



IX Reunión Anual de los Entusistas de las Microondas

MicroMeet 2025

Radio-Comunicaciones ▪ Experimentación ▪ Técnica ▪ EME ▪ AmateurDSN





AMPLIFICADORES PARAMÉTRICOS

Gonzalo Carracedo (EA1IYR)

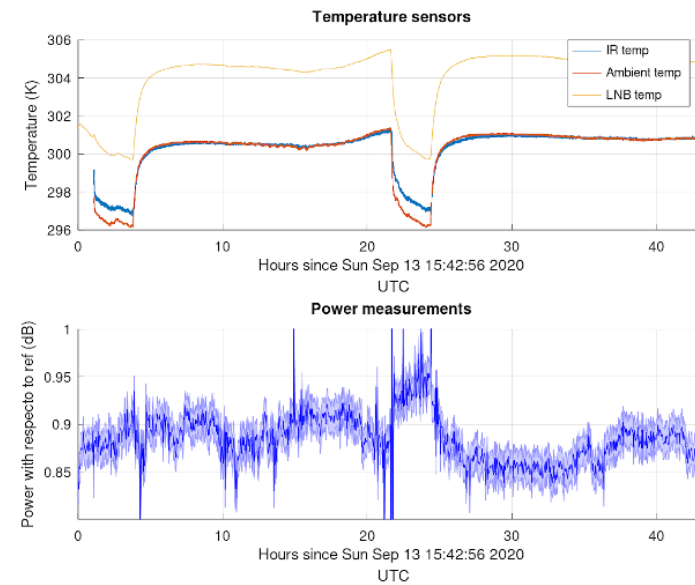
A decorative graphic consisting of several concentric, curved red lines that sweep across the left and bottom portions of the slide, creating a sense of motion and depth.

Gonzalo José Carracedo Carballal

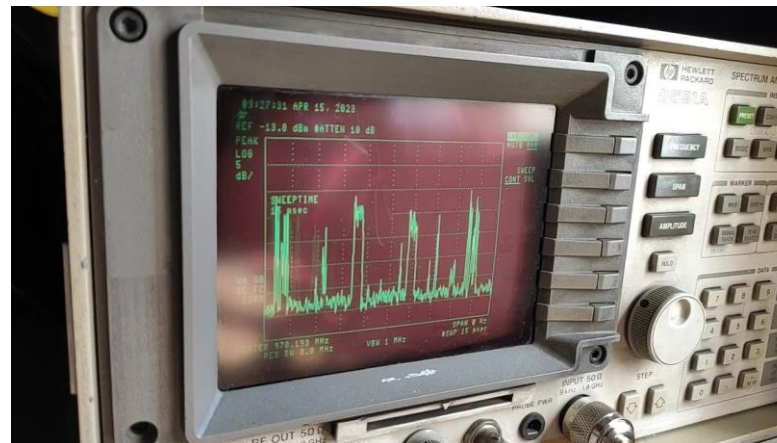
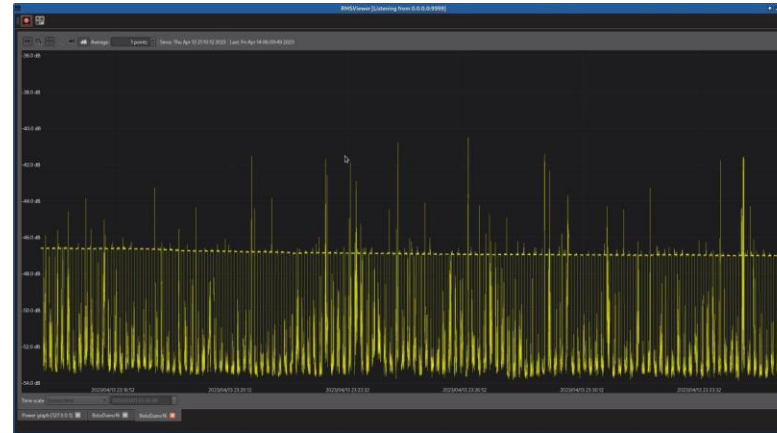
EA1IYR

Amplificación paramétrica contra el QRM

Una triste historia en 4 GHz



QRM por todas partes



Amplificación paramétrica

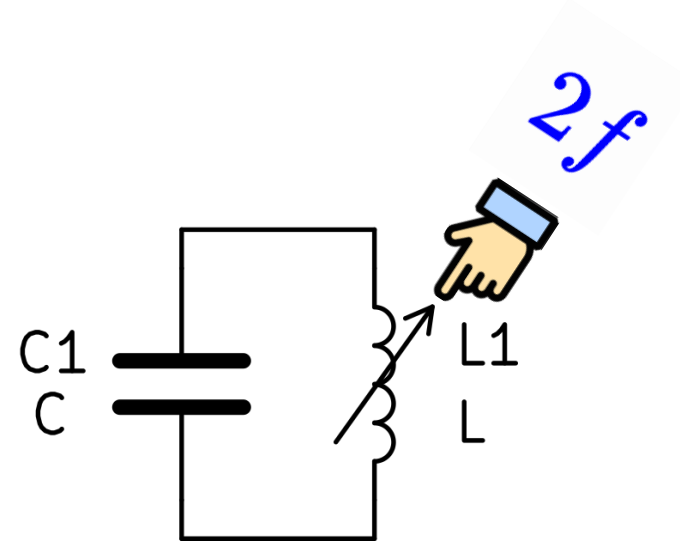
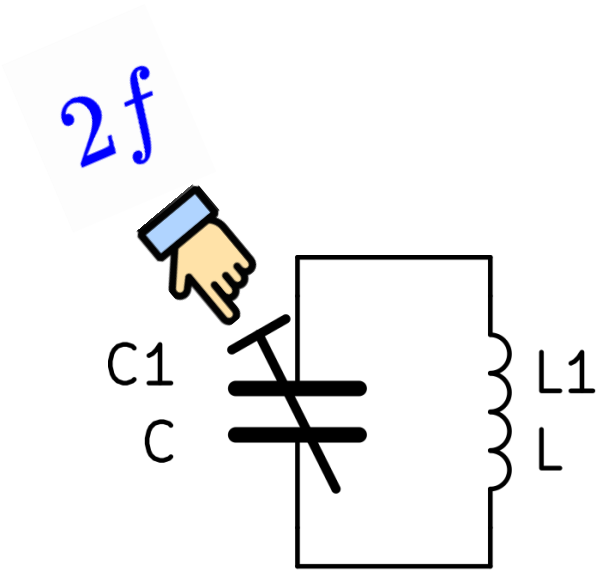
- Amplificación de señal basada en la **variación periódica** de uno de los **parámetros** que determinan la frecuencia de un resonador.
- Este resonador puede ser un **eléctrico** o **mecánico**.
 - **Mecánico:** K/M , g/L ...
 - **Eléctrico:** L/C , ϵ/μ ...

Amplificador mecánico



Amplificador eléctrico

- Variando una reactancia (L o C) de un resonador.
- **Muy bajo ruido** ya que se pueden construir **sin elementos resistivos**.
- Se suelen utilizar en **computadores cuánticos** para medir qubits.



Historia del amplificador paramétrico

1892	George Francis FitzGerald construye un paramp variando la inductancia con una dínamo.
1913-1915	Aplicación en telefonía por radio, usando no-linealidades del núcleo de un inductor.
1948	Aldert Van Ziel señala su potencial para la amplificación de bajo ruido.
1952	Desarrollo de las relaciones de Manley-Rowe en los laboratorios Bell.

Historia del amplificador paramétrico

1956	Se empiezan a desarrollar varactores capaces de funcionar en bandas de microondas.
1960-1980	Figuras de ruido de 1-2 dB, superan en microondas a los transistorizados.
1980...	Los HEMTs empiezan a ser mucho más prácticos y el amplificador paramétrico cae en el olvido.

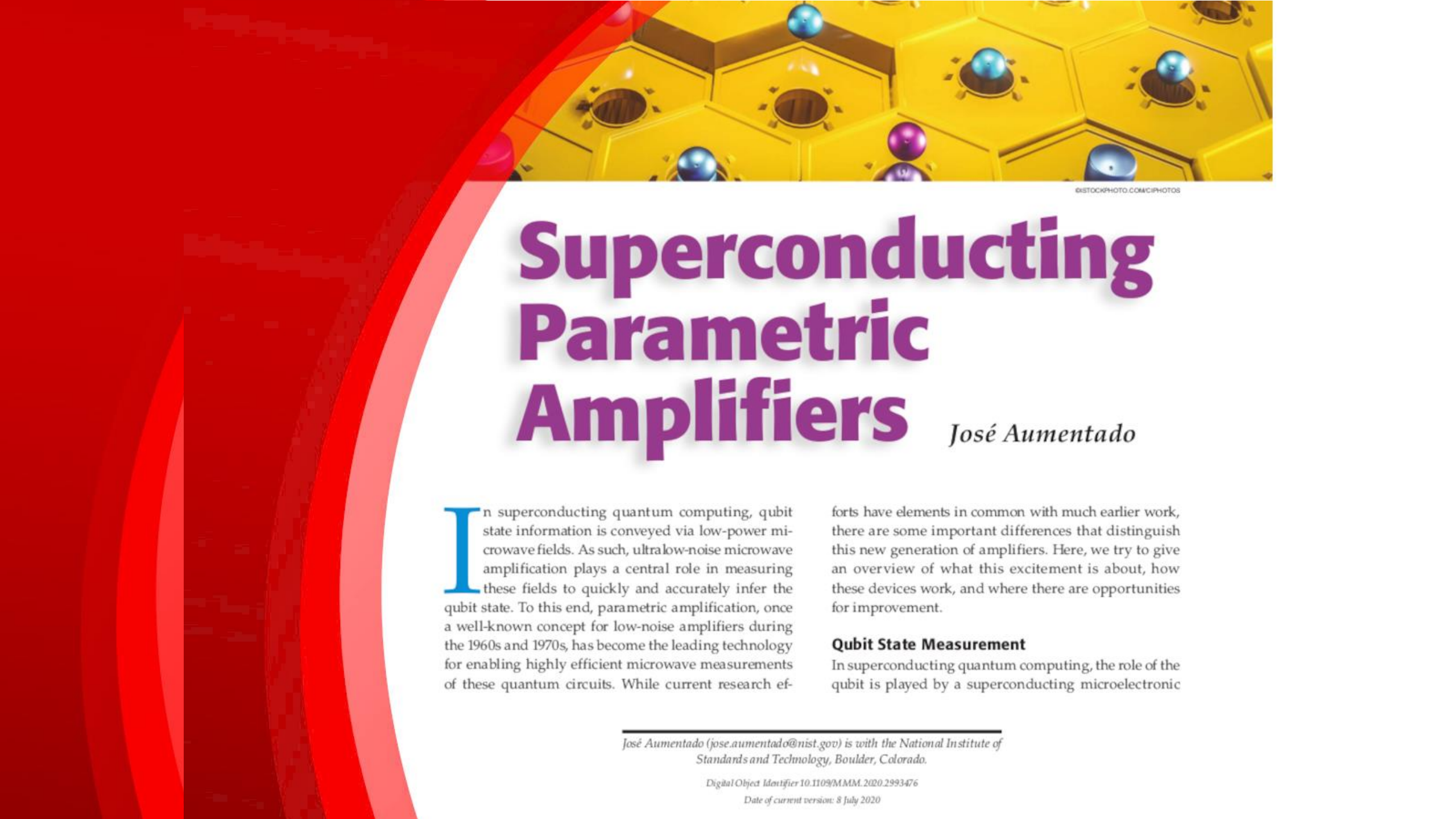
New amplifier
battles "noise"



Four-stage junction diode amplifier was developed at Bell Telephone Laboratories by Rudolf Engelbrecht for military applications. Operates on the "varactor" principle, utilizing the variable capacitance of diodes. With 400-mc. signal, the gain is 10 db. over the 100-mc. band.

Fast Forward hasta 2025

- Departamento de Instrumentación Avanzada del Centro de Astrobiología (CAB, CSIC-INTA)
 - Estamos investigando cosas superconductoras.
 - Ok, mola.
 - Ah, y también existe esto de los amplificadores paramétricos.
 - Huy, y eso qué es?????



Superconducting Parametric Amplifiers

José Aumentado

In superconducting quantum computing, qubit state information is conveyed via low-power microwave fields. As such, ultralow-noise microwave amplification plays a central role in measuring these fields to quickly and accurately infer the qubit state. To this end, parametric amplification, once a well-known concept for low-noise amplifiers during the 1960s and 1970s, has become the leading technology for enabling highly efficient microwave measurements of these quantum circuits. While current research ef-

forts have elements in common with much earlier work, there are some important differences that distinguish this new generation of amplifiers. Here, we try to give an overview of what this excitement is about, how these devices work, and where there are opportunities for improvement.

Qubit State Measurement

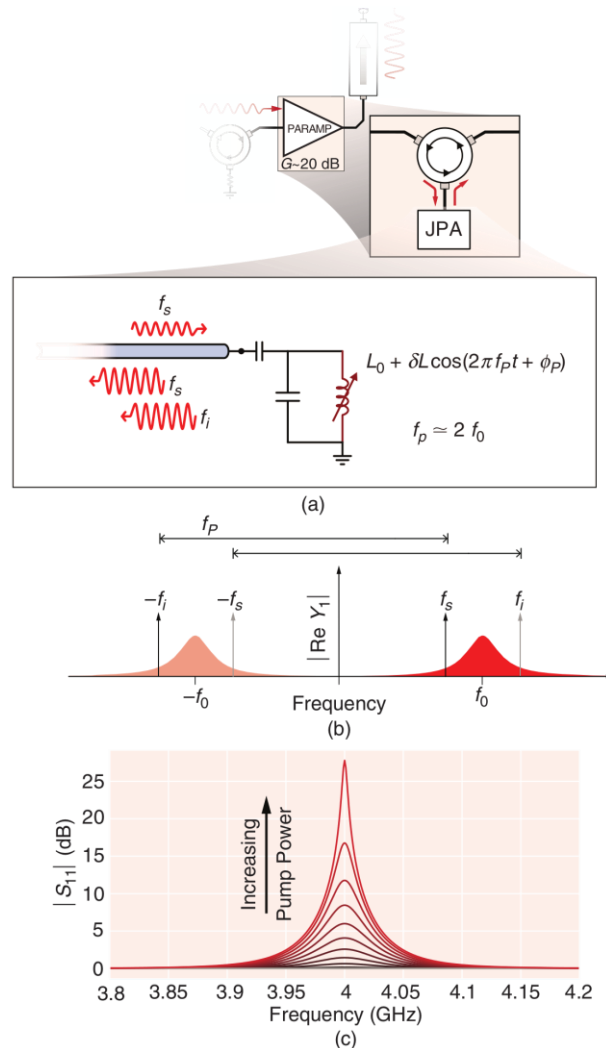
In superconducting quantum computing, the role of the qubit is played by a superconducting microelectronic

José Aumentado (jose.aumentado@nist.gov) is with the National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado.

Digital Object Identifier 10.1109/MMM.2020.2993476

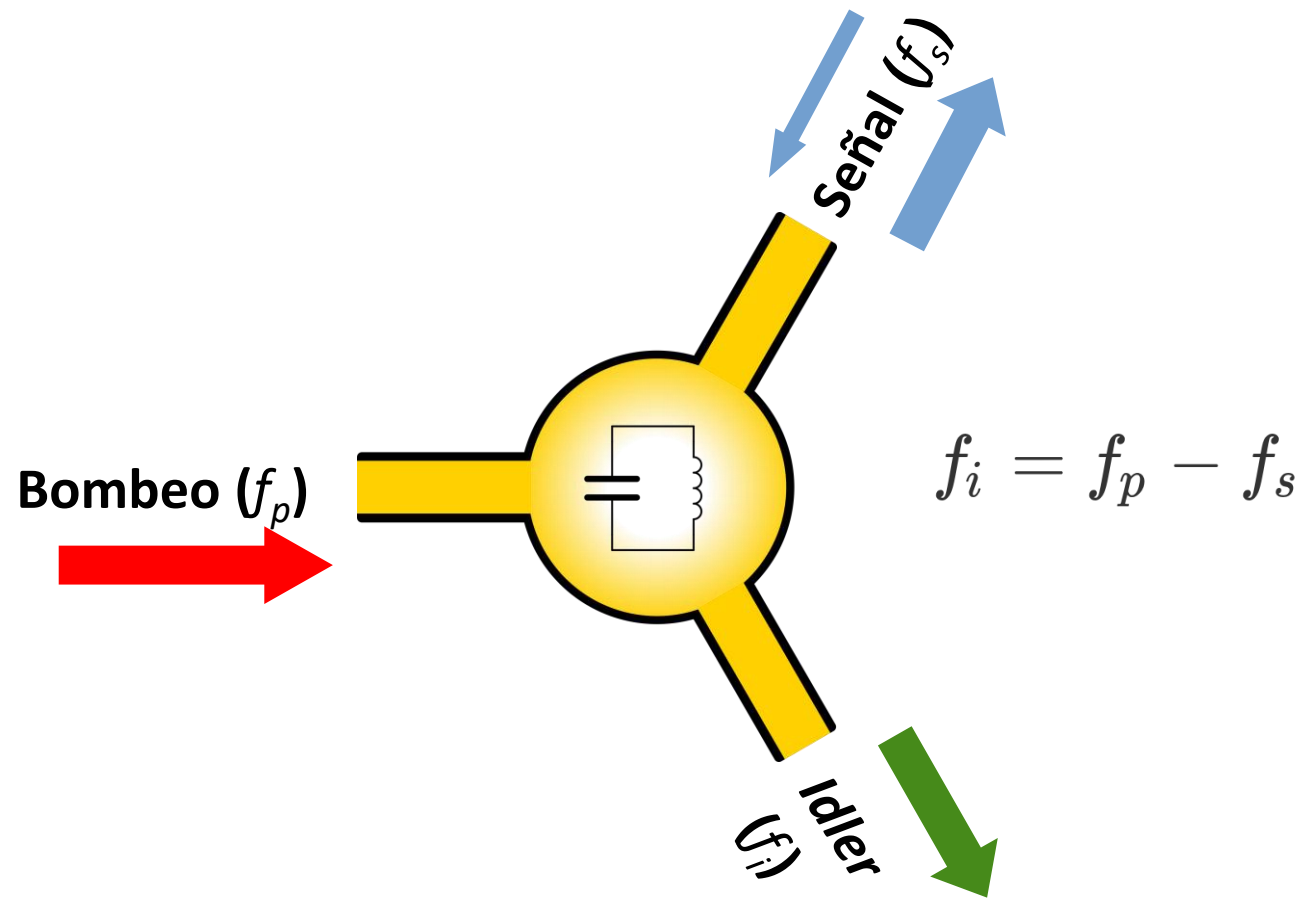
Date of current version: 8 July 2020

Amplificando con reactancias variables



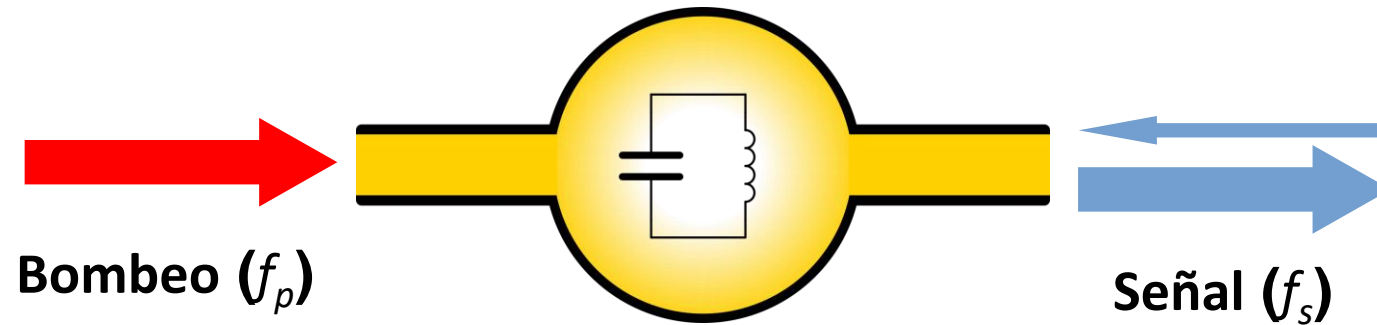
- Figure 2.** The degenerate paramp model circuit. (a) A signal propagating into an inductor–capacitor (LC) resonator is amplified by a mixing process generated by a modulated inductance, (b) connecting the signal to a negative-frequency sideband “idler.” Both the signal and the idler must be located within a linewidth of the LC resonance, indicated by the peaks in the real part of the circuit admittance. The modulated inductance can be implemented by a simple JJ circuit (see the text). (c) The reflection gain response as a function of signal frequency and increasing pump power.

Amplificación paramétrica *usual*



Amplificación paramétrica degenerada

$$f_p = 2f_s \iff f_i = f_s$$



¡Quiero hacer un paramp!

Objetivos a largo plazo

- Amplificador paramétrico en microondas para las bandas de 4 GHz y 1.42 GHz

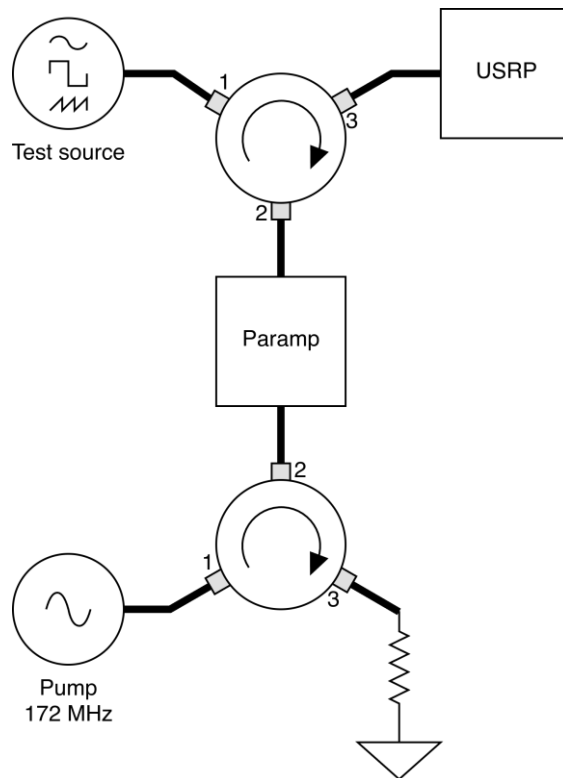
Objetivos a corto plazo

- Demostrador degenerado en VHF para 86 MHz
- Amplificación paramétrica
- Ganancia dependiente de la fase
- Compresión de ruido



Diseñando un amplificador paramétrico degenerado para 86 MHz

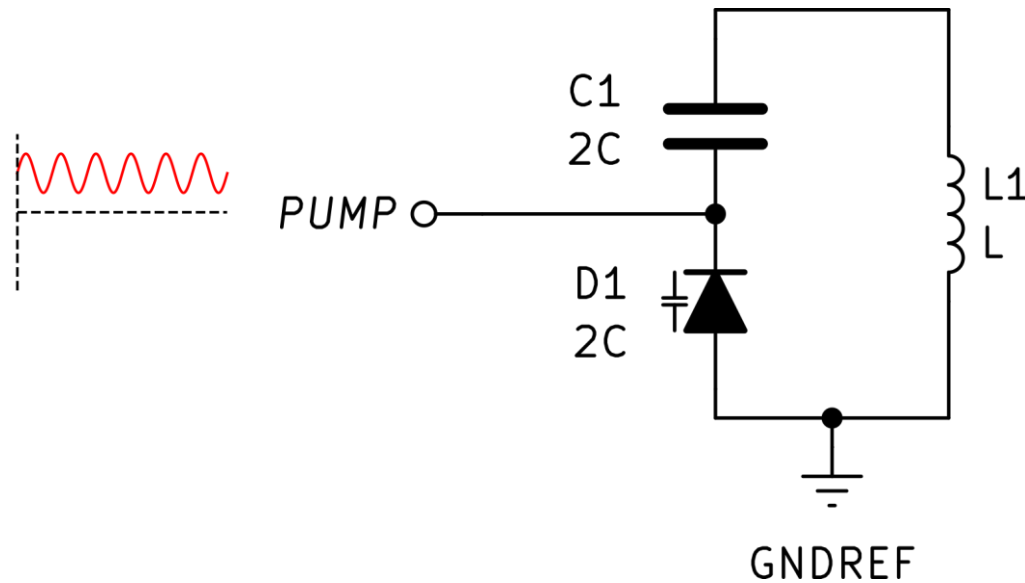
Diseño experimental



- **Circulador (1)** para separar la señal entrante de la reflejada
- **Circulador (2)** para disipar bombeo no absorbido por el amplificador
- **SDR** (USRP) y bomba bajo misma referencia (GPSDO)
- Distintas señales de prueba generadas mediante un **ADF4351** controlado por un Arduino

Punto de partida

- Tanque LC con capacitancia variable a través de un varactor **SMV1237-001LF**

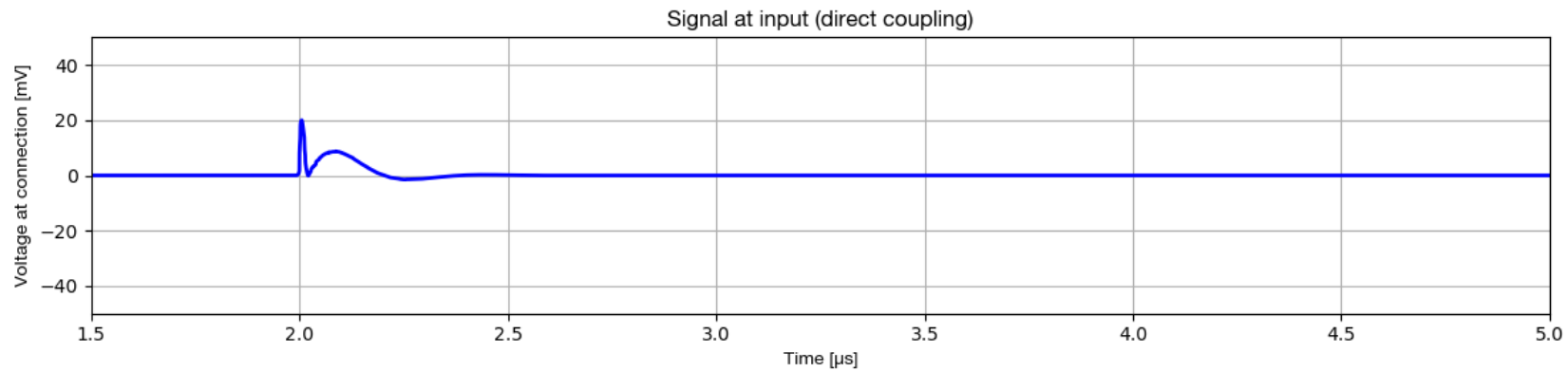
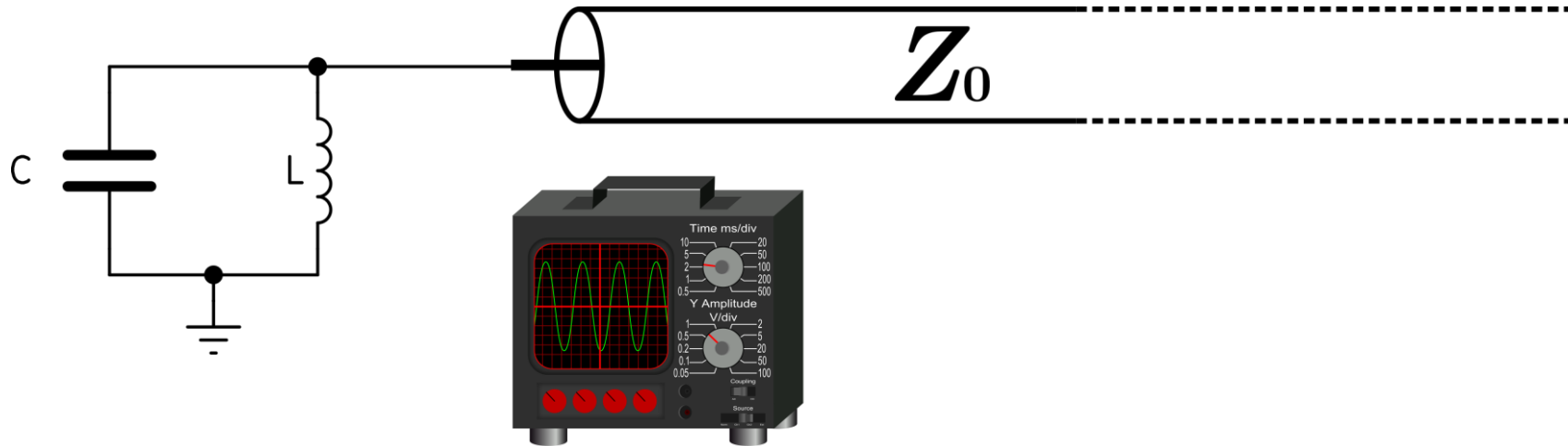


Description

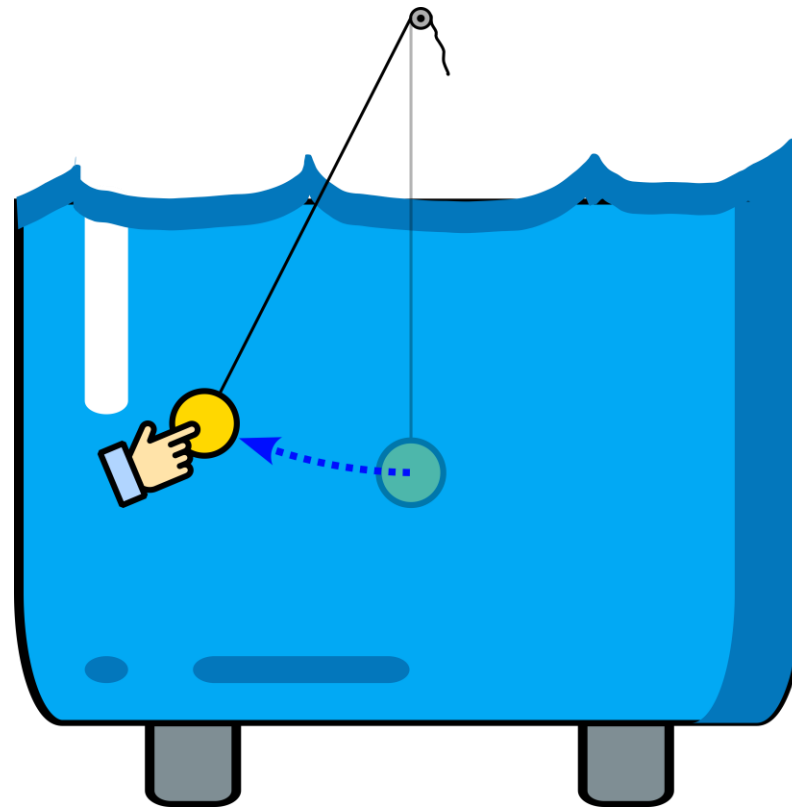
The SMV123x series of silicon hyperabrupt junction varactor diodes are designed for use in Voltage Controlled Oscillators (VCOs) with a low tuning voltage operation. The low resistance of these varactors makes them appropriate for high-Q resonators in wireless system VCOs to frequencies over 10 GHz. This family of varactors is characterized for capacitance and resistance over temperature.

Table 1 describes the various packages and markings of the SMV123x varactors.

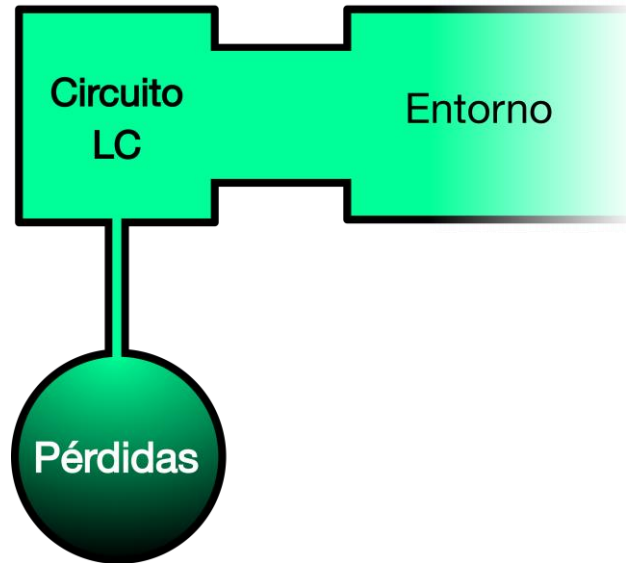
Acoplándonos al circuito



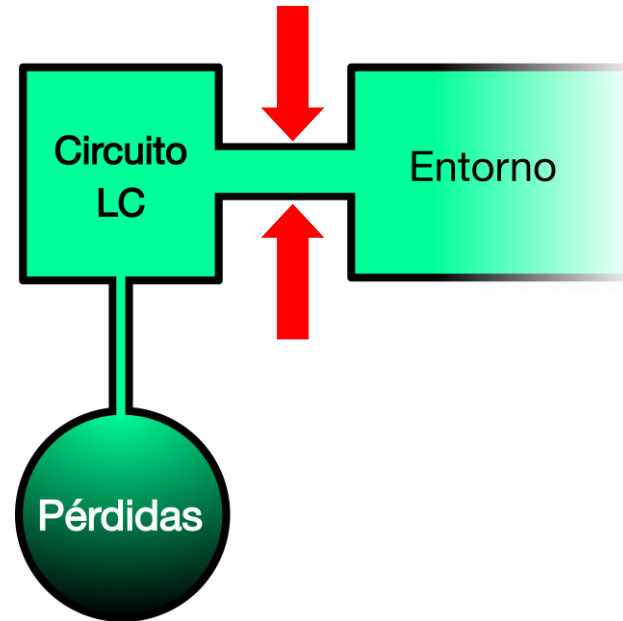
Sobreamortiguamiento



Acoplamiento débil

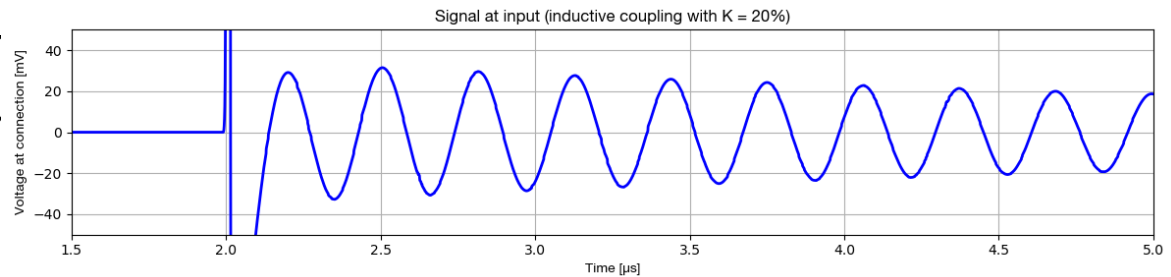
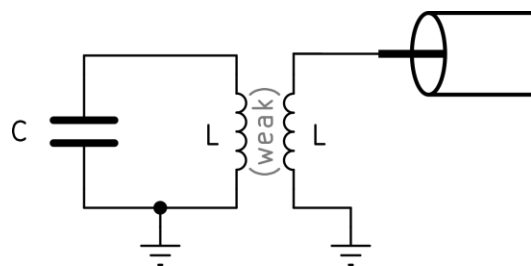
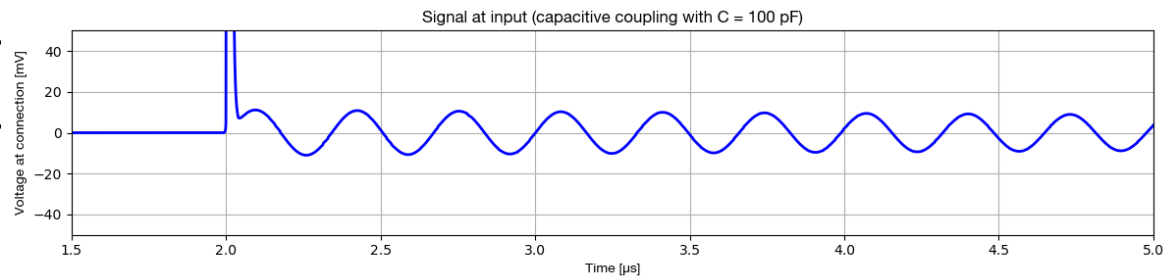
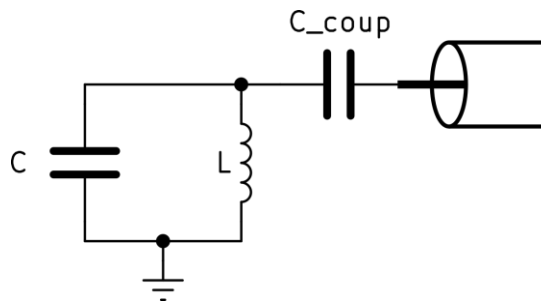
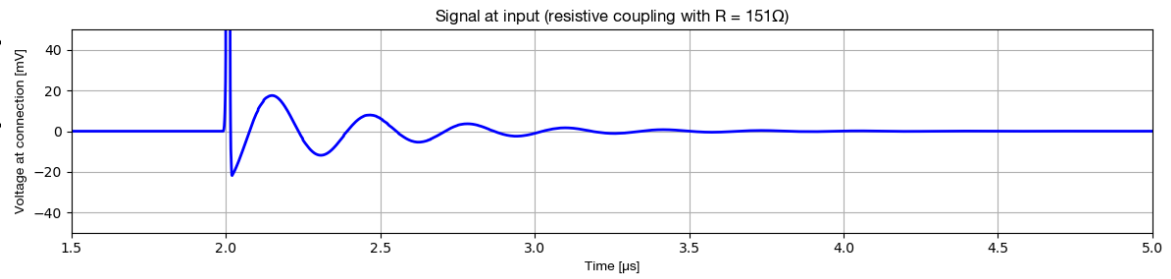
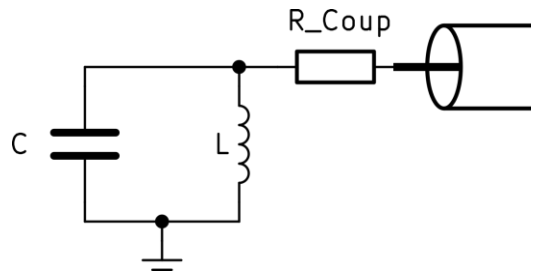


Circuito LC muy acoplado a su entorno. La energía que entra en el circuito LC lo abandona muy rápidamente, debido al fuerte acoplamiento a su entorno. Este rápido vaciado se observa como un circuito con un Q bastante bajo (un ancho de banda bastante alto).



Circuito LC poco acoplado a su entorno. La energía entra (y sale) a un ritmo muy lento. El Q es bastante alto (el ancho de banda bastante bajo) o, en otras palabras, las oscilaciones pueden prolongarse más en el tiempo hasta que se estabilizan con su entorno.

Acoplamiento débil



Algunos problemas

Simulaciones poco halagüeñas

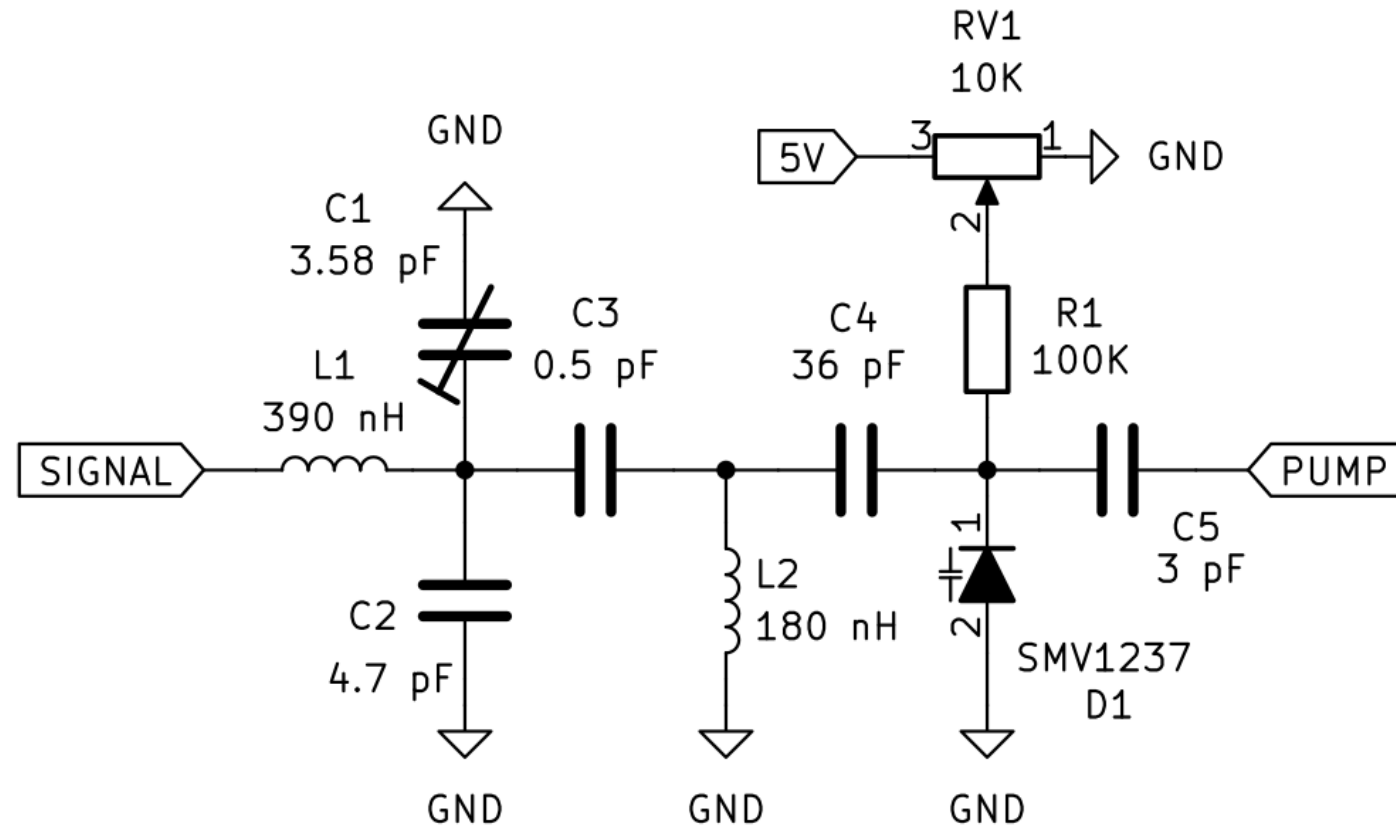
- Incluso con un condensador de 0.5 pF tenía muy poquita amplificación.

Una solución poco satisfactoria

- Una red-L LC a la entrada con la intuición de *(des)adaptar impedancias*.
- **Funciona**, pero posiblemente esta no sea la mejor forma de entender el circuito.

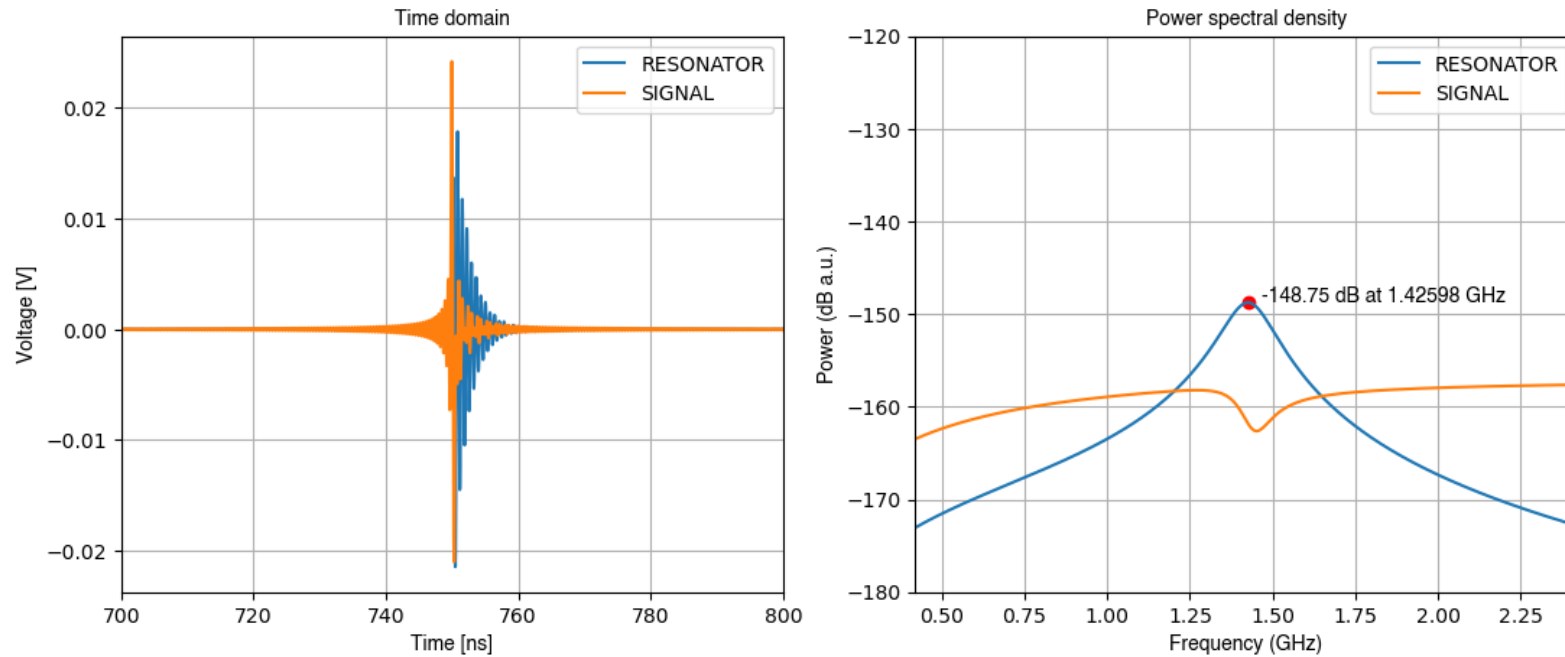
Creo entender el problema: Sesión de preguntas al acabar. **Pista:** tiene que ver con haber elegido un condensador.

El circuito final



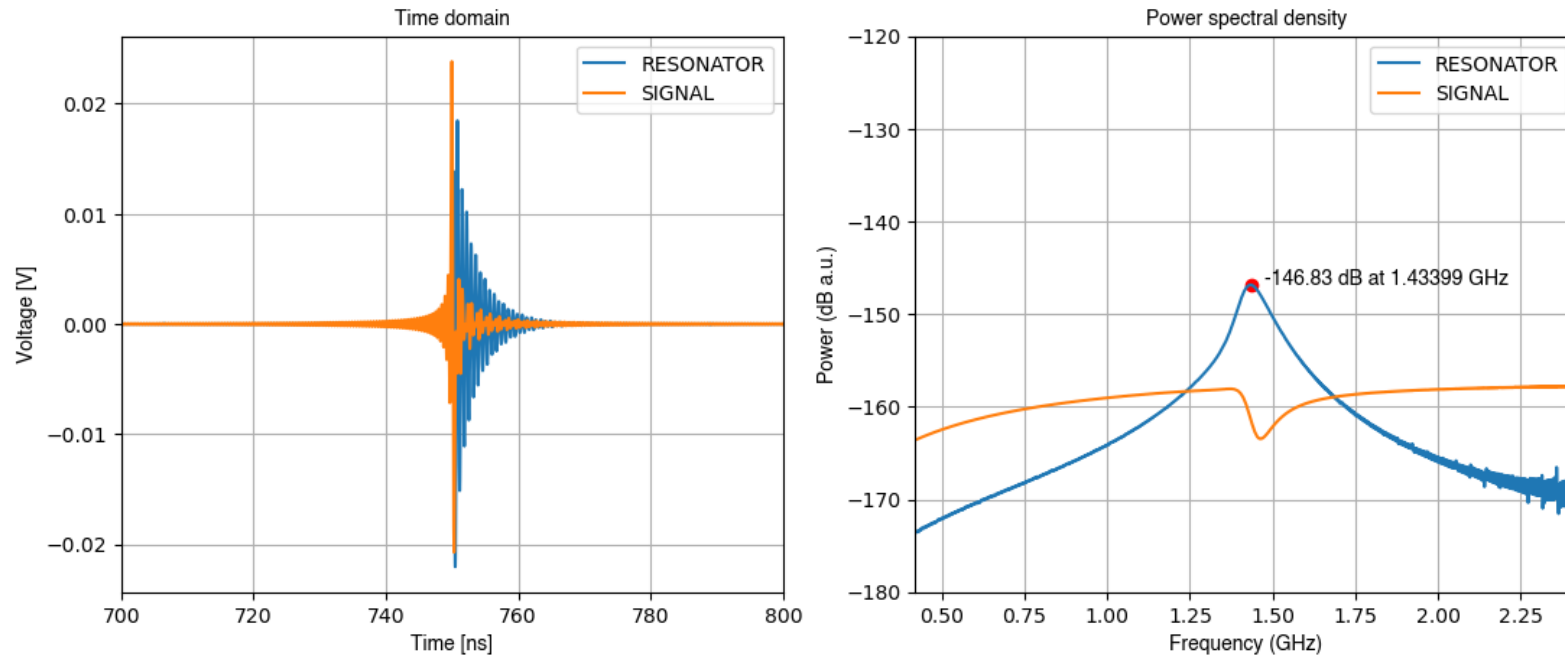
Simulaciones (voltaje)

Bomba desactivada



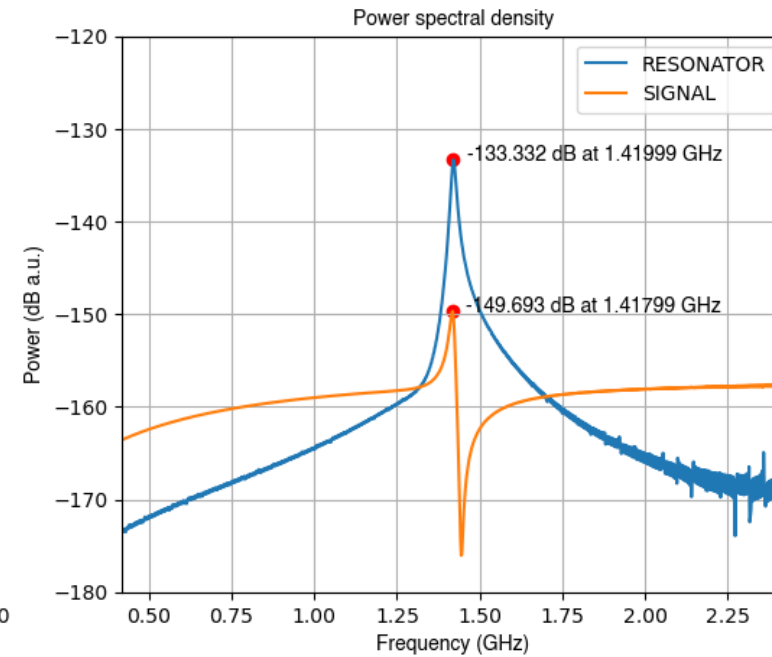
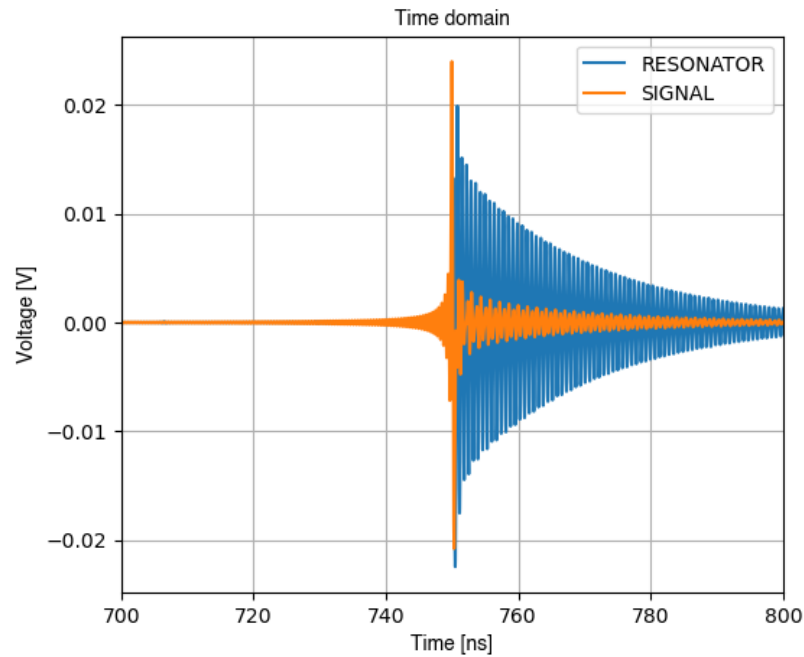
Simulaciones (voltaje)

Bomba a 2V

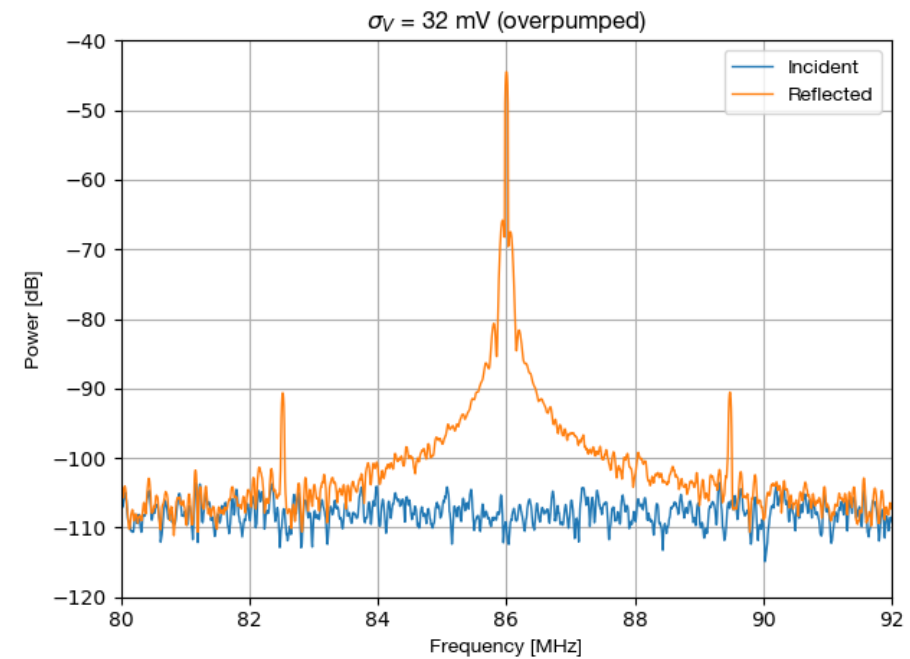
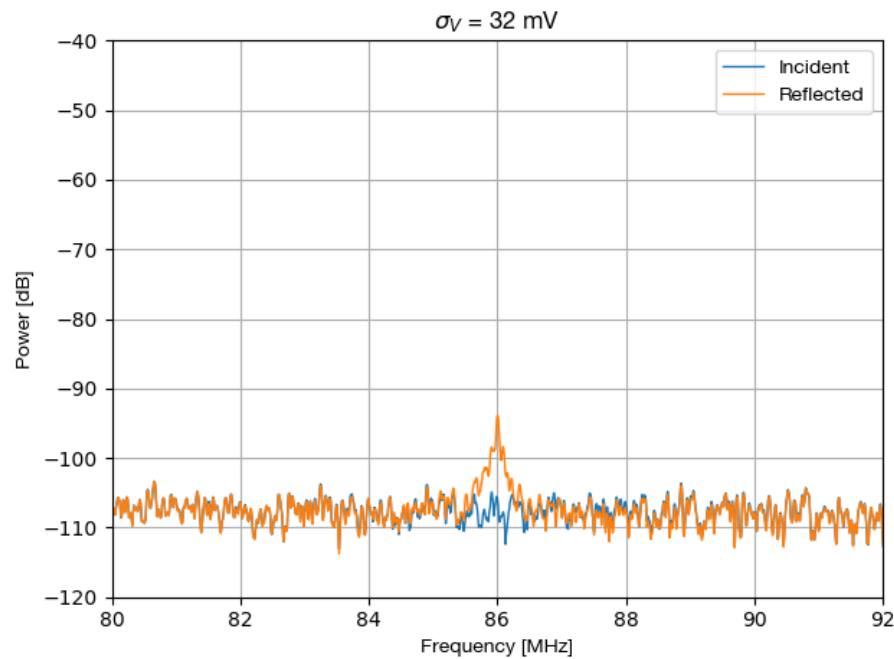


Simulaciones (voltaje)

Bomba a 4.5V

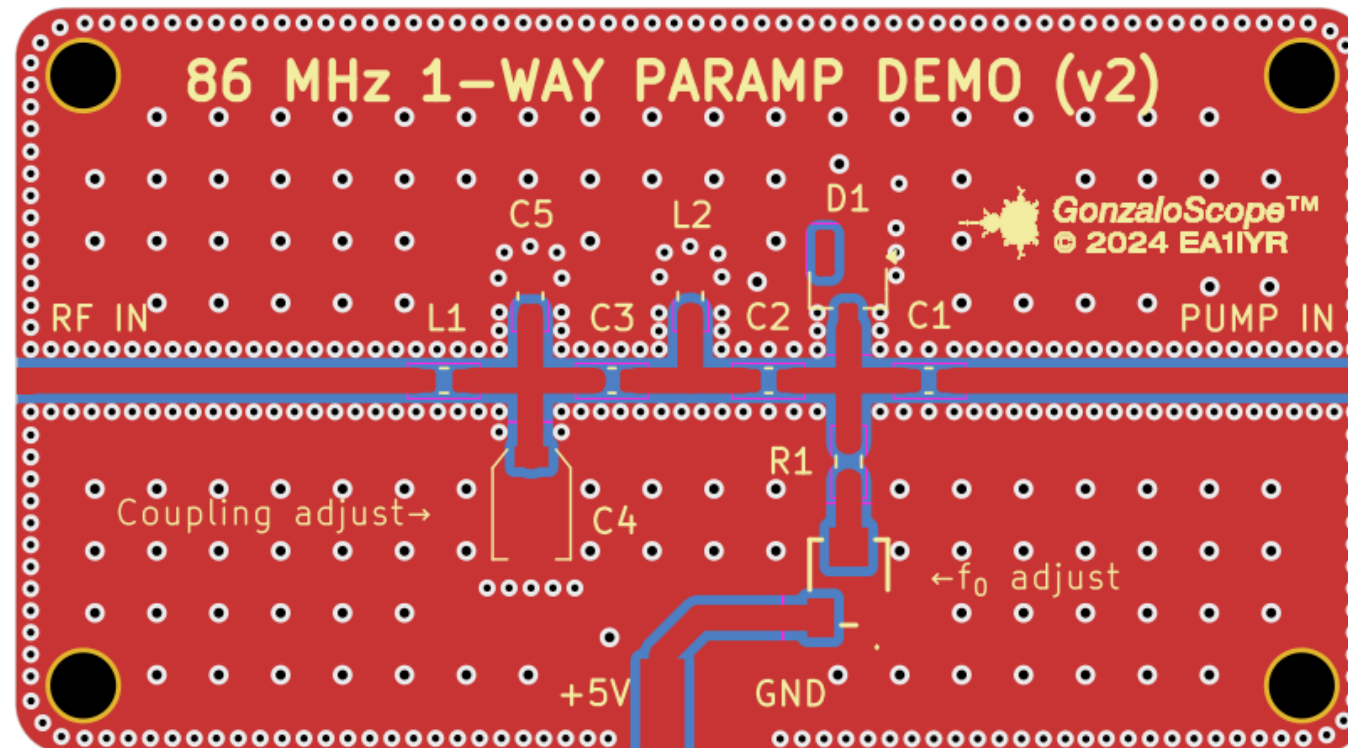


Simulaciones (P_i , P_r)



Diseño PCB (KiCad)

- Usando la plantilla de Alex **EA4BFK** para una caja de aluminio de AliExpress



Fabricación PCB

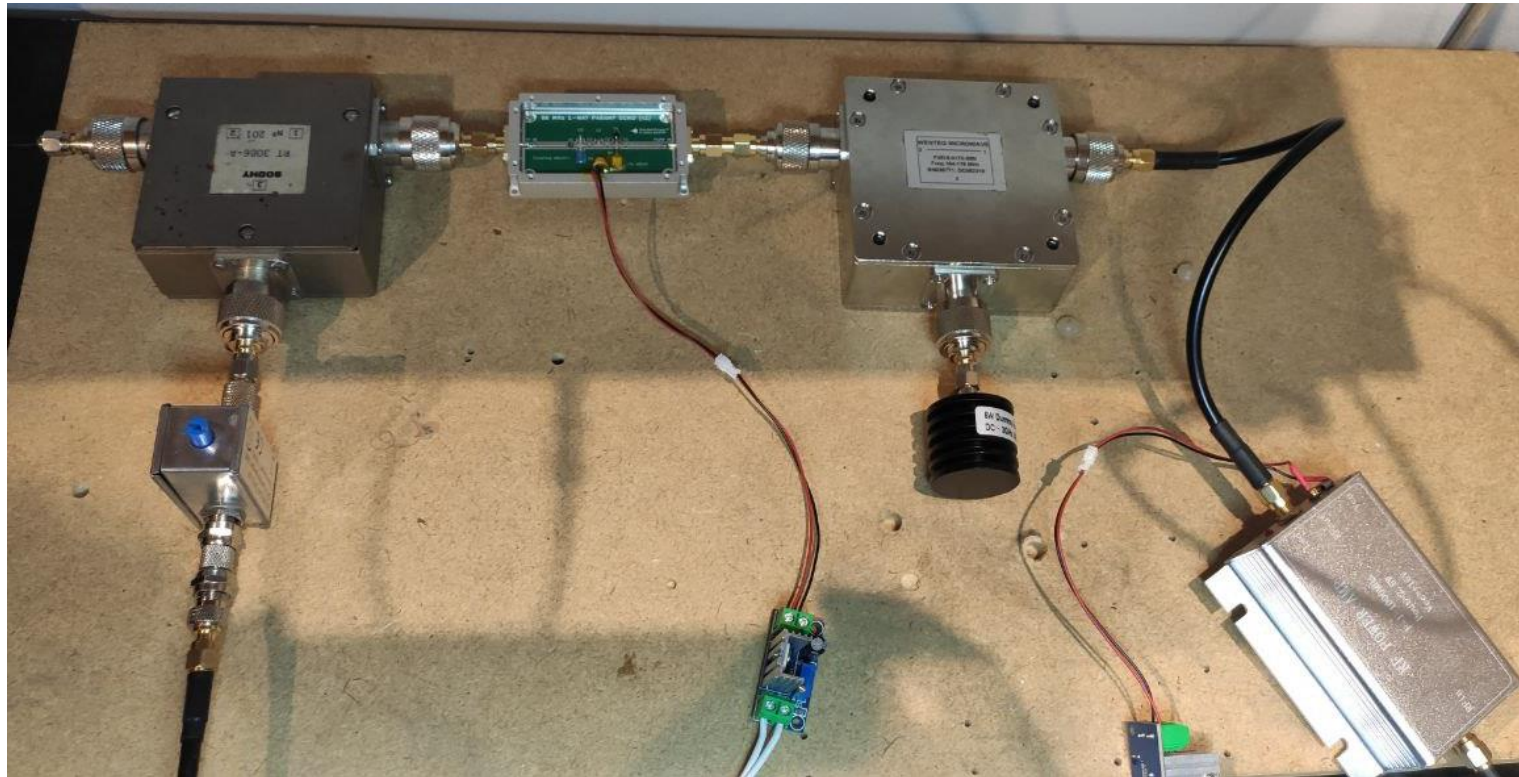


Montaje de prueba

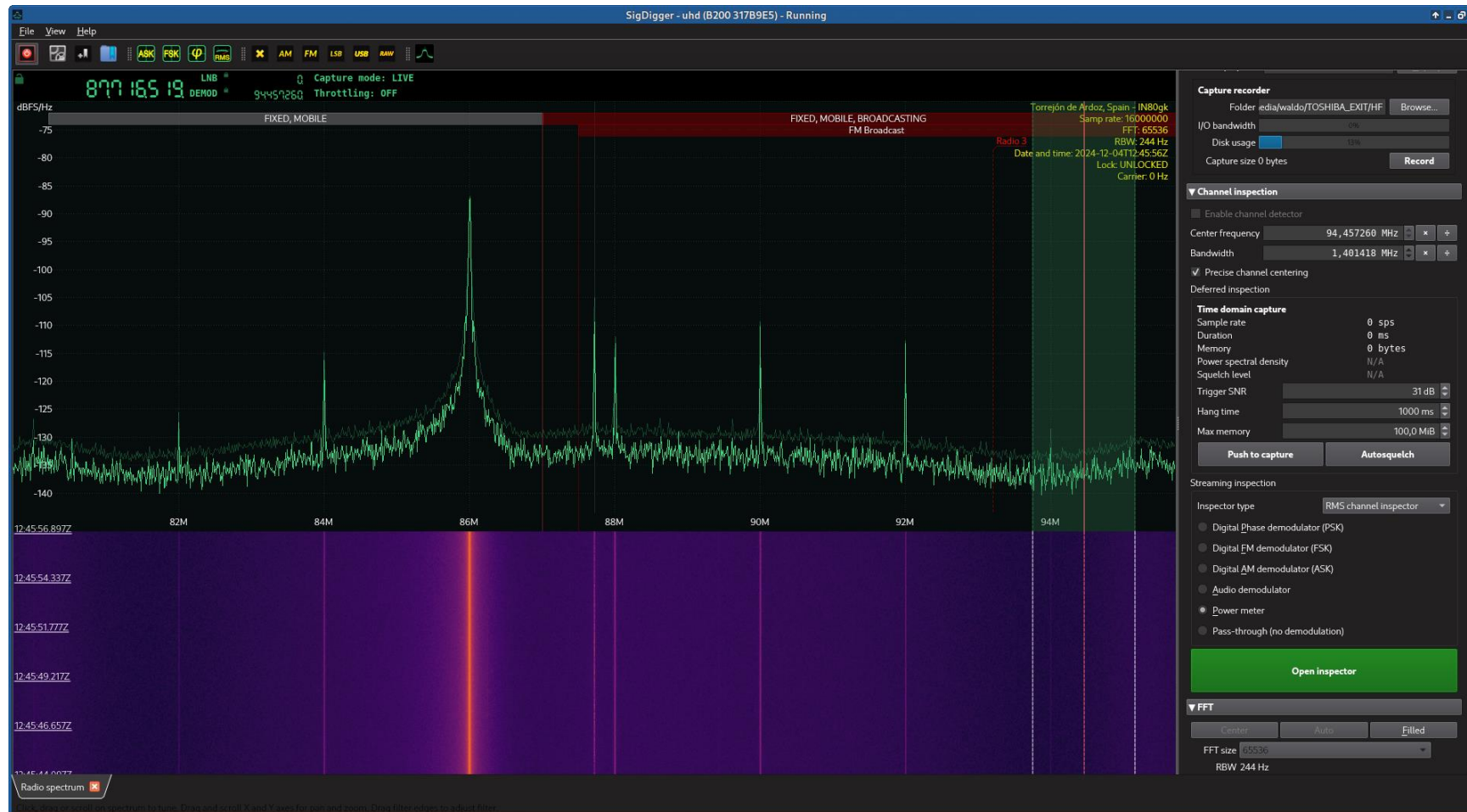
- El montaje final no es tan cutre, lo prometo. Este es uno abierto para jugar.



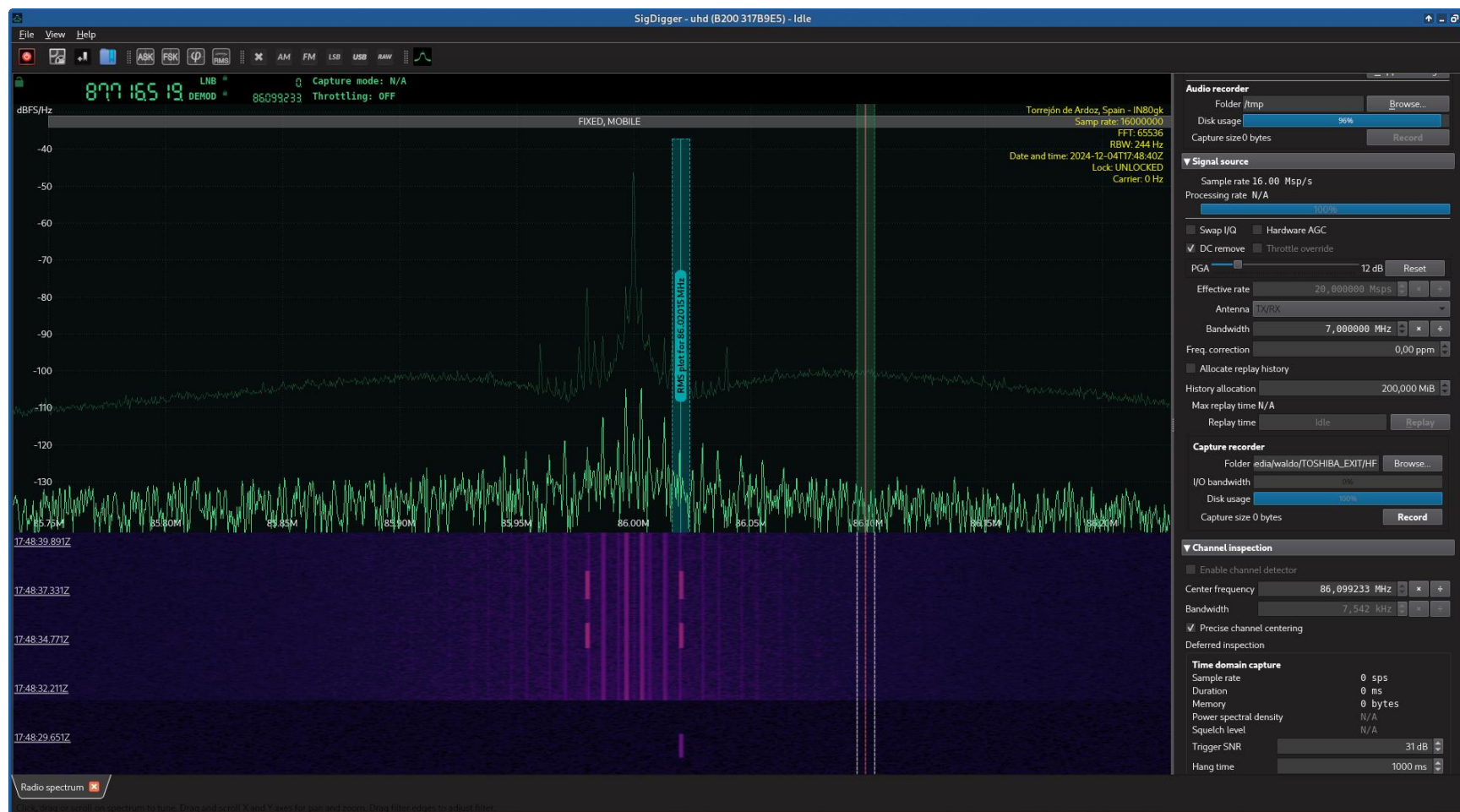
Montaje experimental



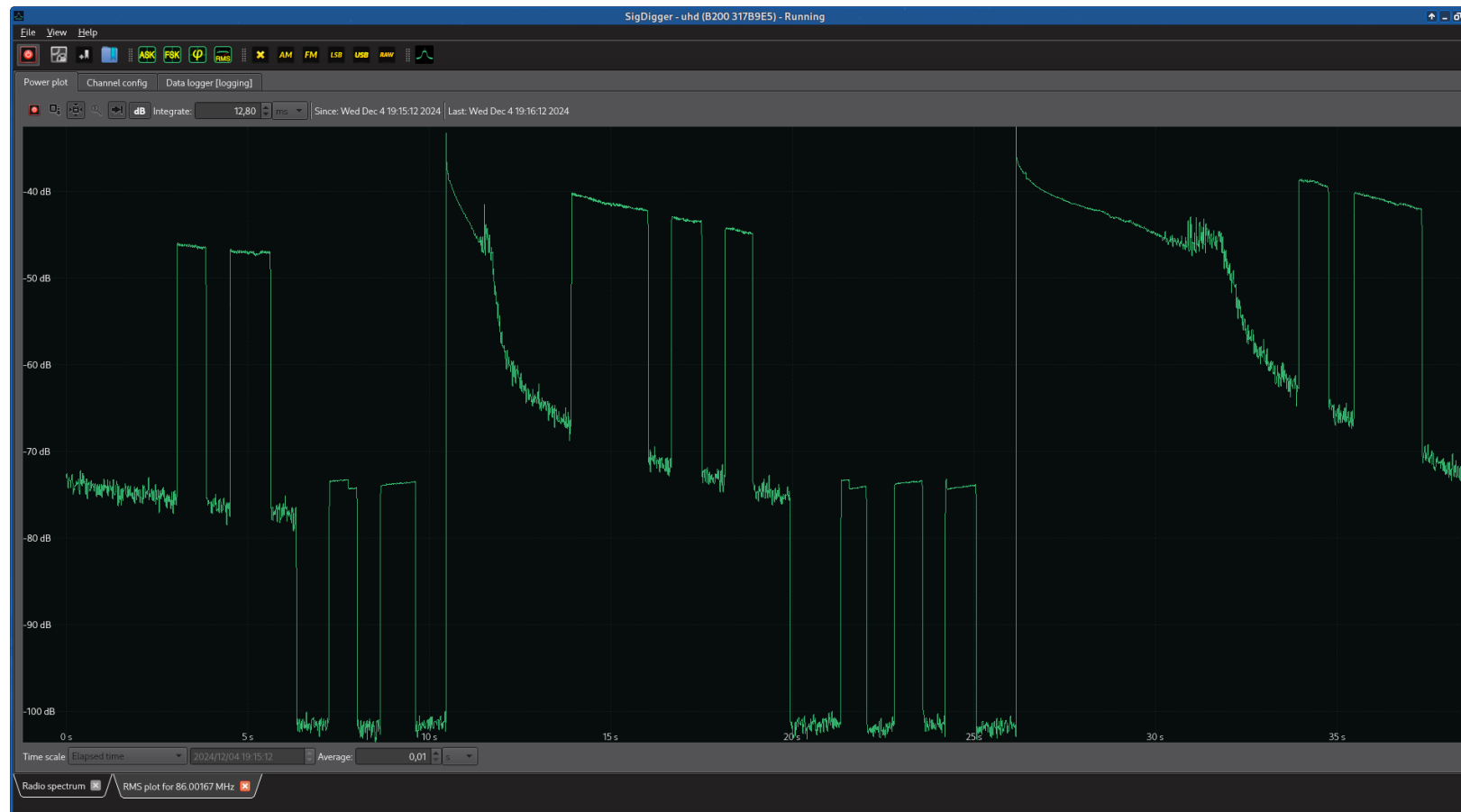
Resultados



Resultados



Resultados



Conclusiones

Se ha observado amplificación paramétrica

- ¡Picos de ganancia de 30 dBs!
- Amplificación dependiente de la ganancia, compresión de ruido.
- Ganancia inestable posiblemente debido a desintonización del resonador. ¿Calentamiento del varactor?

Problemas por resolver

- Esta red LC no me gusta porque no la entiendo perfectamente.
- ¿Cómo adaptas un circuito cuyo S_{11} ideal es 0 dB?
 - De acuerdo a un compañero: mejor adaptación no implica menor ruido
 - ¿Qué quiere decir siquiera “adaptar” en este contexto?



Material adicional

El problema del Q

- Incluso con 0.5 pF delante del resonador, tengo un Q muy bajo.
 - Este Q debe entenderse **acoplado a la línea**.
 - El Q ideal de este circuito es infinito.
- Q muy bajo implica **poca amplificación a la misma potencia de bombeo**.
- La red LC de la entrada parece incrementar el Q de algún modo.
 - Circuito con **dos polos**. No trivial.
 - ¿Quizá se deba entender como dos resonadores un poco acoplados capacitivamente?
- ¿Qué sucede con los otros puertos del resonador? P ej, la bomba. La mayor parte de la energía parece irse por ahí.

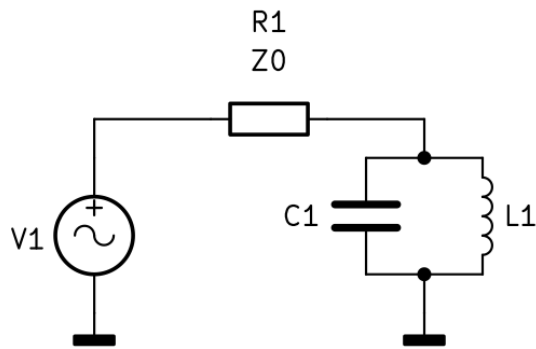
El problema del Q (II)

- Supongamos un tanque LC sin el condensador de desacoplo.
 - Si yo fuerzo un voltaje AC a la resonancia, el tanque se carga **hasta una energía dada**.
 - El flujo neto de corriente desde la fuente de AC al tanque, **en todo momento**, es 0.
 - Esto implica que, **en resonancia**, no hay intercambio neto de energía entre el tanque y el entorno.
 - ¿Cómo controlo a qué velocidad se carga / descarga?
- La teoría intenta explicar estos amplificadores como una **resistencia negativa**.
 - Está claro que viene del varactor, pero: ¿cómo cuantifico esta resistencia negativa?

Lo que creo que hice mal

Un ejemplo del mundo real

- Un tanque LC lo voy a alimentar siempre a través de una fuente de señal con una impedancia de 50Ω
- Este sistema entero ya no es un tanque LC. Es un circuito RLC con un factor de calidad bien entendido.
- Para mi LC *tal cual*, $Q=0.5$. O sea, $BW=43$ MHz. **Mal.**

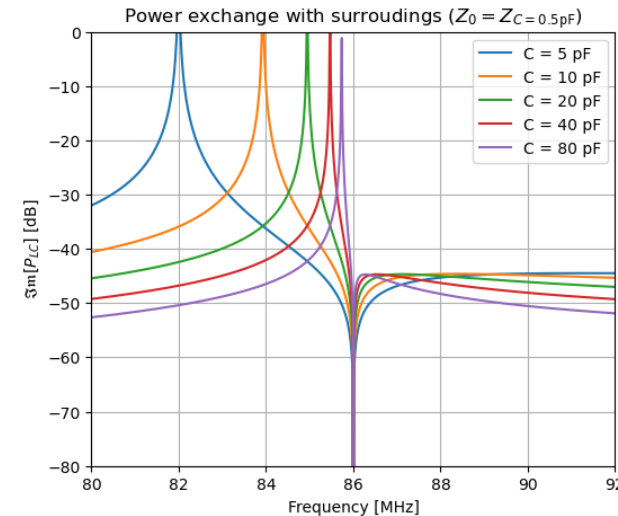
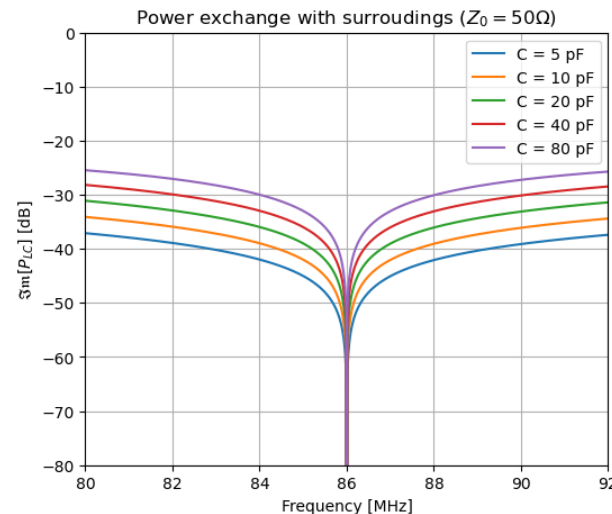


$$Z_d = \sqrt{\frac{L}{C}}$$
$$Q = Z_0 \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{Z_0}{Z_d}$$

Acople capacitivo

El acople capacitivo tampoco parece ser muy buena idea

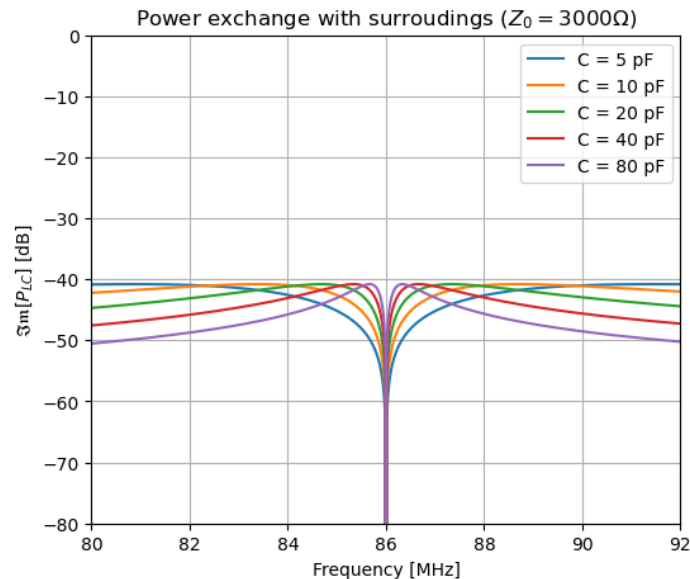
- Pasamos a una respuesta en frecuencia más complicada
- El circuito tiene una frecuencia de impedancia infinita, y otra de impedancia nula.
- Mi "adaptador" solo está compensando un desastre que yo mismo introduje.



Mi propuesta

Take home message: si quieres Q , mete C .

- El producto $L \times C$ determina la frecuencia de resonancia.
- El cociente de L/C determina **la impedancia crítica (Z_d)**.
- Pero es que Q es proporcional al inverso de Z_d .
- Conclusión: necesito **más varactores en paralelo**.



$$Z_d = \sqrt{\frac{L}{C}}$$
$$Q = Z_0 \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{Z_0}{Z_d}$$

Otras preguntas

- De acuerdo a un compañero de trabajo, los amplificadores paramétricos usados en QC tienen el siguiente dilema:
 - O bajas la adaptación.
 - O bajas el ruido.
- ¿En qué se fundamenta?
- ¿Qué pasa si me adapto a la impedancia de pérdidas del circuito?
- ¿Cómo me adapto a una resistencia negativa?