

SISTEMA RF ENERGETICAMENTE AUTONOMI

Progettazione e simulazione di una rectenna in tecnologia planare

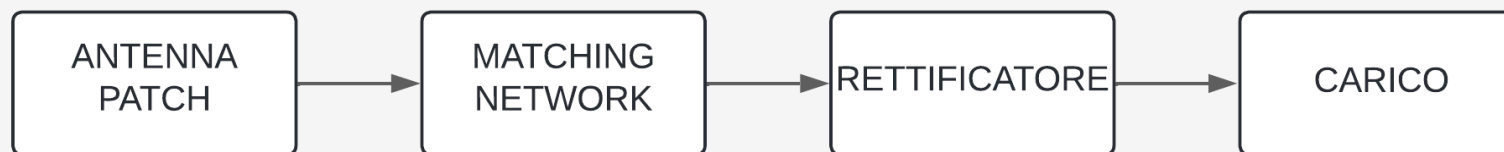
Andrea Guidi
Claudio Ricci
Tommaso Buzzi

Richiesta e parametri di progetto per la rectenna

La rectenna da realizzare deve avere le seguenti caratteristiche:

- Frequenza di lavoro $f_0=2.45$ GHz
- Antenna in tecnologia planare patch con feeding in microstriscia
- Range di potenze in ingresso da -20dBm a 0dBm
- Massimizzare l'efficienza totale della rectenna

Rectenna, introduzione e concetti fondamentali

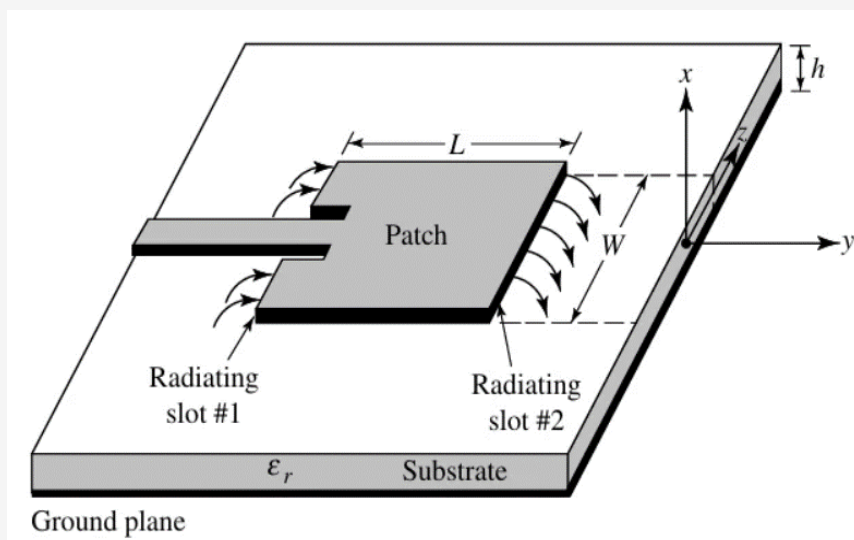


Una **rectenna** ("rectifying antenna") è un dispositivo in grado di ricavare potenza DC a partire da un segnale RF wireless. È formata da un'antenna patch che capta la radiazione e da un rettificatore che raddrizza il segnale al fine di poter alimentare piccoli dispositivi senza l'impiego di batterie.

I campi di applicazione per questa tecnologia sono molteplici e vanno dall'ambito sensoristico alla ricarica di dispositivi.

Progettazione e simulazione antenna patch in CST studio suite

La struttura di una antenna in tecnologia planare con feeding in microstriscia è composta da un substrato di materiale dielettrico sulle interfacce del quale sono presenti due metallizzazioni. Una occupa tutto il lato inferiore del substrato e funge da piano di massa mentre dal lato superiore è invece presenta una metallizzazione opportunatamente modellata in modo che rispetti le condizioni di radiazione e di adattamento.



Come impedenza caratteristica è stato scelto di adottare un valore standard di 50Ω . Di fondamentale importanza è il concetto di adattamento, il quale ci permette di poter trasmettere tutta la potenza dal generatore in ingresso alla feeding line alla antenna patch vera e propria.

Progettazione e simulazione antenna patch in CST studio suite

Per la progettazione sono stati seguiti i seguenti passaggi:

1) SCELTA DEL SUBSTRATO: I materiali a nostra disposizione erano molteplici

SUBSTRATO	ϵ_r a 10GHz	$\tan\delta$ a 10GHz
ROGER 5880	2,20	0,0009
ROGER 4350B	3,48	0,0031
ROGER 6006	6,45	0,0027
ROGER 3006	6,5	0,002
ROGER 4003C	3,55	0,0027
ROGER 3003	3	0,001

Progettazione e simulazione antenna patch in CST studio suite

Partendo dai valori di $\tan\delta$ più bassi per limitare le perdite del materiale abbiamo preso in considerazione il ROGER 3003/3006/5880. Dopo aver scartato il 5880 per via della ϵ_r molto bassa e che avrebbe portato a perdite dovute a irradiazione dalla matching network e feeding line, per i nostri test abbiamo selezionato i ROGER 3003/3006 in quanto sono quelli con $\tan\delta$ più bassa e con valori di ϵ_r che coprono un range di valori intermedi e di interesse per fare dei test. Un altro vantaggio di avere una ϵ_r non troppo bassa è poter miniaturizzare maggiormente il sistema.

Per quanto riguarda gli spessori disponibili con questi substrati:

SPESSORE SUBSTRATO (mm)	ROGER 3003	ROGER 3006
	0,13	0,13
	0,25	0,25
	0,51	0,64
	0,76	1,28
	1,52	

Progettazione e simulazione antenna patch in CST studio suite

Considerando il fatto che la teoria delle microstrisce è valida per $h \ll \lambda$ e $W \ll \lambda$, sempre per contenere le perdite da irradiazione della matching network (e feeding line), abbiamo scelto un substrato che fosse un via di mezzo tra un valore non troppo basso e uno non troppo elevato per evitare di peggiorare le prestazioni della antenna patch; nello specifico sono stati selezionati: 0,76mm per il ROGER 3003 e 0,64mm per il ROGER 3006. Nel nostro caso l'antenna sarà quadrata e quindi $W=L$.

Dopo aver selezionato i substrati e i loro spessori, possiamo calcolare i parametri principali da usare per il progetto:

SUBSTRATO	λ_T (mm)	λ_0 (mm)	h (mm)	ϵ_r (mm)
ROGER 3003	70	0,122	0,76	3
ROGER 3006	48	0,122	0,64	6,5

Progettazione e simulazione antenna patch in CST studio suite

- 2) *DIMENSIONAMENTO*: La lunghezza L è stata determinata mediante la seguente formula: $L = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_r}}$ che rappresenta la dimensione per la quale si ha la prima risonanza. Anche il substrato è stato fatto di dimensioni quadrate con lato pari al doppio di L . Per il dimensionamento della feeding line è stato usato il tool di calcolo integrato nel simulatore per le microstrisce, nello specifico si è determinata la larghezza di quest'ultima (W_{strip}) per ottenere una impedenza caratteristica della stessa di 50Ω . Per l'adattamento tra l'antenna patch e la feeding line sono stati realizzati degli inset con larghezza pari alla feeding line e profondità (L_{inset}) ottenuta mediante sweep per ricavare un coefficiente di riflessione il più basso possibile e potersi così avvicinare al migliore adattamento. Per entrambe le antenne è stato usato uno spessore di metallo pari a 0,035mm.

Progettazione e simulazione antenna patch in CST studio suite

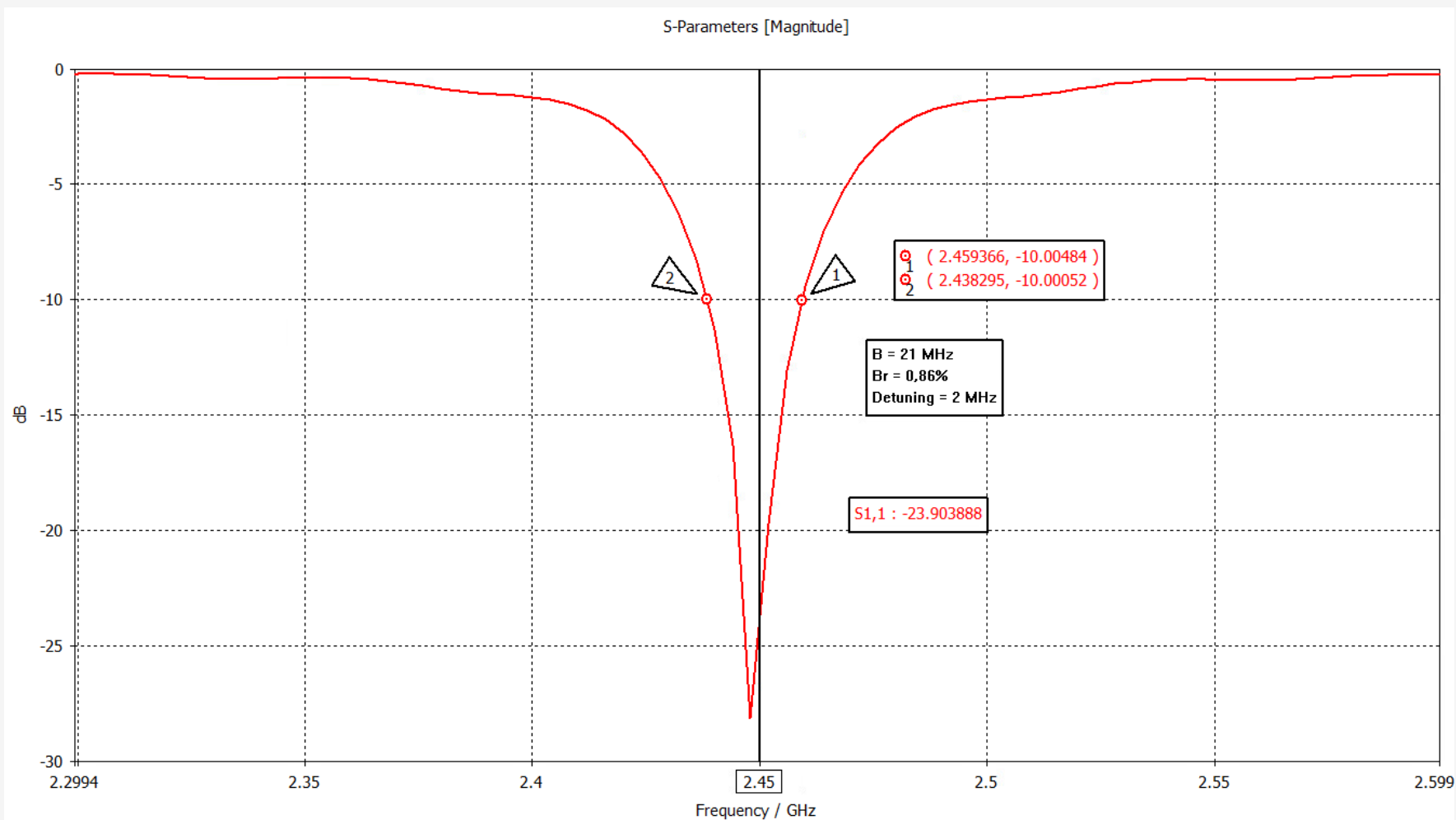
3) RISULTATI E VALUTAZIONI: Considerando quanto detto fino ad ora, i parametri finali che hanno portato ad avere le migliori prestazioni in termini di adattamento, efficienza e guadagno, sono i seguenti:

SUBSTRATO	W=L (mm)	W_srtip(mm)	L_inset (mm)
ROGER 3003	35,3	1,91	11,65
ROGER 3006	24	0,9	9,14

I risultati invece sono:

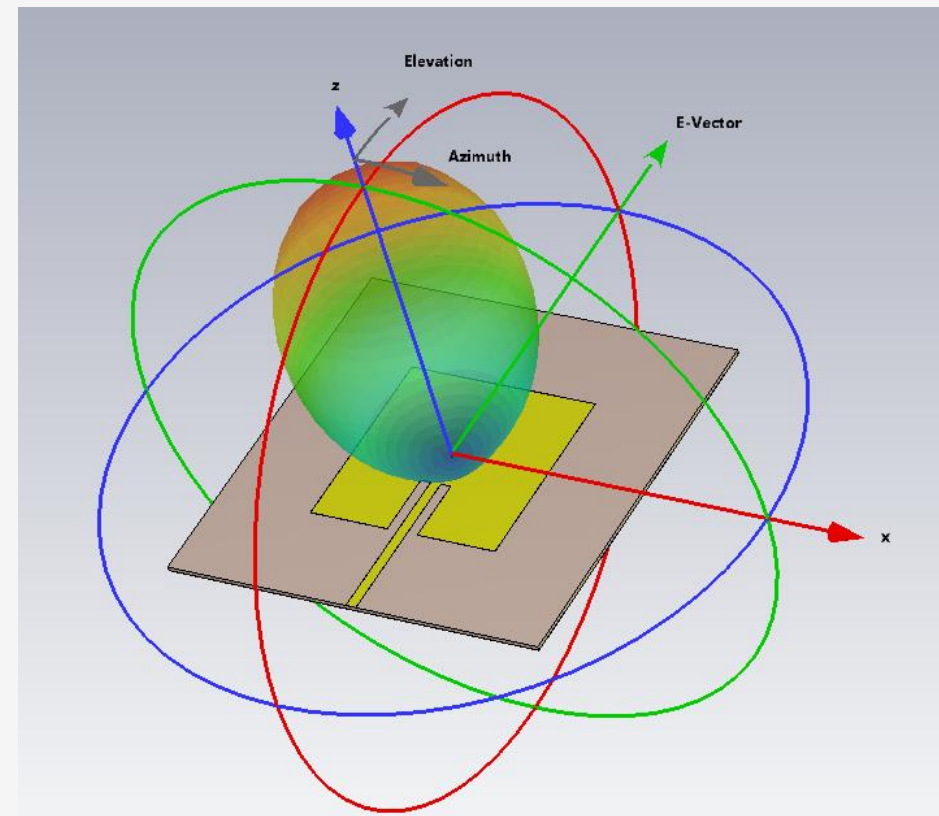
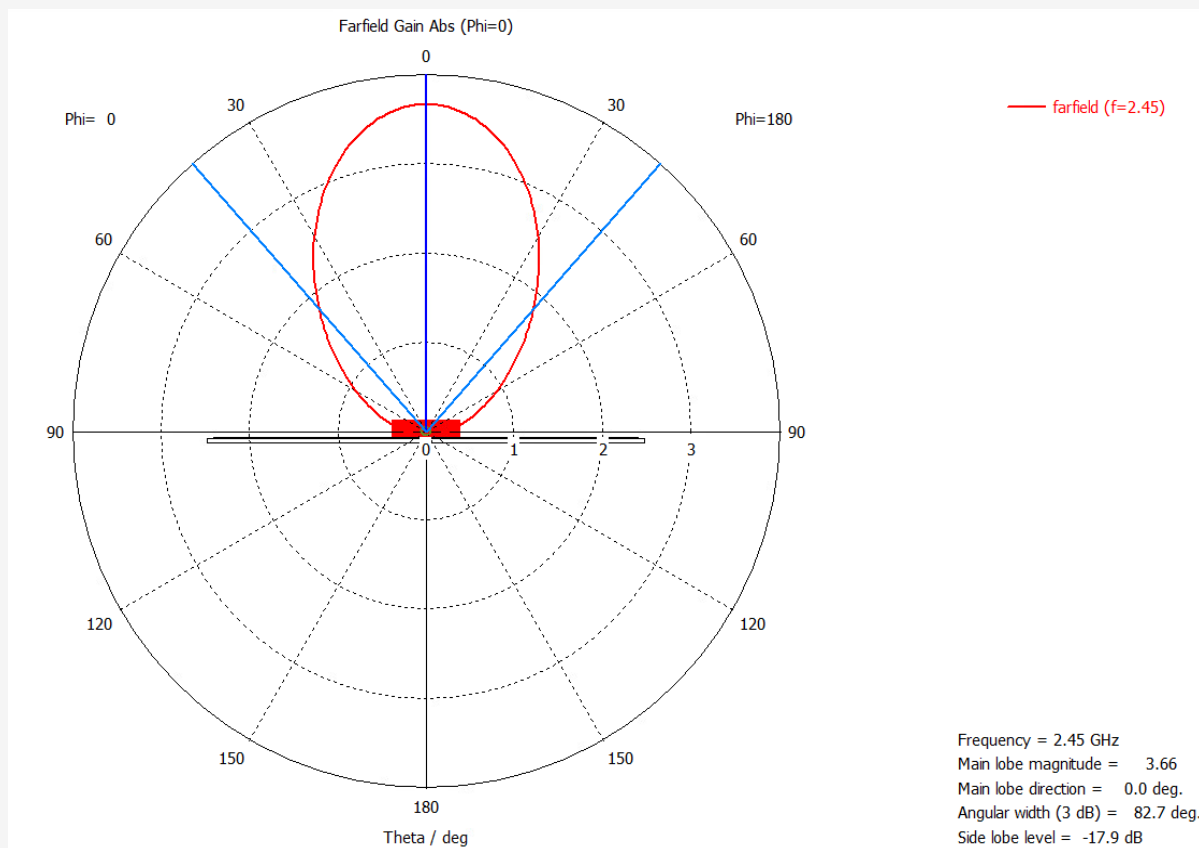
SUB	S_{11} (dB)	GAIN	EFF.	AREA	BW	BR	DETUN.	$Z_{11}(a f_0)$
ROGER 3003	-23,90	3,6	70%	4984mm ²	21MHz	0,86%	2MHz	54,9+1,73j
ROGER 3006	-24	2,201	56%	2304mm ²	19,8MHz	0,81%	2MHz	48,2+0,74j

Progettazione e simulazione antenna patch in CST studio suite



S11 antenna patch con
ROGER 3003

Progettazione e simulazione antenna patch in CST studio suite



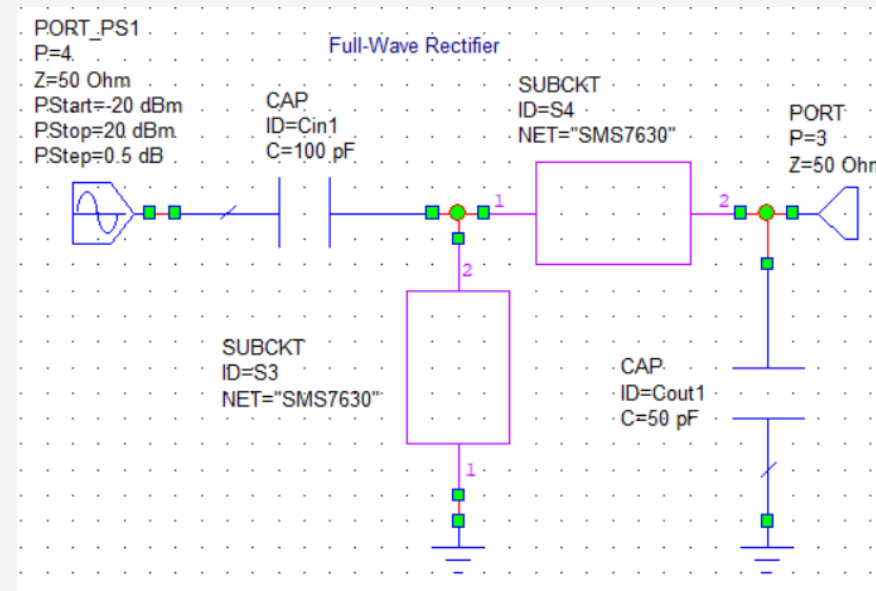
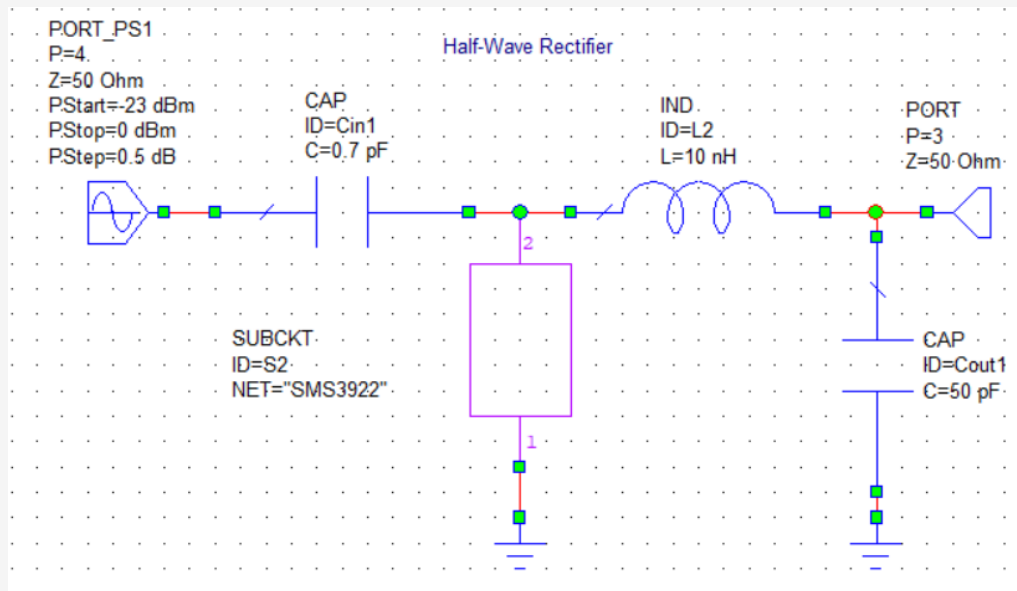
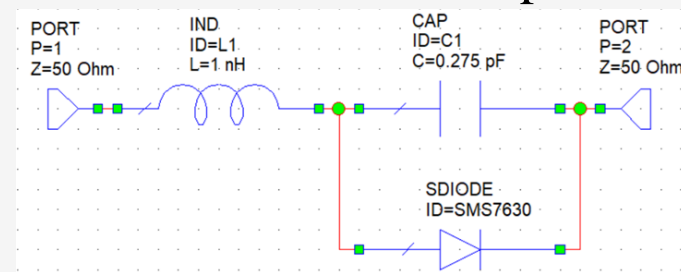
Scelta tipologia rettificatore e diodo/i

Il rettificatore ha il compito di ricavare una tensione continua a partire da una potenza EM ricevuta dall'antenna. Questa conversione avviene sfruttando la non linearità di uno o più componenti (diodi o transistor). Nello specifico la loro caratteristica non lineare porta alla creazione di armoniche superiori e di una componente DC, che è il nostro obiettivo, per alimentare dei dispositivi a valle del circuito. Nel nostro caso faremo uso di diodi e le tipologie di circuito che realizzano questa funzione sono: half-wave rectifier, full-wave rectifier e il voltage multiplier. I diodi a nostra disposizione erano: SMS7630, SMS7621 e SMS3922. Per poter valutare quale di questi usare e quale degli schemi realizzare, sono stati testati tutti i diodi con due circuiti rettificatori, ovvero l'half-wave e il voltage doubler.

Scelta tipologia rettificatore e diodo/i

Per i diodi sono stati considerati nei loro modelli anche le perdite dovute al packaging, i valori dei componenti parassiti aggiunti provengono da misurazioni sperimentali, in alternativa sono disponibili nei datasheet dei componenti.

Qui sotto sono riportati gli schemi circuitali dei due rettificatori realizzati.



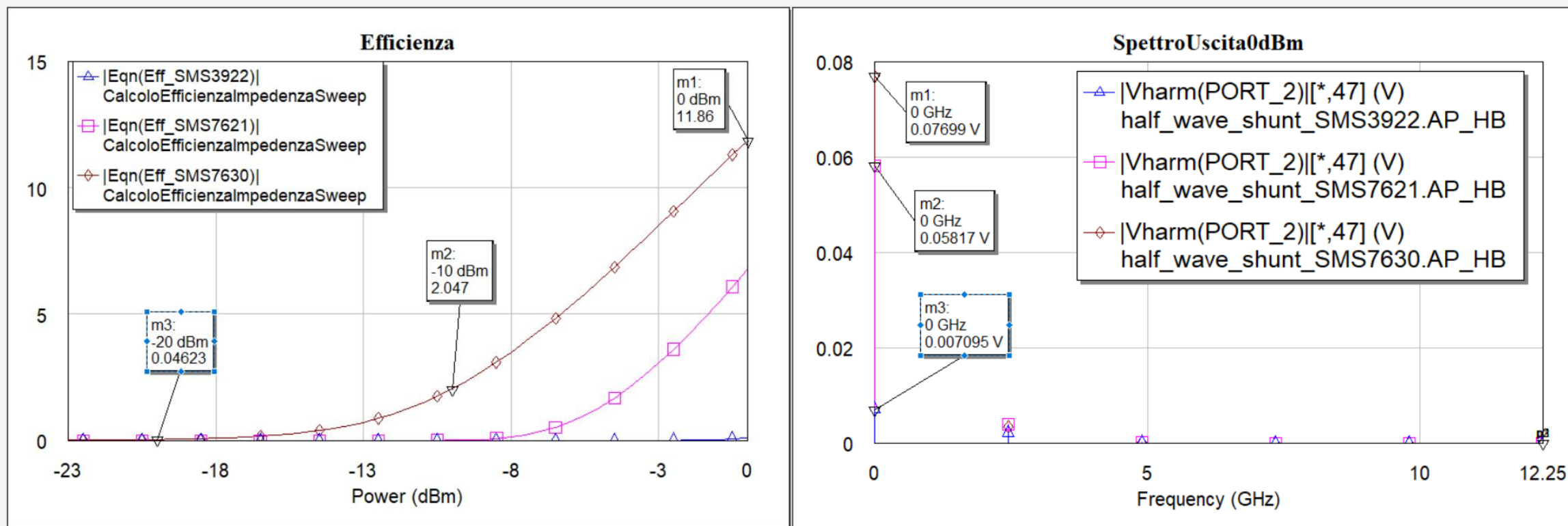
Scelta tipologia rettificatore e diodo/i

Il nostro obiettivo è quello di massimizzare l'efficienza di rettificazione, questa figura di merito può essere espressa come: $\eta_{\text{RF-DC}} = \frac{P_{\text{DC}}}{P_{\text{RF}}}$ dove P_{DC} rappresenta la potenza della componente continua presente in uscita al circuito rettificatore mentre la P_{RF} è la potenza fornita da una sorgente su un carico con il quale essa è adattato, è quindi la massima potenza in RF che è possibile trasmettere su un carico e il suo valore dipende dalla potenza del segnale generato dalla sorgente. Questa sorgente sarà quella in ingresso alla rectenna e rappresenta la potenza incidente sulla antenna.

Per la scelta della tipologia di diodo sono stati realizzati dei circuiti di test con la sola presenza del circuito di rettificazione, in cui si sono andati a monitorare i parametri di nostro interesse ovvero la $\eta_{\text{RF-DC}}$ ma è stata data importanza anche al livello di tensione presente in uscita in ottica di poter alimentare dei carichi reali.

Scelta tipologia rettificatore e diodo/i

I risultati sono stati i seguenti:



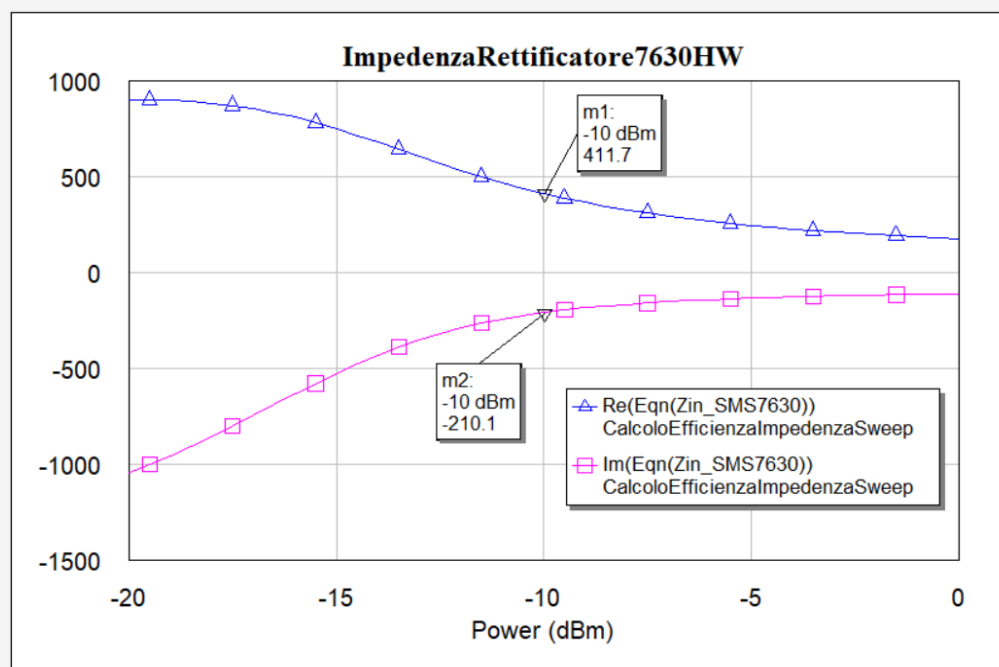
Si noti come l'SMS7630 offre una maggiore efficienza nel range di potenza di nostro interesse e fornisce una maggiore tensione continua in uscita per tutto il range di potenza in ingresso. Inoltre come abbiamo osservato presenta anche una tensione di giunzione inferiore, il che risulta importante per basse potenze.

Scelta tipologia rettificatore e diodo/i

Per la scelta della tipologia di rettificatore da usare sono state invece condotte delle prove a circuito completo ultimato, come verrà mostrato più avanti nella presentazione. Abbiamo inizialmente realizzato il circuito completo sia utilizzando un half wave rectifier che un voltage doubler. L'utilizzo di un voltage multiplier con un numero maggiore di stadi è stato scartato a priori, in quanto avendo una parte del range di potenza non particolarmente elevato (-20dbm/-15dbm), abbiamo reputato che la perdita di potenza dovuta alla caduta su più di due diodi avrebbe causato un dispendio di potenza paragonabile a quella in ingresso, degradando così l'efficienza.

Scelta rete di matching

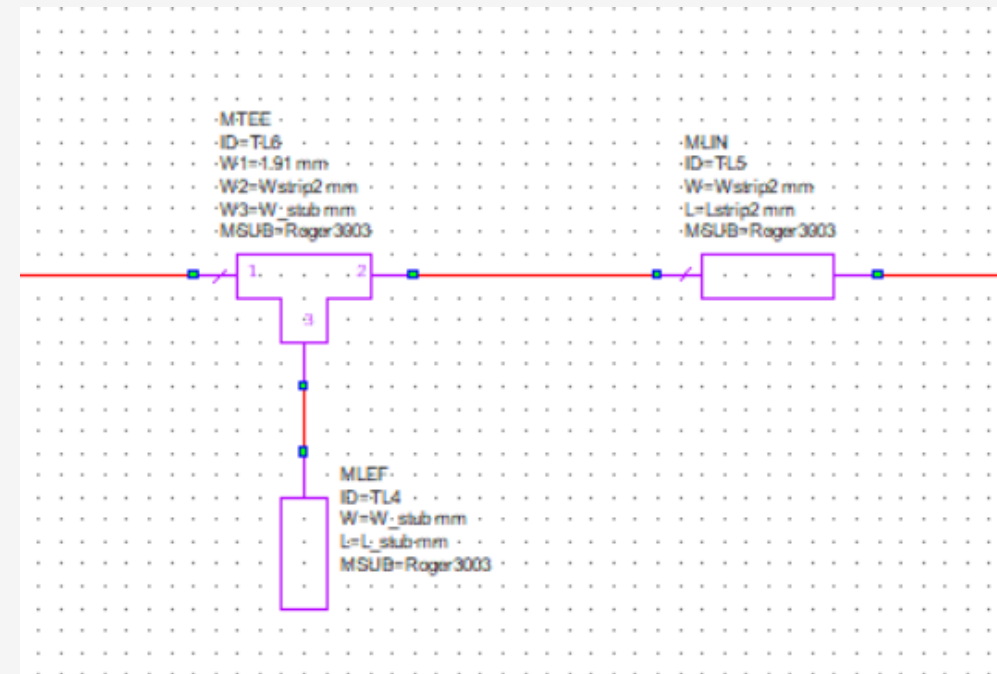
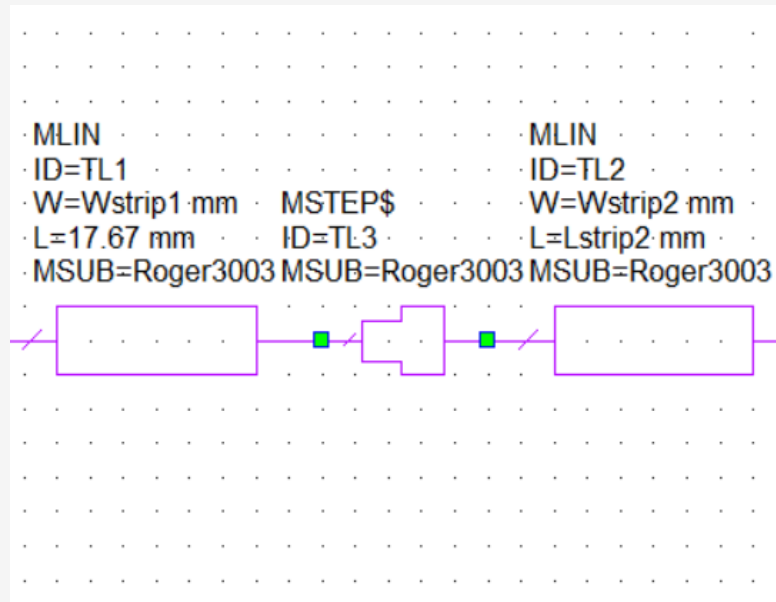
Una rete di matching è una componente circuitale che ha il compito di ottimizzare il trasferimento di potenza da una sorgente a un carico, minimizzando la potenza da esso riflessa. In particolare, nella nostra applicazione il nostro carico risulta essere il rettificatore, il quale presenta un'impedenza complessa. Inoltre, essendo un componente non lineare, la sua impedenza risulta dipendente dall'entità della nostra potenza in ingresso, per cui abbiamo sfruttato un apposito tool di ottimizzazione di AWR al fine di fornire un adattamento valido nel nostro range.



In figura: Il grafico dell'impedenza di ingresso del rettificatore half wave.

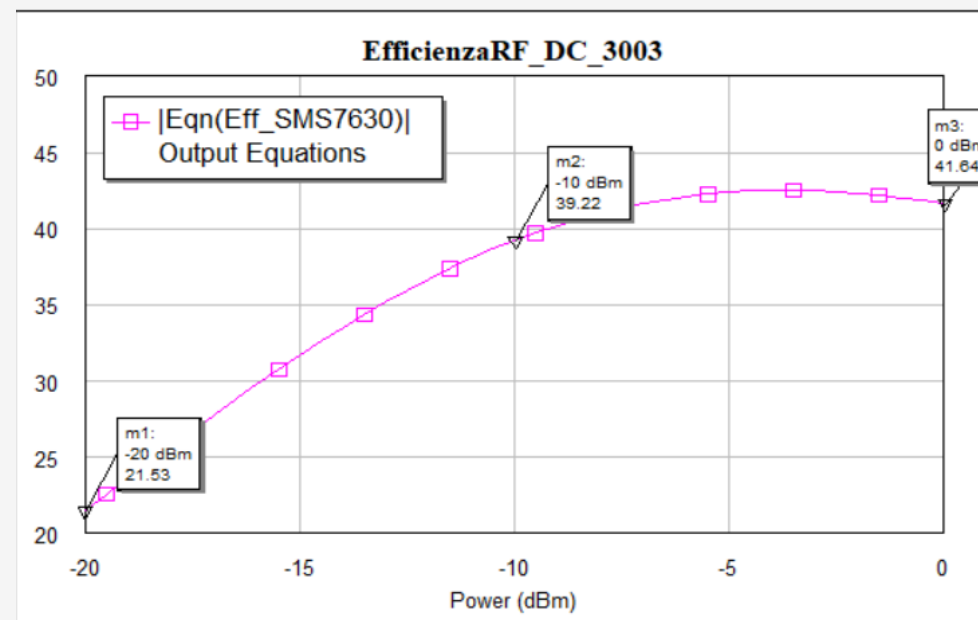
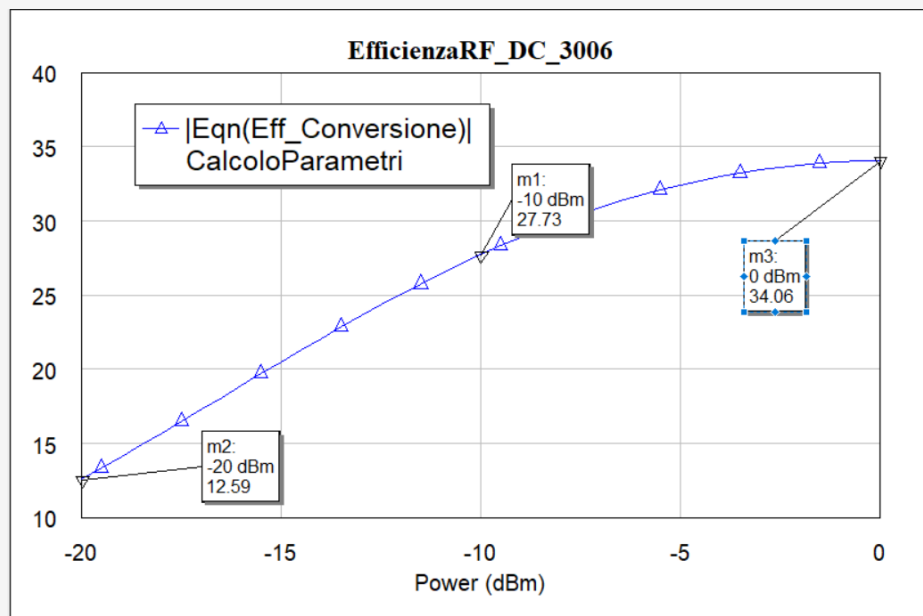
Scelta rete di matching

Per la scelta della tipologia di matching network abbiamo testato sia la rete a stub, sia la rete a $\lambda/4$. In particolare, abbiamo realizzato la rectenna completa implementando entrambi gli adattamenti; i risultati ci hanno portato a concludere che la rete a stub offre un'efficienza di rettificazione lievemente superiore rispetto al $\lambda/4$. Inoltre, l'adattatore a stub offre il vantaggio di poter essere facilmente tunato in un eventuale prototipo fisico.



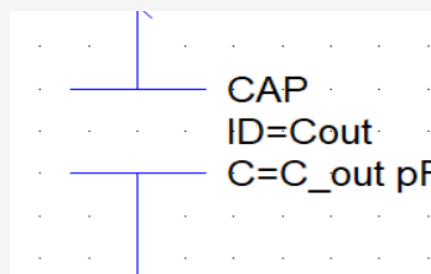
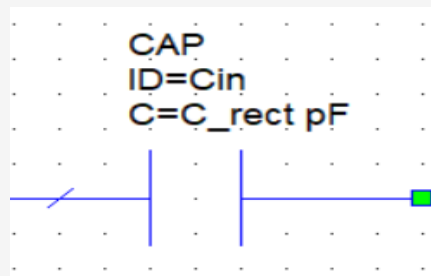
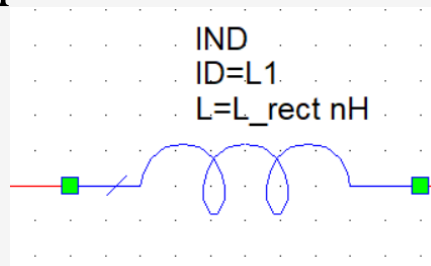
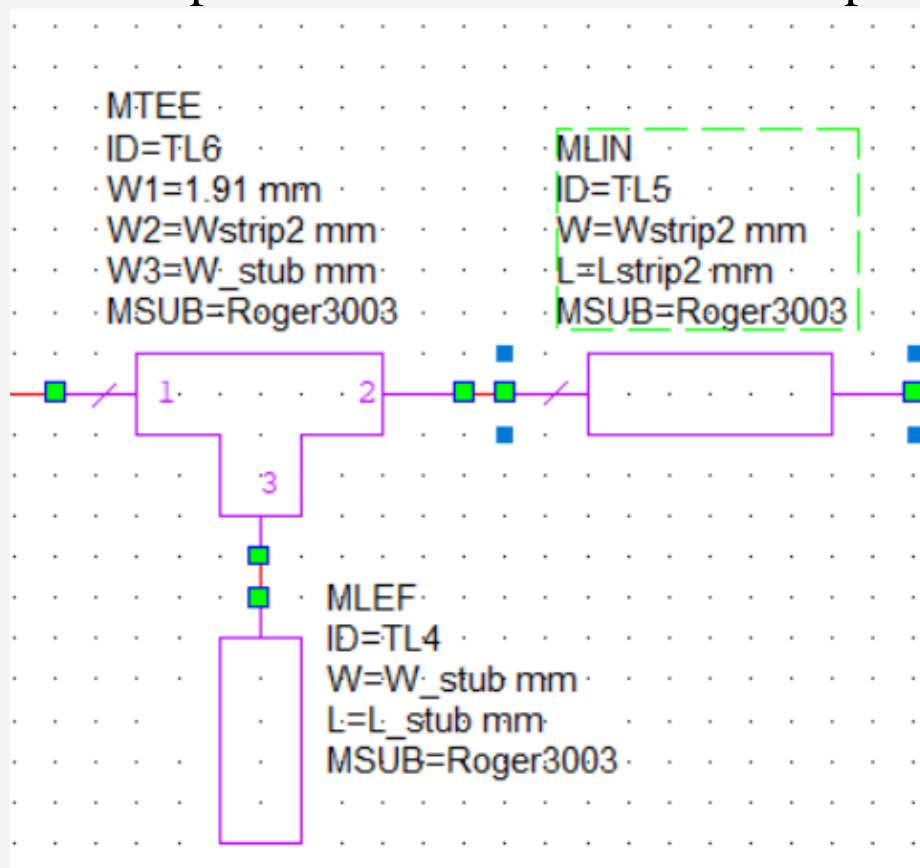
Circuito finale e risultati

Dopo aver chiesto all'ottimizzatore di massimizzare ($>50\%$) il parametro di nostro interesse, ovvero l'efficienza di rettificazione, in tutto il range delle potenze in ingresso alla rectenna, il tool ha determinato i vari parametri circuitali quali: dimensione rete di matching, carico e componenti del rettificatore. Dai risultati ottenuti si è visto che l'efficienza della rectenna realizzata su ROGER 3003 è superiore in tutto il range di potenze in ingresso.



Circuito finale e risultati

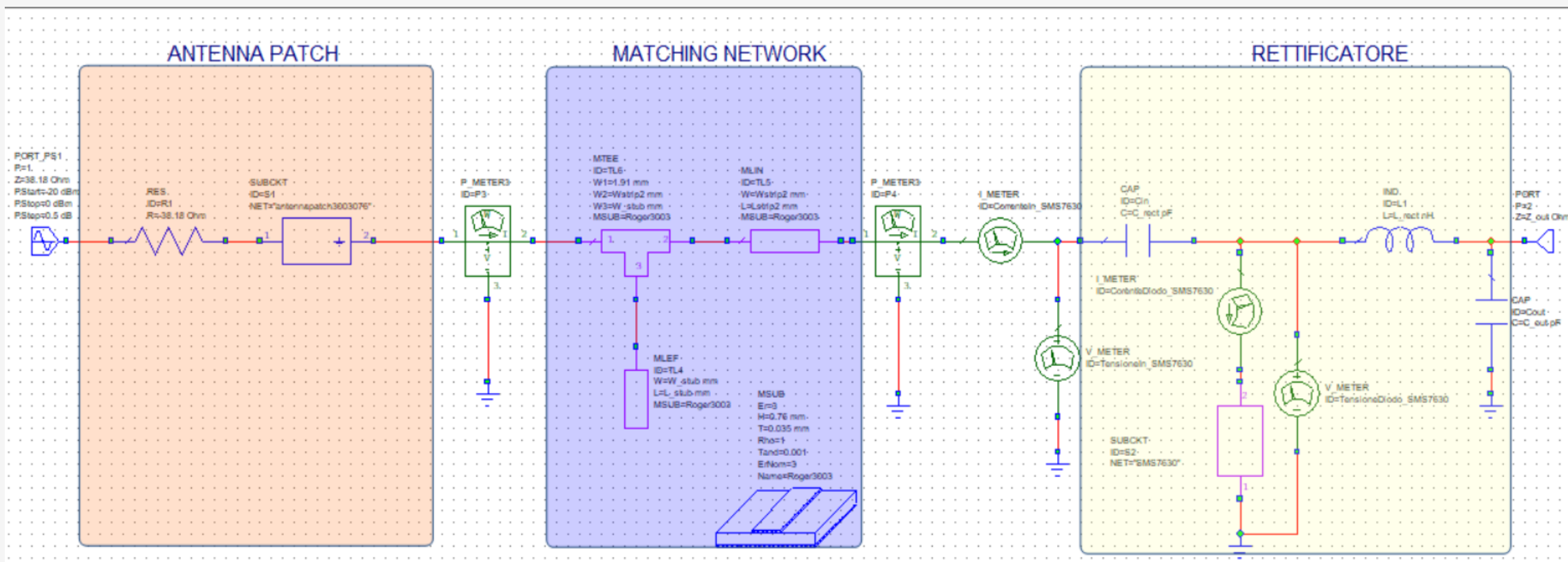
Riassumendo, la rectenna è composta da: substrato di Roger3003, rete di matching a stub, rettificatore half wave e parametri circuitali che sono riportati qui sotto:



Wstrip2=0.77
Lstrip2=22.7
C_rect=0.13
L_rect=7.6
C_out=30
Z_out=2840
W_stub=0.1
L_stub=9.24

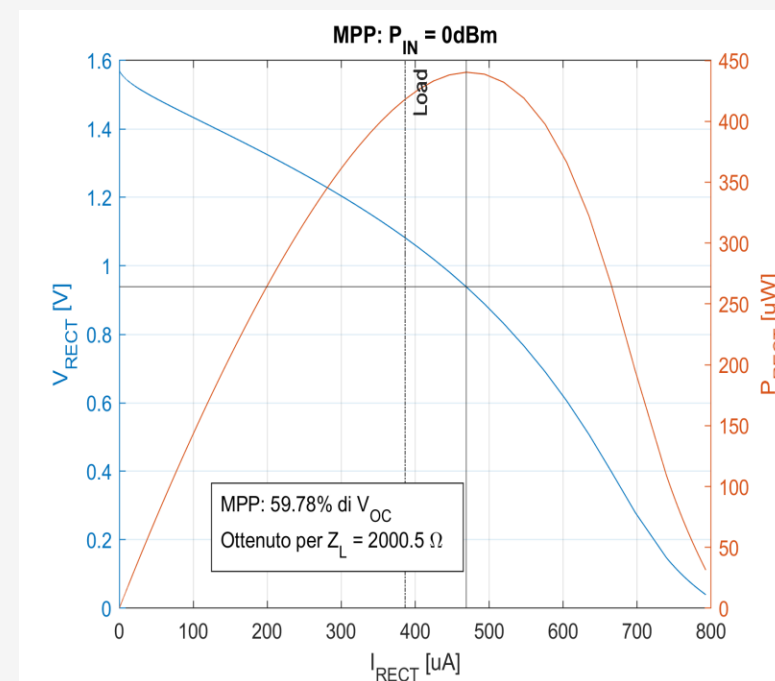
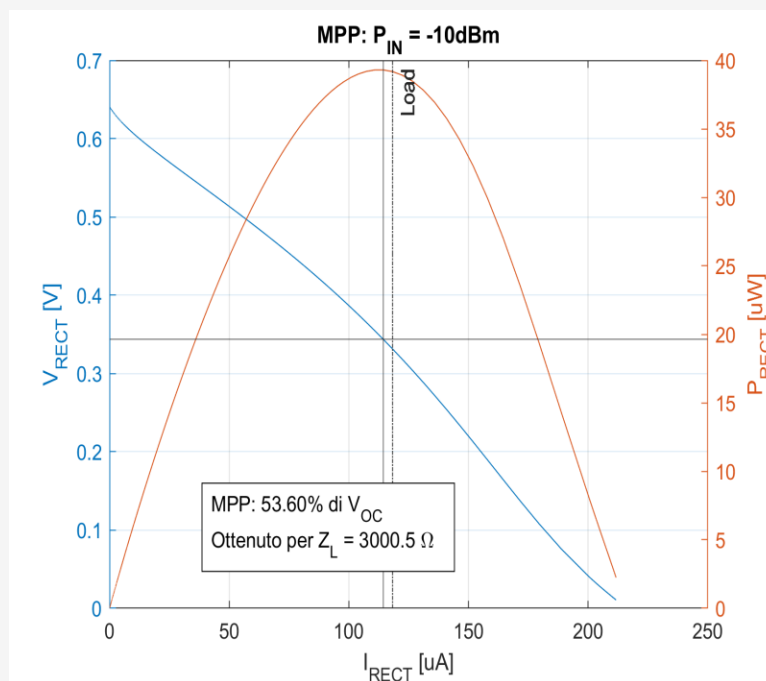
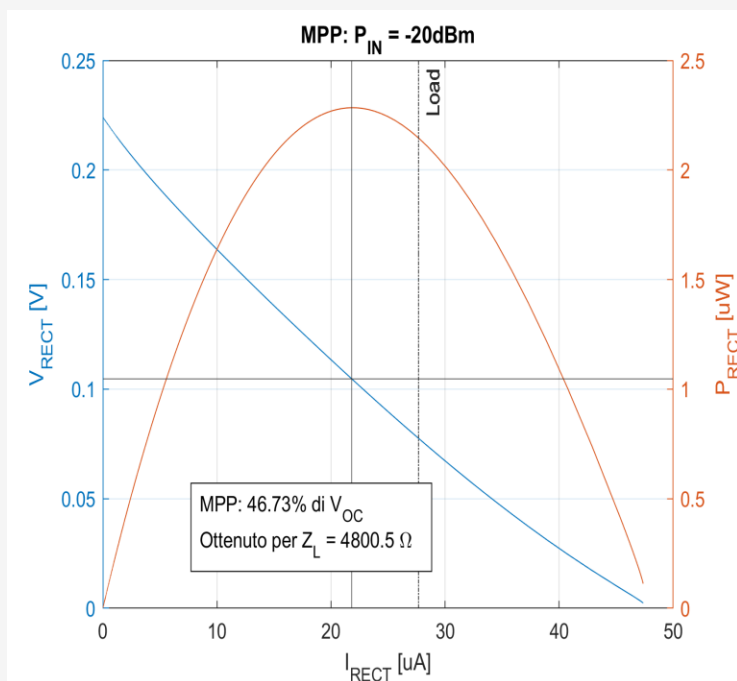
Circuito finale e risultati

Lo schema della rectenna completo è il seguente:



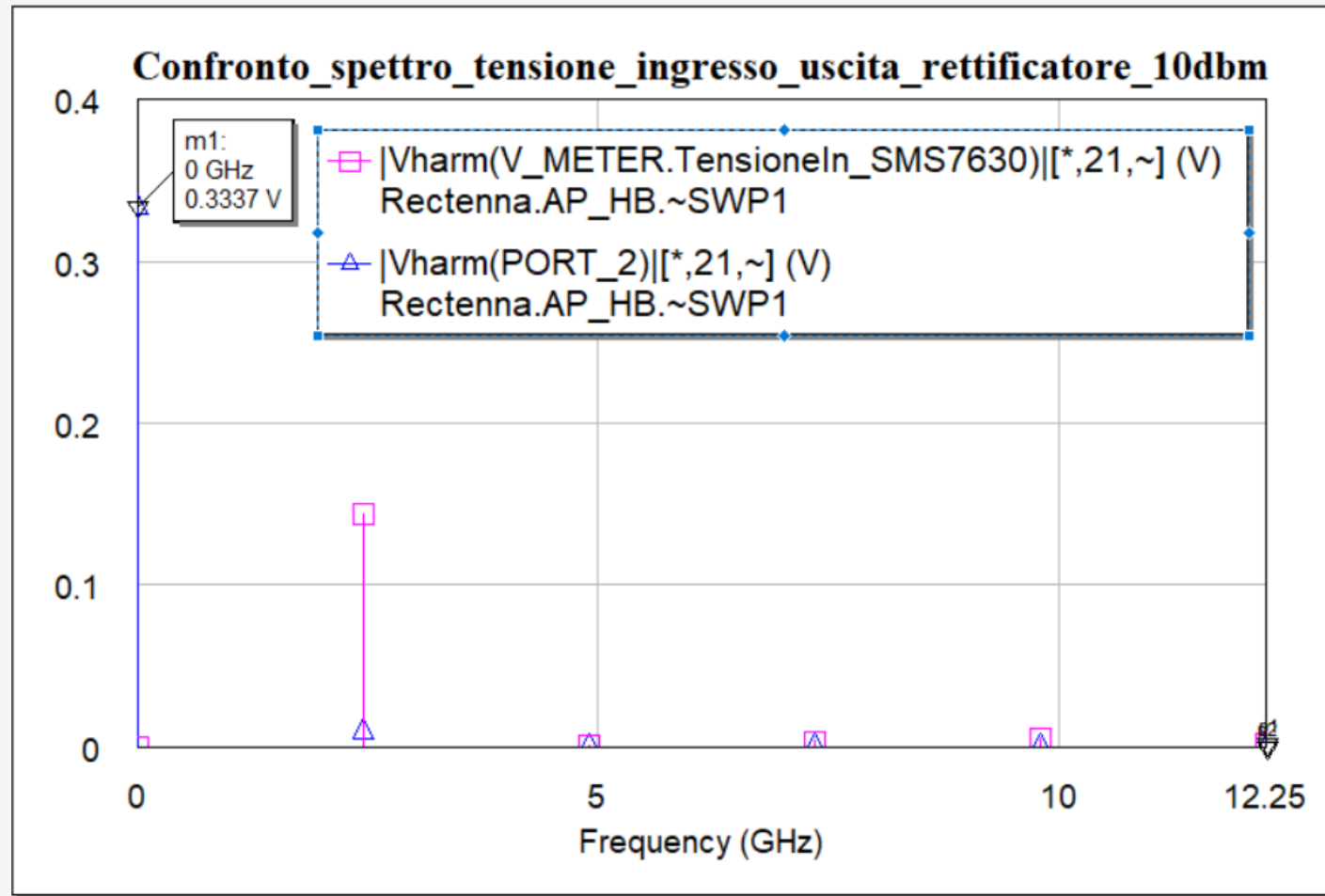
Circuito finale e risultati

Riportiamo tre differenti grafici dell'MPPT per 3 differenti potenze nel nostro range di ingresso, i quali forniscono l'andamento di potenza in uscita in funzione della variazione del carico. La curva aggiuntiva mostra il punto corrispondente al nostro carico ottimizzato di 2840 ohm.



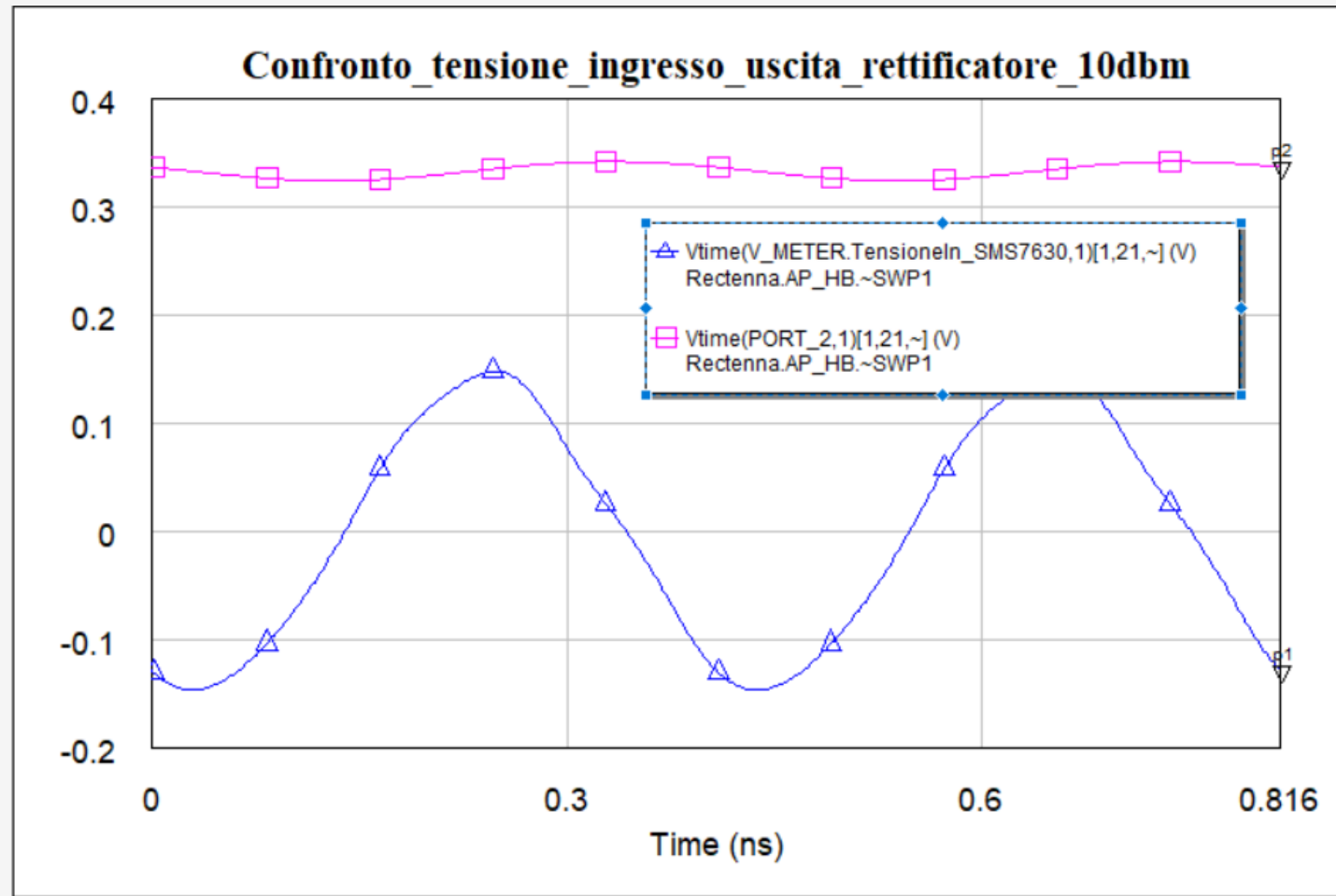
Circuito finale e risultati

Spettro della tensione in uscita paragonata con quella in ingresso al rettificatore a -10dBm:



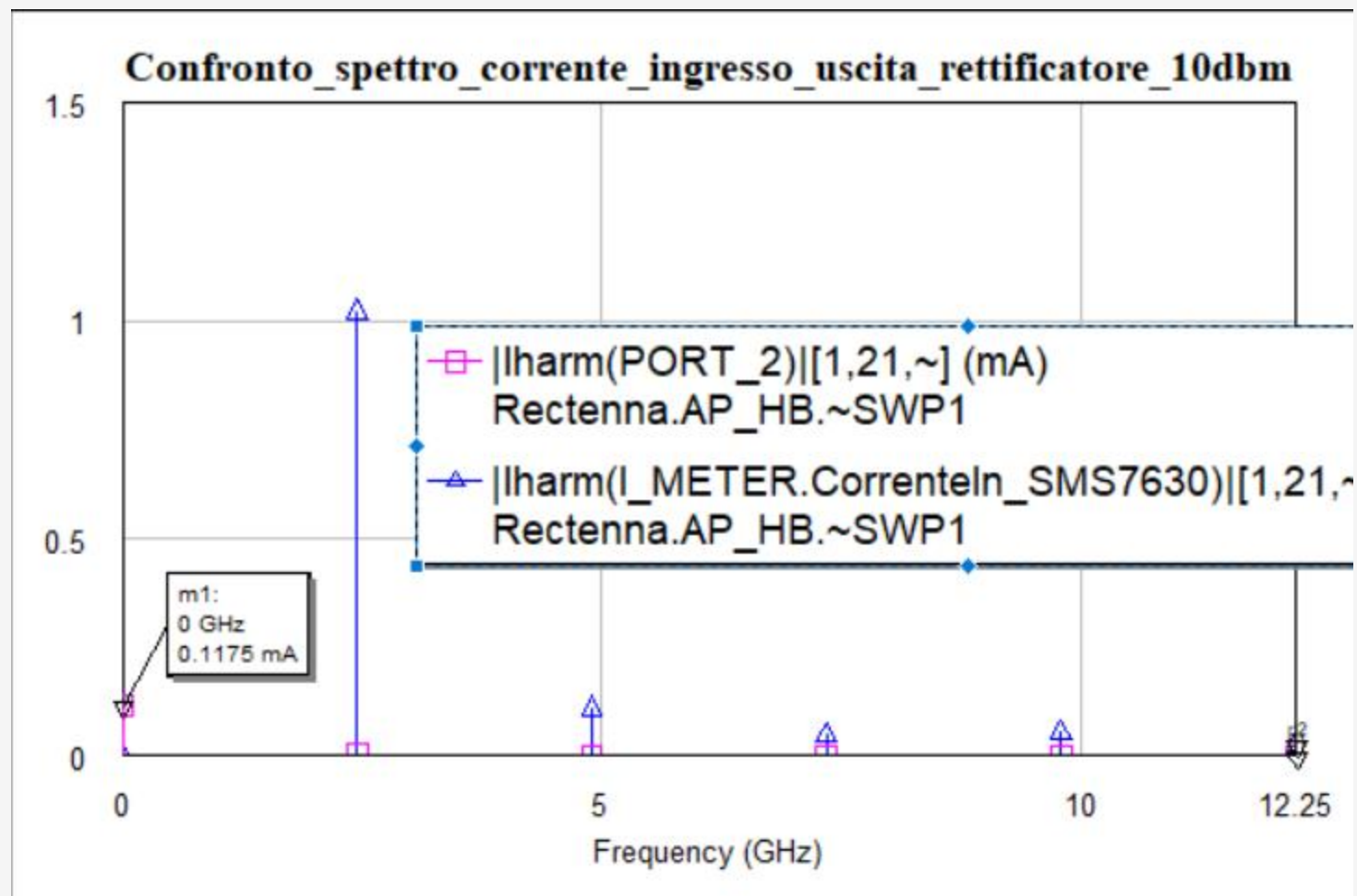
Circuito finale e risultati

Tensione in uscita paragonata con quella in ingresso al rettificatore a -10dBm nel dominio del tempo:



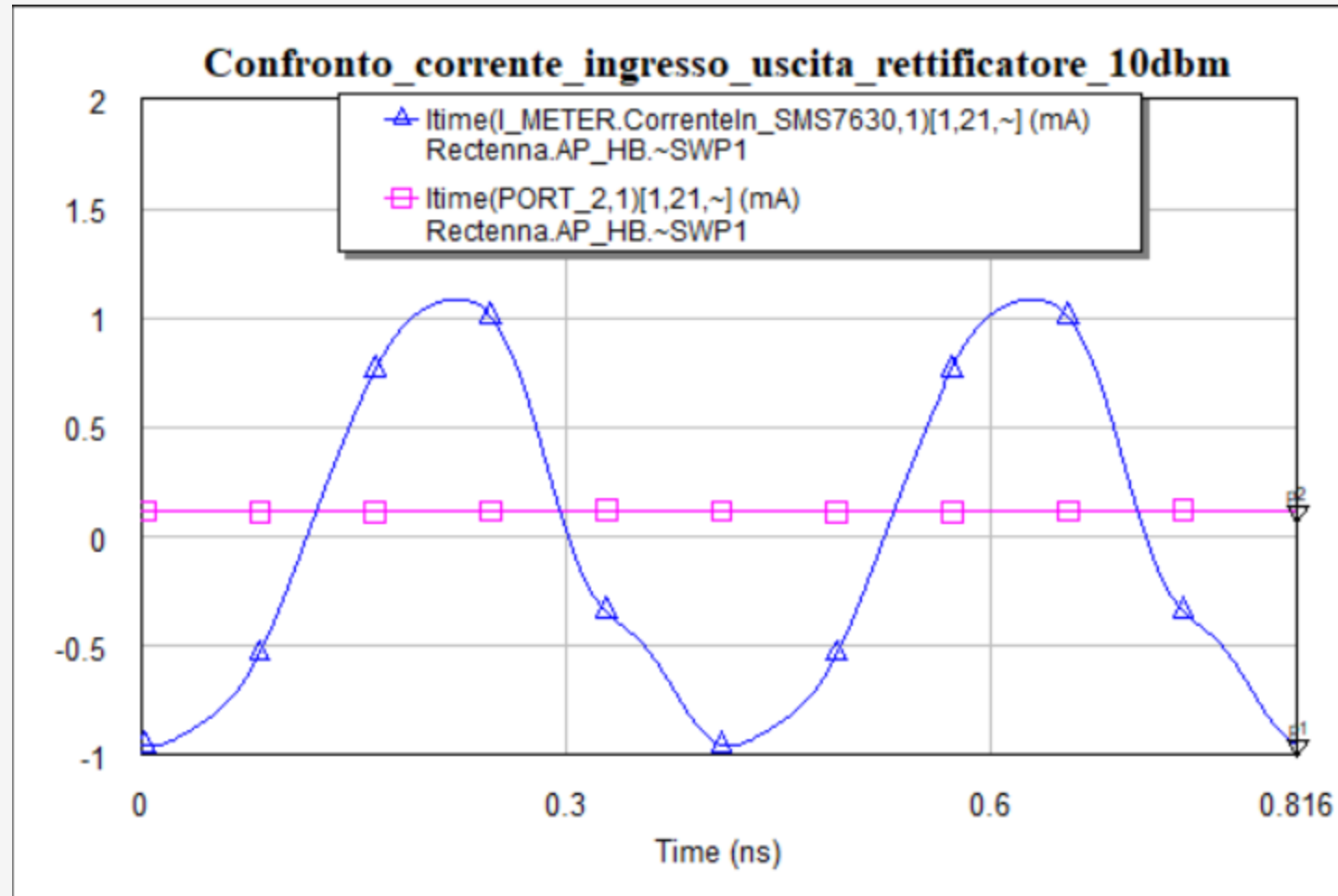
Circuito finale e risultati

Spettro della corrente in uscita paragonata con quella in ingresso al rettificatore a -10dBm:

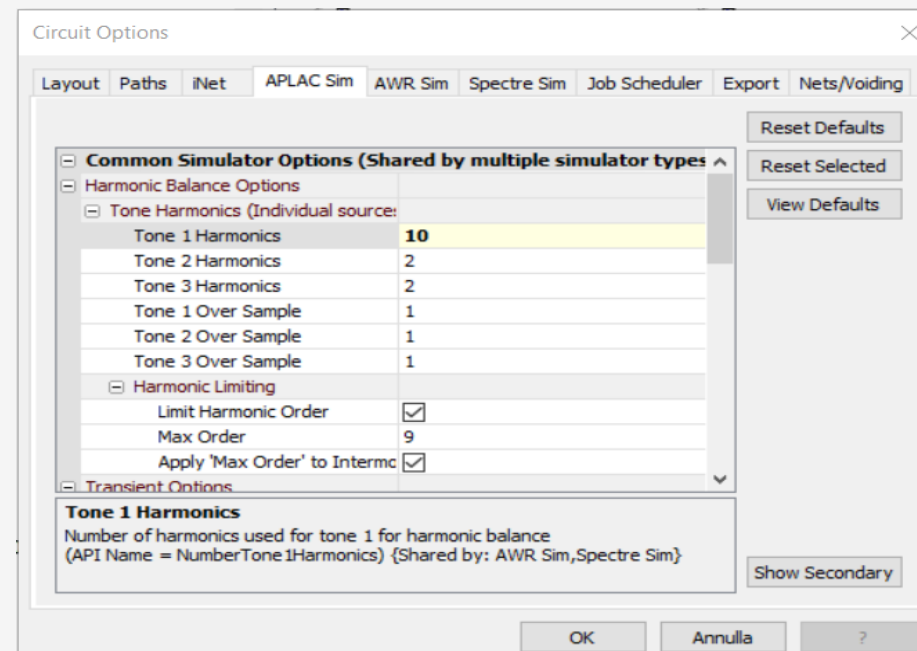
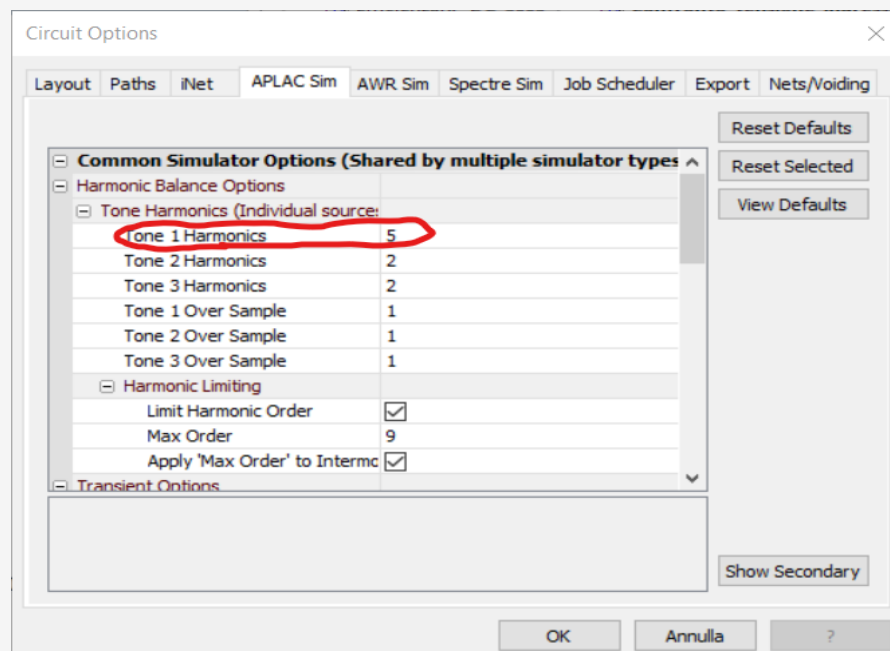


Circuito finale e risultati

Corrente in uscita paragonata con quella in ingresso al rettificatore a -10dBm nel dominio del tempo:

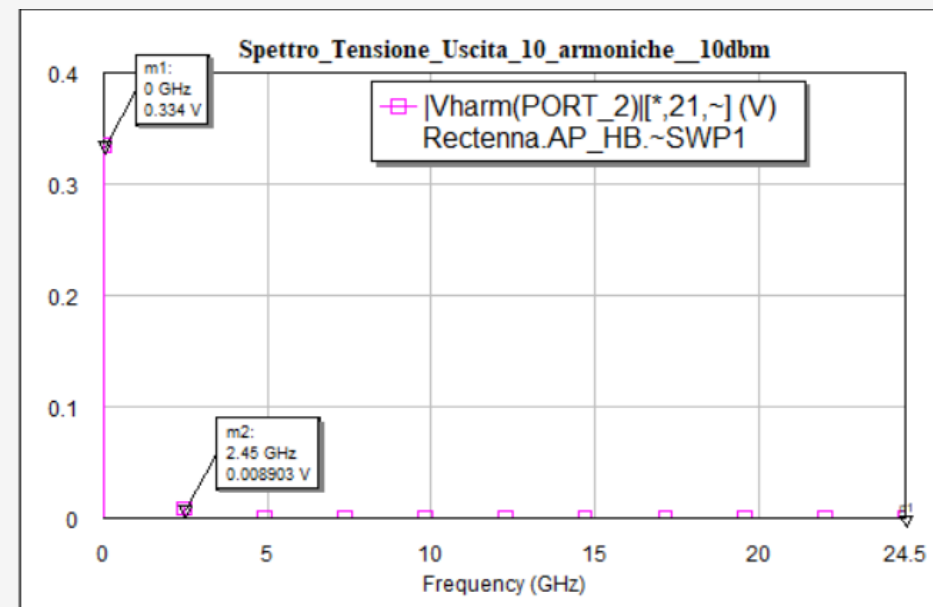
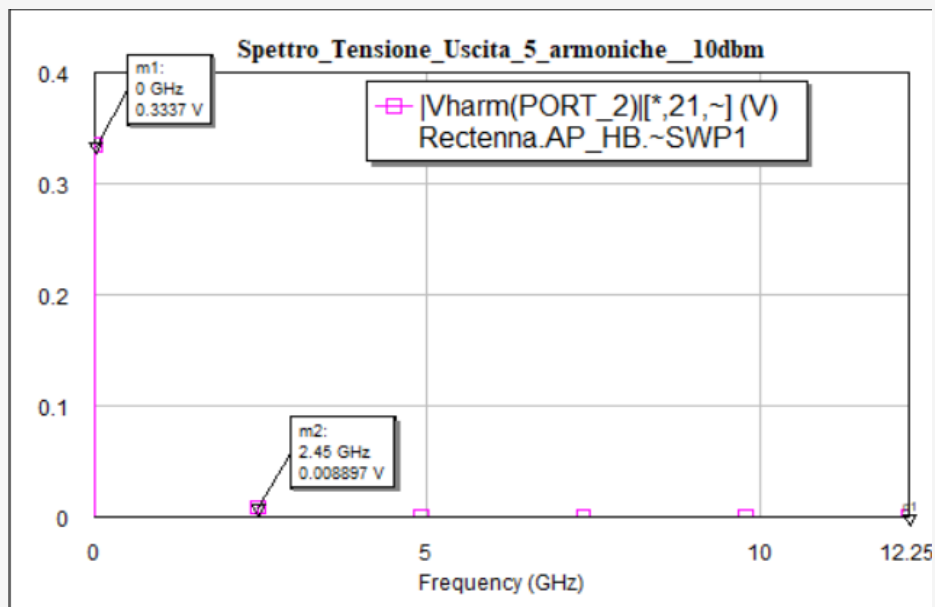


Circuito finale e risultati



Come ultimo test, abbiamo provato a inserire un maggior numero di armoniche nelle opzioni dell'harmonic balance. In particolare tutte le simulazioni effettuate sono state fatte con 5 armoniche (più la DC). Aumentando il numero di armoniche a 10, andremo infatti a valutare i contributi di un maggiore numero di armoniche alla fondamentale e alla DC, ottenendo risultati più precisi sulla efficacia della rettificazione.

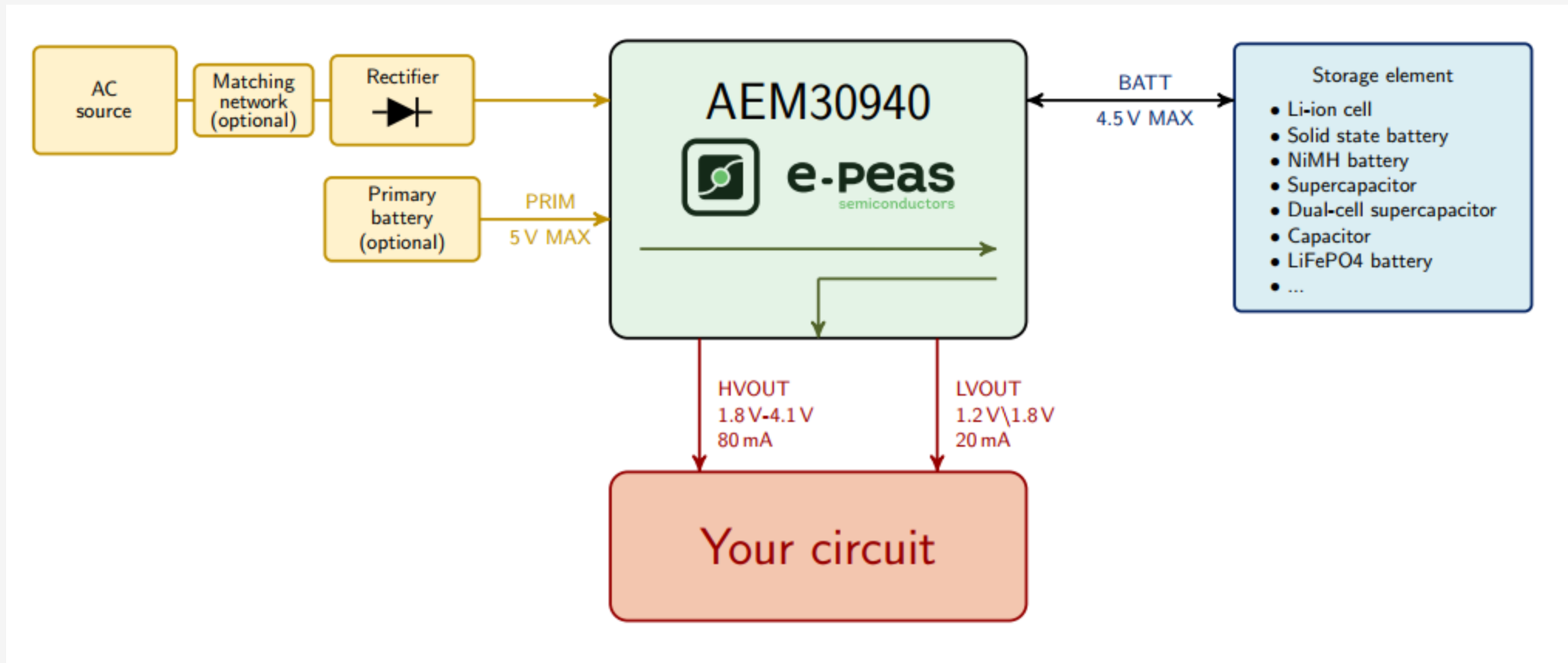
Circuito finale e risultati



In figura vengono mostrati due differenti grafici dello spettro di tensione in uscita per due simulazioni con 5 e 10 armoniche. Si può osservare che anche se minima vi è una differenza.

Esempio di applicazioni

Vari PMU per WPT generico (RF, PV, piezo, ...) da EM, Texas Instruments, E-peas, etc...



Esempio di applicazioni

Il PMU necessita:

ISTANTE	Vin [mV]	Pin [uW]	Nel nostro range
Regime	50	1	Sempre
Cold start	275	3	A partire da -13dBm

Dopodiché tutto dipende dall'applicazione (capacità storage, tensione di uscita, carichi, ...)