



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA E DELL'INFORMAZIONE  
"GUGLIELMO MARCONI"

CORSO DI LAUREA IN  
INGEGNERIA ELETTRONICA PER L'ENERGIA  
E L'INFORMAZIONE

# STUDIO E SIMULAZIONE DI SISTEMI PER ENERGY HARVESTING DA LINEE ELETTRICHE

Tesi di laurea in Elettronica dei Sistemi Digitali

**Relatore**

**Prof. Aldo Romani**

**Presentata da**

**Alessandro Barzagli**

---

**Sessione novembre 2024**

**Anno Accademico 2023/2024**



# INDICE

Introduzione .....	1
1 Introduzione all'energy harvesting .....	2
1.1 Cos'è l'energy harvesting .....	2
1.2 Energy harvesting da linea elettrica.....	3
1.3 Obiettivi del progetto.....	4
2 Studio e modellizzazione del circuito .....	5
2.1 Analisi teorica del circuito equivalente .....	6
2.1.1 Numero di avvolgimenti.....	6
2.1.2 Mutua induttanza.....	6
2.1.3 Induttanza della bobina di Rogowski .....	9
2.1.4 Resistenza parassita.....	9
2.2 Modellizzazione su LTSpice .....	10
2.2.1 Corrente del primario .....	10
2.2.2 Capacità di matching.....	10
2.2.3 Rappresentazione della bobina Rogowski.....	11
2.3 Circuito equivalente dell'energy harvester da linea elettrica .....	11
3 Simulazione del circuito .....	12
3.1 Ricerca del punto di massimo trasferimento di potenza.....	12
3.2 Nucleo in aria.....	13
3.2.1 Sezione circolare .....	14
3.2.2 Aggiunta di trasformatore .....	16
3.2.3 Sezione rettangolare .....	18
3.3 Nucleo in ferrite.....	20
3.3.1 Verifica della saturazione.....	20
3.3.2 Assenza di saturazione .....	22
4 Conclusioni .....	25
5 Bibliografia e sitografia .....	26
6 Ringraziamenti.....	27

# INTRODUZIONE

La moderna tendenza della ricerca ad una maggiore efficienza energetica e la necessità di ridurre l'impatto ambientale causato dalle attività umane hanno portato allo sviluppo di soluzioni innovative come l'energy harvesting, ovvero la raccolta di energia da fonti ambientali come, ad esempio, le radiazioni solari, le vibrazioni o le variazioni di temperatura. Tra i vantaggi di tale tecnologia occorre menzionare la riduzione o l'eliminazione della dipendenza dei dispositivi elettronici dalle convenzionali batterie, caratterizzate tradizionalmente da un impatto ambientale elevato. Tra le applicazioni, tale tecnologia negli ultimi anni ha permesso di realizzare sistemi che ricavano energia a partire dagli effetti elettromagnetici generati dalle linee elettriche, ad esempio per effettuare il monitoraggio.

L'obiettivo di questa tesi consiste nella modellizzazione e simulazione di un sistema induttivo per energy harvesting da una linea elettrica a bassa tensione, al fine di studiare la dipendenza tra la potenza estratta e il dimensionamento del sistema stesso. Inoltre, le attività presentate sono svolte in collaborazione con il gruppo di ricerca dell'Università di Bologna coinvolto nel progetto di ricerca europeo Chips Joint Undertaking ECS4DRES "Electronic Components and Systems for flexible, coordinated and resilient Distributed Renewable Energy Systems" (grant agreement n. 101139790) [1] [2].

Nel primo capitolo viene introdotto il tema dell'energy harvesting, con particolare riferimento a quello da linea elettrica. Nel secondo capitolo si descrivono, invece, le varie fasi che hanno caratterizzato la creazione del modello, che spaziano dall'analisi teorica degli effetti fisici fino alla realizzazione di un circuito equivalente mediante software per simulazione circuitale. Nel terzo capitolo sono riportati i risultati della simulazione del circuito e varie soluzioni per renderlo compatibile con i blocchi che lo seguono considerando l'utilizzo di un'architettura di sistema di tipo applicativo. Infine, nel quarto ed ultimo capitolo sono presentate le conclusioni.

# 1 INTRODUZIONE ALL'ENERGY HARVESTING

## 1.1 Cos'è l'energy harvesting

L'energy harvesting rappresenta un insieme di processi tecnologici che permettono di raccogliere piccole quantità di energia dall'ambiente, che altrimenti verrebbero dissipate sotto forma di luce, vibrazioni o calore, con l'intento di trasformarle in energia elettrica. Le fonti dalle quali si può attingere sono varie, alcune delle quali sono riportate nella Figura 1:

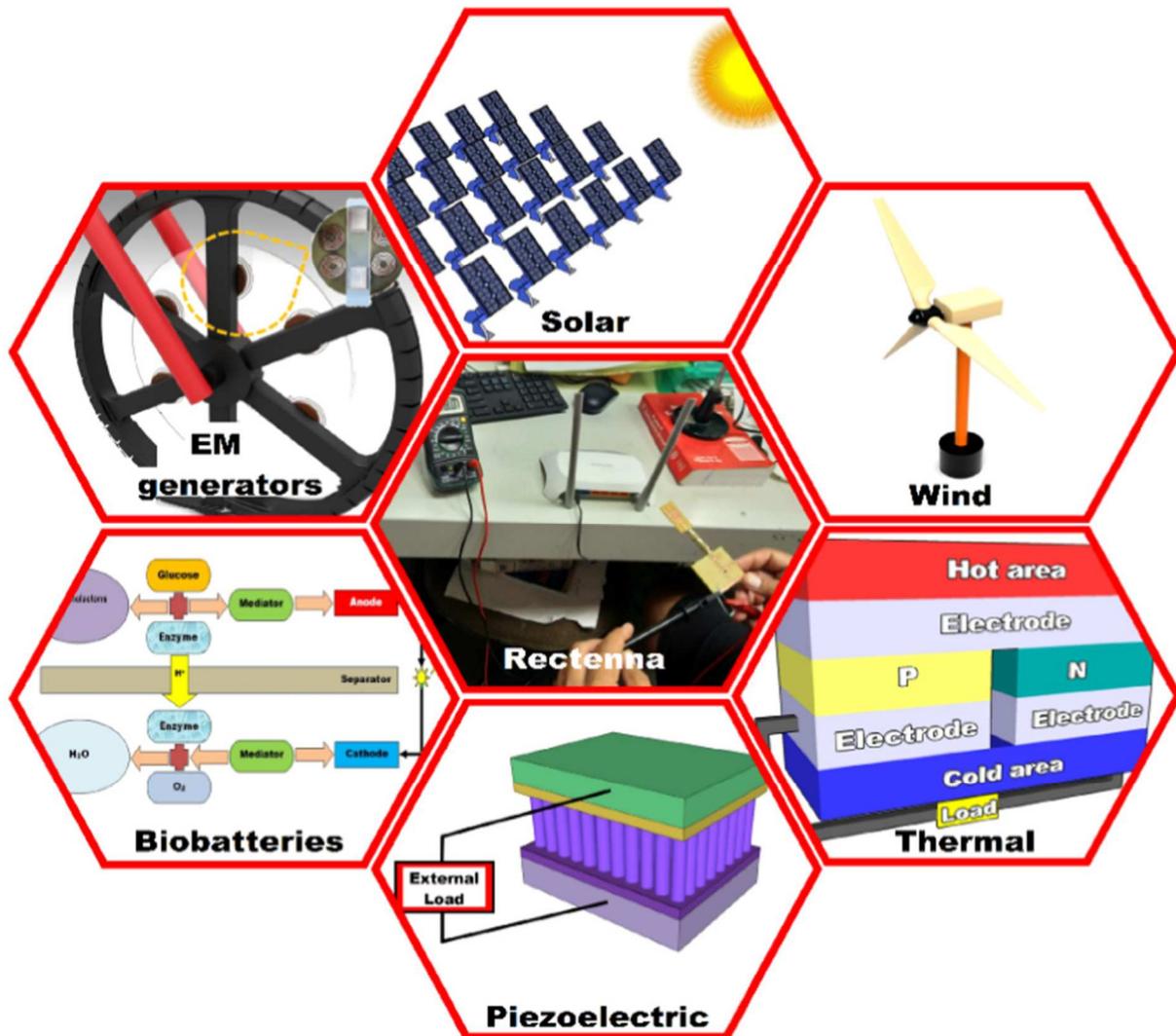


Figura 1: Tipologie di tecnologie Energy Harvesting. Fonte: Bhatt, K., Kumar, S., Kumar, S., Sharma, S., & Singh, V. (2024). A review on energy harvesting technologies: Comparison between non-conventional and conceptual approaches. *Energy Reports*, 12, 4717-4740. [3]

Tali tecnologie non hanno ancora raggiunto l'apice del loro sviluppo e il loro potenziale lascia sperare in un futuro più ecosostenibile, sempre meno vincolato all'utilizzo di batterie. [4]

Ci si potrebbe interrogare su quali siano attualmente i vantaggi che portano ad utilizzare energy harvester piuttosto che sistemi basati su accumulatori; la risposta risiede nei seguenti aspetti:

- esistono fonti di energia disponibili nell'ambiente dove viene installato l'apparato;
- esistono difficoltà di installazione legate al posizionamento del sistema;
- sussistono difficoltà a raggiungere i dispositivi in caso di manutenzione;
- il cablaggio può presentare un costo troppo elevato;
- un elevato numero di dispositivi installati incrementa la difficoltà e i costi di gestione;
- l'uso di batterie riduce il livello di eco-compatibilità;
- il ciclo di vita dei dispositivi è limitato dalle batterie.

Qualora si verifichi uno o più di questi fattori la scelta dell'impiego di energy harvesting risulta essere vantaggioso [5].

## 1.2 Energy harvesting da linea elettrica

L'energy harvesting da linea elettrica, come suggerisce il nome, basa il suo funzionamento sul recupero di energia originata da fenomeni elettromagnetici, dovuti a linee di alimentazione già esistenti.

Oggetto di questo elaborato è lo studio di un harvester che si basa sulla bobina di Rogowski. Tale induttore viene posto intorno a uno spezzone di linea, al fine di raccogliere parte del campo magnetico originato dal passaggio di corrente attraverso il conduttore.

La bobina di Rogowski è tipicamente impiegata per effettuare misurazioni di precisione della corrente che scorre all'interno di un conduttore, senza interromperne la continuità, portando il vantaggio di modellare la forma del componente, che risulta flessibile data l'assenza di un nucleo rigido al suo interno. [6]

Lo studio documentato nella fonte [7] realizza un sistema di raccolta basato su un dispositivo induttivo, che presenta un nucleo ferromagnetico adatto alle applicazioni a bassa frequenza (50Hz o 60Hz).

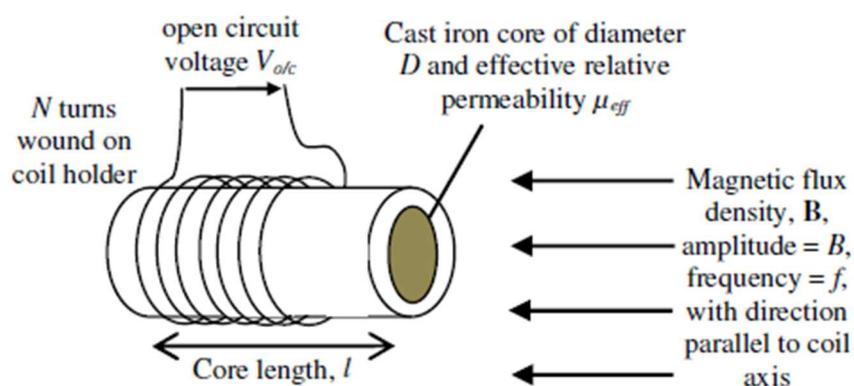


Figura 2: Energy harvesting di tipo induttivo. Fonte[7] © IEEE 2013

Oltre ai metodi induttivi, esistono anche delle tecnologie che sfruttano dispositivi capacitivi: per esempio, la fonte [8] riporta uno studio effettuato su un harvester, composto da un elettrodo cilindrico isolato per mezzo di un materiale dielettrico da un generico conduttore della linea sospesa dell'alta tensione, in grado di immagazzinare energia elettrica. Nella figura sottostante è riportato lo schema appena descritto:

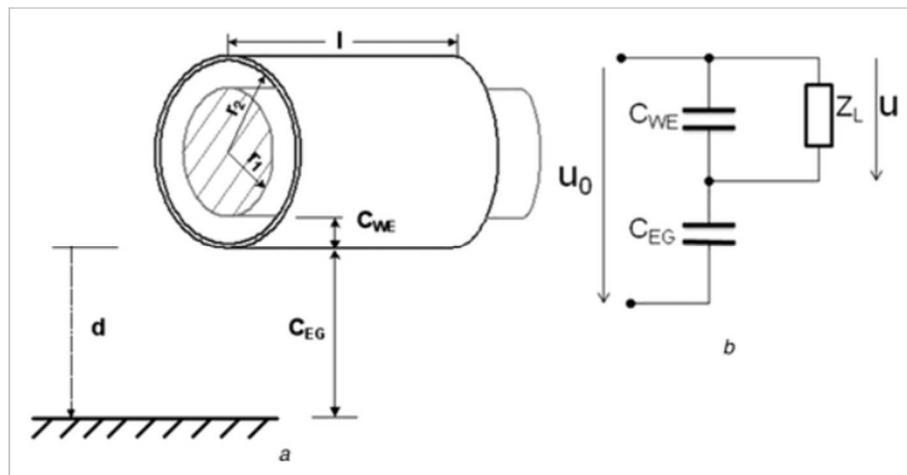


Figura 3: Modello harvester capacitivo. Fonte: Zhao, X., Keutel, T., Baldauf, M., & Kanoun, O. (2013). Energy harvesting for a wireless-monitoring system of overhead high-voltage power lines. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 7(2), 101-107. [8] (License: [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/))

### 1.3 Obiettivi del progetto

L'obiettivo del progetto è quello di creare il modello di un energy harvester che sia retrofittabile all'interno di un sistema di monitoraggio wireless. A tal proposito sono fornite le seguenti specifiche di progetto: si deve ottenere una tensione d'uscita all'incirca di 1V, e una potenza estratta nell'ordine di qualche decina di  $\mu\text{W}$ , al fine di consentire la rettificazione ed alimentare un convertitore di micropotenze. Inoltre considerando il tipo di applicazione è necessario che il sistema abbia una dimensione massima di qualche cm.

## 2 STUDIO E MODELLIZZAZIONE DEL CIRCUITO

L'analisi teorica svolta si basa sui circuiti proposti dell'articolo [6] e [9], di seguito sono riportati sia lo schema fisico dell'harvester (Figura 4) che il suo equivalente circuitale (Figura 5). In particolare svolgendo una modellizzazione semplificata come suggerito in [9] è possibile ignorare gli effetti parassiti di tipo capacitivo associati alla bobina.

Il modello prevede un conduttore rettilineo percorso da corrente, ad es. su una linea elettrica, che svolgerà il ruolo di primario, ed un avvolgimento toroidale, che svolgerà il ruolo di secondario, orientato secondo le linee di campo magnetico del primario. Si ipotizza che il primario venga influenzato in maniera trascurabile dal circuito collocato sul secondario. La struttura del secondario è riconducibile ad una bobina di Rogowski.

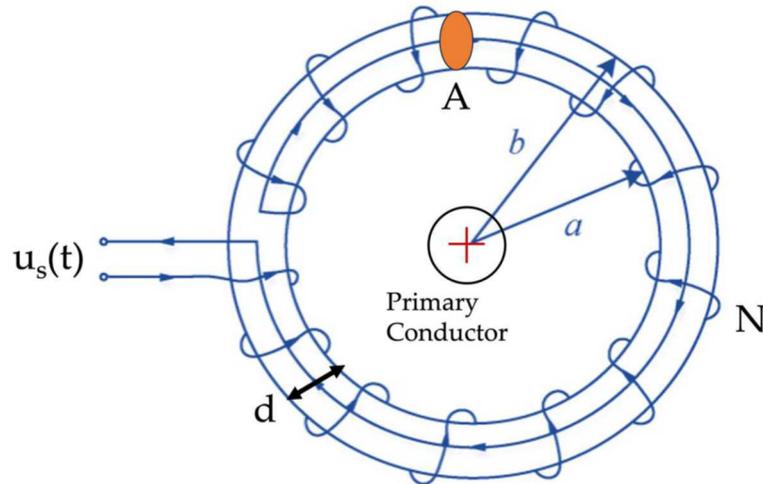


Figura 4: Struttura del Rogowski Coil utilizzato come energy harvester. Fonte: Mingotti, A., Betti, C., Tinarelli, R., & Peretto, L. (2023). *Simplifying Rogowski Coil Modeling: Simulation and Experimental Verification*. *Sensors*, 23(19), 8032. [9] (License: [Creative Commons](#))

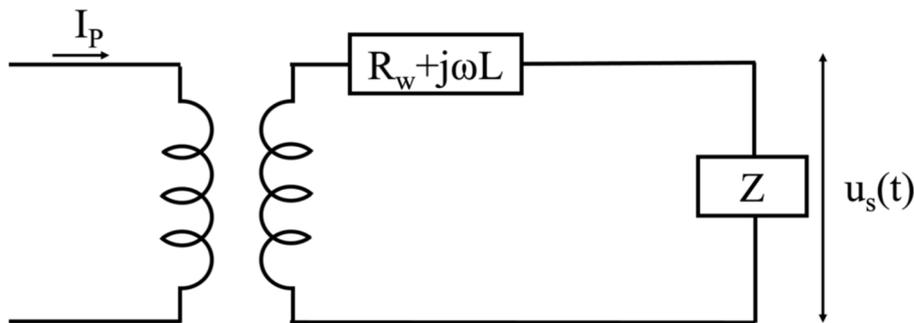


Figura 5: Circuito equivalente del Rogowski Coil. Fonte: Mingotti, A., Betti, C., Tinarelli, R., & Peretto, L. (2023). *Simplifying Rogowski Coil Modeling: Simulation and Experimental Verification*. *Sensors*, 23(19), 8032. [9] (License: [Creative Commons](#))

## 2.1 Analisi teorica del circuito equivalente

Lo scopo di questa sezione è la presentazione dello studio finalizzato a ricavare i valori dei componenti che compongono il circuito equivalente, in funzione dei due parametri fisici della bobina Rogowski  $r_1$  e  $r_2$  (rispettivamente il raggio medio del toroide e il raggio della sezione trasversale).

### 2.1.1 Numero di avvolgimenti

Per prima cosa si prenda in esame il numero di spire  $N$ , che verrà espresso come  $N(r_1, r_2)$ , con l'obiettivo di non aumentare la complessità del modello considerando tre parametri indipendenti. Se si fissa il diametro del conduttore avvolto  $d_{filo}$ , ipotizzato pari a 0.4mm e con strato di isolamento di spessore trascurabile, si può calcolare la densità di avvolgimenti per metro come:

$$\delta = \frac{1}{d_{filo}[m]}$$

Con l'intento di sfruttare al massimo lo spazio disponibile per allocare più avvolgimenti, in considerazione della ridotta permeabilità magnetica relativa dell'aria, non essendo previsto l'uso di materiali magnetici, si è scelto di realizzare diversi livelli di avvolgimenti, attraverso l'inserimento di un parametro chiamato *layers*.

Ipotizzando di avvicinare il più possibile gli avvolgimenti interni, andando ad occupare tutta la circonferenza interna della bobina, il calcolo di  $N$  risulta il seguente:

$$N = C_{interna} \cdot \delta \cdot layers = 2\pi(r_1 - r_2) \cdot \delta \cdot layers$$

### 2.1.2 Mutua induttanza

Si consideri la seguente situazione:

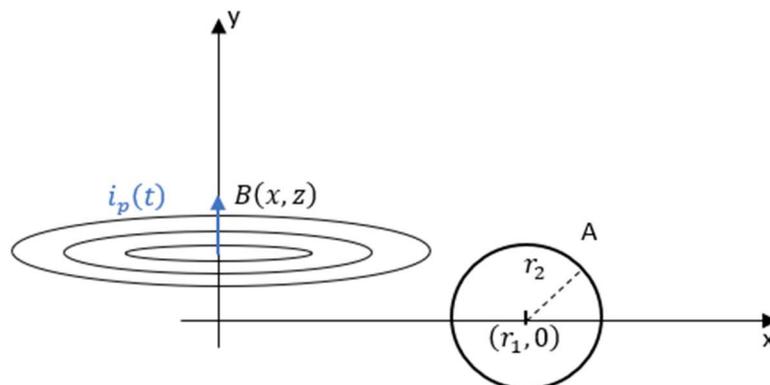


Figura 6: Campo magnetico generato da filo rettilineo di lunghezza indefinita su spira circolare

Pensando il conduttore del primario come un filo rettilineo di lunghezza infinita attraversato da corrente, esso quindi genera un campo magnetico,  $\vec{B}(x)$ , che presenta linee di campo circolari concentriche posizionate intorno al conduttore stesso. È possibile ricavare l'espressione del modulo del campo magnetico tramite la formula:

$$B(x) = \frac{\mu_0 i_p(t)}{2\pi x}$$

dove:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  [H/m] rappresenta la permeabilità magnetica del vuoto,  $i_p(t)$  è la corrente che scorre lungo il conduttore del primario,  $x$  è la distanza del generico punto dalla sorgente del campo.

Per quantificare la capacità dell'induttore toroidale di raccogliere energia dal primario è necessario per prima cosa calcolare il coefficiente di mutua induttanza, mediante l'espressione:

$$M = \frac{\Phi_B N}{I_p}$$

dove:  $\Phi_B$  è l'ampiezza del flusso del campo magnetico generato dalla corrente  $i_p(t)$  concatenato alla sezione trasversale A dell'avvolgimento,  $N$  è il numero di avvolgimenti della bobina, come precisato nel paragrafo precedente.

Si procede calcolando il flusso:

$$\Phi_B = \int_A B(x) \cdot dA$$

Nella rappresentazione sul piano cartesiano della situazione d'interesse si ha che il filo attraversato da  $i_p(t)$  risulta coincidente con l'asse y, mentre la superficie A individua una circonferenza di raggio  $r_2$  centrata nel punto di coordinate  $(r_1, 0)$ , la cui equazione è la seguente:

$$x^2 + y^2 - 2r_1x + (r_1^2 - r_2^2) = 0$$

Eseguendo un cambio di variabile si può riportare il problema del calcolo del flusso alle variabili di nostro interesse:

$$\Phi_B = \int_A \vec{B}(x) \cdot \hat{n} dA = \int_{r_1-r_2}^{r_1+r_2} \frac{\mu_0 I_p}{\pi x} \sqrt{r_2^2 - (x - r_1)^2} dx$$

Trascurando per il momento il termine  $\frac{\mu_0 I_p}{\pi}$ , il quale risulta costante sull'intervallo di integrazione, si prosegue il calcolo con ulteriori cambi di variabile (C.V.):

$$\text{C.V.: } u = x - r_1; \quad du = dx; \quad x = r_1 + r_2 \Rightarrow u = r_2; \quad ; \quad x = r_1 - r_2 \Rightarrow u = -r_2$$

$$\Rightarrow \int_{-r_2}^{r_2} \frac{\sqrt{r_2^2 - u^2}}{u + r_1} du$$

$$\text{C.V.: } u = r_2 \sin\theta; \quad du = r_2 \cos\theta d\theta; \quad u = r_2 \Rightarrow \pi/2; \quad u = -r_2 \Rightarrow -\pi/2$$

$$\Rightarrow r_2^2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\cos^2 \theta}{r_2 \sin \theta + r_1} d\theta$$

$$\text{C.V.: } v = \tan(\theta/2); \quad dv = \frac{1}{2\cos^2(\theta/2)} d\theta; \quad \sin \theta = \frac{2v}{v^2+1}; \quad \cos \theta = \frac{1-v^2}{v^2+1};$$

$$\theta = \pi/2 \Rightarrow v = 1; \quad \theta = -\pi/2 \Rightarrow v = -1$$

$$\Rightarrow r_2^2 \int_1^{-1} \frac{(v^2 - 1)^2}{(v^2 + 1)^2 (r_1 v^2 + 2r_2 v + r_1)} dv$$

Ora, applicando la risoluzione tramite il metodo Ostrogradsky e sviluppando i calcoli, si ottiene la seguente espressione:

$$\Rightarrow r_2^2 \left\{ \left[ \frac{2}{r_2(v^2 + 1)} \right]_1^{-1} + \int_1^{-1} \frac{2r_1}{r_2^2(v^2 + 1)} - \frac{2r_1^2 - 2r_2^2}{r_2^2(r_1 v^2 + 2r_2 v + r_1)} dv \right\}$$

Proseguendo con la sola risoluzione dell'integrale restante si ha che:

$$\begin{aligned} & \int_1^{-1} \frac{2r_1}{r_2^2(v^2 + 1)} - \frac{2r_1^2 - 2r_2^2}{r_2^2(r_1 v^2 + 2r_2 v + r_1)} dv \\ \Rightarrow & \frac{2r_1}{r_2^2} [\arctan(v)]_{-1}^1 - \frac{2r_1^2 - 2r_2^2}{r_2^2} \int_{-1}^1 \frac{dv}{(r_1 v^2 + 2r_2 v + r_1)} \end{aligned}$$

Per risolvere il secondo termine è necessario procedere per completamento del quadrato, procedura che porterà ad ulteriori cambi di variabile:

$$\int_{-1}^1 \frac{dv}{(r_1 v^2 + 2r_2 v + r_1)}$$

$$\text{C.V.: } t = \sqrt{r_1} v + \frac{r_2}{\sqrt{r_1}}; \quad dv = \frac{1}{\sqrt{r_1}} dt;$$

$$\Rightarrow \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{\sqrt{r_1} \left( t^2 + \frac{r_1^2 - r_2^2}{r_1} \right)}$$

$$\text{C.V.: } z = \frac{t}{\sqrt{r_1 - \frac{r_2^2}{r_1}}}; \quad dt = \frac{\sqrt{r_1^2 - r_2^2}}{\sqrt{r_1}} dz; \quad \Rightarrow \left[ \frac{\sqrt{r_1} \sqrt{r_1 - \frac{r_2^2}{r_1}}}{r_1^2 - r_2^2} \arctan(z) \right]$$

Sostituendo a ritroso le variabili impiegate per il calcolo della primitiva dell'ultimo integrale e risostituendo anche quest'ultimo si ottiene:

$$\Rightarrow \frac{2r_1}{r_2^2} \left[ \arctan(v) - \frac{\sqrt{r_1^2 - r_2^2}}{r_2^2} \arctan \left( \frac{r_1 v + r_2}{\sqrt{r_1^2 - r_2^2}} \right) \right]_{-1}^1$$

Unendo i vari risultati ottenuti è possibile ottenere la seguente espressione dell'ampiezza del flusso  $\Phi_B$ , calcolando il suo valore mediante il Teorema fondamentale del calcolo integrale:

$$\Phi_B = \frac{\mu_0 I_p}{\pi} \left\{ \sqrt{r_1^2 - r_2^2} \left[ -2 \arctan \left( \frac{r_1 + r_2}{\sqrt{r_1^2 - r_2^2}} \right) - 2 \arctan \left( \frac{r_1 + r_2}{\sqrt{r_1^2 - r_2^2}} \right) \right] + \pi r_1 \right\}$$

Conoscendo ora l'espressione esatta del flusso che si concatena alla superficie A, si calcola il coefficiente M come:

$$M = \frac{\mu_0 N}{\pi} \left\{ \sqrt{r_1^2 - r_2^2} \left[ -2 \arctan \left( \frac{r_1 + r_2}{\sqrt{r_1^2 - r_2^2}} \right) - 2 \arctan \left( \frac{r_1 + r_2}{\sqrt{r_1^2 - r_2^2}} \right) \right] + \pi r_1 \right\}$$

### 2.1.3 Induttanza della bobina di Rogowski

Ipotizzando di selezionare una bobina di Rogowski di forma toroidale, si può calcolare la sua induttanza mediante la nota formula:

$$L_{rog} = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A}{l_m}$$

dove:  $l_m$  rappresenta la lunghezza media del percorso magnetico nel nucleo.

L'assenza di nucleo ferromagnetico permette di ignorare il termine  $\mu_r$  in quanto la permeabilità magnetica relativa dell'aria è approssimabile a 1. È possibile ricavare l'espressione di A e  $l_m$  in funzione di  $r_1$  e  $r_2$ , che permette di esprimere la formula in funzione dei parametri di progetto come segue:

$$L_{rog} = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 r_2^2}{2r_1}$$

### 2.1.4 Resistenza parassita

Come suggerito dall'articolo[9], il calcolo della resistenza parassita può essere svolto attraverso la seconda legge di Ohm:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

dove:  $\rho$  indica la resistività del materiale che realizza gli avvolgimenti,

$l$  rappresenta la lunghezza del filo,

$S$  indica la sezione del conduttore avvolto.

Ancora una volta è possibile esplicitare la dipendenza di  $l$  ed  $S$  dai parametri di progetto; se si utilizza il rame ( $\rho_{Cu} = 1,68 \cdot 10^{-8}$ ), si ottiene:

$$R_{rog} = \rho_{Cu} \frac{N \cdot 2\pi r_2}{\pi \left( \frac{d_{filo}}{2} \right)^2}$$

## 2.2 Modellizzazione su LTSpice

Obiettivo di questa sezione è la realizzazione di un modello circuitale equivalente degli effetti magnetici, utilizzando il software LTSpice. Di seguito si riportano ulteriori dimensionamenti e calcoli, necessari alla creazione di tale schema.

### 2.2.1 Corrente del primario

Il primario costituisce un conduttore generico della distribuzione della bassa tensione in ambito civile, ovvero una tensione sinusoidale a  $f = 50\text{Hz}$  e caratterizzata da  $V_{eff} = 220\text{V}$ . Si ipotizza che la linea elettrica sia richiusa su un carico puramente resistivo del valore di  $20\Omega$ : in base alle ipotesi poste sfruttando la legge di Ohm si ottiene  $I_{eff} = 11\text{A}$ , compatibile anche con utenze domestiche, attraverso cui si calcola il valore massimo della corrente:

$$I_M = I_{eff}\sqrt{2}$$

È quindi possibile rappresentare il primario come un generatore di corrente caratterizzato dalla seguente espressione:

$$I_p = I_M \sin(2\pi ft)$$

### 2.2.2 Capacità di matching

Come già riportato nell'introduzione, nel campo dell'energy harvesting la potenza estratta è tipicamente di piccola entità. Al fine di massimizzare la quantità di potenza estraibile è necessario che la tensione e la corrente sul carico dell'harvester siano perfettamente in fase. A tal proposito, considerando la natura induttiva del Rogowski, il cui coefficiente di autoinduzione verrà rappresentato con un induttore  $L_{rog}$ , si inserisce in serie una capacità di matching  $C_{match}$  che corregga lo sfasamento introdotto da  $L_{rog}$ . Si ipotizza dunque di inserire  $C_{match}$  in serie all'impedenza  $Z_{rog} = R_{rog} + j\omega L_{rog}$ .

Con l'intento di dimensionare correttamente il condensatore, si può trascurare l'effetto dell'impedenza di carico, che per ipotesi sarà puramente resistiva. Si consideri quindi:

$$Z_{eq} = Z_{rog} + \frac{1}{j\omega C_{match}}$$

Affinchè  $Z_{eq}$  sia puramente resistiva, è sufficiente imporre l'uguaglianza:

$$\omega L_{rog} = \frac{1}{\omega C_{match}} \Rightarrow C_{match} = \frac{1}{\omega^2 L_{rog}}$$

### 2.2.3 Rappresentazione della bobina Rogowski

Per rappresentare la bobina di Rogowski su LTSpice è stato scelto di impiegare un generatore di tensione comportamentale (behavioural voltage source) che simuli l'accoppiamento magnetico che si instaura tra il conduttore del circuito primario e l'harvester. Per la legge di Faraday-Lenz e quella di Biot-Savart è possibile esprimere la forza elettromotrice indotta al secondario come funzione della corrente  $i_p(t)$ , secondo la relazione seguente:

$$\varepsilon = - \frac{M di_p(t)}{dt}$$

dove il segno meno indica che la f.e.m. si oppone alla sorgente che l'ha generata.

### 2.3 Circuito equivalente dell'energy harvester da linea elettrica

In questa sezione viene riportato il circuito dell'energy harvester da linea elettrica realizzato basandosi sulla teoria esposta nel corso del secondo capitolo (Figura 7). Di seguito si ricordano i parametri necessari a caratterizzarlo:

- $r_1$  rappresenta il raggio medio della bobina;
- $r_2$  indica il raggio della sezione trasversale della bobina;
- $\mu_r$ , esprime il valore della permeabilità magnetica del nucleo della bobina;
- $d_{filo}$ , indica il diametro del filo avvolto intorno al nucleo del toroide;
- $layers$ , rappresenta il numero di strati di avvolgimenti realizzati.

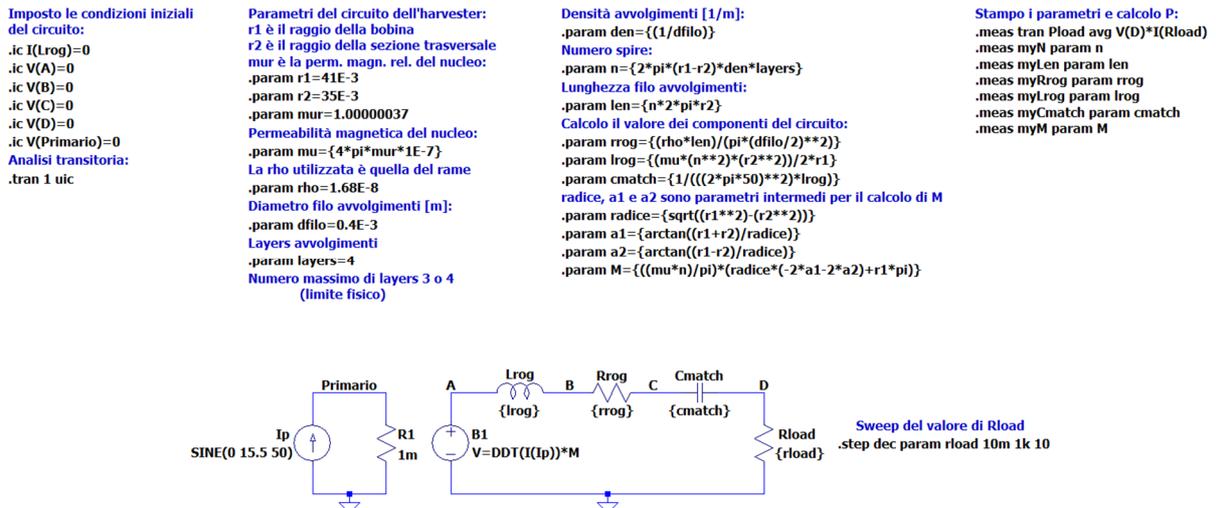


Figura 7: Circuito equivalente dell'energy harvester basato su Rogowski coil realizzato con LTSpice

### 3 SIMULAZIONE DEL CIRCUITO

In questo capitolo sono riportati i risultati delle simulazioni eseguite sul modello generato in precedenza, con l'aggiunta di eventuali correzioni allo schema riportato in Figura 7. In assenza di indicazioni differenti i valori di riferimento delle simulazioni sono quelli riportati nella seguente tabella:

	$r_1$ [mm]	$r_2$ [mm]	$\mu_r$ [H/m]	$d_{filo}$ [mm]	<i>layers</i>
Ricerca MPP	41	35	1.00000037	0.4	4
Nucleo in aria	27.5 $\Rightarrow$ 41	21.5 $\Rightarrow$ 35	1.00000037	0.4	4
Nucleo in ferrite	27.5 $\Rightarrow$ 41	21.5 $\Rightarrow$ 35	1000	0.4	1

Tabella 1: Parametri delle simulazioni su LTSpice

#### 3.1 Ricerca del punto di massimo trasferimento di potenza

Di seguito viene presentato il risultato della ricerca del punto di massimo trasferimento di potenza (MPP). A livello teorico ci si aspetta, per la configurazione circuitale in analisi, che tale condizione si verifichi quando  $R_{load} = R_{rog}$ . Per verificarlo si esegue uno sweep sul valore di  $R_{load}$  e si calcola la potenza sul carico:

$$P_{load_{MAX}} = \frac{1}{T} \int_T V(D)I(R_{load})dt$$

dove:  $T$  rappresenta il periodo

Il calcolo della potenza è eseguito dal software mediante la direttiva measure:

```
.meas tran Pload avg V(D)*I(Rload)
```

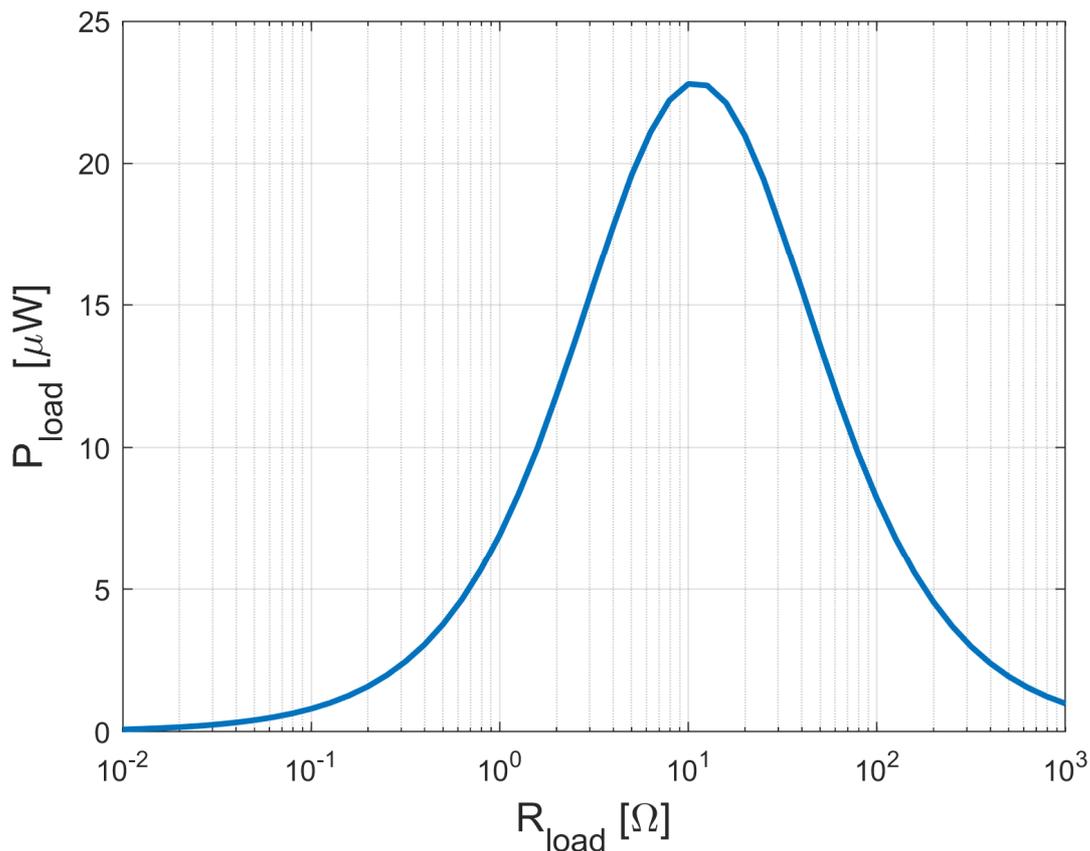


Figura 8: Simulazione della potenza estratta in funzione della resistenza di carico ed individuazione del punto di massima potenza (MPP)

Tramite la Figura 8 è possibile constatare che il picco si ha in corrispondenza del valore teorico calcolato, ovvero,  $R_{load_{opt}} = 11,084\Omega$ .

Nelle sezioni successive dell'elaborato tutte le simulazioni verranno eseguite nella condizione di MPP, ponendo quindi il valore di  $R_{load} = R_{rog}$  a default, in modo da estrarre la potenza massima.

### 3.2 Nucleo in aria

In questa sezione si analizza la variazione della potenza estratta dall'energy harvester in funzione dei due parametri di progetto  $r_1$  e  $r_2$ , nel caso in cui  $\mu_r = 1.00000037$  (permeabilità magnetica dell'aria).

Si realizza un doppio sweep sui parametri, in modo da ottenere un risultato che tenga conto di un ampio intervallo di valori. Attraverso questo studio occorre verificare che la coppia di valori origini una bobina che presenti sempre  $r_2 < r_1$ . Si modifica perciò il modello inserendo un nuovo parametro *annulla*, che ha lo scopo di verificare la suddetta condizione e, in caso

negativo, consenta di azzerare la potenza estratta in modo da poter escludere tale configurazioni dalla successiva analisi.

Come riportato al paragrafo 2.1.1, nel caso di nucleo in aria si sfrutta la possibilità di realizzare più livelli di avvolgimenti: nelle simulazioni di questa sezione si pone infatti  $layers = 4$ .

### 3.2.1 Sezione circolare

Di seguito viene riportato il circuito impiegato per la simulazione (Figura 9) e il grafico di  $P_{load}$  (Figura 10), ottenuti tramite gli sweep di  $r_1$  e  $r_2$ :

```
.step param r1 27.5E-3 41E-3 1.5E-3
.step param r2 21.5E-3 35E-3 1.5E-3
```

Le due direttive Spice riportate sopra indicano che  $r_1$  varia da 27.5mm a 41mm, mentre  $r_2$  copre l'intervallo di valori che va da 21.5mm a 35mm.

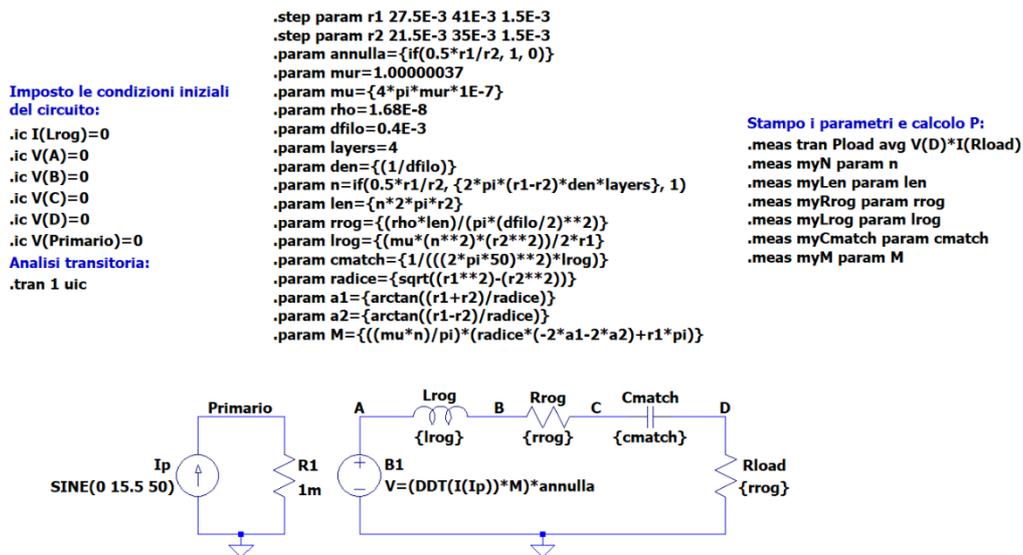


Figura 9: Circuito equivalente dell'energy harvester con nucleo in aria

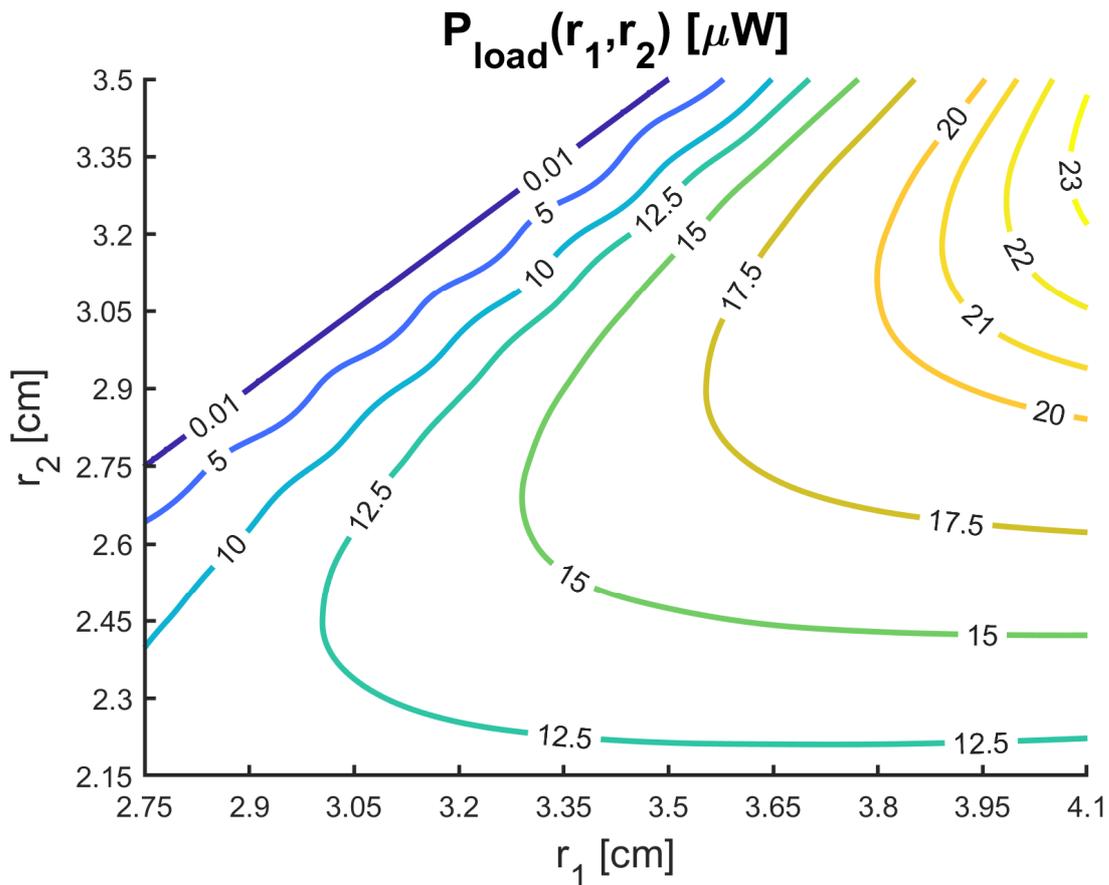


Figura 10: Potenza del carico, nucleo in aria, in funzione delle geometrie dell'avvolgimento

Ai fini di una corretta analisi dell'uscita dell'harvester è necessario analizzare le caratteristiche della tensione ai capi del carico e della corrente che lo attraversa. Questo aspetto risulta fondamentale per determinare se la soluzione tecnologica considerata è in grado di pilotare circuiti posti in cascata, come rettificatori e circuiti convertitori di micropotenze, che tipicamente vengono impiegati nell'energy harvesting per ottenere i livelli di alimentazione desiderati in uscita.

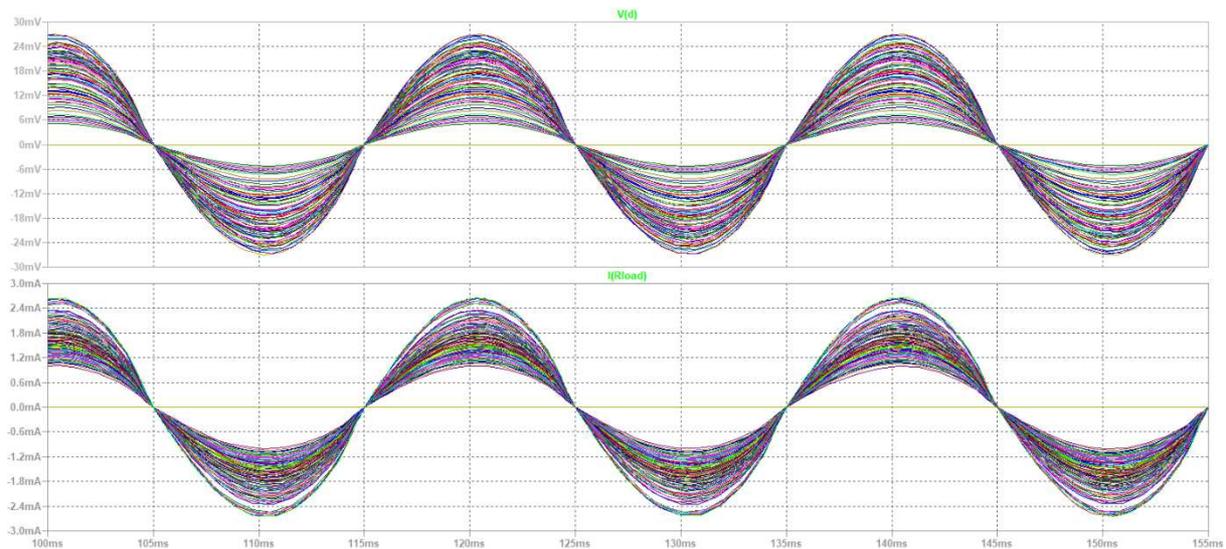


Figura 11: Andamento della tensione in uscita  $V(D)$  e della corrente sul carico  $I(Rload)$ , con nucleo in aria

Nonostante con le geometrie scelte i valori di potenza estratta risultino soddisfacenti, dalla Figura 11 si evince che nei casi migliori la tensione di picco è nell'ordine di qualche decina di  $mV$ , valore del tutto insufficiente al fine di azionare qualunque circuito in cascata. Per rendere utilizzabile il sistema, occorre quindi elevare la tensione disponibile in uscita.

### 3.2.2 Aggiunta di trasformatore

L'idea di fondo è quella di conservare  $P_{load}$  che si estrae con la soluzione circuitale precedente, andando però ad aumentare il valore della tensione sul nodo d'uscita. Si inserisce perciò un trasformatore ideale in cascata all'harvester prima di connetterlo al carico, come riportato in Figura 12. È stata ripresa un'idea proposta nell'articolo [10] che illustra uno studio analogo.

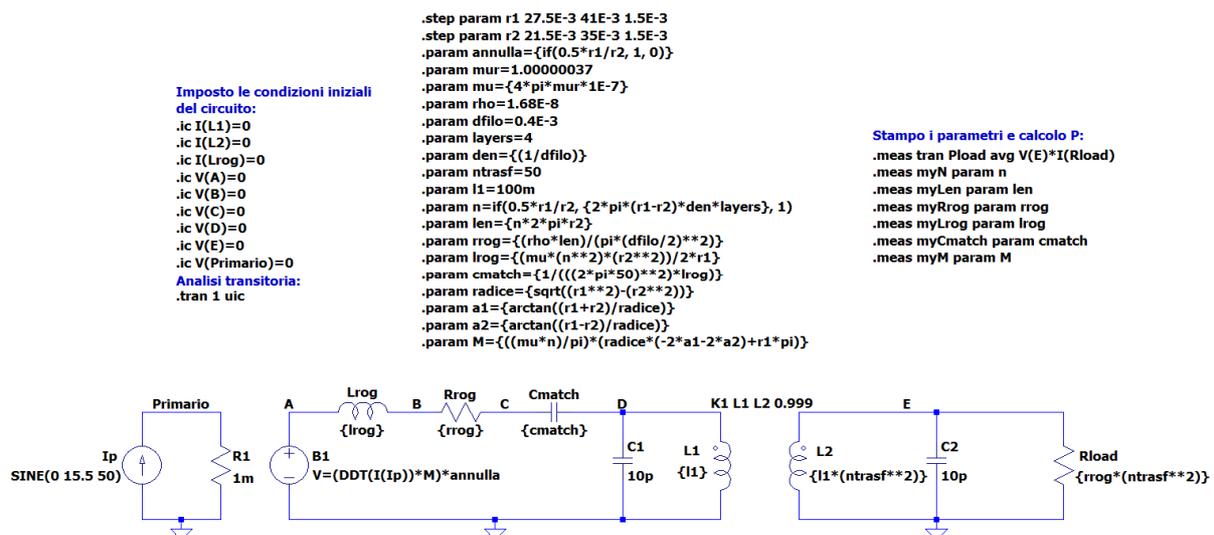


Figura 12: Circuito equivalente dell'energy harvester con trasformatore in uscita

Il trasformatore, per ora ipotizzato ideale, è modellato attraverso due induttori  $L_1$  ed  $L_2$ , accoppiati tramite la direttiva:

$$K1 L1 L2 0.999$$

Viene introdotto il parametro  $n_{trasf} = 50$ , che rappresenta il rapporto spire del trasformatore, il cui valore è stato dimensionato al fine di ottenere una tensione d'uscita  $V(E)$  nell'ordine dei V.

Collegando il carico al secondario è necessario eseguire un'operazione di ridimensionamento mediante la formula seguente:

$$R_{load} = R'_{load} \cdot N_{trasf}^2$$

dove:  $R'_{load}$  rappresenta il valore che  $R_{load}$  assume se connessa al primario del trasformatore.

L'aggiunta dei condensatori  $C_1 = C_2 = 10pF$  è stata attuata per migliorare la convergenza del simulatore ed evitare picchi spuri sulle tensioni e correnti d'uscita.

Di seguito è riportato il grafico di  $P_{load}$  (Figura 13).

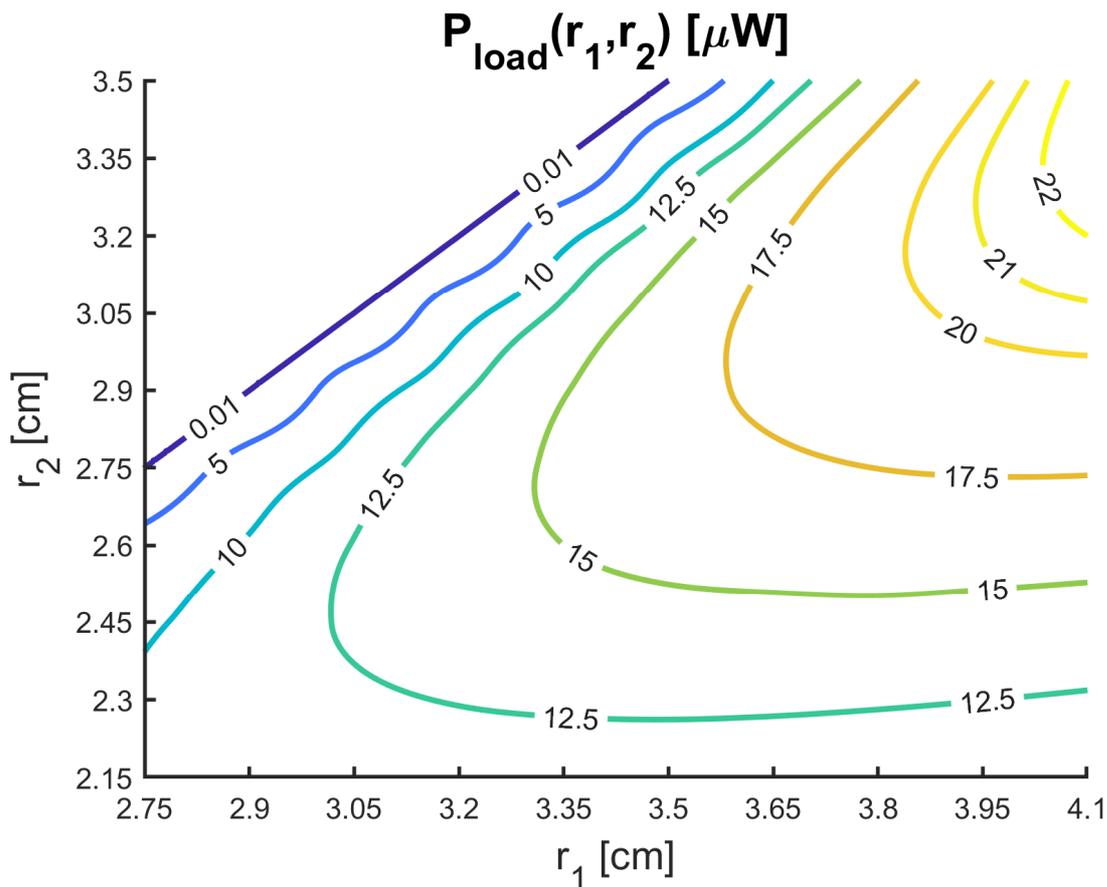


Figura 13: Potenza trasferita al carico ottimo in funzione delle geometrie, nucleo in aria con trasformatore in uscita

Come ci si aspetta, il grafico di  $P_{load}(r_1, r_2)$  non è cambiato dal caso precedente (Figura 10), in quanto il trasformatore ideale non agisce sulla quantità di potenza estratta.

Si osservino poi le caratteristiche di tensione e corrente sul carico:

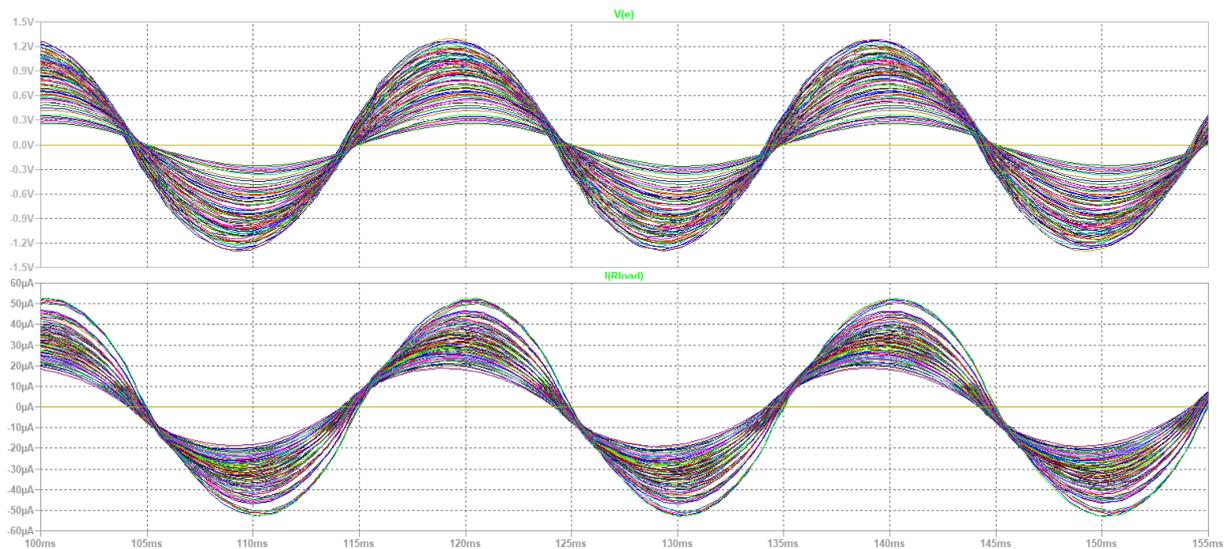


Figura 14: Andamento della tensione in uscita  $V(E)$  e della corrente sul carico  $I(Rload)$ , nucleo in aria e trasformatore in uscita

Grazie alla presenza del trasformatore, anche mantenendo invariate le geometrie, si ottengono valori di tensione accettabili per le applicazioni desiderate, compatibili con una rettificazione in uscita. Il vantaggio che fornisce la soluzione proposta si verifica nella possibilità di poter adattare i parametri d'uscita a proprio piacimento, mantenendo invariata la potenza raccolta. Andranno comunque considerati modelli più realistici dei trasformatori, che includano anche i relativi effetti parassiti.

### 3.2.3 Sezione rettangolare

Una soluzione alternativa a quella proposta in precedenza è rappresentata dalla possibilità di considerare una bobina con un nucleo che sfrutti una struttura con sezione trasversale non circolare, come ad esempio un rettangolo.

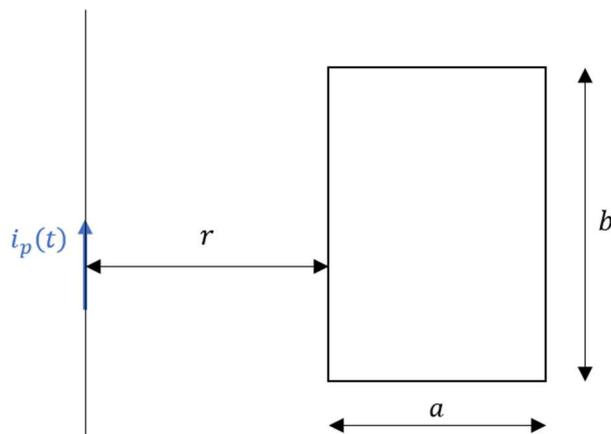


Figura 15: Spira con sezione rettangolare.

Facendo riferimento alle formule proposte in [11], relative al caso di spira a sezione rettangolare mostrato in Figura 15, è possibile considerare un nuovo modello: il caso d'interesse è quello della realizzazione di una spira di lati rispettivamente  $a$ ,  $b$ , con  $b > a$ , in modo da avere una sezione stretta ma che possa essere allungata arbitrariamente lungo il conduttore per concatenare più linee di campo. Si ottiene infatti che le linee di campo concatenate sono caratterizzate da intensità maggiore di quelle che si raccoglierebbero aumentando  $a$ . Si ricorda infatti che  $\vec{B}(r)$ , generato da una sorgente rettilinea, decresce all'aumentare della distanza.

Si consideri  $r = 6\text{mm}$ , tale valore è stato scelto per avere una distanza dalla sorgente del campo uguale al caso della spira circolare, e si ponga  $a = 41\text{mm}$  (valore corrispondente a  $r_{1MAX}$  del caso di spira circolare). Si tenga presente che il calcolo di  $N$  è stato svolto andando a considerare i parametri  $d_{filo}$  e  $layers$  impiegati nel caso della sezione circolare, che ancora una volta rimangono invariati nel modello rettangolare.

Posto il valore di  $I_p = 10A$  si analizza l'andamento della potenza al variare del valore di  $b$ , inizialmente posto uguale ad  $a$ . I risultati sono riportati nella tabella sottostante:

$b$ [mm]	41	61.5	82
$Circ_{int}$ [cm]	3,77	3,77	3,77
$N$	377	377	377
$B$ [mT]	0,333	0,333	0,333
$\Phi_B$ [ $\mu Tm^2$ ]	63,6	95,4	127
$f. e. m$ [mV]	0,2	0,3	0,4
$l_{filo}$ [m]	61,827	77,283	92,740
$R_{load}$ [ $\Omega$ ]	8,27	10,33	12,40
$I$ [mA]	2,42	2,90	3,22
$P_{max}$ [ $\mu W$ ]	12,087	21,756	32,231

Tabella 2: Calcolo potenza nel caso di nucleo in aria a sezione rettangolare

Come mostrato dai risultati nella Tabella 2, la soluzione studiata permette di ricavare valori di potenza più elevati senza però andare ad alterare la distanza della bobina dal cavo o il suo ingombro esterno. Tuttavia, ancora una volta, i valori della tensione d'uscita ottenuti non sono

soddisfacenti, in quanto la *f.e.m.* si ripartisce in egual misura sulla  $R_{rog}$  e la  $R_{load}$ , numericamente equivalenti nel caso di MPP ed i valori non risultano compatibili con una rettificazione in uscita. Una possibile soluzione a tale problematica è quella di incrementare nuovamente la tensione d'uscita, attraverso l'introduzione di un trasformatore opportunamente dimensionato.

### 3.3 Nucleo in ferrite

In questa sezione si effettua lo studio relativo ad una bobina di Rogowski di sezione trasversale circolare e si ipotizza di andare ad inserire un nucleo ferromagnetico al suo interno. Nell'articolo [7] sono riportati alcuni materiali indicati per le applicazioni a 50Hz, ma, a seguito di ulteriori ricerche, è stata selezionata per la simulazione la ferrite 3C94 ( $\mu_r = 1000$ ).

Nel caso in esame viene portato il valore di *layers* a 1, poiché, non operando con un nucleo in aria, non è più necessario aumentare  $N$  attraverso l'introduzione di più livelli di avvolgimenti sovrapposti ed opportunamente isolati tra loro.

#### 3.3.1 Verifica della saturazione

Si consideri ora il seguente circuito, dedotto dallo schema in Figura 9, al quale viene sostituito il nuovo valore di  $\mu_r$ :

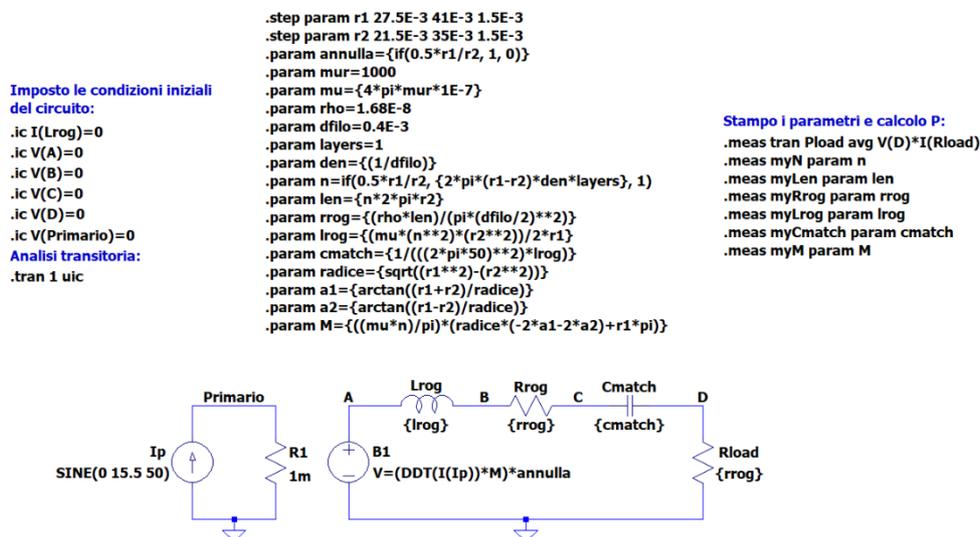


Figura 16: Circuito equivalente dell'energy harvester con nucleo in ferrite 3C94

Di seguito è riportata la caratteristica della tensione sul nodo d'uscita:

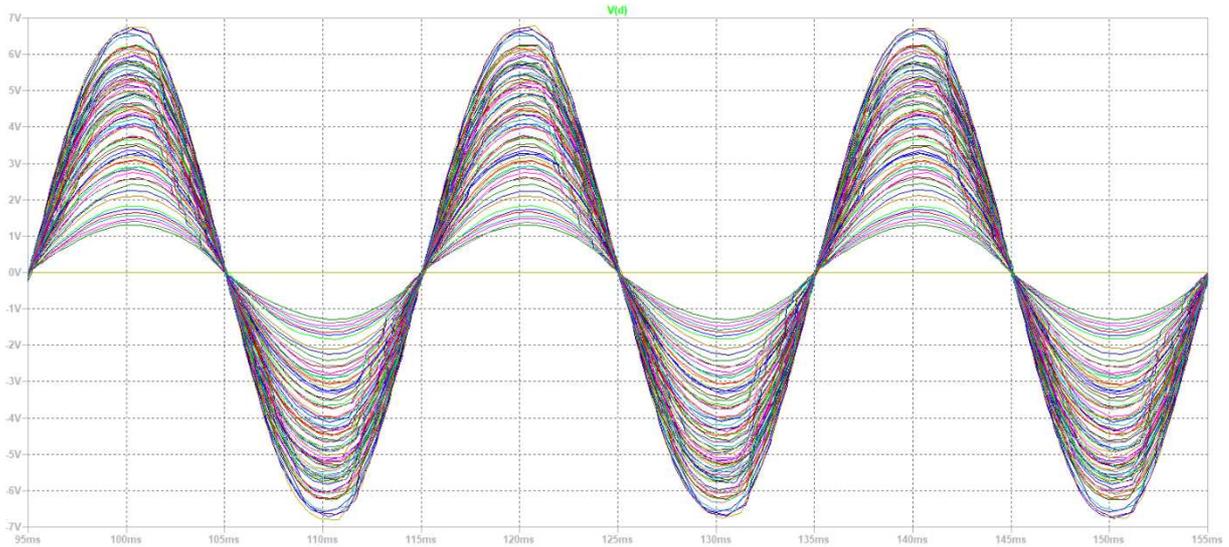


Figura 17: Andamento della tensione sul carico  $V(D)$ , nucleo in 3C94

Dal grafico si nota che il valore della tensione risulta piuttosto elevato rispetto ai casi precedentemente esaminati. Vale la pena comunque constatare che l'inserimento del nucleo ferromagnetico non è stato preceduto da una verifica della saturazione del materiale impiegato. La saturazione, infatti, è un fenomeno che si verifica quando il nucleo raggiunge la sua massima magnetizzazione: una volta raggiunto il valore massimo, la curva di magnetizzazione perde di linearità.

Al fine di una corretta valutazione della saturazione, si consideri il caso relativo a  $P_{load_{MAX}}$ , che si ottiene quando  $r_1 = 41mm$  e  $r_2 = 33.5mm$ . Si valutano di seguito il campo magnetico prodotto dal primario e il campo magnetico autoindotto dal secondario al fine di confrontarli con il valore di saturazione del materiale scelto.

Nel paragrafo 2.1.2 è già stato riportato il calcolo del campo magnetico generato da un conduttore rettilineo di lunghezza indefinita attraversato da corrente; si ricava il suo valore considerando  $I_p = 15.56A$  e  $x_{min} = 6mm$ :

$$B_{MAX_{prim}} = \frac{\mu_0 \mu_r I_p}{2\pi x_{min}} = 0.52T$$

Il campo prodotto dalla bobina nel punto di massima estrazione di potenza si calcola tramite la formula che segue:

$$B_{MAX_{autoind}} = \frac{\mu_0 \mu_r I_{load_{MPP}} N}{l_m} = 1.03T$$

Dato che la ferrite 3C94 presenta  $B_{sat} = 0.39T$ , numericamente inferiore a entrambi i valori di campo magnetico massimo calcolato, si incorre nella saturazione del nucleo ferromagnetico. Dunque, sarebbe necessario limitare la corrente massima del conduttore nel primario. Inoltre, un eventuale circuito di conversione a valle dovrebbe necessariamente

estrarre una corrente inferiore a quella relativa al punto di massimo trasferimento di potenza, non lavorando quindi nel punto di massima potenza estratta.

### 3.3.2 Assenza di saturazione

Di seguito sono riportati gli accorgimenti per evitare la saturazione del nucleo ferromagnetico dell'induttore.

Analizzando la formula del campo magnetico del primario si osserva che agendo sulla corrente che fluisce attraverso il primario stesso è possibile limitarne il valore. Fissato  $B_{MAX_{prim}} = B_{sat}$  si calcola il valore  $I_{p_{MAX}}$  tramite la formula:

$$I_{p_{MAX}} = \frac{2\pi B_{sat} x_{min}}{\mu_0 \mu_r} = 11.7A$$

Il valore ottenuto rappresenta il limite da non valicare per evitare la saturazione del nucleo.

Per risolvere il problema della presenza della saturazione dovuta al campo magnetico autoindotto dall'avvolgimento, si è scelto di agire sul parametro  $N$ : se si fissa  $B_{MAX_{autoind}} = B_{sat}$ , si è in grado di ricavare il numero limite di spire tramite l'espressione:

$$N_{MAX} = \frac{B_{sat} l_m}{\mu_0 \mu_r I_{load_{MAX}}} = 44.42$$

Per evitare il funzionamento del nucleo al di fuori della regione lineare viene posto come nuovo valore della corrente al primario  $I_p = 10A$  e si sceglie  $N = 20$ , valore che consente comunque di ottenere una tensione in uscita in linea con i casi precedentemente analizzati. Di seguito si presenta lo schema dell'harvester, opportunamente rivisto:

<pre> Imposto le condizioni iniziali del circuito: .ic I(Lrog)=0 .ic V(A)=0 .ic V(B)=0 .ic V(C)=0 .ic V(D)=0 .ic V(Primario)=0 Analisi transitoria: .tran 1 uic         </pre>	<pre> Parametri del circuito dell'harvester: r1 è il raggio della bobina r2 è il raggio della sezione trasversale annulla è un par. di controllo mur è la perm. magn. rel. del nucleo: Permeabilità magnetica del nucleo: La rho utilizzata è quella del rame Diametro filo avvolgimenti [m]: Numero massimo di layers 3 o 4 (limite fisico) Densità avvolgimenti [1/m]: Numero spire: Lunghezza filo avvolgimenti: Calcolo il valore dei componenti del circuito: radice, a1 e a2 sono parametri intermedi per il calcolo di M         </pre>	<pre> .step param r1 27.5E-3 41E-3 1.5E-3 .step param r2 21.5E-3 35E-3 1.5E-3 .param annulla={if(0.5*r1/r2, 1, 0)} .param mur=1000 .param mu={4*pi*mur*1E-7} .param rho=1.68E-8 .param dfilo=0.4E-3 .param layers=1 .param den={(1/dfilo)} .param n=if(0.5*r1/r2, 20, 1) .param len={n*2*pi*r2} .param rrog={(rho*len)/(pi*(dfilo/2)**2)} .param lrog={(mu*(n**2)*(r2**2))/2*r1} .param cmatch={1/((2*pi*50)**2*lrog)} .param radice={sqrt((r1**2)+(r2**2))} .param a1={arctan((r1+r2)/radice)} .param a2={arctan((r1-r2)/radice)} .param M={(mu*n)/pi*(radice*(-2*a1-2*a2)+r1*pi)}         </pre>	<pre> Stampo i parametri e calcolo P: .meas tran Pload avg V(D)*I(Rload) .meas myN param n .meas myLen param len .meas myRrog param rrog .meas myLrog param lrog .meas myCmatch param cmatch .meas myM param M         </pre>
--	--	--	---

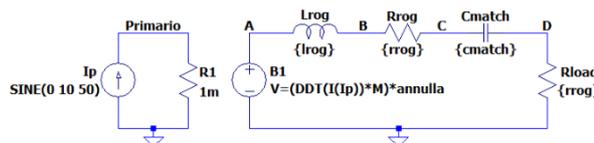


Figura 18: Circuito equivalente dell'energy harvester con nucleo in ferrite 3C94, senza saturazione

A seguire vengono riportati i grafici di  $P_{load}$  e delle caratteristiche di tensione e corrente sul carico:

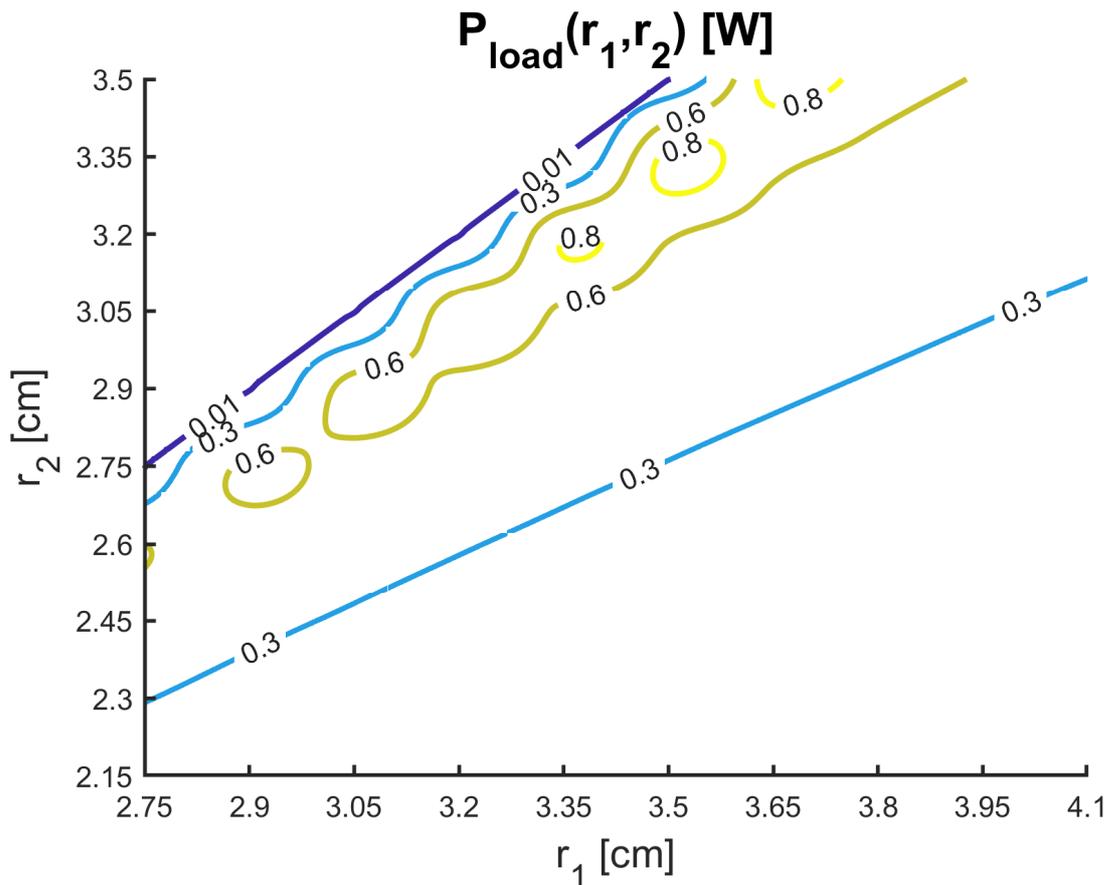


Figura 19: Potenza trasferita al carico ottimo in funzione delle geometrie, nucleo in 3C94

La Figura 19 mostra che la potenza estratta è di gran lunga superiore a quella ottenuta impiegando il nucleo in aria, che era nell'ordine dei  $\mu\text{W}$ .

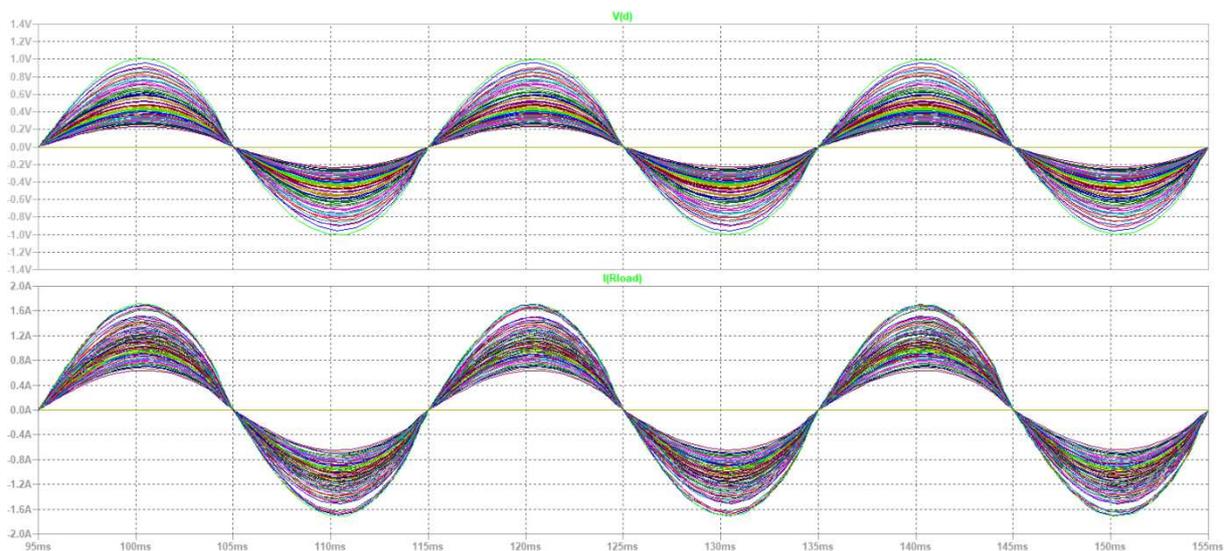


Figura 20: Andamento della tensione  $V(D)$  e della corrente sul carico  $I(Rload)$ , con nucleo in 3C94

Come preventivato, la caratteristica di tensione d'uscita dell'energy harvester presenta ampiezza dello stesso ordine di grandezza del caso di Rogowski coil in assenza di nucleo

ferromagnetico, mentre invece l'entità della corrente è molto maggiore, giustificando quindi l'aumento di potenza raccolta.

## 4 CONCLUSIONI

Nello svolgimento di questa tesi sono stati presentati diversi modelli per energy harvester di tipo induttivo: è emerso che la bobina di Rogowski, in assenza di accorgimenti come l'aggiunta di un trasformatore in cascata o l'inserimento di un nucleo ferromagnetico al suo interno, non permette di ricavare grandezze fisiche sufficienti per il suo impiego in sistemi di energy harvesting su linee a bassa tensione e in volumi limitati.

I risultati riportati sono stati ottenuti per mezzo di un circuito equivalente semplificato e di un simulatore, i quali assumono che il circuito operi in condizioni ideali: sarebbe perciò opportuno verificare che i dati ottenuti siano in linea con rilevazioni o simulazioni fisiche eseguite sul sistema tenendo conto di tutti gli effetti parassiti e di perdita presenti. In particolare, nei dispositivi basati su nucleo ferromagnetico risulta importante rappresentare i vari effetti di perdita.

In eventuali studi futuri si potrebbe realizzare un nuovo modello che consideri la possibilità in dispositivi senza nucleo ferromagnetico di aumentare ulteriormente il numero di spire avvolte sulla bobina a parità di volume, andando ad occupare il volume d'aria ricavato all'interno del componente, in modo da incrementare la potenza estratta.

## 5 BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] “ChipsJU” <https://www.chips-ju.europa.eu/>
- [2] “CORDIS – UE research results” <https://cordis.europa.eu/project/id/101139790>
- [3] Bhatt, K., Kumar, S., Kumar, S., Sharma, S., & Singh, V. (2024). A review on energy harvesting technologies: Comparison between non-conventional and conceptual approaches. *Energy Reports*, 12, 4717-4740.
- [4] “What is energy harvesting?”, ONIO <https://www.onio.com/article/what-is-energy-harvesting.html> [consultato il 2 novembre 2024]
- [5] “Sistemi di Energy Harvesting e telealimentazione da radiazione elettromagnetica a RF per wireless sensor network”, Alessandro Bertacchini <https://web.ing.unimo.it/wiki/images/3/3e/EHRF@INGREshort.pdf> [consultato il 2 novembre 2024]
- [6] Samimi, M. H., Mahari, A., Farahnakian, M. A., & Mohseni, H. (2014). The Rogowski coil principles and applications: A review. *IEEE Sensors Journal*, 15(2), 651-658.
- [7] Roscoe, N. M., & Judd, M. D. (2013). Harvesting energy from magnetic fields to power condition monitoring sensors. *IEEE Sensors Journal*, 13(6), 2263-2270.
- [8] Zhao, X., Keutel, T., Baldauf, M., & Kanoun, O. (2013). Energy harvesting for a wireless-monitoring system of overhead high-voltage power lines. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 7(2), 101-107.
- [9] Mingotti, A., Betti, C., Tinarelli, R., & Peretto, L. (2023). Simplifying Rogowski Coil Modeling: Simulation and Experimental Verification. *Sensors*, 23(19), 8032.
- [10] Taccetti, S., Zonzini, F., Zauli, M., Mohammadgholiha, M., Peppi, L. M., Romani, A., & De Marchi, L. (2024, July). Ultrasonic Wireless Power Transfer in Metal Structures using Frequency-Steerable Acoustic Transducers and Impedance Matching. In *2024 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)* (pp. 1-6). IEEE.
- [11] “Campo magnetico generato da un filo indefinito su spira rettangolare”, Samuel Leanza <https://www.webtutordimatematica.it/esercizi-di-fisica/campo-magnetico/campo-magnetico-generato-da-un-filo-indefinito-su-una-spira-rettangolare> [consultato il 6 novembre 2024]

## **6 RINGRAZIAMENTI**

Raggiungere questo traguardo è stato possibile solo grazie al supporto e all'incoraggiamento di tante persone che mi sono state vicine. Vorrei dedicare loro queste righe per esprimere la mia più sincera gratitudine.

Desidero iniziare con un ringraziamento al Professor Aldo Romani che mi ha guidato nella stesura di questo elaborato in ogni suo passaggio con estrema disponibilità e pazienza.

Proseguo ringraziando la mia famiglia, in particolare Marco, Emanuela, Maddalena, Matteo e Riccardo, che mi ha accompagnato in questo viaggio tortuoso standomi vicino e sostenendomi anche nei momenti più difficili.

Ringrazio tutti gli amici incontrati, in loro ho trovato leali compagni con cui condividere sia le gioie che le fatiche di questo periodo della mia vita che ormai volge al termine.

Ultima, ma non per importanza, ringrazio Maria, che mi ha accompagnato per parte di questo percorso. Il suo amore e la sua dolcezza mi hanno permesso di credere più in me stesso e di terminare questo percorso.