ordine degli 80 KHz.

Nel'analisi in regime permanente, la capacità del condensatore è stata assunta molto elevata per avere una tensione di uscita costante $v_0(t) \cong V_0$.

5.2.1 MODALITÀ DI CONDUZIONE CONTINUA

La modalità di conduzione continua si ha quando la corrente nell'induttore è sempre strettamente maggiore di zero.

La tensione media di uscita del convertitore è la stessa calcolata nella (5.5), ed pari al prodotto tra la tensione in ingresso per il *duty cycle* del convertitore.

$$V_0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_0(t) dt = \frac{1}{T_s} V_d t_{on} = V_d D$$

Il funzionamento di questo convertitore può essere paragonato ad un ipotetico trasformatore in continua con rapporto di trasformazione pari a D, che può variare tra 0 e 1. Se consideriamo un circuito DC/DC ideale privo di perdite la potenza in ingresso è uguale alla potenza in uscita, cioè:

$$P_d = V_d I_d = V_0 I_0 = P_0 \quad (5.18)$$

$$D = \frac{I_d}{I_0} = \frac{V_0}{V_d}$$

$$I_0 = \frac{I_d}{D} \quad (5.19)$$

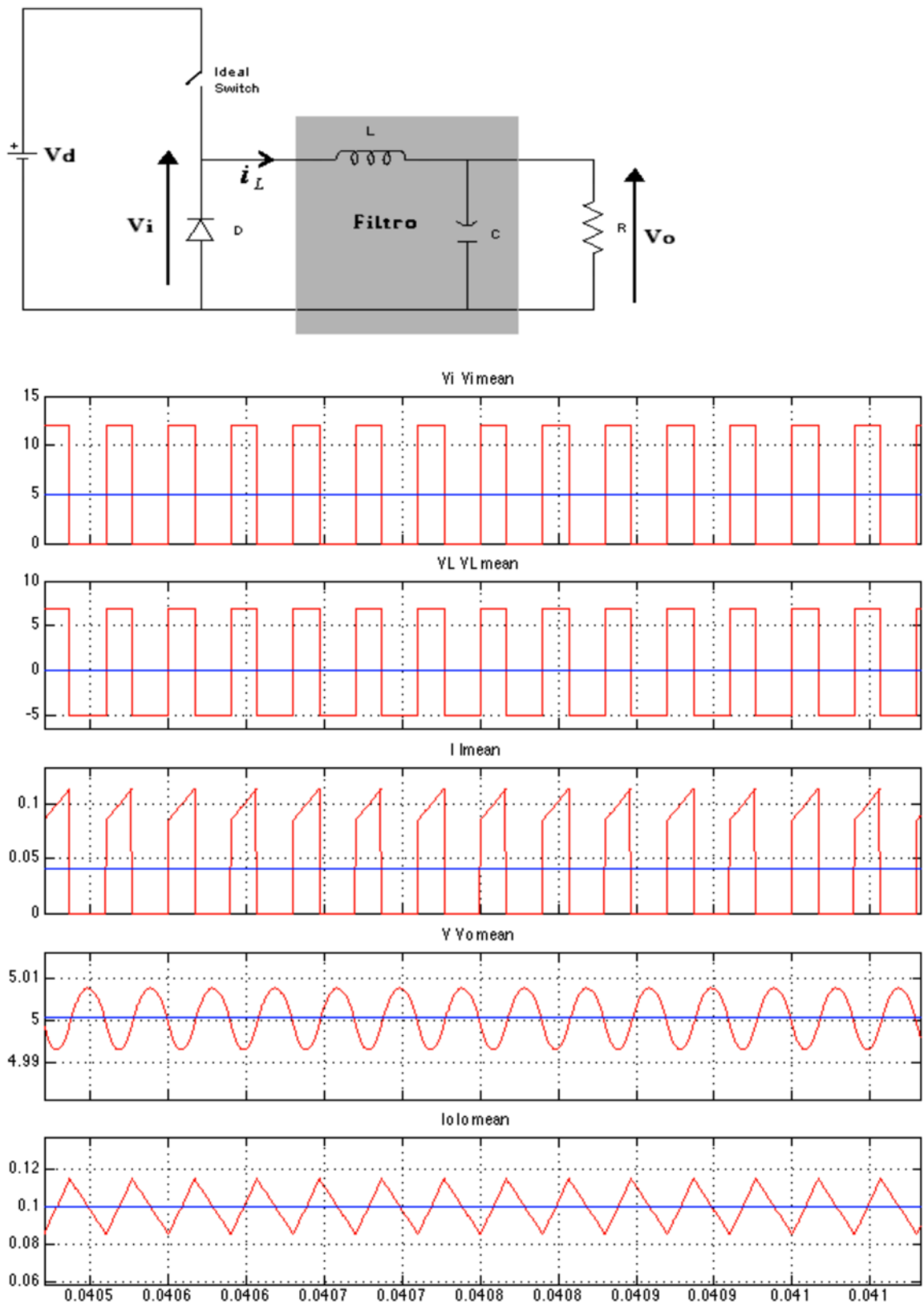
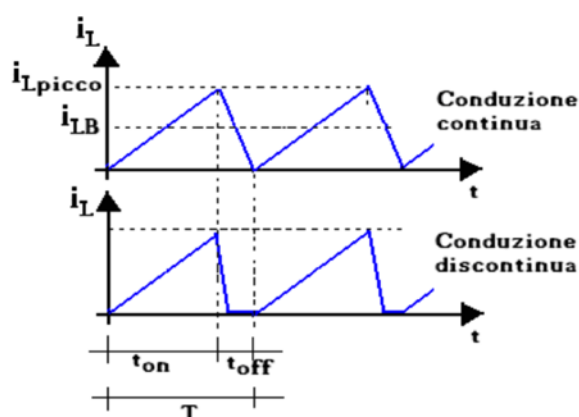


Fig.32 Andamento forme d'onda convertitore Buck in conduzione continua.

5.2.2 MODALITÀ DI CONDUZIONE DISCONTINUA

La modalità di conduzione discontinua si ha quando la corrente nell'induttore è minore o uguale a zero per almeno una parte del periodo T_s . Il limite tra conduzione continua e discontinua è dato sulla corrente media dell'induttore e quindi nel carico (nell'ipotesi di capacità infinita) che non deve mai scendere al di sotto di una corrente limite pari a:

$$I_{LB} = I_{0B} = \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{1}{2L} (V_d - V_0) D T_s \quad (5.20)$$



Valutando la derivata della (5.20) in funzione del *duty cycle*, D , otteniamo la massima corrente limite. Distinguiamo due casi:

1. Convertitore DC/DC con V_d costante;
 2. Convertitore DC/DC con V_0 costante;
1. Il massimo di I_{0B} mantenendo costante la V_d lo otteniamo per $D = 0,5$ ed è pari a:

$$I_{0B,max}|_{V_d=cost} = \frac{T_s V_d}{8L}$$

2. Nel caso in cui venga mantenuta costante la V_0 , $D = 0$, ed è pari a:

$$I_{0B,max}|_{V_0=cost} = \frac{T_s V_0}{2L}$$

Il funzionamento discontinuo porta ad avere una caratteristica non lineare del convertitore, ed è un limite sulle variazioni della tensione in ingresso nel caso di carico costante oppure è una limitazione sul carico massimo nel caso di carico non costante. Di seguito sono riportate le caratteristiche del convertitore in funzione del rapporto sia in zona di conduzione continua che discontinua della corrente nel caso in cui si mantenga V_d o la V_0 costanti.

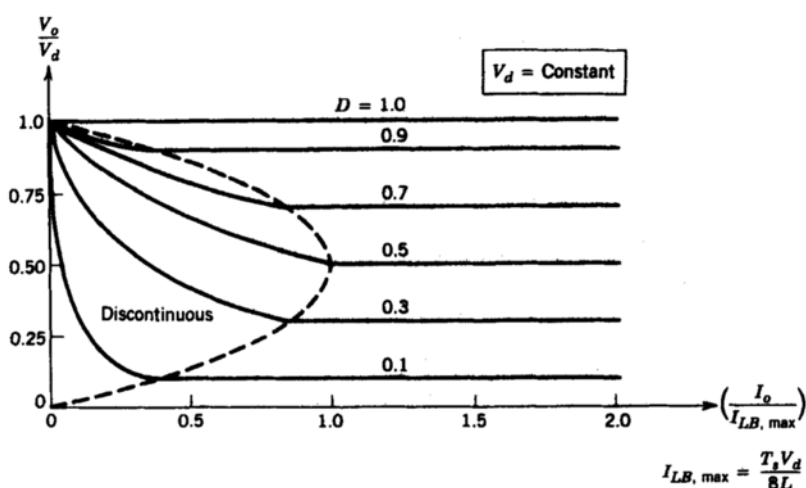


Fig.33 Caratteristica di un convertitore DC/DC con $V_d = cost$.

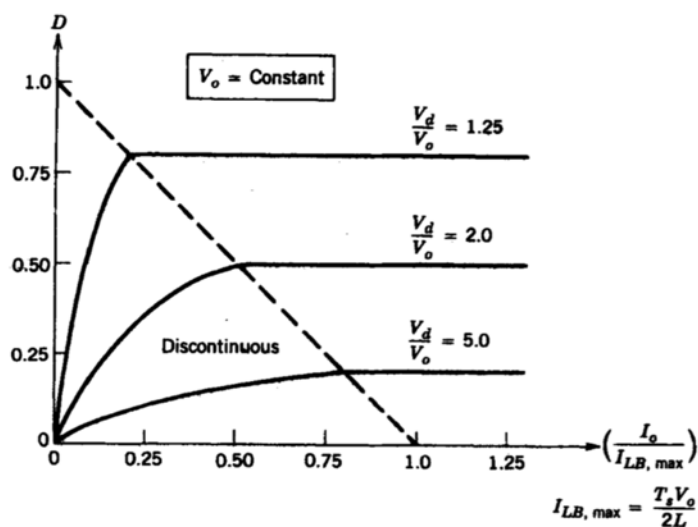


Fig.34 Caratteristica di un convertitore DC/DC con $V_0 = cost$.

5.2.3 RIPPLE SULLA TENSIONE E SULLA CORRENTE IN USCITA

Valutiamo i ripple sulla tensione e sulla corrente in uscita al convertitore, in assenza di capacità infinita. Consideriamo l'intervallo di conduzione dell'interruttore. In questa condizione la tensione sull'induttore per la legge di Kirchhoff delle tensioni è data:

$$v_L = v_i - v_L = V_d - V_0 \quad (5.11)$$

la corrente nell'induttore sarà quindi data da:

$$i_L = \frac{1}{L} \int v_L dt + C = \frac{1}{L} (V_d - V_0)t + i_{L0}$$

$$\Delta i_{Lon} = \frac{1}{L} (V_d - V_0)t_{on} = \frac{1}{L} (V_d - V_0)DT_s \quad (5.12)$$

Se ora consideriamo l'interruttore nello stato di non conduzione, otteniamo una tensione sull'induttore:

$$v_L = v_i - v_L = -V_0 \quad (5.13)$$

la corrente diventa:

$$i_L = \frac{1}{L} \int v_L dt + C = \frac{1}{L} (-V_0)(t - t_{on}) - i_{L0}$$

in questo intervallo l'energia immagazzinata nell'induttore si scarica su C e su R, l'oscillazione quindi diventa:

$$\Delta i_{Loff} = \frac{1}{L} (-V_0)(T_s - t_{on}) = -\frac{1}{L} V_0 T_s (1 - D) \quad (5.14)$$

$$\Delta i_{Lon} + \Delta i_{Loff} = 0$$

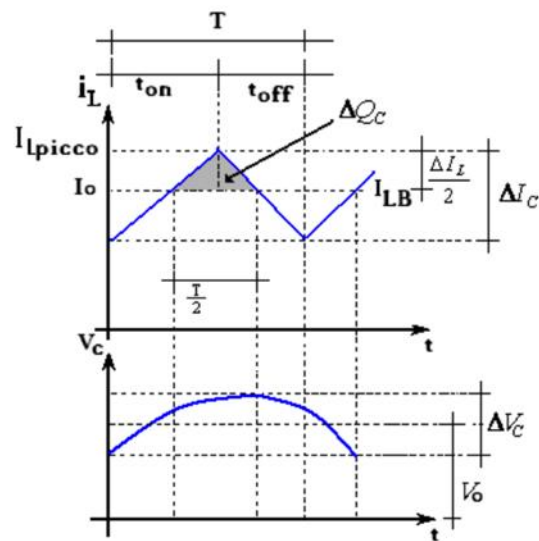
La somma della variazione di corrente nell'induttore nella fase "on" e della variazione di corrente nella fase "off" è uguale a zero. L'integrale dell'impulso di tensione sull'induttore è quindi uguale a zero.

Il ripple sulla corrente è quindi pari a :

$$\Delta I_L = \frac{1}{L}(V_d - V_0)DT_s = \frac{1}{L}V_0T_s(1 - D) \quad (5.15)$$

che ha un massimo per $D=0,5$.

Valutiamo ora l'andamento della tensione sul condensatore in funzione di i_L .



Supponiamo che la componente alternata di i_L circoli solo nella capacità, nel carico circolerà solo la componente continua. La variazione di tensione ai capi del condensatore è data dal rapporto tra la carica immagazzinata nel condensatore e la capacità del condensatore:

$$\Delta V_C = \Delta V_0 = \frac{\Delta Q_C}{C} \quad (5.16)$$

la variazione di carica nel condensatore può essere espressa come:

$$\Delta Q_C = \frac{1}{2} \frac{T_s}{2} \frac{\Delta I_L}{2}$$

$$\Delta V_0 = \frac{\Delta Q_C}{C} = \frac{1}{8C} \frac{\Delta I_L}{f_s} \quad (5.17)$$

che come l'oscillazione di corrente ha un massimo per $D=0,5$.

5.3 CONVERTITORE DC/DC STEP UP/BOOST

Il convertitore Step-up mostrato in fig. 35 a differenza del convertitore Buck, fornisce una tensione media in uscita maggiore della tensione in ingresso.

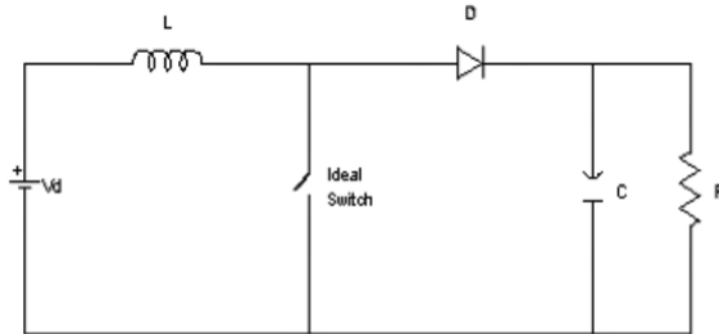


Fig.35 Convertitore DC/DC Step-Up (Boost)

Quando l'interruttore è chiuso, il diodo è polarizzato inversamente, la sezione di uscita è isolata e l'ingresso fornisce energia all'induttore. Quando l'interruttore è aperto, la sezione di ingresso riceve energia sia dall'induttore, sia dall'ingresso. Nel'analisi in regime permanente, la capacità del condensatore è stata assunta molto elevata per avere una tensione di uscita costante $v_0(t) \cong V_0$.

5.3.1 MODALITÀ DI CONDUZIONE CONTINUA

La modalità di conduzione continua si ha quando la corrente nell'induttore è sempre strettamente maggiore di zero.

In regime permanente l'integrale della tensione sull'induttore in un periodo è uguale a zero, si ha quindi:

$$V_d t_{on} + (V_d - V_0) t_{off} = 0$$

Dividendo entrambi i membri per T_s si ottiene:

$$\frac{V_0}{V_d} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D} \quad (5.21)$$

Supponendo il circuito privo di perdite, si ha $P_d = P_0$, quindi:

$$P_d = V_d I_d = V_0 I_0 = P_0 \quad (5.22)$$

$$\frac{I_0}{I_d} = (1 - D) \quad (5.23)$$

Anche il convertitore DC/DC Boost può essere visto come un trasformatore in continua ideale con rapporto di trasformazione $1-D$.

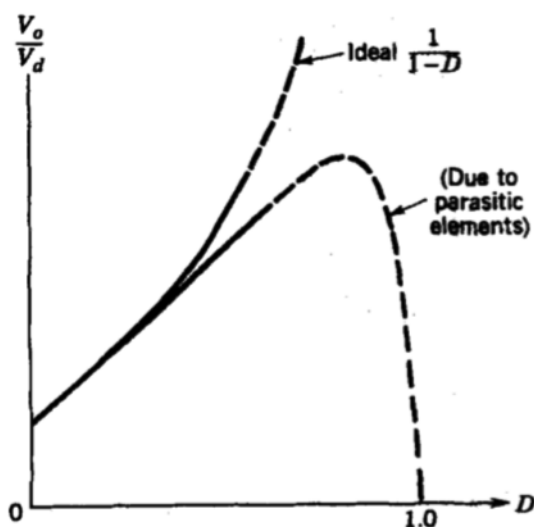


Fig.36 Andamento della tensione V_o nel caso reale e in quello ideale senza perdite.

Nella realtà V_o/V_d decade quando il *duty cycle* si avvicina all'unità, a causa delle perdite associate all'induttore, al condensatore, all'interruttore e al diodo. La curva in questo tratto è tratteggiata. Conoscere il funzionamento del convertitore in questa condizione è fondamentale per la progettazione del controllo in anello chiuso del convertitore.

Nell'analisi in regime permanente, la capacità del condensatore è stata assunta molto elevata per avere una tensione di uscita costante $v_o(t) \cong V_o$.

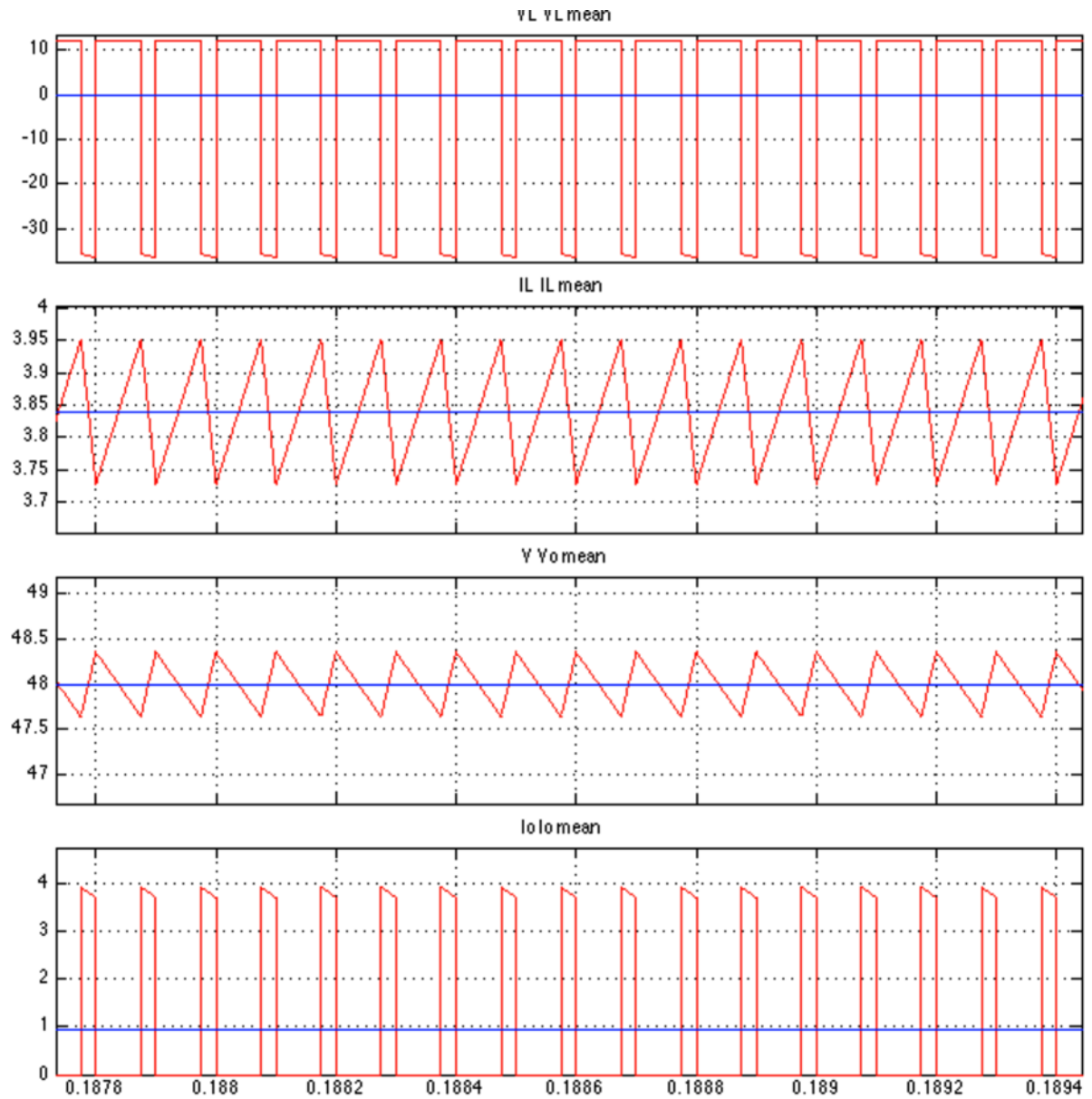


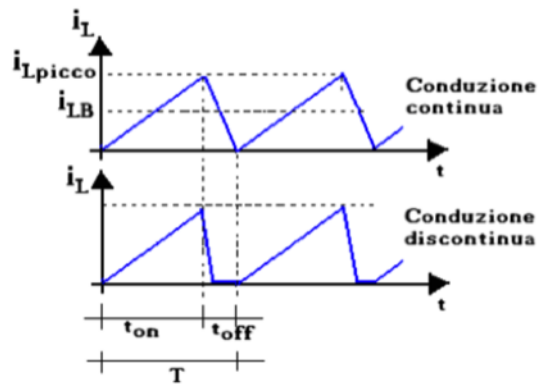
Fig.37 Andamento delle forme d'onda di un convertitore DC/DC Boost

5.3.2 MODALITÀ DI CONDUZIONE DISCONTINUA

La modalità di conduzione discontinua si ha quando la corrente nell'induttore è minore o uguale a zero per almeno una parte del periodo T_s .

Il limite tra conduzione continua e discontinua è dato sulla corrente media dell'induttore e quindi quella di ingresso che non deve mai scendere al di sotto di una corrente limite pari a:

$$I_{LB} = I_{0B} = \frac{1}{2} i_{L,picco} = \frac{1}{2} \frac{V_d}{2L} t_{on} = \frac{V_0 T_s}{2L} (1 - D) D \quad (5.24)$$



Usando l'equazione (5.23) si trova che il valor medio della corrente di uscita al limite della conduzione continua è:

$$I_{0B,max} = \frac{V_0 T_s}{2L} (1 - D)^2 D \quad (5.24)$$

Valutando la derivata della (5.20) in funzione del *duty cycle*, D , otteniamo la massima corrente limite. Distinguiamo due casi:

3. Convertitore DC/DC con V_d costante;
4. Convertitore DC/DC con V_0 costante;

3. Il massimo di I_{0B} mantenendo costante la V_d lo otteniamo per $D = 0,5$ ed è pari a:

$$I_{0B,max}|_{V_d=cost} = \frac{T_s V_d}{8L}$$

4. Nel caso in cui venga mantenuta costante la V_0 , $D = 0,333$, ed è pari a:

$$I_{0B,max}|_{V_0=cost} = \frac{2}{27} \frac{T_s V_0}{L}$$

Il funzionamento discontinuo porta ad avere una caratteristica non lineare del convertitore, ed è un limite sulle effettive variazioni della tensione in ingresso nel caso di carico costante oppure una limitazione sul carico massimo nel caso di carico non costante.

5.3.3 RIPPLE SULLA TENSIONE IN USCITA

Il valore picco-picco del ripple della tensione in uscita può essere calcolato considerando le forme d'onda mostrate nella fig. 37 in modalità di conduzione continua, facendo le stesse considerazioni fatte per il convertitore Buck.

Supponendo che tutto il ripple di corrente circoli nel diodo i_D circoli nel condensatore e che il valore medio di i_D circoli nel carico resistivo. Il valore picco-picco del ripple di tensione è dato da:

$$\Delta V_0 = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_0 D T_s}{C} = \frac{V_0 D T_s}{R C} \quad (5.25)$$

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{D T_s}{R C}$$

5.4 CONVERTITORE BUCK-BOOST

Il convertitore Buck-Boost può essere usato sia per innalzare che per abbassare la tensione in ingresso.

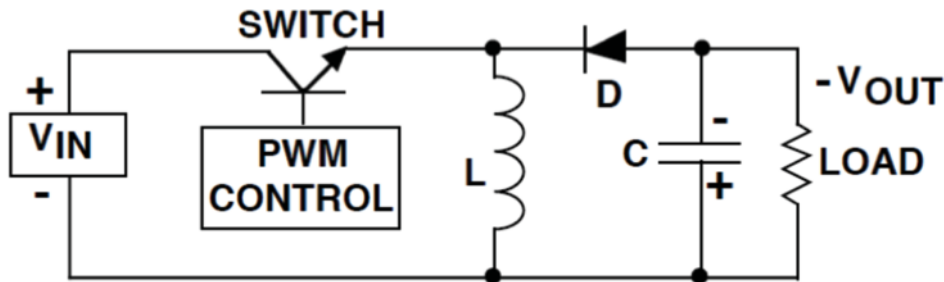


Fig.38 Convertitore Buck-Boost

Quando lo switch è ON l'induttore inizia ad accumulare energia; a causa della presenza del diodo, in questa fase il carico risulta alimentato solo dalla capacità C. Quando lo switch è OFF, l'induttore tenderà a scaricarsi, fornendo energia sia alla capacità che al carico.

5.5 CONFRONTO FRA I VARI CONVERTITORI

I convertitori di tipo step-up, step-down e buck boost possono trasferire energia in una sola direzione.

Per valutare quanto bene sia utilizzato l'interruttore nei circuiti dei convertitori, si formulano le seguenti ipotesi:

- La corrente media è al suo valore nominale (massimo consentito) I_0 . Il ripple della corrente nell'induttore è trascurabile; quindi $I_L(t) = I_L$. Questa condizione implica una modalità di conduzione continua per tutti i convertitori.
- La tensione di uscita v_0 è al suo valore nominale V_0 . Si fa l'ipotesi che il ripple di v_0 sia trascurabile; quindi $v_0(t) = V_0$.
- E' consentita la variazione della tensione d'ingresso V_d . Il duty cycle deve essere controllato per mantenere costante V_0 .

Con queste condizioni di funzionamento si calcolano il valore massimo della tensione V_T dell'interruttore e il valore massimo della corrente I_T .

Il valore nominale della potenza dell'interruttore è calcolato come:

$$P_T = V_T I_T \quad (5.26)$$

Lo sfruttamento dell'interruttore è espresso come P_0/P_T , dove $P_0 = V_0 I_0$ è la potenza nominale in uscita.

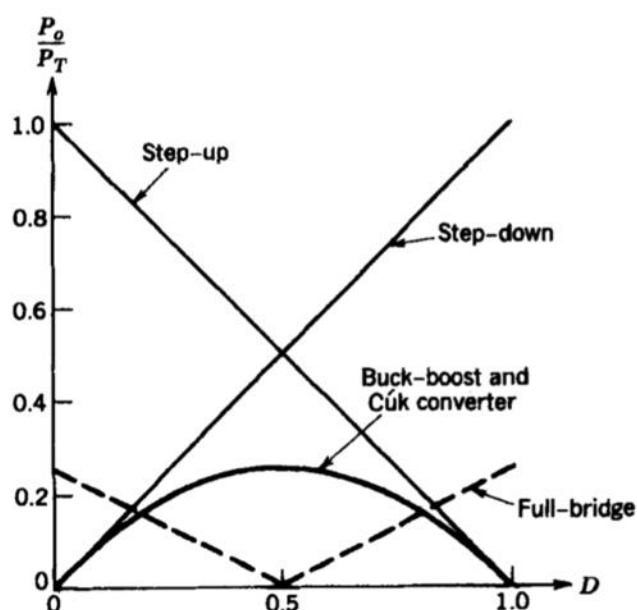


Fig.39 Sfruttamento dell'interruttore nei convertitori DC-DC

Il grafico in fig. 39 mostra i grafici del fattore di sfruttamento dell'interruttore per i convertitori considerati. Si può notare che, se le tensioni d'ingresso e di uscita sono dello stesso ordine di grandezza, nei convertitori step-up e step-down il fattore di sfruttamento dell'interruttore è molto buono. Nel convertitore Buck-boost invece l'interruttore è poco sfruttato.

CAPITOLO 6

ALGORITMI MPPT

Nel seguente capitolo saranno analizzati i diversi algoritmi di *MPPT* presenti in letteratura. Gli algoritmi di *MPPT* sono utilizzati per estrarre la massima potenza possibile dal modulo termoelettrico (TEG) e trasferirla al carico. L'algoritmo va ad agire sulla logica di comando del convertitore DC/DC, modificandone il *duty cycle*, e quindi l'impedenza vista dal generatore, di modo da far funzionare il generatore termoelettrico nella condizione di massima potenza al variare della potenza termica transitante nel modulo. Le tecniche di *MPPT* analizzate sono le seguenti:

- P&O: *Perturba e Osserva*;
- IC: *Conduttanza incrementale*;
- *Semplice accoppiamento tra moduli e carico*;

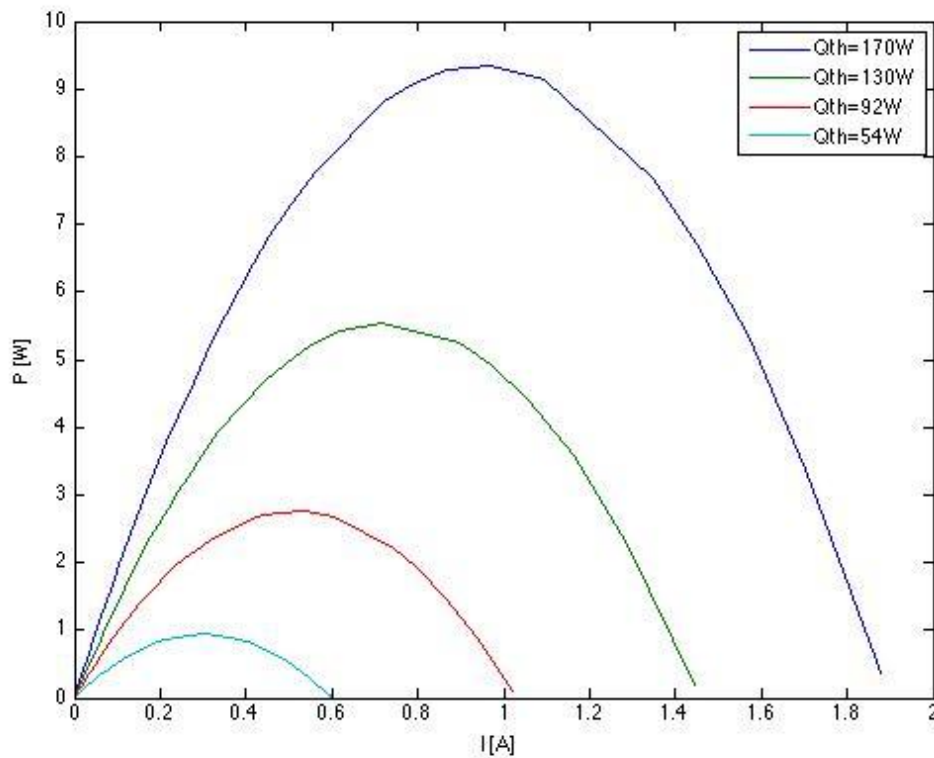


Fig.40 Diagramma PI TEG GM250-241-10-12 della European Thermonamics, simulato al variare della potenza termica transitante.

6.1 ALGORITMO DI P&O: PERTURBA E OSSERVA

Questa famiglia di algoritmi lavora perturbando il sistema tramite un incremento o un decremento della tensione/corrente operativa del TEG (a seconda se il controllo viene fatto in tensione o in corrente), tramite un convertitore DC/DC, ed osservando l'effetto sulla potenza in uscita del sistema.

Possiamo avere tre tipi di algoritmi P&O:

- *controllo diretto sul duty-cycle;*
- *controllo di corrente;*
- *controllo di tensione.*

6.1.1 CONTROLLO DIRETTO SUL DUTY CYCLE

L'algoritmo viene implementato con un DSP e va a comandare il convertitore DC/DC alla quale è collegato il generatore. Lo scopo è di campionare la corrente e le tensione del modulo, di calcolarne la potenza e di verificare se questa è maggiore della potenza del passo precedente.

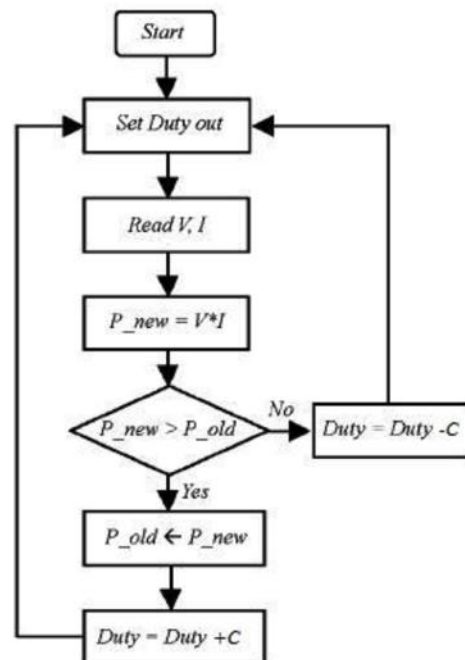


Fig.41 Algoritmo di MPPT con controllo diretto del Duty Cycle

Se ciò è verificato si varia il duty-cycle con un incremento positivo, viceversa si decrementa. L'algoritmo è riportato in fig. 41. Una volta raggiunto l'MPP si continuerà ad oscillare nell'intorno di questo punto e l'oscillazione dipenderà in maniera proporzionale all'ampiezza della perturbazione (C), che si applica al duty-cycle. Quindi tanto più piccola è la perturbazione, tanto minore sarà l'oscillazione a regime della potenza estratta dal modulo, e tanto maggiore sarà il tempo necessario al raggiungimento del MPP.

L'oscillazione inoltre causa una perdita di potenza proporzionale all'ampiezza di ogni singola perturbazione. Il valore ideale del passo di perturbazione viene determinato per ogni sistema sperimentalmente. Lo svantaggio di questo tipo di algoritmo è dovuto alla mancanza di controllo sulla corrente e sulla tensione d'ingresso che può portare a limitazioni del funzionamento dell'algoritmo in funzione del dimensionamento del convertitore DC/DC.

6.1.2 CONTROLLO DIRETTO SULLA CORRENTE

In questo caso l'algoritmo MPPT fornisce il riferimento della corrente (I_{REF}), che viene confrontata con quella presente all'ingresso del convertitore DC/DC, secondo lo schema di fig.42. Dopo il nodo sommatore viene posto un regolatore PI e in uscita a questo si ha il modulatore PWM. L'uscita di quest'ultimo sarà un segnale ad onda quadra che comanda lo switch del convertitore. Il tutto viene implementato con un DSP.

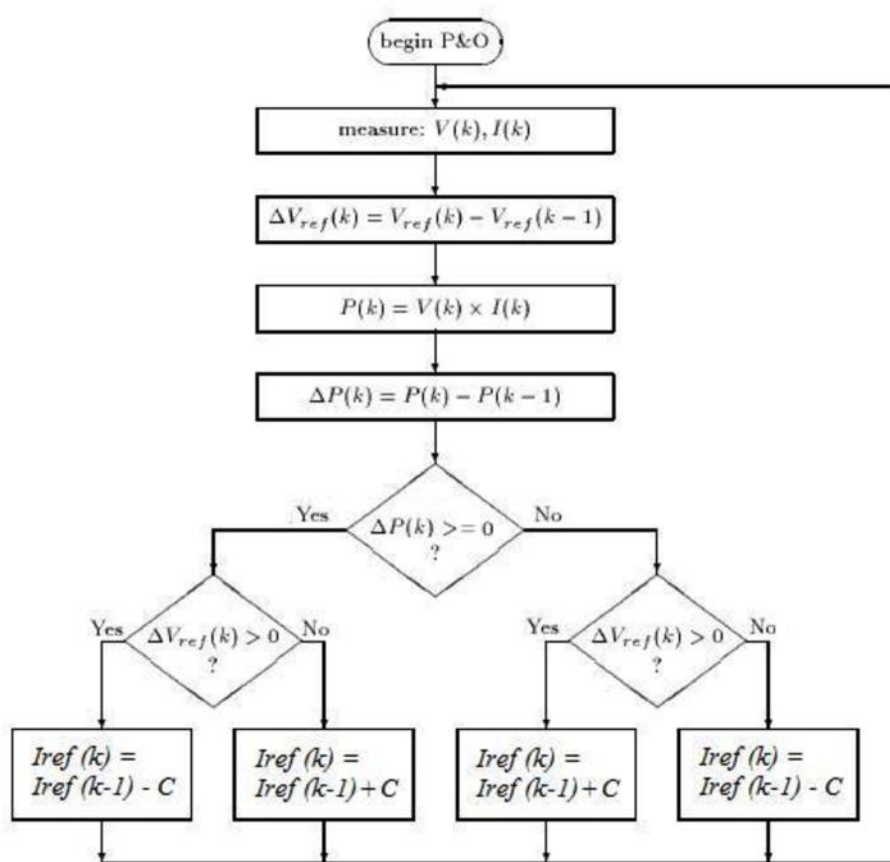


Fig.42 Algoritmo P&O con controllo diretto della corrente

L'algoritmo, riportato in fig.42, si basa sul campionamento dei segnali di tensione e corrente in uscita dal modulo, li moltiplica per ottenerne la potenza in uscita al passo k , e la confronta con la potenza campionata al passo $k-1$.

Se è superiore di quella al passo $k-1$ e la tensione al passo k è maggiore di quella al passo precedente, si decrementa il riferimento di corrente della costante C . Viceversa, se il punto operativo è a sinistra rispetto al punto di MPPT (tensione al passo k minore di quella precedente) si incrementa il riferimento di corrente. La stessa cosa, in maniera opposta, avviene se la potenza al passo k è minore di quella al passo precedente. Anche qui, una volta raggiunto l'MPP, si avrà un'oscillazione nell'intorno proporzionale a C . Più piccola è la variazione (C) del riferimento di corrente e minore sarà l'oscillazione.

6.1.3 CONTROLLO DIRETTO SULLA TENSIONE

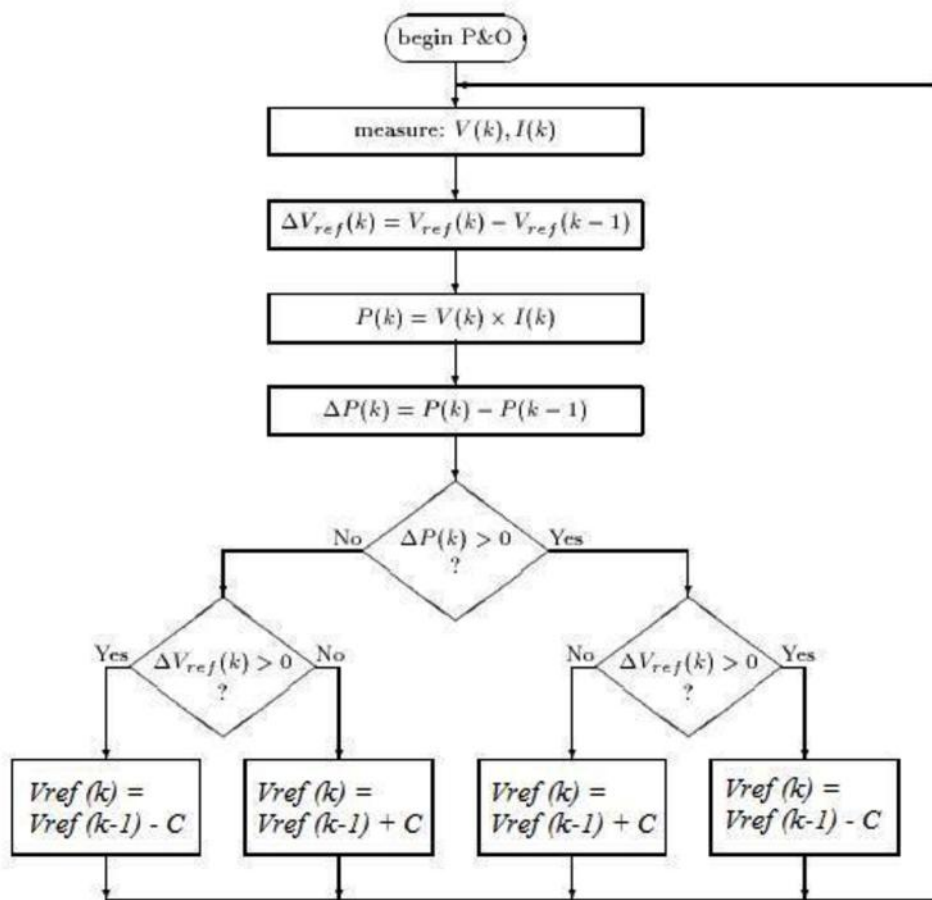


Fig.43 Algoritmo P&O con controllo diretto della tensione

Questo tipo di controllo è analogo a quello del paragrafo precedente, solo che in questo caso l'algoritmo MPPT fornisce il riferimento della tensione d'ingresso e non quello della corrente. Lo schema del circuito è simile a quello di fig.42, sostituendo il confronto di corrente con quello di tensione. Il diagramma di flusso dell'algoritmo è riportato in fig.43. Anche in questo caso una volta raggiunto l'MPP si continuerà ad avere un'oscillazione nell'intorno di questo punto. Si sceglierà, quindi, la costante C cercando un compromesso tra la velocità di raggiungimento dell'MPP e l'oscillazione a regime.

6.2 ALGORITMO IC: CONDUITTANZA INCREMENTALE

L'algoritmo di conduttanza incrementale sfrutta la caratteristica a parabola della curva PV, per ricercare il punto di MPP; tale punto sarà caratterizzato da una derivata della potenza rispetto alla tensione nulla.

$$\frac{dP}{dV} = 0$$

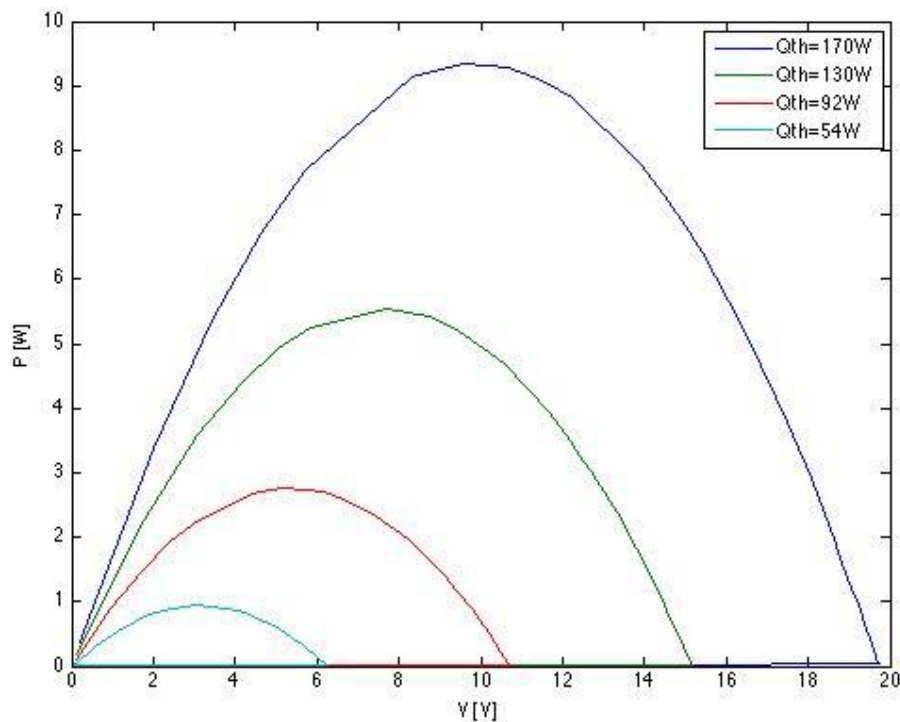


Fig.44 Diagramma PV TEG GM250-241-10-12 della European Thermonamics, simulato al variare della potenza termica transitante

Quando il punto di funzionamento si trova a sinistra dell'MPP allora una variazione di tensione positiva porta ad una variazione positiva di potenza, viceversa se ci troviamo a destra dell'MPP succederà il contrario, ad una variazione positiva di tensione corrisponderà una variazione negativa di potenza. Riassumendo:

- $\frac{dP}{dV} = 0$ → MPP;
- $\frac{dP}{dV} < 0$ → a destra dell'MPP;
- $\frac{dP}{dV} > 0$ → a sinistra dell'MPP;

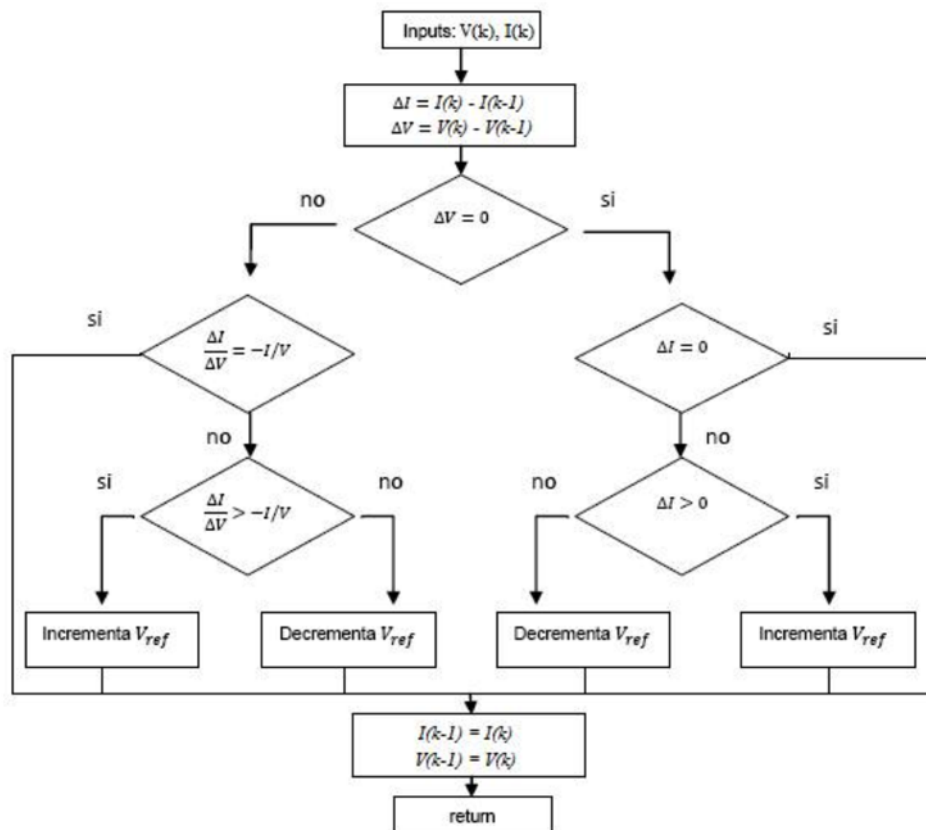


Fig.45 Algoritmo Conduttanza Incrementale

La potenza del modulo è ottenuta moltiplicando la tensione per la corrente.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (6.1)$$

a questo punto possiamo definire la posizione relativa del punto di funzionamento rispetto l'MPP in funzione dell'equazione 6.1.

- $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \rightarrow$ MPP;
- $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \rightarrow$ a destra dell'MPP;
- $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \rightarrow$ a sinistra dell'MPP;

Per cui, il punto di massima potenza viene individuato confrontando ad ogni ciclo la conduttanza istantanea ($\frac{I}{V}$) con la conduttanza incrementale ($\frac{\Delta I}{\Delta V}$), secondo il diagramma di flusso dell'algoritmo MPPT riportato in fig.45.

Per prima cosa bisogna campionare, attraverso due sensori, la corrente e la tensione in uscita dal modulo. Poi viene calcolato l'incremento di corrente (ΔI) e quello di tensione (ΔV), come differenza tra i campioni acquisiti al passo k e quelli campionati al passo $k-1$.

- Se $\Delta V = 0$:
 - Se ΔI è nulla si è nel punto di MPP;
 - Se ΔI è maggiore di zero. si incrementa il riferimento di tensione (si è a sinistra dell'MPP), altrimenti si decrementa;
- Se $\Delta V \neq 0$
 - Se la conduttanza incrementale è uguale a quella istantanea $\frac{\Delta I}{\Delta V} = \frac{I}{V}$ si è nel punto di MPP;
 - Se $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$ si aumenta il riferimento;
 - $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$ si diminuisce il riferimento;

Utilizzando l'algoritmo *IC*, una volta raggiunto il punto di massima potenza (MPP) il riferimento di tensione rimane costante non portando in linea teorica ad un'oscillazione del riferimento (nella realtà l'oscillazione permane a causa della discretizzazione del sistema). Questo metodo è molto più veloce del P&O ma ha lo svantaggio di essere più complesso da implementare.

6.3 SEMPLICE ACCOPPIAMENTO MODULO E CARICO

In questo metodo il punto operativo ottimale del generatore è valutato in fase di progetto. Valutato l'MPP, e quindi i valori V_{mp} e I_{mp} , viene determinato il carico più adatto. L'array di moduli è connesso con un banco di accumulatori che funge da buffer tra l'array stesso e il circuito a valle che di solito è un convertitore DC/DC o DC/AC. Il vantaggio di questa configurazione è la sua semplicità, in quanto non è usato nessun circuito supplementare, quindi l'intero sistema risulta molto affidabile e le perdite di potenza tra pannello e batterie sono ridotte alle sole perdite nei conduttori di collegamento. L'inconveniente di questo sistema è che non risponde a cambiamenti di temperature lato caldo e freddo a cui corrispondono variazioni di V_{mp} . Per questo motivo si viene a creare una differenza tra la tensione V_{mp} e la tensione nominale del banco di accumulatori V_{bat} che produce una significativa riduzione della potenza estraibile dall'array. Di conseguenza tale metodo è utilizzato solo per particolari applicazioni, in particolare per applicazioni di bassissima potenza.

CAPITOLO 7

SET UP SPERIMENTALE

Nel seguente capitolo si analizzerà la configurazione del banco prova utilizzato per valutare validare il modello teorico prima analizzato nel capitolo 4. Saranno inoltre caratterizzati i componenti che compongono il sistema.

7.1 SET UP SPERIMENTALE

Con il seguente esperimento si vuole valutare il rendimento di conversione di un TEG applicato ad una canna fumaria e confrontare i dati sperimentali con i dati forniti dal modello sviluppato in Matlab Simulink e presentato nel capitolo 4.

$$\eta = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_T}$$

Il banco di prova è presentato in fig.46 ed è costituito principalmente da 4 elementi che saranno meglio analizzati di seguito:

- Generatore di Calore;
- Circuito di raffreddamento;
- Generatore termoelettrico;
- Sistema di acquisizione delle misure;
-



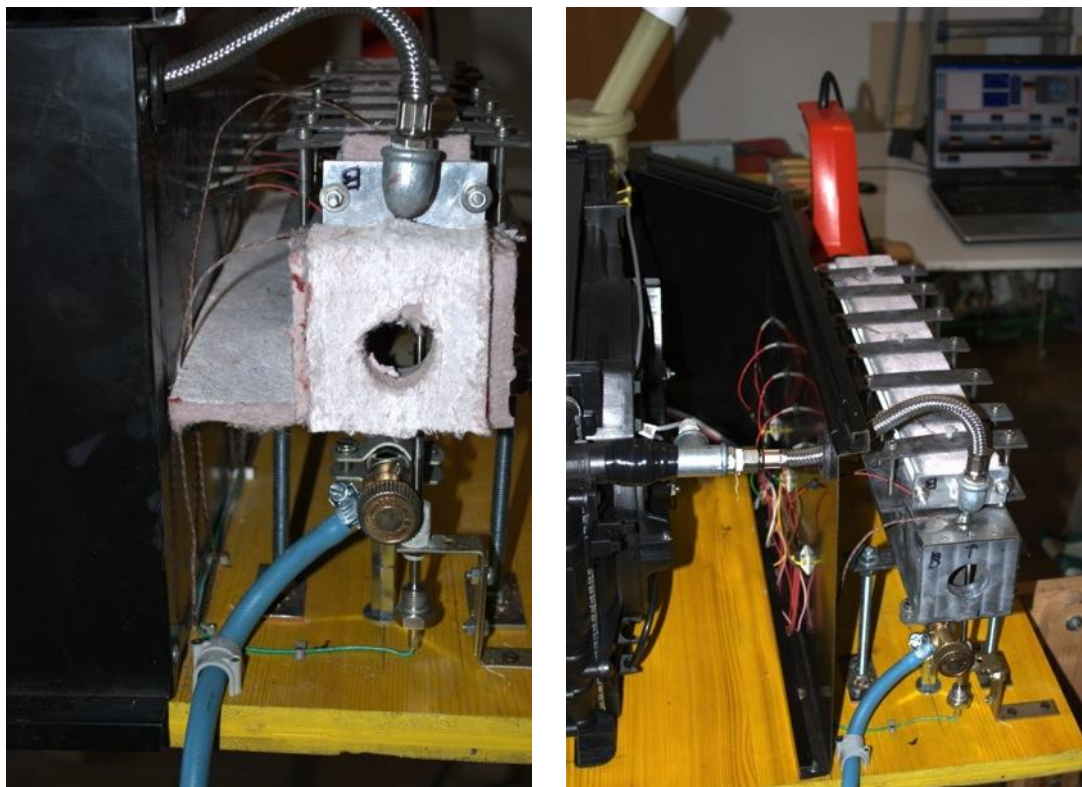


Fig.46 Foto di insieme del banco di prova nelle ultime fasi di assemblaggio

7.2 GENERATORE DI CALORE

Il generatore di calore è costituito da un tubo di acciaio inox a sezione quadrata, 80x80x500 mm di spessore 2 mm, con due fori uno da 42 mm e uno da 33,5 mm, coibentato in AEROGEL PYROGEL X-TE, materiale ad altissimo isolamento termico, resistente ad elevate temperature.

La superficie superiore, dove sono fissate le celle ad effetto Seebeck, è stata trattata con lappatura a specchio, per ridurre la resistenza termica di contatto tra le superfici.

Per portare a circa 300°C la canna fumaria si utilizzeranno: un termo soffiatore da 2.000 W nominali con regolazione continua della portata (la temperatura massima alla bocca, misurata, è intorno ai 370°C); e un bruciatore a gas per barbecue alla base della “canna fumaria”, per il preriscaldamento e il mantenimento della temperatura.



Fig.47 Particolare del bruciatore e del termosoffiatore

I dati di targa del termo soffiatore sono:

P [W]	2000
V [V]	240
T _{max} [°C]	600
Q [l/min]	650

Per il calcolo della Potenza termica estratta dai fumi sono state installate due sonde K per la misura della temperatura dell'aria in ingresso ed in uscita alla canna fumaria, sonda tipo OMEGA K-L-1-6-150-G1/4-G-5.

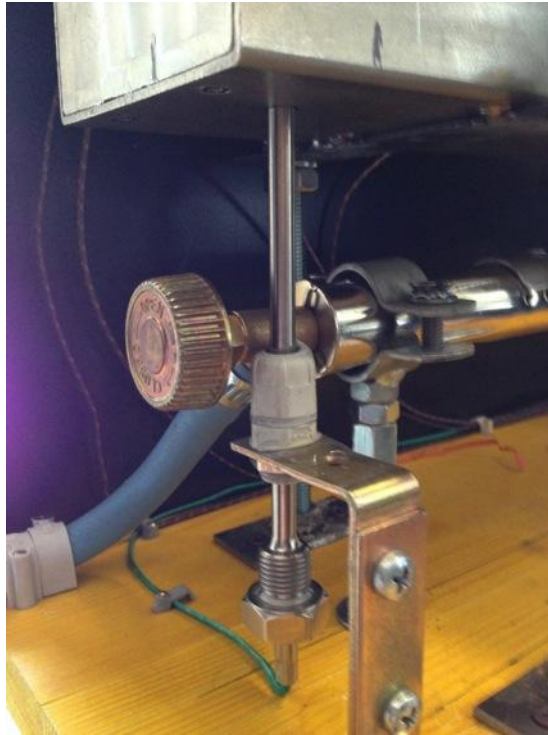


Fig.48 Particolare sonda K installata per misurare temperatura in uscita dei fumi

La temperatura della superficie calda dove sono installate le celle ad effetto Seebeck è misurata in 3 punti: uno all'inizio della canna fumaria, uno a metà ed uno alla fine, con delle sonde K fissate a vite, tipo OMEGA WTK-8-60.

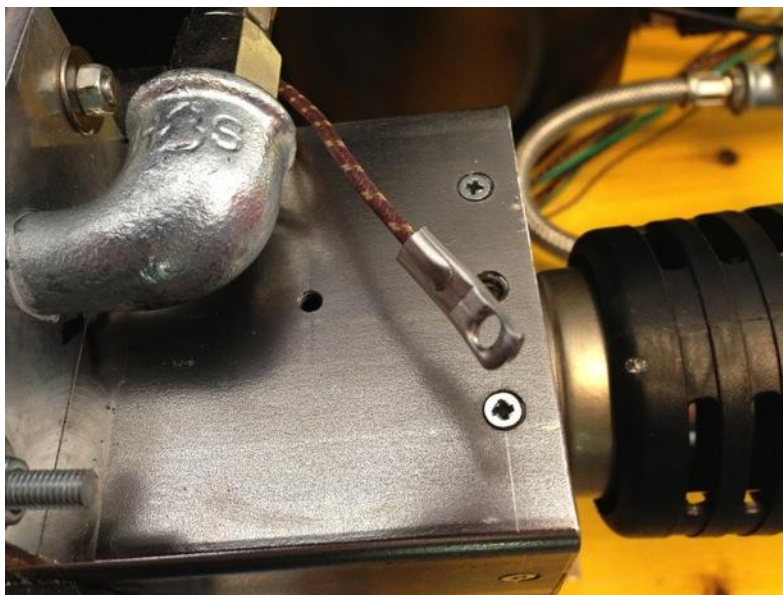


Fig.49 Particolare sonda K a vite

La Potenza termica estratta dalla canna fumaria sarà calcolata come:

$$Q_{THOT} = \dot{m}_{aria} c_{p_{aria}} (T_{Hin} - T_{Hout}) \quad (7.1)$$

dove:

- $c_{p_{aria}}$ è il calore specifico dell'aria = 1005 J/kgK ;
- T_{Hin} e T_{Hout} sono le temperature dell'aria in ingresso ed in uscita alla canna fumaria;
- \dot{m}_{aria} è la portata massica espressa in kg/s, data da:

$$\dot{m}_{aria} = \gamma_{aria} \cdot q_{aria} \quad (7.2)$$

dove:

- γ_{aria} è il peso specifico dell'aria = 1.293 kg/m³;
- q è la portata volumetrica dell'aria in m³/s.

7.3 CIRCUITO DI RAFFREDDAMENTO

Il circuito di raffreddamento è del tipo aria/acqua forzato. Lo scambiatore è costituito da un tubo rettangolare in alluminio con dimensioni di 60x30x402mm con spessore pareti di 2mm (sezione interna di 56x26mm), coibentato con AEROGEL PYROGEL XT-E.

La superficie inferiore, dove sono fissate le celle ad effetto Seebeck, è stata trattata con lappatura a specchio, per ridurre la resistenza termica di contatto tra le superfici.

I tappi di chiusura (tenuti in sede dalle due barre filettate) sono fresati a misura e con guarnizione elastica per motori, i tappi penetrano nel tubo per 10 mm ed hanno dimensioni esterne di 76x34x4,5 mm.

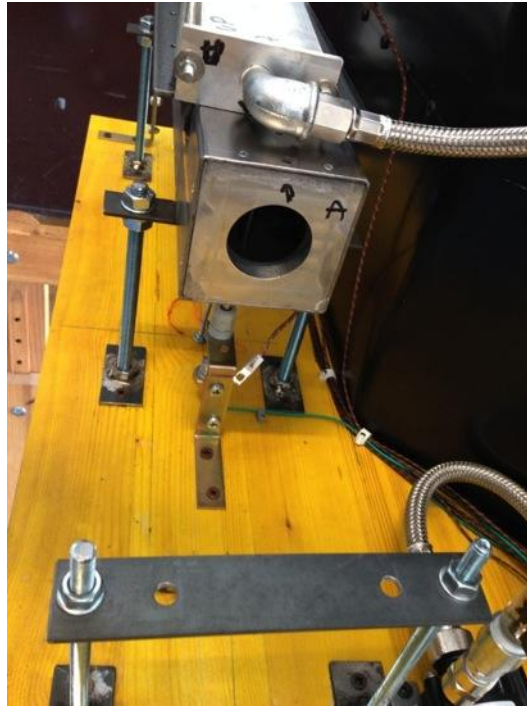


Fig.50 Particolare dello scambiatore di calore.

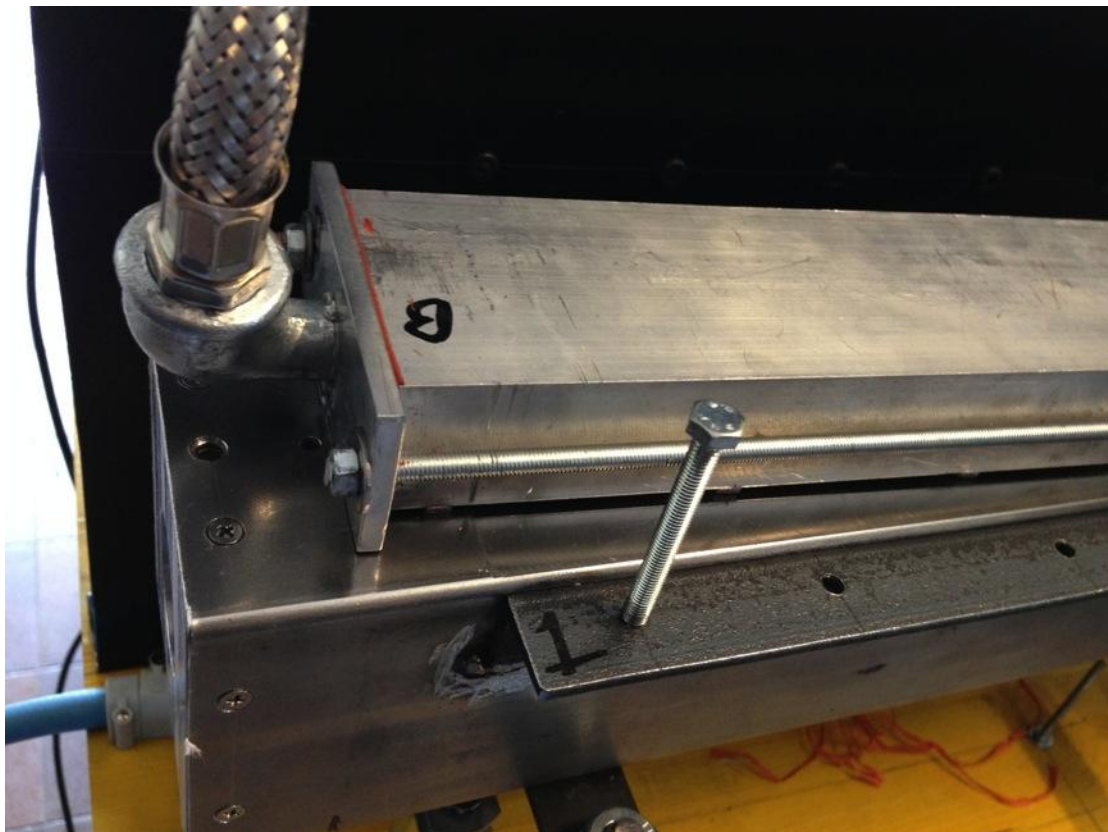


Fig.51 Particolare dello scambiatore di calore.

La pompa di ricircolo ha una prevalenza di 8,5 m e una portata da 8 l/min, alimentata a 12 Vcc/2 A, 4900 rpm. La portata della pompa è misurata attraverso un sensore di portata ad elica posto in mandata. Il radiatore e la ventola sono state prelevate da una fiat punto 1.4 turbo diesel da 55 kW di cui non si conoscono le caratteristiche tecniche.



Fig.52 Particolare della pompa di ricircolo e del dissipatore

Per il calcolo della potenza termica estratta dal dissipatore, sono state installate due sonde di temperatura della MAXIM: una in ingresso e una in uscita allo scambiatore, e tre sonde K a vite in diversi punti dello scambiatore: una all'inizio, una a metà ed una alla fine, tipo OMEGA WTK-8-60.

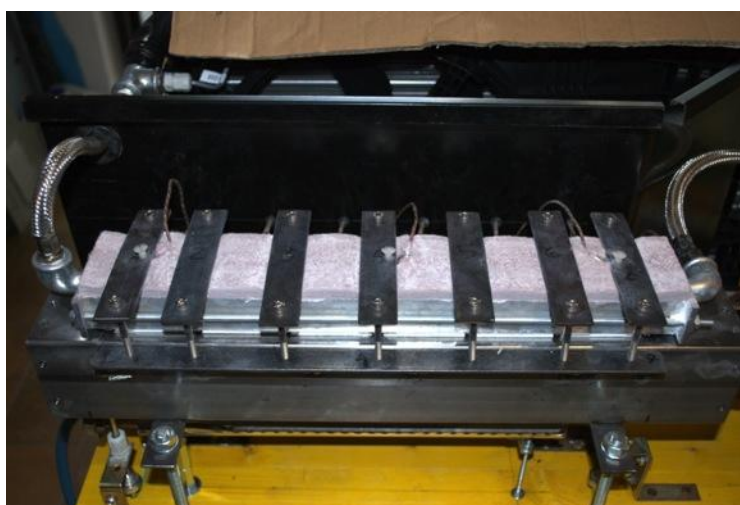


Fig.53 Disposizione sonde K sul lato freddo



Fig.54 Particolare del sensore di portata FLOWMETER VISIO2000 e del sensore di temperatura acqua

La Potenza termica trasferita al liquido dello scambiatore sarà calcolata come:

$$Q_{TCOLD} = \dot{m}_{H2O} c_{p_{H2O}} (T_{Cout} - T_{Cin}) \quad (7.3)$$

dove

- $c_{p_{H2O}}$ è il calore specifico dell'acqua = 4186 J/kgK;
- T_{Cout} e T_{Cin} sono rispettivamente le temperatura in uscita ed ingresso allo scambiatore;
- \dot{m}_{H2O} è la portata massica espressa in kg/s, data da:

$$\dot{m}_{H2O} = \gamma_{H2O} \cdot q_{H2O} \quad (7.4)$$

dove:

- γ_{H2O} è il peso specifico dell'acqua = 1000 kg/m³ ;
- q è la portata volumetrica dell'acqua in m³/s.

7.4 GENERATORE TERMOELETTRICO

Le celle utilizzate per il banco di prova sono prodotte dall'azienda canadese TEGTEC, modello TEG1-12611-6.0. I dati forniti dal costruttore sono i seguenti:

T_H [°C]	300
T_c [°C]	30
V_{oc} [V]	8.4
R_{in} [Ω]	1.2
V_{ml} [V]	4.3
I_{ml} [A]	3.4
P_{ml} [W]	14.6

Le celle della famiglia TEG1 utilizzano come materiale termoelettrico il Bi_2Te_3 (*Tellururo di Bismuto*), un materiale che possiede un buon zT intorno ai 300 °C, e che è comunemente utilizzato nei generatori termoelettrici in commercio.



Fig.55 TEG1-12611-6.0

La lega saldante utilizzata per collegare in serie elettrica le giunzioni p-n di Bi_2Te_3 e per la connessione con i cavi di potenza, è composta al 95% da Sn (*Stagno*) e dal 5% da Sb (*Antimonio*). Questa lega saldante ha punto di fusione a $232\text{ }^\circ\text{C}$, e poiché tutte le saldature sono fatte sul lato freddo della cella, questa è anche la temperatura massima che può raggiungere il lato connesso con il dissipatore.

Le giunzioni sono messe in parallelo termico da due piastre in *Allumina* (Al_2O_3) trattate con grafite fusa per migliorarne la conducibilità termica di contatto.

I cavi in uscita al generatore sono isolati in TEFLON®, un ottimo isolante elettrico e termico le cui caratteristiche rimangono stabili fino a $250\text{ }^\circ\text{C}$.

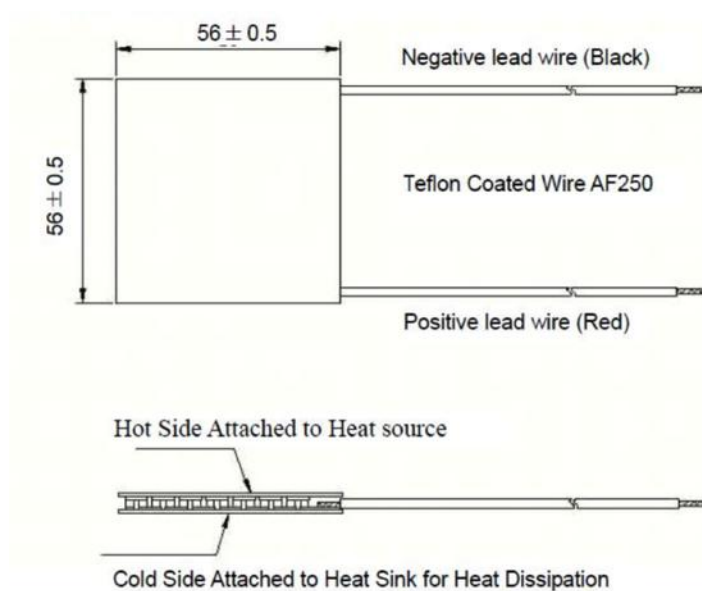


Fig.56 Disegno costruttivo della cella TEG1-12611-6.0

Dai data sheet della cella si può ricavare il rendimento di conversione nominale nelle condizioni di massima potenza come:

$$\eta_{ml} = \frac{P_{ml}}{Q_T} = 4\%$$

Il coefficiente di Seebeck (V/K) della cella può essere calcolato come:

$$\alpha = \frac{V_{OC}}{T_H - T_C} = 0.031 \text{ [V/K]}$$

L'indice di merito assoluto, Z, è quindi:

$$Z = \frac{8\eta_{mL}}{T_{HJ}(2-3\eta_{mL}) - T_{CJ}(2+\eta_{mL})} = 6.97 \cdot 10^{-4} \text{ [1/K]}$$

La resistenza termica della giunzione è data da:

$$\Theta_{in} = \frac{R_{in}}{\alpha_{pn}^2} Z = 0.8641 \text{ [K/W]}$$

La resistenza termica della piastra in *Allumina* di dimensioni 56x56x0,5 mm è data da:

$$\Theta_{Al_2O_3} = \frac{h}{k_{Al_2O_3} A} = 0.010629252 \text{ [K/W]}$$

dove $k_{Al_2O_3}$ è la conducibilità termica dell'*Allumina*.

$$k_{Al_2O_3} = 15 \text{ W/K}$$

La tensione scelta per il banco di prova è di 24 Vcc, corrispondente ad una "stringa" di sei celle in serie. Si è preferito non dover incorrere nell'utilizzo di diodi di by-pass, necessari nella configurazione in parallelo.

Se le celle fossero in parallelo, infatti, una non omogeneità di temperature sia sul lato freddo che su quello caldo, porterebbero le celle con delta di temperatura minore a funzionare come carichi.

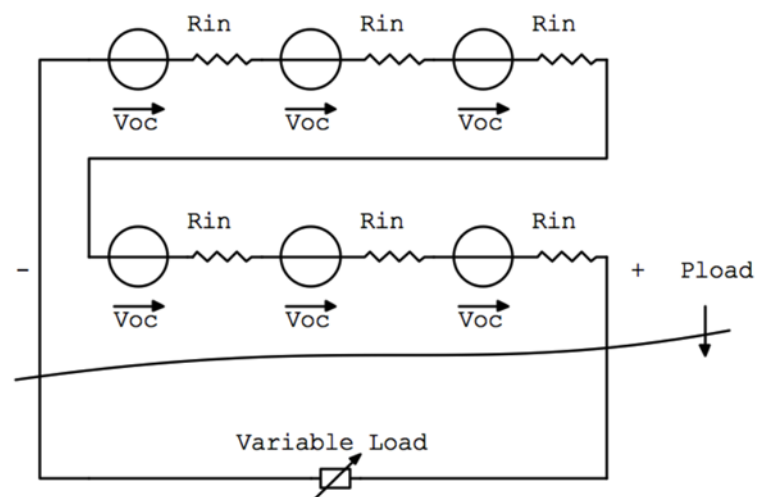


Fig.57 Schema elettrico del banco di prova

Dove:

$$V_{oc} = 8.4 V$$

$$R_{in} = 1.2 \Omega$$

Il carico è composto da una basetta di 6 resistenze diverse:

RL1	48
RL2	24
RL3	15
RL4	7,67
RL5	2,03
RL6	0,2

Il circuito equivalente del generatore visto ai morsetti del carico è il seguente:

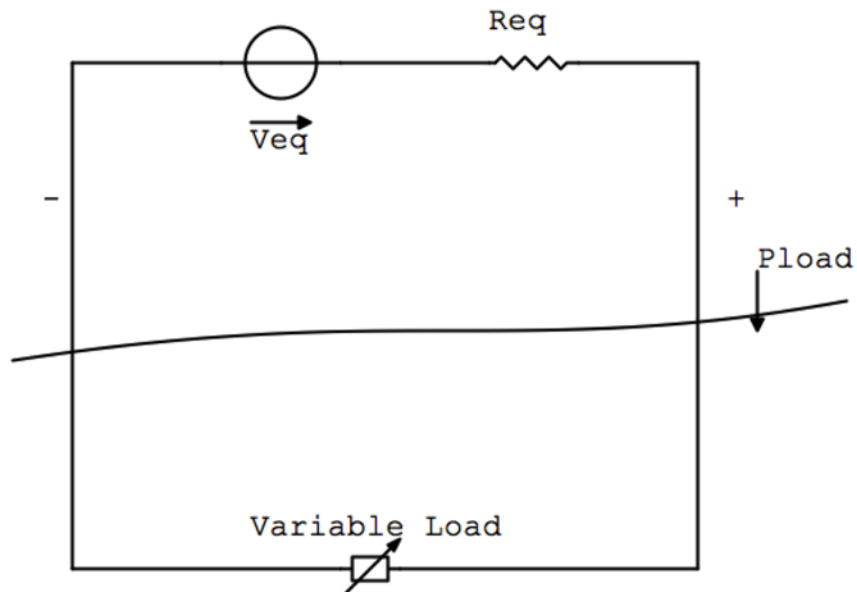


Fig.58 Circuito equivalente del generatore

Utilizzando l'equivalente di Thevenin ai morsetti esterni del generatore si ottengono i seguenti parametri:

$$V_{eq} = 6V_{oc} = 50,4 V$$

$$R_{eq} = 6R_{in} = 7,2 \Omega$$

Se le celle sono tutte uguali, la resistenza equivalente è data da:

$$R_{eq} = \frac{nR_{in}}{j} \quad (7.5)$$

dove n è il numero di celle in serie e j il numero di stringhe in parallelo.

Il generatore termoelettrico sarà costituito da n*j celle in parallelo termico la cui resistenza termica complessiva, sarà data da:

$$\Theta_{eq} = \frac{\Theta_{in}}{n \cdot j} \quad (7.6)$$

Nel Caso in esame sarà pari a:

$$\Theta_{eq} = \frac{\Theta_{in}}{n \cdot j} = \Theta_{eq} = \frac{\Theta_{in}}{6} = 0,14505 \text{ K/W}$$

Allo stesso modo calcoliamo la resistenza termica complessiva delle piastre in ceramica, come:

$$\Theta_{Al_2O_3} = \frac{\Theta_{Al_2O_3}}{n \cdot j} \quad (7.7)$$

che nel caso in esame è pari a:

$$\Theta_{Al_2O_3} = \frac{\Theta_{Al_2O_3}}{n \cdot j} = \frac{\Theta_{Al_2O_3}}{6} = 1.7717 \cdot 10^{-3} \text{ K/W}$$

Il generatore termoelettrico essendo costituito dalla serie e parallelo di moduli ad effetto Seebeck, può essere modellizzato come un 'unica cella di Seebeck con *coefficiente di Seebeck* complessivo pari a:

$$\alpha_{eq} = \frac{V_{eq}}{T_H - T_C} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{oc_i}}{T_H - T_C}$$

dove n sono il numero di celle in serie.

Generalizzando, se le celle sono tutte uguali, il coefficiente di Seebeck complessivo è dato da:

$$\alpha_{eq} = n\alpha \quad (7.8)$$

La potenza prodotta dal generatore termoelettrico può essere idealmente espressa come la potenza prodotta da una singola cella avente le caratteristiche del generatore equivalente appena calcolate.

$$P_{prod} = \frac{V_{eq}^2}{R_{eq}} \frac{m}{(1+m)^2} = \frac{V_{eq}^2}{R_{eq}} \frac{m}{(1+m)^2} = \frac{\alpha_{eq}^2 \Delta T^2}{R_{eq}} \frac{m}{(1+m)^2}$$

Se supponiamo di avere a disposizione un carico variabile che fa lavorare il generatore sempre nelle condizioni di massima potenza (un DC/DC con controllo MPPT), possiamo considerare il parametro $m=1$ (m è il rapporto tra la resistenza interna del generatore e quella di carico). La potenza della cella equivalente sarà quindi data:

$$P_{prod} = n \cdot j \frac{\alpha^2 \Delta T^2}{R_{in}} \frac{1}{4} \quad (7.9)$$

In ultima analisi il generatore termoelettrico può essere modellizzato (a meno delle perdite nei cavi di collegamento e nelle giunzioni) come una cella ad effetto Seebeck equivalente con resistenza interna pari a R_{eq} , coefficiente di Seebeck pari ad α_{eq} , resistenza termica pari a Θ_{eq} e resistenza delle due piastre ceramiche pari a $\Theta_{Al_2O_3}$.

7.5 SISTEMA DI ACQUISIZIONE DELLE MISURE

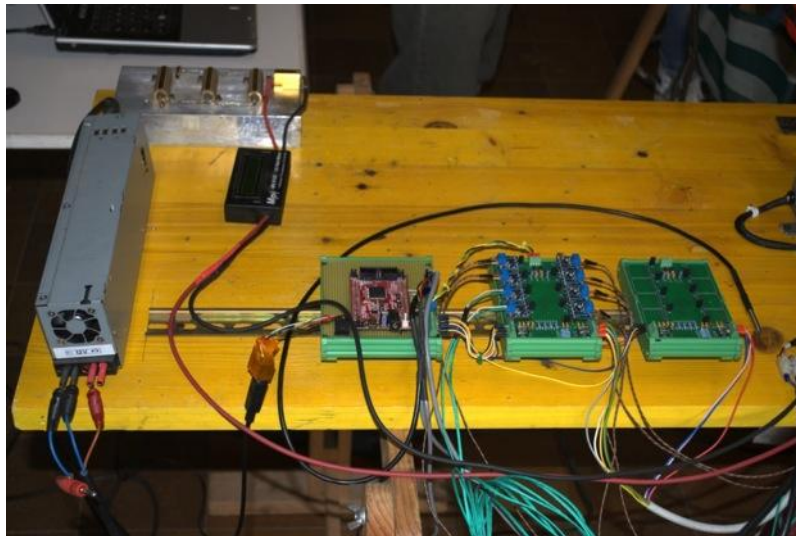


Fig.59 Sistema di misura

Le misure sperimentali sono acquisite per mezzo di un sistema elettronico creato Ad Hoc. Il sistema è così costituito:

- Scheda di Sviluppo OLIMEX –STM32H107;
- Basetta con convertitori di temperatura MAX31850 con compensazione del giunto freddo

Lo schema di principio del sistema di acquisizione delle misure è presentato nella figura in basso.

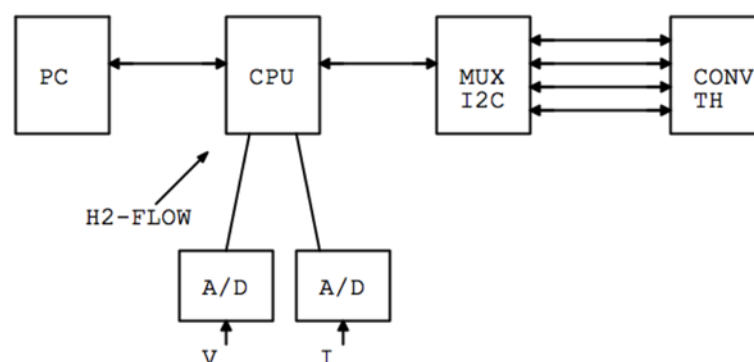


Fig.60 Schema di principio sistema di acquisizione misure, il MUX I2C converte il protocollo 1-wire in protocollo seriale, acquisito dalla CPU.

7.5.1 SCHEDA ACQUISIZIONE SEGNALI DI TEMPERATURA

La basetta è composta da 8 convertitori di termocoppia digitali MAX31850, dotati di interfaccia 1-Wire® e compensazione del giunto freddo. I dispositivi offrono una precisione di $\pm 2,0$ °C (senza considerare la non linearità del sensore). L'interfaccia 1-Wire di cui sono dotati i dispositivi MAX31850 consente a più sensori, collocati in punti diversi, di comunicare e ricevere alimentazione tramite un'unica linea dati, semplificando notevolmente il cablaggio.

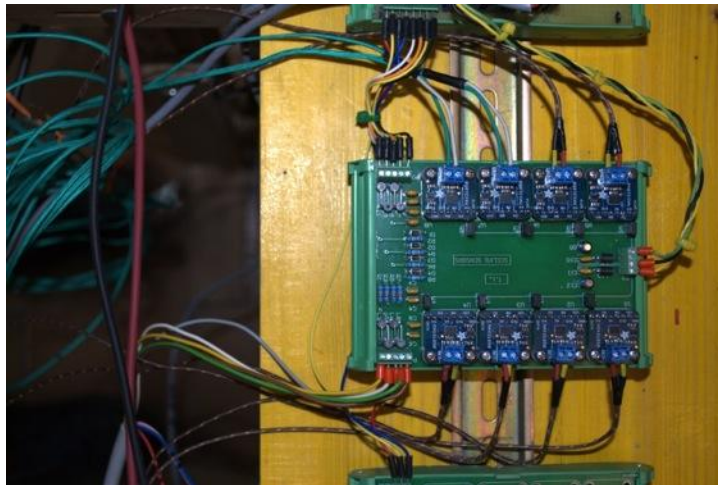


Fig.61 Scheda acquisizione termocoppie

Le termocoppie forniscono valori di tensione molto bassi e, per garantire una buona precisione di misura, richiedono la compensazione del giunto freddo; la digitalizzazione dei segnali generati da questi sensori può essere quindi difficile. I convertitori MAX3185 offrono in un unico chip un convertitore analogico-digitale (ADC) discreto, un riferimento ad alta precisione, un sensore di temperatura per la compensazione del giunto freddo ed un'interfaccia bus 1-Wire. I dispositivi MAX31850 sono anche in grado di rilevare le termocoppie sconnesse o in cortocircuito, potenziali cause di misure errate o di guasti del sistema.

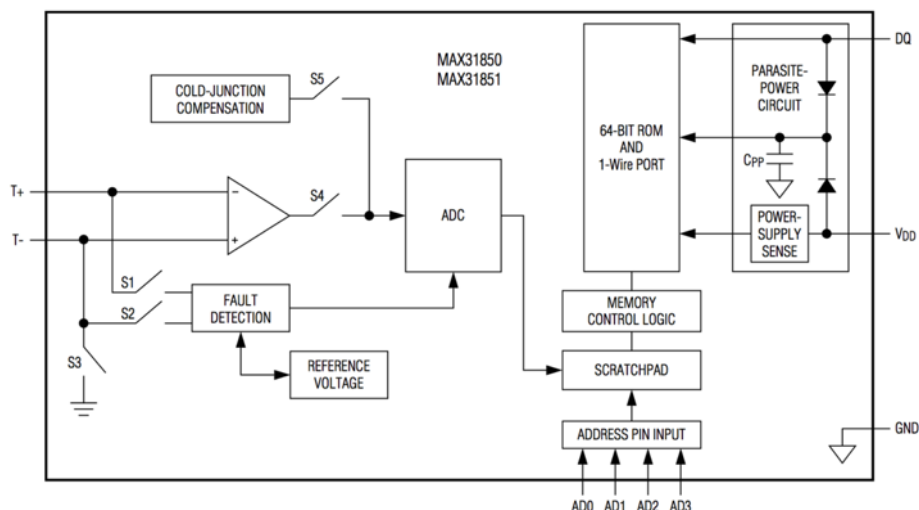


Fig.62 Schema elettronica MAX31850

I sensori di temperatura acquisiti con i convertitori MAX31850 sono:

- 6 sonde di temperatura OMEGA WTK-8-60
 - INPUT-C, MIDDLE-C, OUTPUT-C, INPUT-H, MIDDLE-H, OUTPUT-H.
- 2 sonde di temperatura OMEGA K-L-1-6-150-G1/4-G-5
 - AIRFLOW-H, AIRFLOW-C

I sensori di temperatura restanti sono invece acquisiti con sensori integrati di temperatura, del tipo MAXIM DS18B20, sensore 1-Wire della Maxim IC. Questo sensore ha la capacità di rilevare temperature con precisione da 9-bit a 12-bit in un range di temperature fra un minimo di -55°C ed un massimo di $+125^{\circ}\text{C}$ con un'approssimazione di $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, sono anche dotati di comandi di ricerca di allarmi che identificano ed indirizzano i sensori che misurano temperature al di fuori di limiti programmati (Temperature Alarm Condition).



Fig.63 Sonda di temperatura acqua e temperatura ambiente con DS18B20 integrato.

7.6.2 SCHEDA DI SVILUPPO OLIMEX- STM32H107

La scheda di sviluppo OLIMEX-STM32H107 è utilizzata per l'acquisizione dei segnali digitali dalla scheda convertitori delle termocoppie, l'acquisizione dei segnali di tensione e carico del generatore (segnali campionati da due A/D a 12 bit), e l'acquisizione del segnale di portata dal flussimetro. I segnali sono poi trasferiti al PC con protocollo seriale, tramite USB.

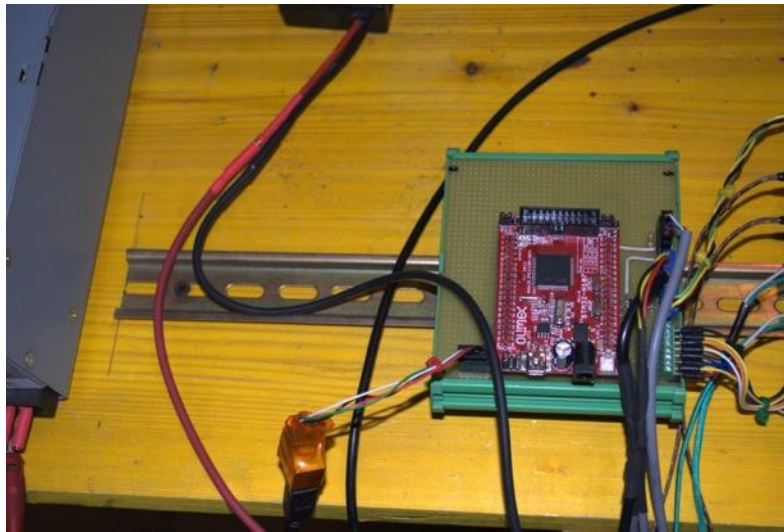


Fig.64 Immagine della Scheda OLIMEX STM32H107

Le caratteristiche della scheda sono:

- Core: ARM 32-bit Cortex™-M3 CPU
 - 72 MHz maximum frequency, 1.25 DMIPS/MHz (Dhrystone 2.1) performance at 0 wait state memory access
 - Single-cycle multiplication and hardware division
- Memories
 - 256 Kbytes of Flash memory
 - 64 Kbytes of SRAM
- Clock, reset and supply management
 - 2.0 to 3.6 V application supply and I/Os
 - POR, PDR, and programmable voltage detector (PVD)
 - 25 MHz crystal oscillator
 - Internal 8 MHz factory-trimmed RC
 - Internal 40 kHz RC with calibration
 - 32 kHz oscillator for RTC with calibration
- Low power
 - Sleep, Stop and Standby modes
 - VBAT supply for RTC and backup registers
- 2 × 12-bit, 1 μs A/D converters (16 channels)
 - Conversion range: 0 to 3.6 V
 - Sample and hold capability
 - Temperature sensor
 - up to 2 MSps in interleaved mode
- 2 × 12-bit D/A converters
 - DMA: 12-channel DMA controller Supported peripherals: timers, ADCs, DAC, I²Ss, SPIs, I²Cs and USARTs

- Debug mode
 - Serial wire debug (SWD) & JTAG interfaces
 - Cortex-M3 Embedded Trace Macrocell™
- 80 fast I/O ports 80 I/Os, all mappable on 16 external interrupt vectors and almost all 5 V-tolerant 10 timers;
- 1 × 16-bit motor control PWM timer with dead-time generation and emergency stop
- 2 × watchdog timers (Independent and Window)
- SysTick timer: a 24-bit downcounter
- 2 × 16-bit basic timers to drive the DAC
- 14 communication interfaces
 - 2 × I²C interfaces (SMBus/PMBus)
 - 5 USARTs (ISO 7816 interface, LIN, IrDA capability, modem control)
 - 3 SPIs (18 Mbit/s), 2 with a multiplexed I²S interface that offers audio class accuracy via advanced PLL schemes
 - 2 × CAN interfaces (2.0B Active) with 512 bytes of dedicated SRAM
 - USB 2.0 full-speed device/host/OTG controller with on-chip PHY that supports HNP/SRP/ID with 1.25 Kbytes of dedicated SRAM
 - 10/100 Ethernet MAC with dedicated DMA and SRAM (4 Kbytes): IEEE1588 hardware support, MII/RMII available on all packages
- CRC calculation unit, 96-bit unique ID;

I dati acquisiti dal sistema di controllo sono poi inviati al PC, nel quale è stata sviluppata una piattaforma che permette la lettura e l'acquisizione delle misure dei sensori. Il "banco di misura" virtuale è stato sviluppato in DelPhi dall'amico Walfrido Dalmazzo, consulente e tecnico informatico.

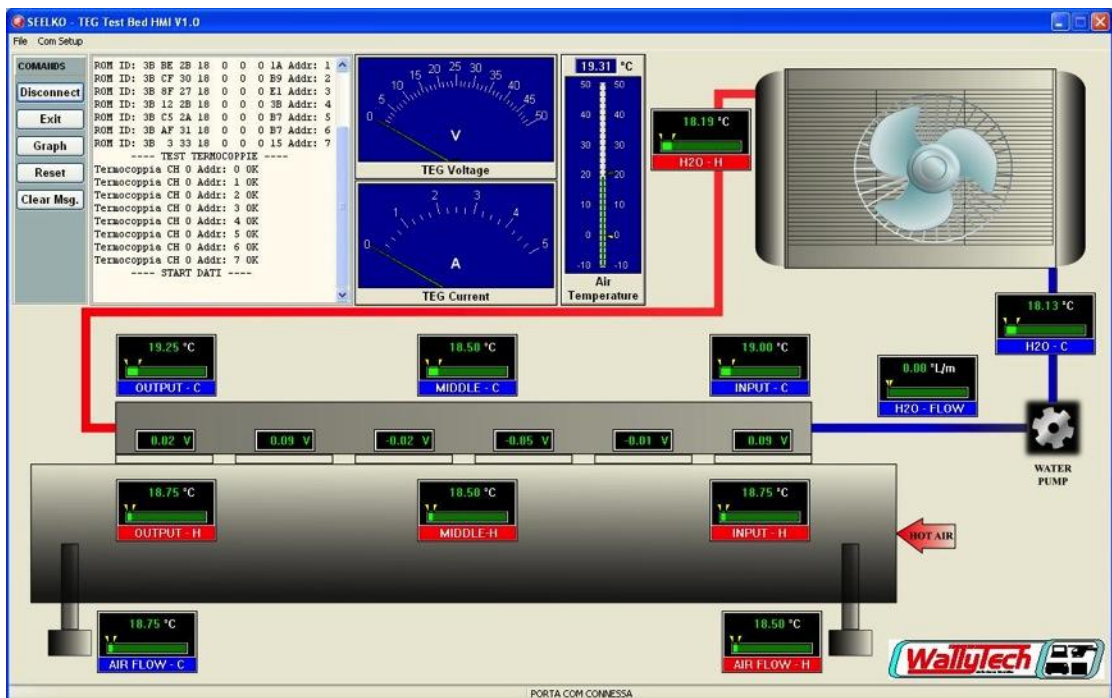


Fig.65 Schermata di acquisizione e visualizzazione misure

CAPITOLO 8

ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI

Nel seguente capitolo sono presentati i dati sperimentali estratti dal banco di prova presentato, le curve PV e VI del generatore termoelettrico e confrontate con le curve teoriche. Verrà calcolato infine il rendimento di conversione del generatore.

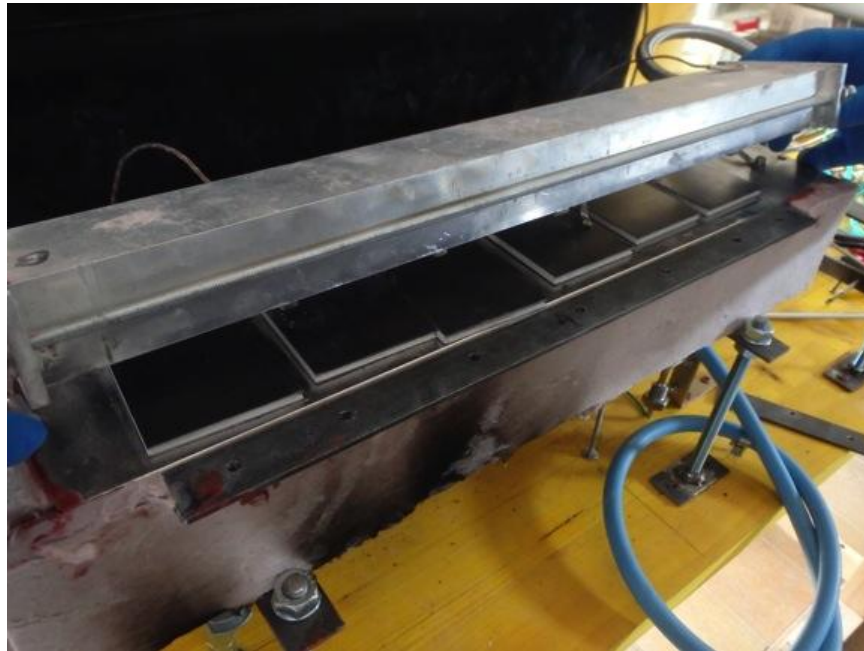


Fig. 66 Moduli termoelettrici e generatore in funzione

8.1 TEMPERATURE A REGIME TERMICO

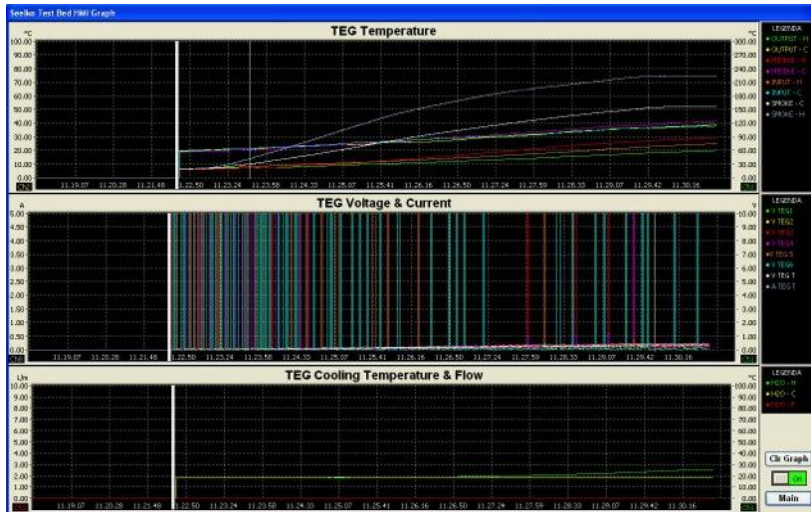


Fig. 67 Grafici di temperatura, tensione del Banco di Prova.

Il test ha lo scopo di ricavare sperimentalmente le curve V-I e P-V del generatore termoelettrico, e calcolarne il rendimento elettrico di conversione.

Tutti i dati estratti sono da intendersi ad equilibrio termico raggiunto e simulano il funzionamento di un generatore TEG applicato ad una canna fumaria, in presenza di elevato gradiente di temperatura.

Le temperature rilevate dai sensori sulle superfici del banco di prova sono:

INPUT_C	38,25 °C
MIDDLE_C	39,25 °C
OUTPUT_C	41,50 °C
INPUT_H	169,75 °C
MIDDLE_H	171,50 °C
OUTPUT_H	235,00 °C
H2O_C	31,06 °C
H2O_H	32,00 °C

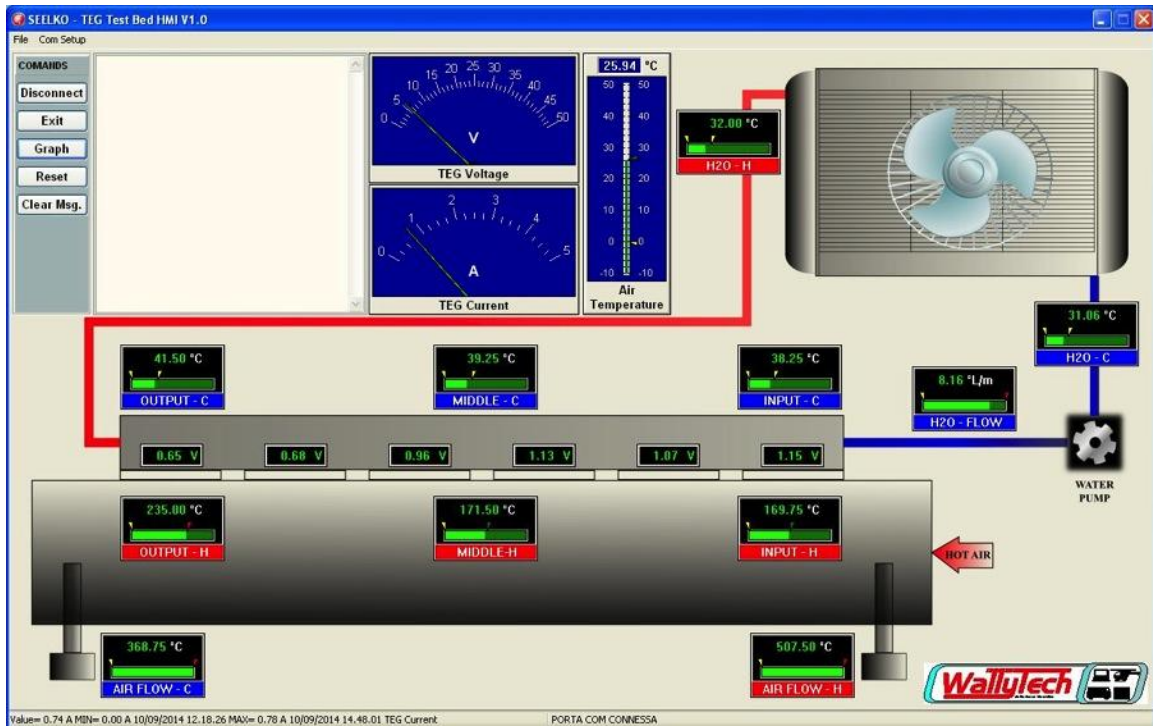


Fig. 68 Pannello HMI, con TEG a regime termico

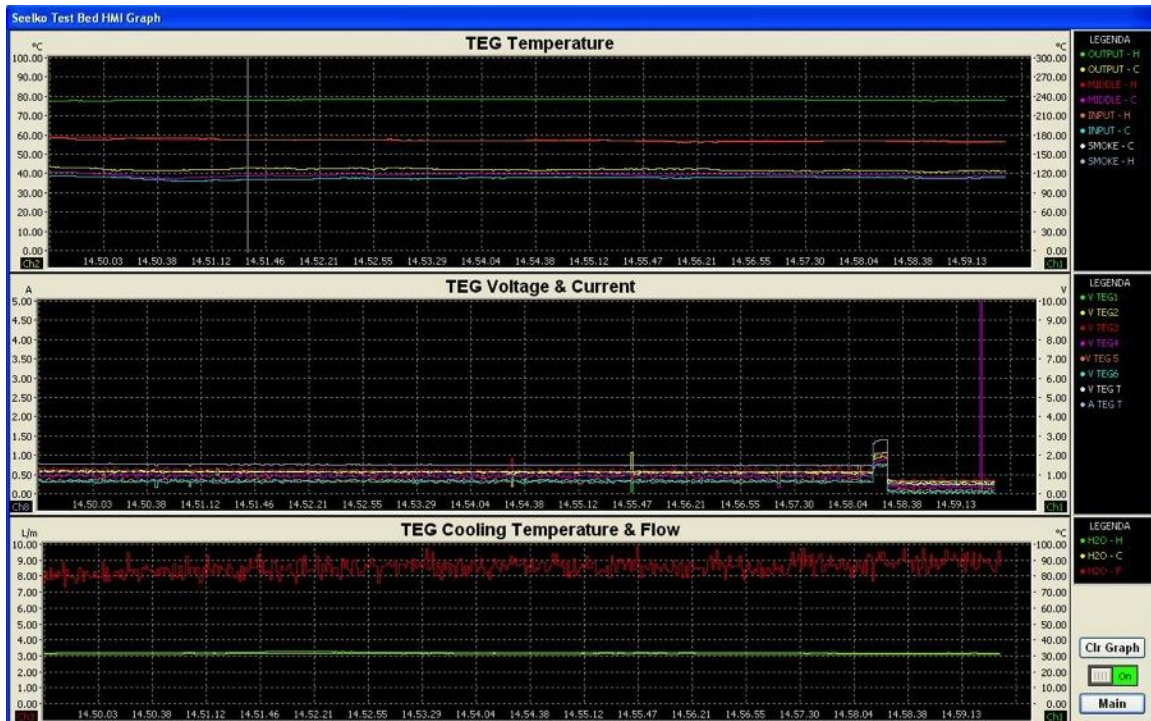


Fig. 69 Grafici funzionamento del TEG con temperatura a regime. (l'incremento di tensione e il successivo decremento sono transitori di inserzione di un carico)

8.2 CURVE CARATTERISTICHE DEL TEG: V-I E P-V

Raggiunto l'equilibrio termico, tra le superfici a contatto, si è analizzato il comportamento del generatore sotto diverse condizioni di carico. Il generatore così costituito ha una resistenza interna, supposta costante al variare della temperatura, di $R_{in} = 7,2 \Omega$, che corrisponde anche al valore della resistenza di carico per la quale si ha il massimo trasferimento di energia.

Non avendo a disposizione una resistenza variabile con una risoluzione così bassa, si è deciso di utilizzare le seguenti resistenze di carico:

RL1	48
RL2	24
RL3	15
RL4	7,67
RL5	2,03
RL6	0,2



Fig. 70 Particolare sulle resistenze di carico utilizzate.

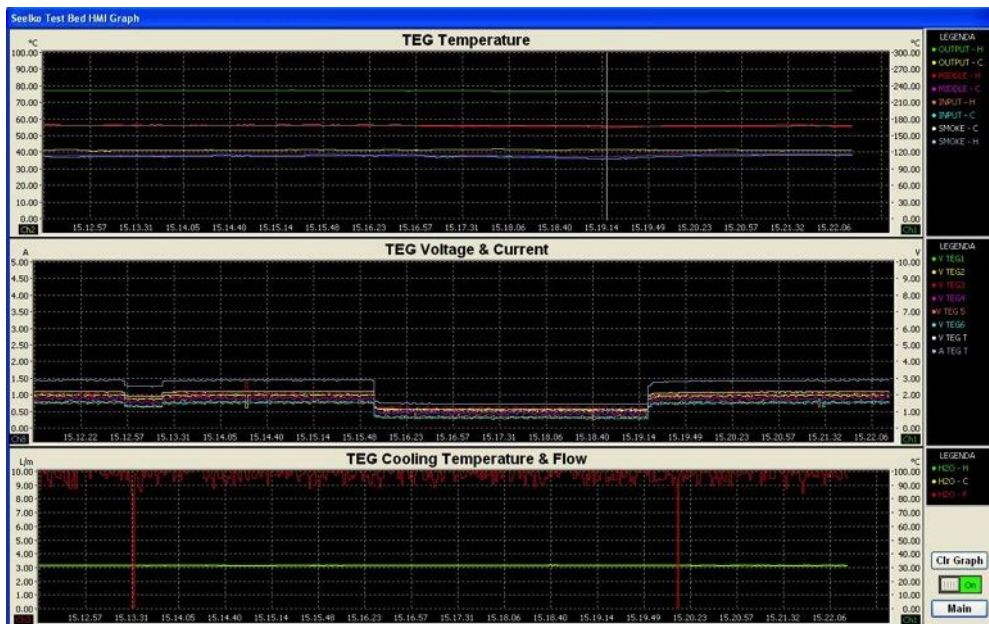


Fig. 71 Parametri del TEG durante l'inserzione/disinserzione delle resistenze di carico

La caratteristica tensione – corrente mette in relazione la tensione e la corrente del generatore sotto diverse condizioni di carico. Il generatore termoelettrico, come si può vedere dalla Fig. 66, ha una caratteristica V-I di tipo lineare, il rapporto tra la tensione e la corrente sono quindi costanti al variare del carico. La tensione è massima a vuoto (circuito aperto) e man mano che si riduce il carico, diminuisce fino alla condizione limite di cortocircuito, in cui si ha corrente massima e tensione nulla.

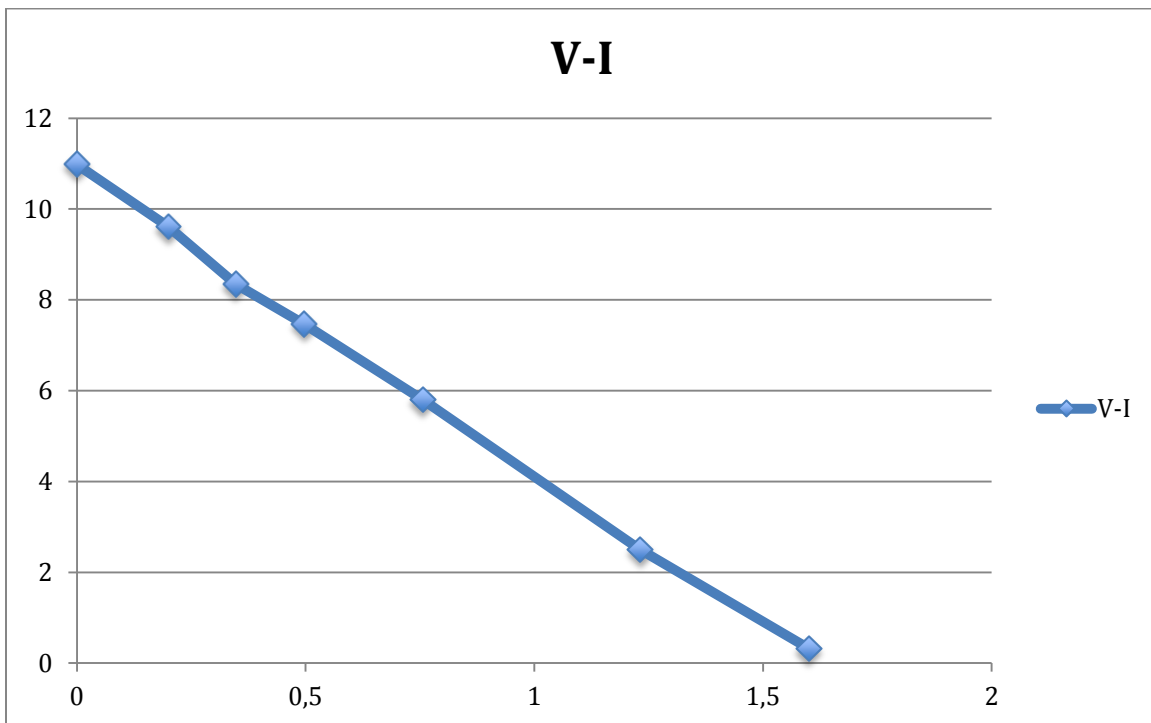


Fig. 72 Grafico V-I del generatore TEG, ricavato dai dati sperimentali

La resistenza interna reale del generatore può essere calcolata, con riferimento al circuito equivalente come:

$$R_{in_tot} = \frac{V_0 - V_L}{I_L} = 6,65 \Omega$$

supponendo le celle tutte con la stessa resistenza interna si ha:

$$R_{in} = \frac{V_0 - V_L}{6I_L} = 1,11 \Omega$$

La caratteristica Potenza- Tensione, mette in relazione la potenza e la tensione di un generatore, in diverse condizioni di carico. Come si può vedere in Fig. 67, ha una forma parabolica con un massimo in $V_{ml} = V_{oc}/2$. Generatori con caratteristiche paraboliche si prestano bene ad essere controllati con le tecniche MPPT discusse nei capitoli precedenti.

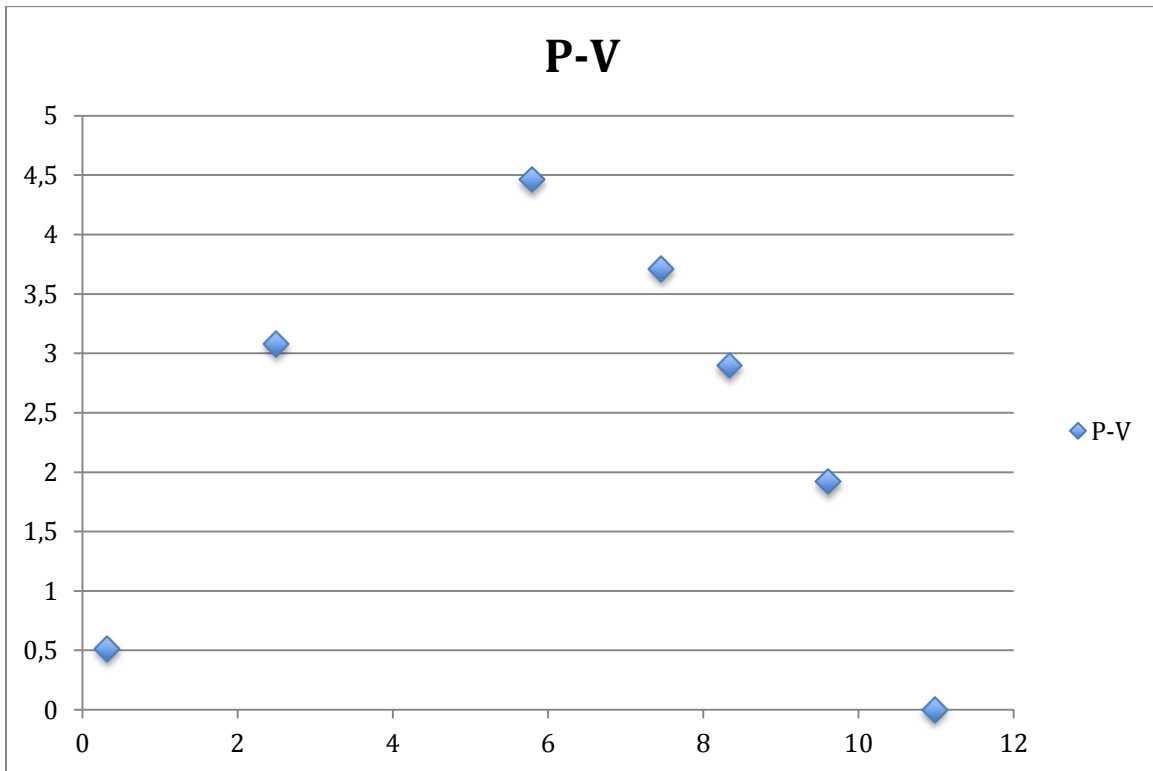


Fig. 73 Grafico P-V ricavato dai dati sperimentali

8.2 CALCOLO DEL RENDIMENTO DI CONVERSIONE DEL GENERATORE TERMOELETTRICO E INTERPRETAZIONE DATI SPERIMENTALI

Per il calcolo del rendimento di conversione del generatore termoelettrico è necessario conoscere la potenza termica transitante nei moduli, nel sistema presentato è con buona approssimazione pari alla potenza termica trasferita al liquido dello scambiatore e cioè:

$$Q_{TCOLD} = \dot{m}_{H2O} c_{p_{H2O}} (T_{Cout} - T_{Cin}) \quad (7.3)$$

dove

- $c_{p_{H2O}}$ è il calore specifico dell'acqua = 4186 J/kgK;
- T_{Cout} e T_{Cin} sono rispettivamente le temperatura in uscita ed ingresso allo scambiatore;
- \dot{m}_{H2O} è la portata massica espressa in kg/s, data da:

$$\dot{m}_{H2O} = \gamma_{H2O} \cdot q_{H2O} \quad (7.4)$$

dove:

- γ_{H2O} è il peso specifico dell'acqua = 1000 kg/m³ ;
- q è la portata volumetrica dell'acqua in m³/s.

La portata misurata è di 8,16 l/min, pari a 0,136 kg/s. Le temperature del liquido monte e valle del dissipatore sono:

H20_C	31,06 °C
H20_H	32,00 °C

La potenza termica transitante nel generatore termoelettrico è quindi:

$$\dot{Q}_{Tc} = 535,14 \text{ Wth}$$

La potenza totale entrante nel generatore termoelettrico è quindi data dalla somma della potenza emessa più la potenza elettrica generata:

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_{Tc} + P_{el} = 539,68 \text{ Wth}$$

la massima potenza estratta è (con un carico di 7,67 Ω)

$$P_{el} = 4,47 \text{ W}$$

Il rendimento sarà quindi dato da:

$$\eta = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_T} = 0,85 \%$$

La Potenza elettrica estratta dal generatore termoelettrico è molto bassa ma in linea con le aspettative, il salto termico letto dalle sonde di temperatura infatti, non è il salto termico reale alla quale viene sottoposta la giunzione ma risulta essere maggiore (si sono verificate queste ipotesi con termometro laser). Analisi con strumenti di modellizzazione agli elementi finiti hanno portato a far luce sulle cause del basso rendimento di conversione e sulla non uniformità delle tensioni sulle celle.

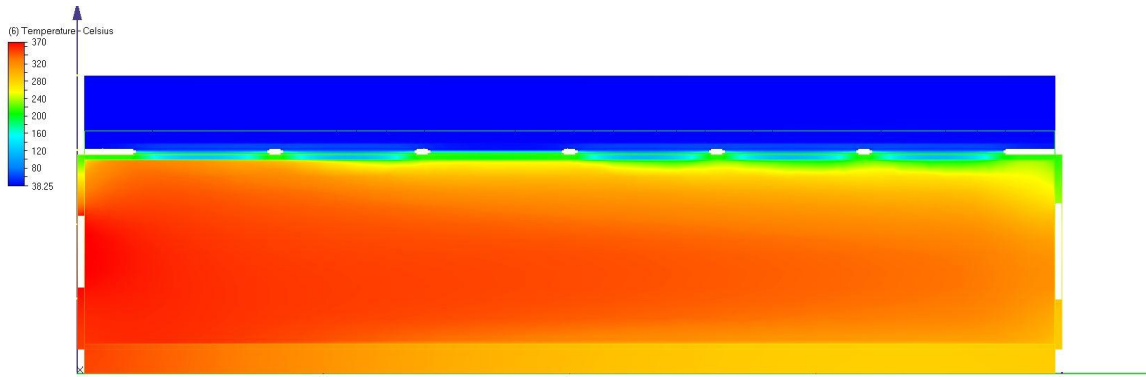
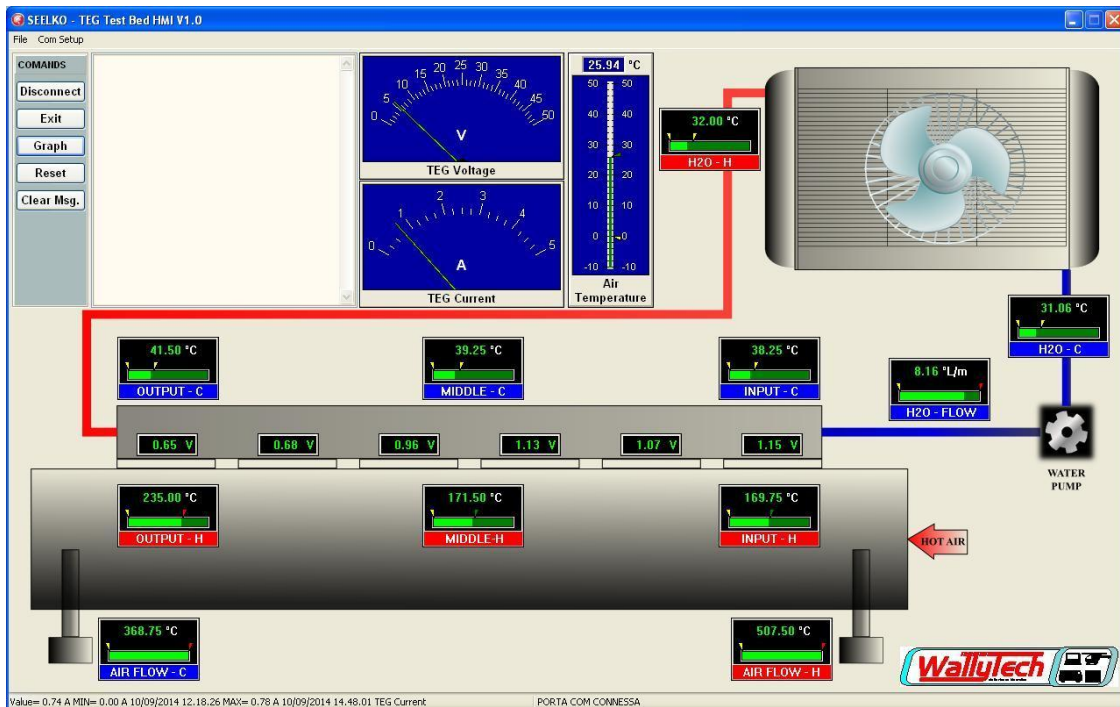


Fig.74 Modellizzazione dell'esperimento con analisi FEM, Software Autodesk CFD

Il grafico in fig.74 è stato ricavato con il Software di modellazione FEM Autodesk CFD, inserendo i dati di progetto.

Come si può vedere, le celle fino alla 4, sono sottoposte ad un gradiente di temperatura simile (intorno agli 80°C), le ultime due celle (la 5 e la 6), sono attraversate da un flusso termico molto piccolo, il che le porta a non concorrere quasi alla generazione di energia elettrica.



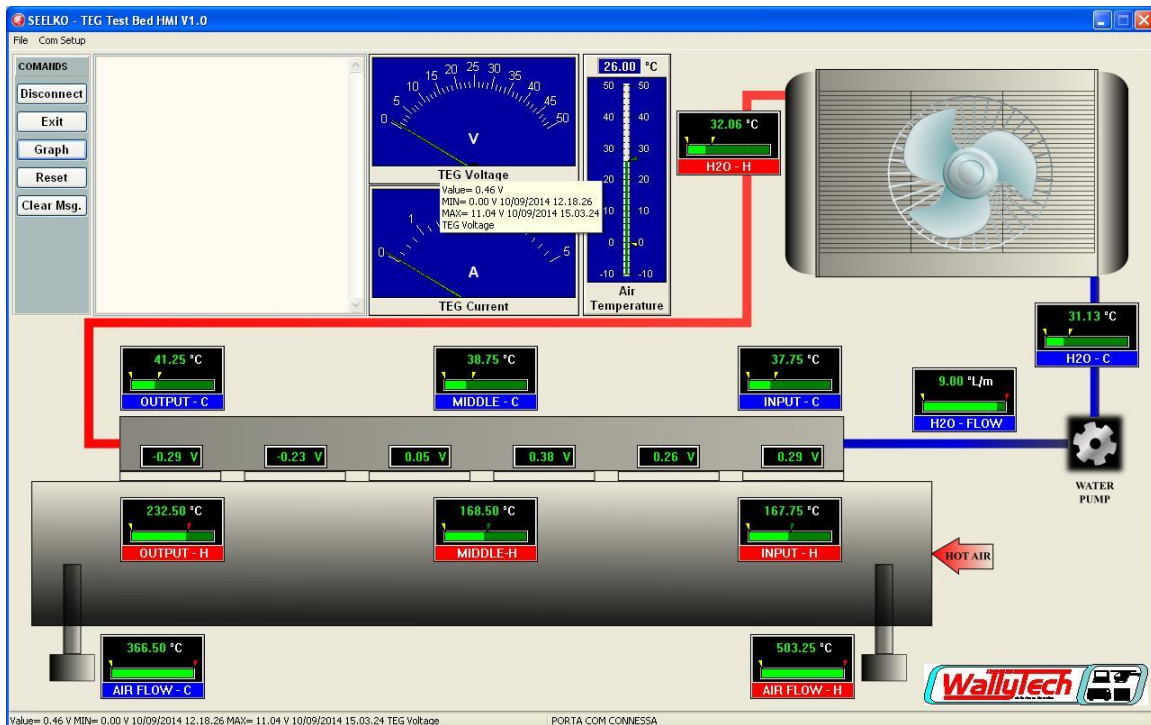


Fig. 75 Schermata di acquisizione dati nelle condizioni di massima potenza e in condizioni prossime al cortocircuito

La fig. 75 mostra i dati del funzionamento in corto circuito del generatore, in queste condizioni si vede come le celle 5 e 6, si comportino da carico rispetto alle altre (tensione negativa).

A conferma di quanto emerso nella modellizzazione agli elementi finiti, si sono utilizzati i parametri costitutivi del generatore termoelettrico calcolati nel cap.7, e si è calcolato il ΔT medio alla quale deve essere sottoposto il generatore per far sì che transiti una potenza termica di 539,68 W. La differenza di temperatura media (trascurando la resistenza di interfaccia) tra le facce dei moduli deve essere pari a:

$$\Delta T = \dot{Q}_T \theta_{eq} = 77,7^\circ C$$

Alla quale corrisponde una potenza per cella pari a:

$$P_{prod} = \frac{\alpha^2 \Delta T^2}{R_{in}} \frac{m}{(m+1)^2} = 1,309 \text{ W}$$

dove il rapporto m è pari:

$$m = \frac{R_L}{R_{in}} = 1,153$$

La potenza totale dovrebbe essere quindi di:

$$P_{tot} = n \cdot j \frac{\alpha^2 \Delta T^2}{R_{in}} \frac{m}{(m+1)^2} = 7,854 \text{ W}$$

Con le considerazioni fatte precedentemente con il modello FEM si nota come le celle 5 e 6 non siano quasi attraversate da flusso termico e quindi in ultima analisi si comportano solo come carico. Eliminando il contributo di queste ultime e confrontando la potenza che avrebbe dovuto erogare il sistema, si ottiene:

$$P_{tot} = 4 \frac{4\alpha^2 \Delta T^2}{R_{in_tot}} \frac{m}{(m+1)^2} = 3,49 \text{ W}$$

Che è la potenza teorica estraibile dal sistema.

La potenza elettrica misurata è stata invece di:

$$P_{el} = 4,47 \text{ W}$$

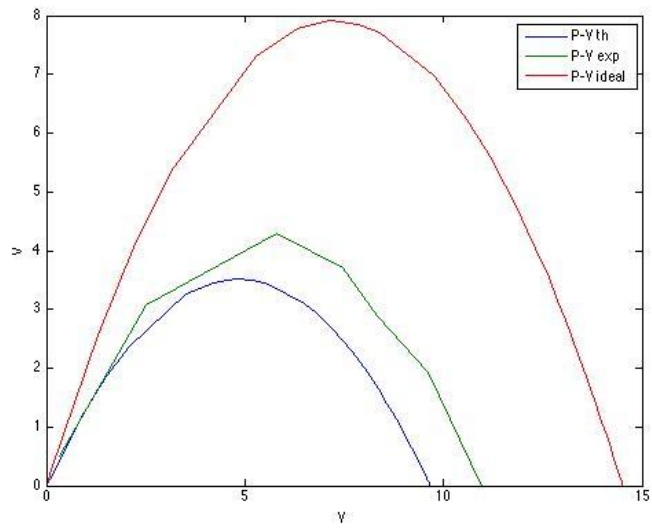


Fig. 76 Grafici P-V a confronto: In rosso il grafico P-V ideale, in blu il grafico P-V simulato delle condizioni dell'esperimento, in verde il grafico P-V dell'esperimento

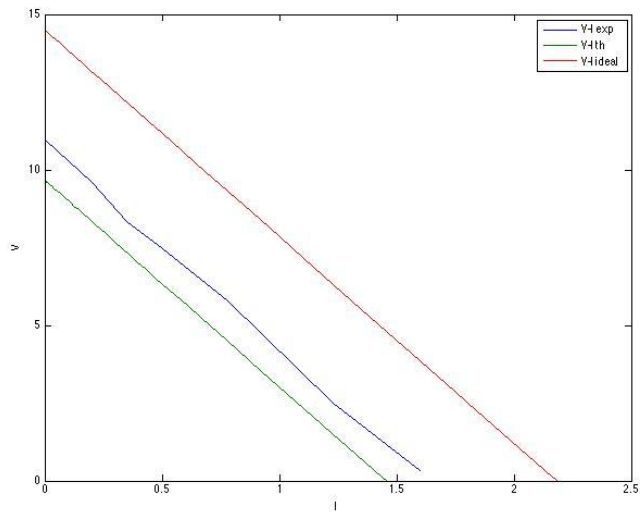


Fig. 77 Grafici V-I a confronto: In rosso il grafico V-I ideale, in blu il grafico V-I simulato delle condizioni dell'esperimento, in verde il grafico V-I dell'esperimento

Sono emersi i seguenti temi di riflessione, durante le fasi di sperimentazione:

- La densità di potenza termica necessaria al modulo è estremamente elevata, l'applicazione diretta di queste celle su una superficie "calda" non basta per estrarre tutta l'energia termica necessaria. La ricerca dovrebbe orientarsi verso lo sviluppo di *heat exchanger* ottimizzati per scambio gas-solido e che non aumentino di troppo le perdite di carico nel camino. Le celle inoltre devono essere attraversate da una potenza termica il più possibile uniforme.
- La resistenza di interfaccia tra la cella, sorgente di calore e dissipatore, gioca un ruolo fondamentale, maggiore è la pressione con cui vengono impaccate le celle e minore è la resistenza di contatto tra le interfacce.

Nell'esperimento analizzato si è utilizzata una coppia di serraggio di 6 Nm su 6 bulloni a testa esagonale M5x50.

I costruttori consigliano una pressione di 5 kg/cm² uniformi sulla cella.

Importantissimo è anche l'uso di paste termiche particolari o fogli di grafite per migliorare lo scambio termico.

Conclusioni

Si è presentata una possibile modellizzazione in ambiente Matlab Simulink del funzionamento dei generatori TEG, con modelli presenti in letteratura, successivamente si è analizzato il funzionamento reale di un generatore termoelettrico applicato ad un modello di un camino “ricreato” in laboratorio e comparati i risultati ottenuti con quelli attesi.

Nonostante i rendimenti di conversione di questi generatori termoelettrici siano piuttosto bassi (1% ottenuto sperimentalmente, con un salto termico di 110 °C), numerosi sono i punti in favore di questa tecnologia:

- **Disponibilità di risorsa:** Circa il 60% dell'energia convertita è persa sottoforma di calore.
- **Costo dei Materiali:** Recenti sviluppi tecnologici hanno portato ad una drastica riduzione del costo dei materiali termoelettrici: 0.50 \$/W *Alphabet Energy Inc.*, costi che rendono questa tecnologia competitiva rispetto al mercato delle rinnovabili.
- **Affidabilità:** Elevata affidabilità del sistema grazie all'assenza di parti in movimento.
-

Il lavoro getta le basi per il progetto di tesi del collega e amico Nicola Loss dell'università degli studi di Trento che tratta lo studio di fattibilità di un sistema innovativo di cogenerazione applicabile ai fumi esausti di generatori termici di grandi dimensioni con la finalità di studiare oltre alla soluzione tecnica anche la competitività dell'investimento



Fig. 78 Foto del camino dell'impianto a biogas Agrifer dove verrà installato il generatore termoelettrico.

Le conoscenze teoriche/pratiche acquisite verranno utilizzate durante la progettazione e l'installazione di un impianto di cogenerazione pilota da 1kW nella centrale a Biogas, Agrifer a Rivarolo del Re (CR) in collaborazione con l'Università di Trento e la Seelko S.r.L.

BIBLIOGRAFIA

Lukyan Anatychuk, John Stockholm e Giorgio Pastorino, "On the discovery of thermoelectricity by A. Volta", in *Proceedings of the 8th European Conference on Thermoelectrics*, Como, 2010.

Seebeck T.J., *Magnetic Polarization of Metals and Minerals*, Berlino, 1823.

David M. Rowe, *Thermoelectric Handbook*, Cardif, 1995.

Peltier, J. C., *Nouvelles experiences sur la caloricite des courans electrique*, *Ann. Chim.*, LVI 371, 1834.

Thomson, W., *On a mechanical theory of thermoelectric currents*, *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 1851.

Altenkirch E., *Electrothermische Kalteerzeug un gund Reversible Electriche Heizung*, *Physikalische Zeitschrifr*, , 1911.

<http://www.nasa.org>, *Radioisotope Thermoelectric Generator*.

<http://thermoelectrics.caltech.edu>, *History of Thermoelectric*.

<http://www.its.org>.

L.D.Hicks, *M.S. Dresselhaus*, *Phys. Rev.*, 1993.

G. J. Snyder and E. Toberer "Complex Thermoelectric Materials" *Nature Materials*, 2008.

Alex Zevalkink, Jessica Swallow and G. Jeffrey Snyder, *Thermoelectric properties of Zn-doped $\text{Ca}_5\text{In}_2\text{Sb}_6$* , *Dalton Trans*, 2013.

Seebeck T.J., *Magnetic Polarization of Metals and Minerals*, 1823.

Fermi Enrico, *Sulla quantizzazione del gas perfetto monoatomico*, 1926.

Peltier, J. C., *Nouvelles experiences sur la caloricite des courans electrique*, *Ann. Chim.*, LVI 371, 1834.

Christophe Goupil, Wolfgang Seifert, Knud Zabrocki, Eckhart Müller and G. Jeffrey Snyder, “Thermodynamics of Thermoelectric Phenomena and Applications”, *Entropy*, 2011.

Thomson William, *On a mechanical theory of thermoelectric currents*, 1851.

J.P. Joule, *On the Effects of Magnetism upon the Dimensions of Iron and Steel Bars*, 1847.

Vining, C.B., *The Thermoelectric process*, Research Society Symposium Proceeding, 1997.

Fermi Enrico, *Sulla quantizzazione del gas perfetto monoatomico*, 1926.

Gibbs, J.W., *On the equilibrium of heterogeneous substances*, Transactions of the Connecticut Academy, 1876.

Rocard, Y., *Thermodynamique*, 1967.

Pottier, N., *Physique Statistique hors équilibre, processus irréversibles linéaires*, 1968.

Onsager, L., *Reciprocal Relations in Irreversible Processes I*, 1931.

Onsager, L., *Reciprocal Relations in Irreversible Processes II*, 1931.

Christophe Goupil, Wolfgang Seifert, Knud Zabrocki, Eckhart Müller and G. Jeffrey Snyder, *Thermodynamics of Thermoelectric Phenomena and Applications*, *Entropy*, 2011.

Callen, H.B., *Thermodynamics*, 1960.

Callen, H.B, Greene, R.F. *On a Theorem of Irreversible Thermodynamics*, 1952.

Simone Dalola, Marco Ferrari, Vittorio Ferrari, Michele Guizzetti, Daniele Marioli e Andrea Taroni, “Characterization of Thermoelectric Modules for Powering Autonomous Sensors”, 2009.