

**DISEÑO DE UN FILTRO POLIFÁSICO
ACTIVO EN TECNOLOGÍA SiGe 0.35 μm
PARA UN RECEPTOR BASADO EN EL
ESTÁNDAR IEEE 802.11a**

Autor: D. Tamara Delgado Alemán

Titulación: Sistemas Electrónicos

Tutores: Francisco Javier del Pino Suárez

Sunil Lalchand Khemchandani



Índice

BLOQUE I: Introducción

Introducción
Receptor de WLAN
Objetivos

BLOQUE II: Teoría y diseño de filtros paso bajo

Teoría general sobre filtros integrados
Diseño de filtros pasivos
Filtros Gm-C

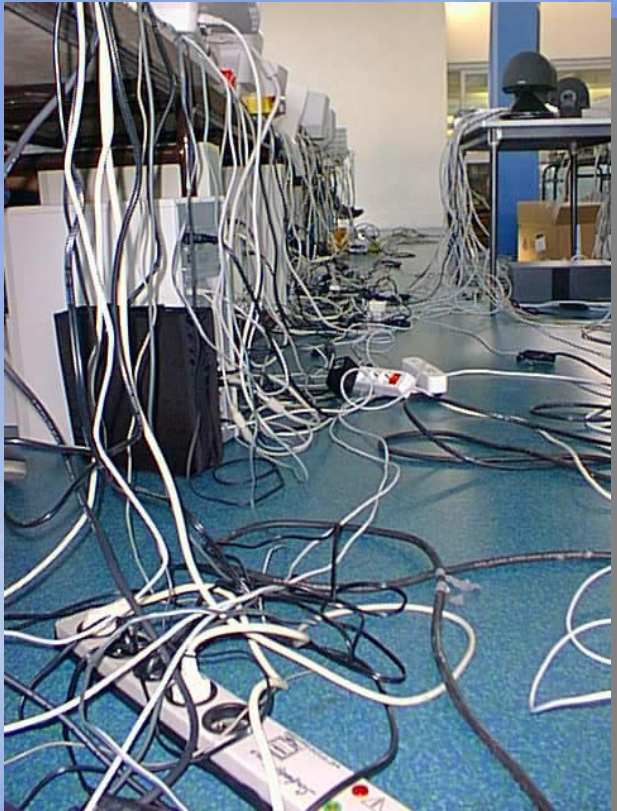
BLOQUE III: Desarrollo del proyecto

Transconductor real de Nauta
Filtros polifásicos

BLOQUE IV: Conclusión

Conclusiones
Presupuesto

Introducción



Ventajas

Movilidad

Instalación rápida y sencilla

Coste reducido

Escalabilidad

Índice

BLOQUE I: Introducción

Introducción

Receptor de WLAN

Objetivos

BLOQUE II: Teoría y diseño de filtros paso bajo

Teoría general sobre filtros integrados

Diseño de filtros pasivos

Filtros Gm-C

BLOQUE III: Desarrollo del proyecto

Transconductor real de Nauta

Filtros polifásicos

BLOQUE IV: Conclusión

Conclusiones

Presupuesto

Receptor de WLAN

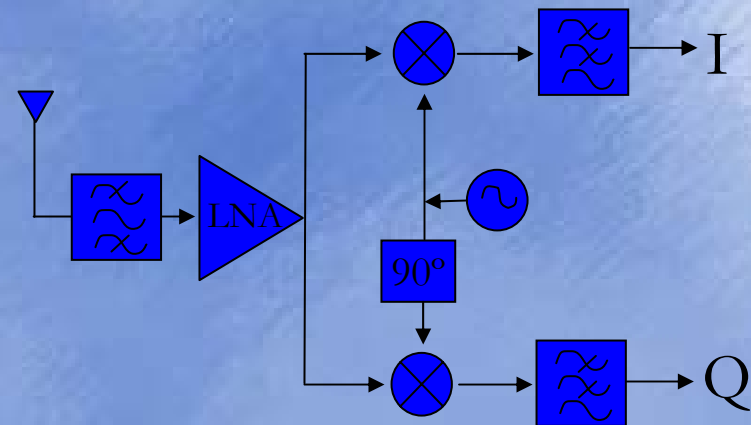
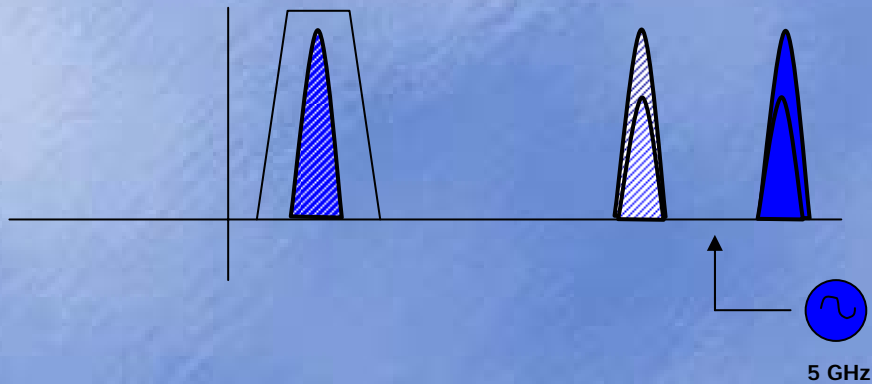
Estándar 802.11a

Velocidad máxima: 54Mbps

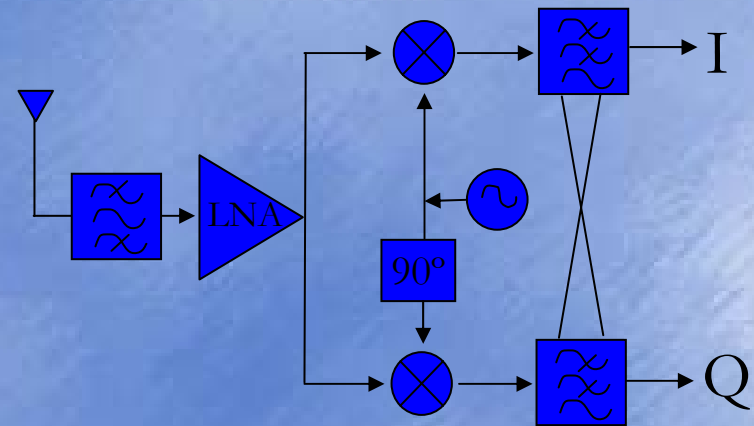
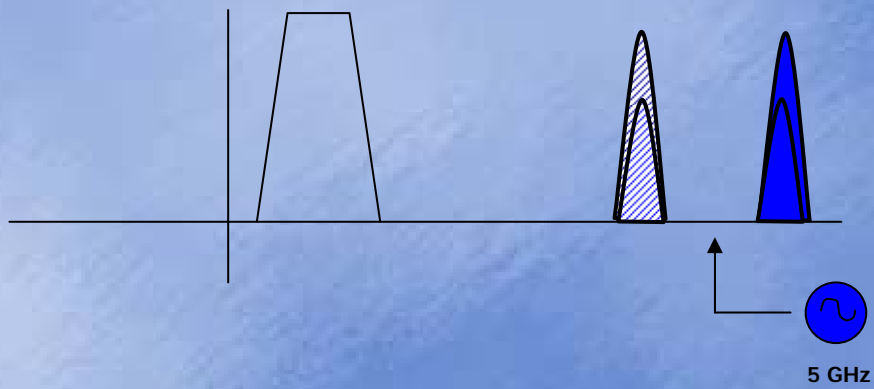
Modulación: OFDM

Ancho de banda del canal: 20MHz

Frecuencia: 5GHz



Receptor de WLAN



Índice

BLOQUE I: Introducción

Introducción
Receptor de WLAN
Objetivos

BLOQUE II: Teoría y diseño de filtros paso bajo

Teoría general sobre filtros integrados
Diseño de filtros pasivos
Filtros Gm-C

BLOQUE III: Desarrollo del proyecto

Transconductor real de Nauta
Filtros polifásicos

BLOQUE IV: Conclusión

Conclusiones
Presupuesto

Objetivos

Especificaciones del **filtro polifásico integrado** paso banda

Parámetros	Especificaciones
Tipo de filtro	Butterworth
Frecuencia central	20MHz
Ancho de banda	20MHz
Rechazo de banda	-30dB

Índice

BLOQUE I: Introducción

Introducción
Receptor de WLAN
Objetivos

BLOQUE II: Teoría y diseño de filtros paso bajo

Teoría general sobre filtros integrados
Diseño de filtros pasivos
Filtros Gm-C

BLOQUE III: Desarrollo del proyecto

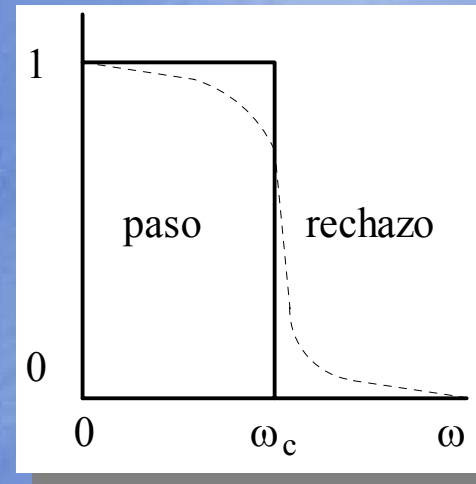
Transconductor real de Nauta
Filtros polifásicos

BLOQUE IV: Conclusión

Conclusiones
Presupuesto

Teoría general sobre filtros

¿Qué es un filtro?



Clasificación de los filtros

- Según la función que desempeñan
- Según los componentes que lo forman

Teoría general sobre filtros

- Según la función que desempeñan pueden ser del tipo:

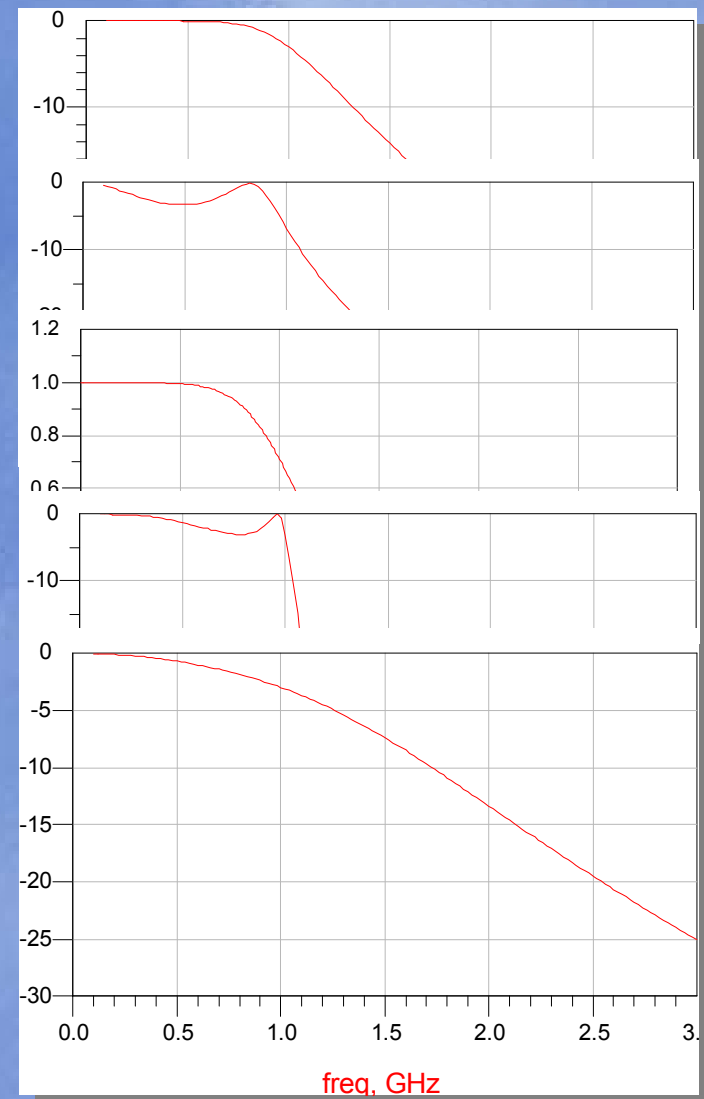
Butterworth

Chebyshev

Chebyshev inverso

Elíptico o de Cauer

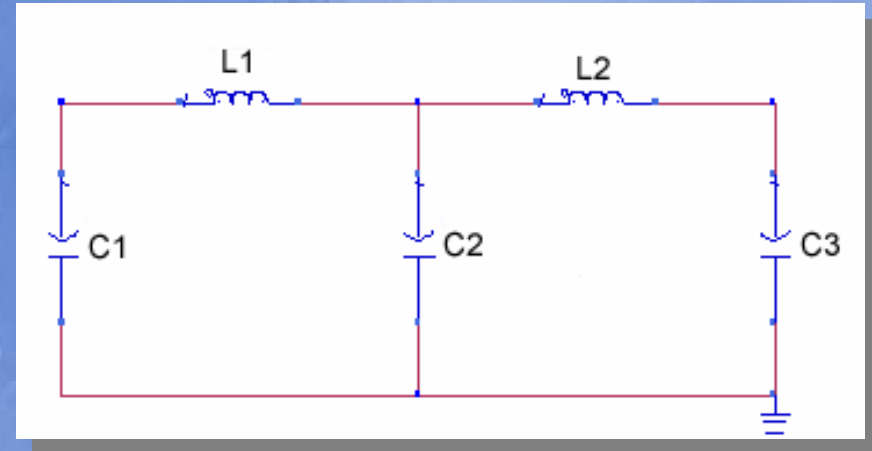
Bessel-Thomson



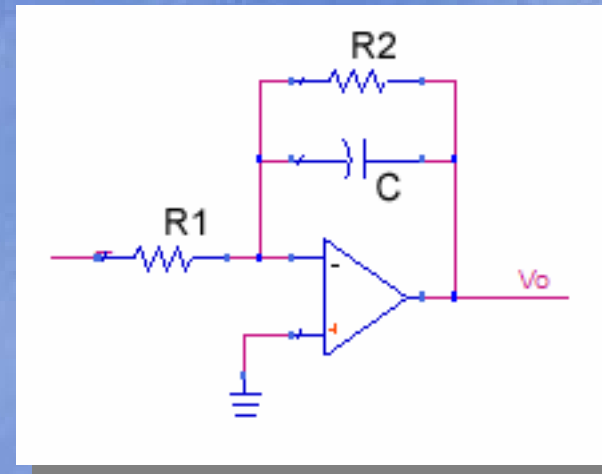
Teoría general sobre filtros

- Según los componentes que lo forman:

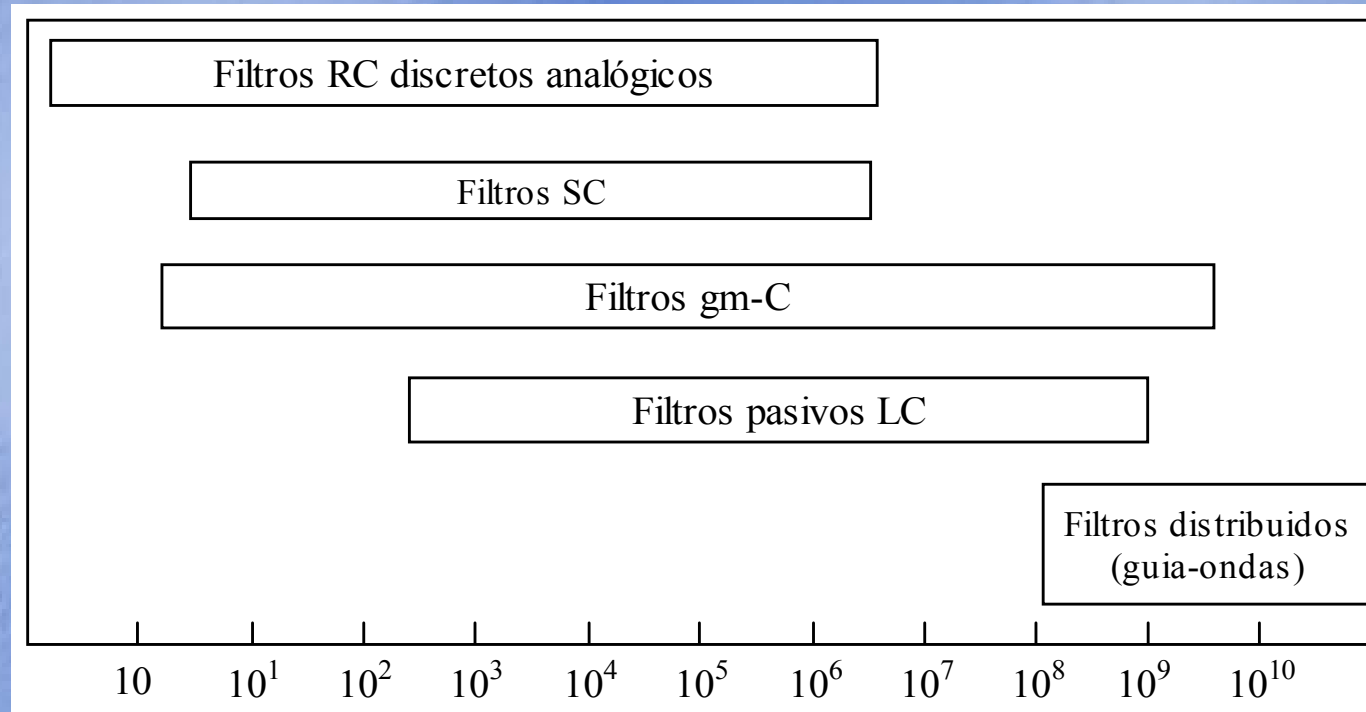
Pasivos (Ladder): Formado por componentes pasivos (R, L, C)



Activos: Uno o más componentes que lo forman son activos (OA, OTA)



Teoría general sobre filtros



Los filtros gm-C son el método más conveniente para el diseño de filtros de frecuencias intermedias (FI)

Teoría general sobre filtros

- Efectos de segundo orden

- **DC-Offset:** Puede corromper las señales y saturar las etapas siguientes. Se puede compensar en caso necesario y afecta más a los filtros paso bajo.

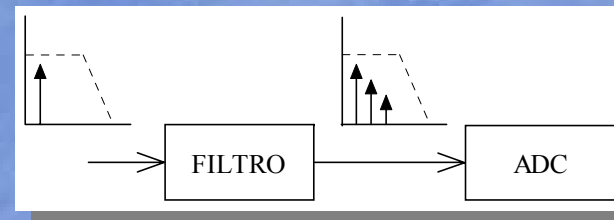
- **Ruido:** Es introducido por los circuitos semiconductores. Generalmente se aloja en la banda de paso de un filtro activo, aunque no suele ser significativo (pW)

Teoría general sobre filtros

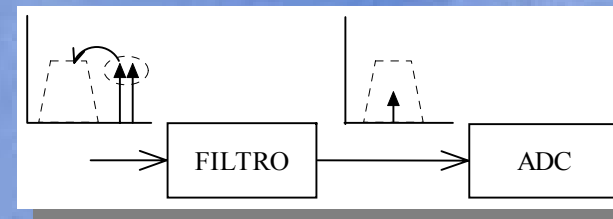
- Efectos de segundo orden

- **Distorsión:** Si los filtros presentan no linealidades, a la salida aparecerán componentes armónicas no deseadas que se convierten en señal:

- Para los filtros paso bajo se medirá mediante el parámetro THD:



- Para los filtros paso banda con el IP3:



Índice

BLOQUE I: Introducción

Introducción
Receptor de WLAN
Objetivos

BLOQUE II: Teoría y diseño de filtros paso bajo

Teoría general sobre filtros integrados
Diseño de filtros pasivos
Filtros Gm-C

BLOQUE III: Desarrollo del proyecto

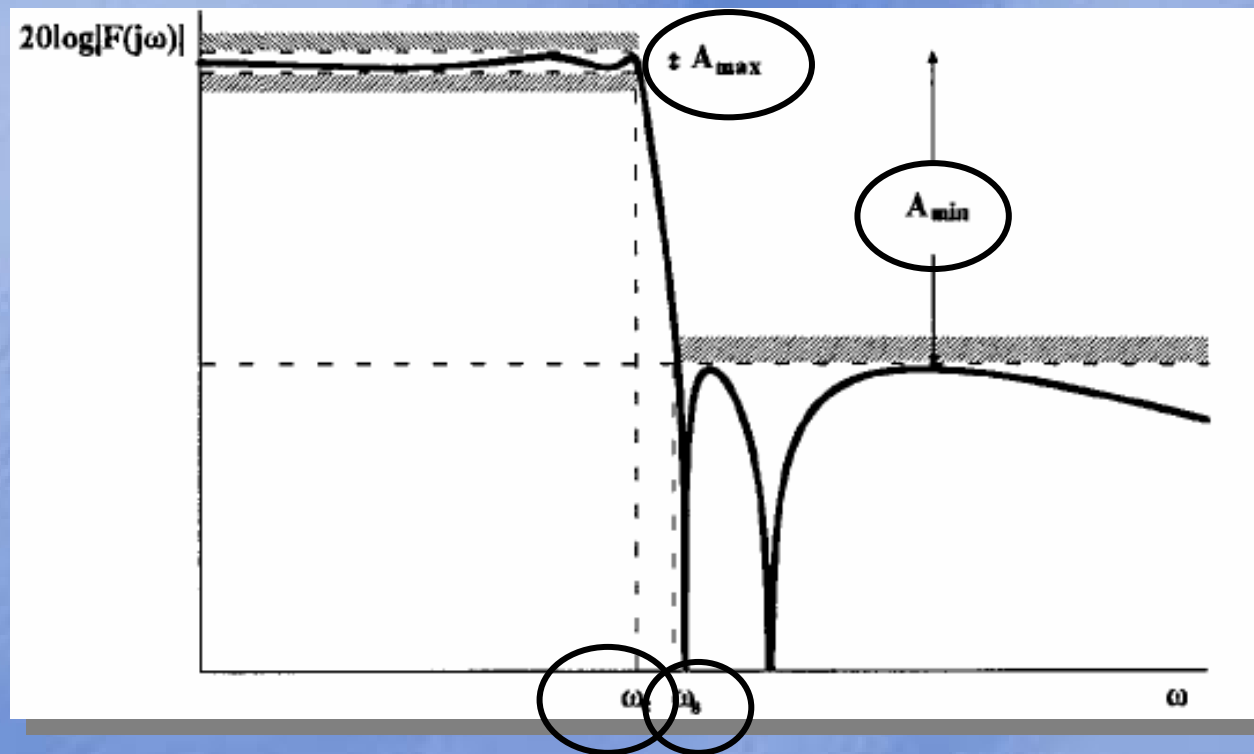
Transconductor de Nauta
Filtros polifásicos

BLOQUE IV: Conclusión

Conclusiones
Presupuesto

Diseño de filtros pasivos

- Es necesario conocer las especificaciones del filtro:



Diseño de filtros pasivos

- Herramienta de diseño software ADS:

The screenshot displays the ADS Filter Assistant interface with the following parameters and settings:

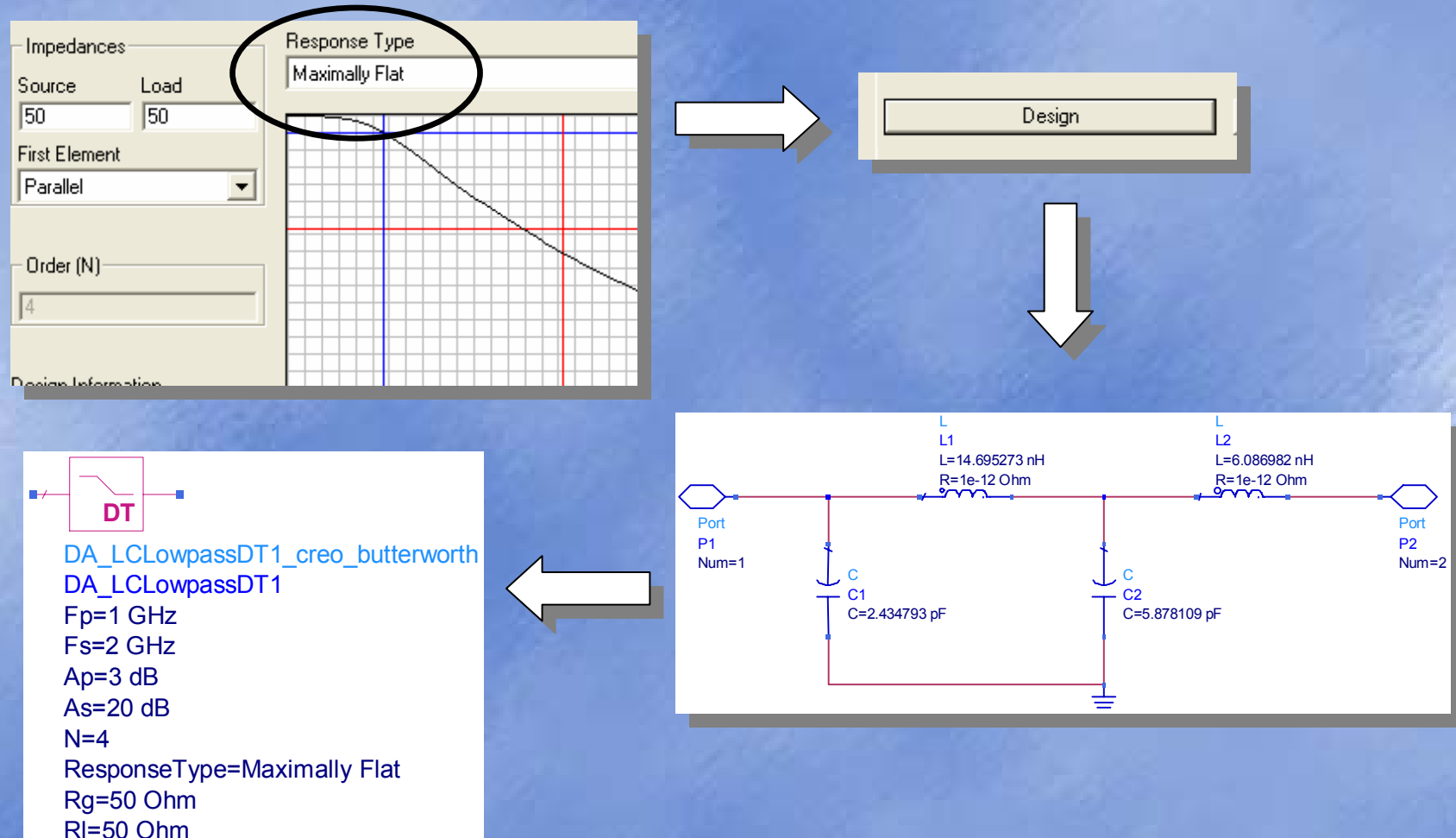
- Impedances:** Source and Load are both set to 50.
- Response Type:** Maximally Flat.
- Ap (dB):** 3.
- As (dB):** 20.
- Roll-off:** 3 dB/square.
- Order (N):** 4.
- Design Information:** Order: 4, Minimum Insertion Loss: 0.0000.
- Realizations:** View All (unchecked), Max #: 1.
- Frequency Cutoffs:** F_p (Passband Edge) is 1, and F_s (Stopband Edge) is 2.
- Units:** GHz.

The central graph shows a magnitude response curve on a grid. A vertical blue line is at $F_p = 1$ GHz and a vertical red line is at $F_s = 2$ GHz. The curve is flat at 3 dB in the passband and rolls off at 3 dB/square in the stopband.

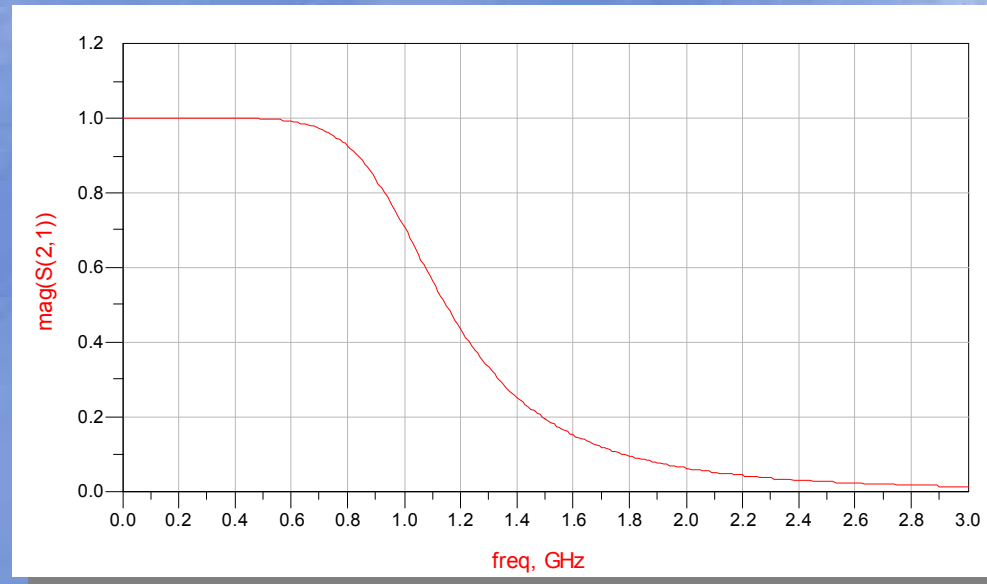
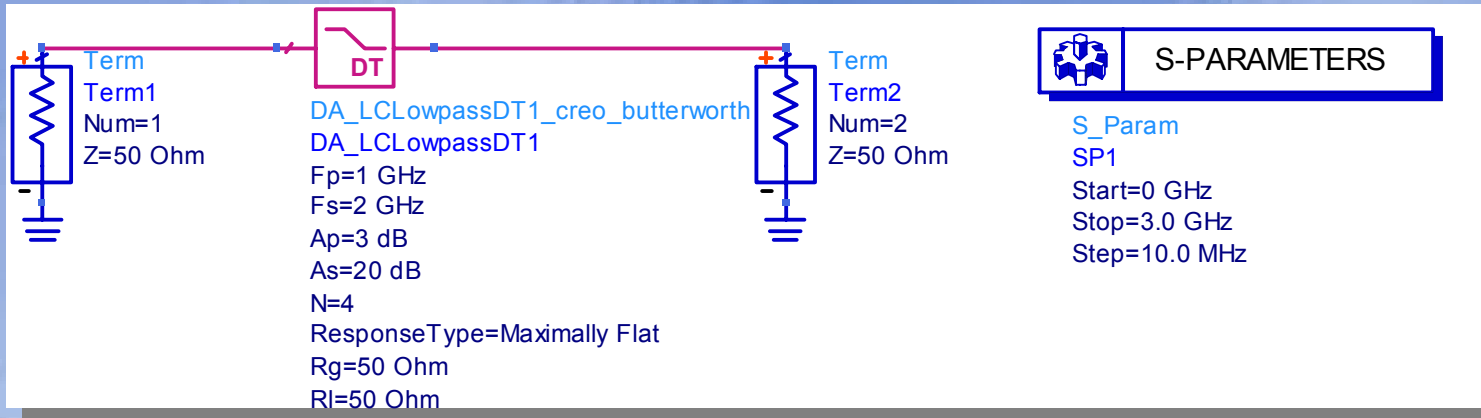
Buttons at the bottom include Design, Redraw, and Help.

Diseño de filtros pasivos

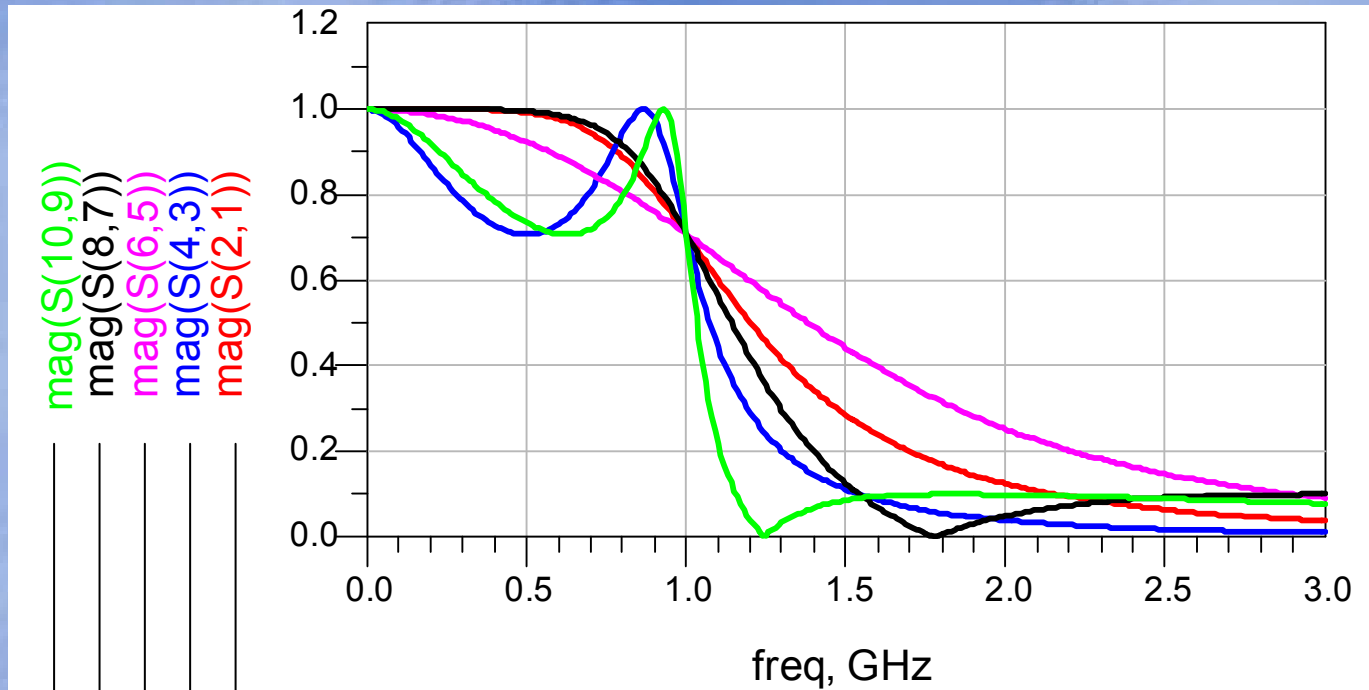
- Aproximación por el método de Butterworth:



Diseño de filtros pasivos



Diseño de filtros pasivos



- Butterworth
- Chebyshev
- Bessel-Thomson
- Chebyshev inverso
- Elíptico

Índice

BLOQUE I: Introducción

Introducción
Receptor de WLAN
Objetivos

BLOQUE II: Teoría y diseño de filtros paso bajo

Teoría general sobre filtros integrados
Diseño de filtros pasivos
Filtros Gm-C

BLOQUE III: Desarrollo del proyecto

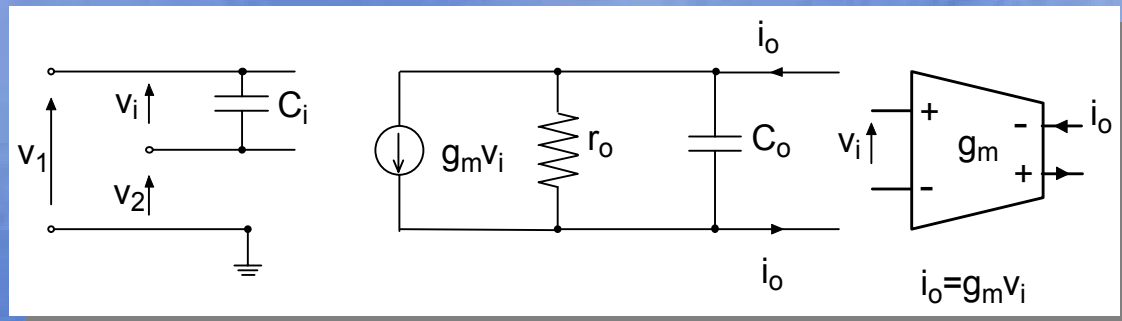
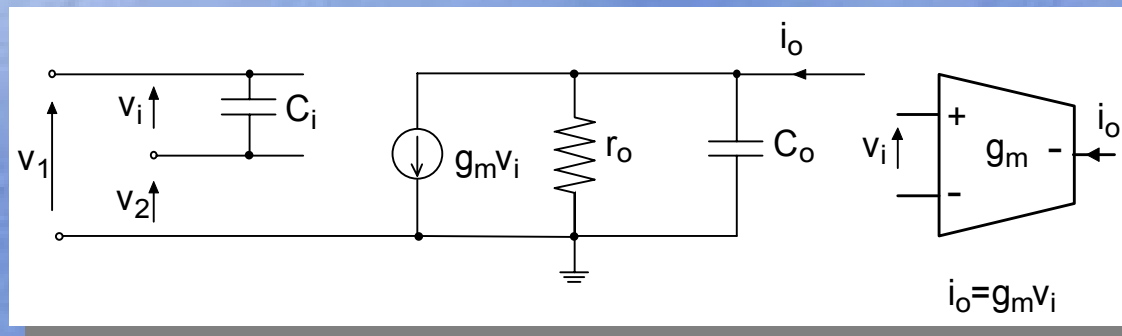
Transconductor real de Nauta
Filtros polifásicos

BLOQUE IV: Conclusión

Conclusiones
Presupuesto

Filtros Gm-C

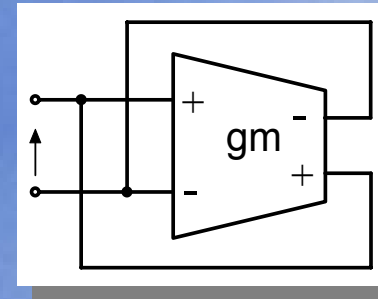
- Formados por amplificadores de transconductancia (OTAs) y condensadores
- OTA ideal: fuente de corriente controlada por tensión, BW, Zi y Zo infinitas
- Circuito equivalente en pequeña señal:



Filtros Gm-C

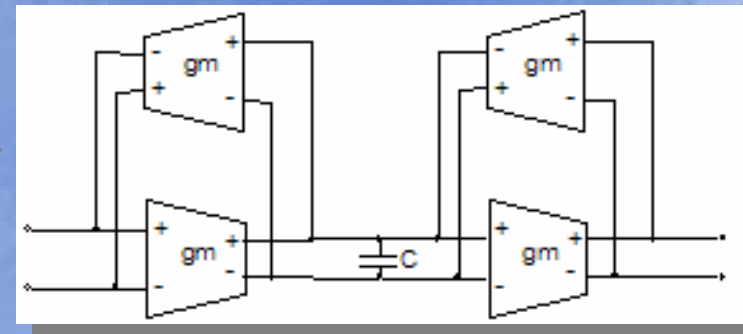
- Circuitos básicos con OTAs:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{V}{gm \cdot V} = \frac{1}{gm}$$



Resistencia
diferencial y
negativa

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{s \cdot C}{gm^2} \rightarrow L = \frac{C}{gm^2}$$

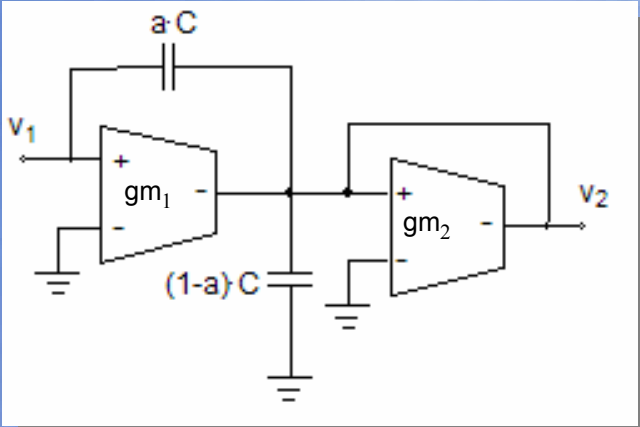


Bobina flotante

Filtros Gm-C

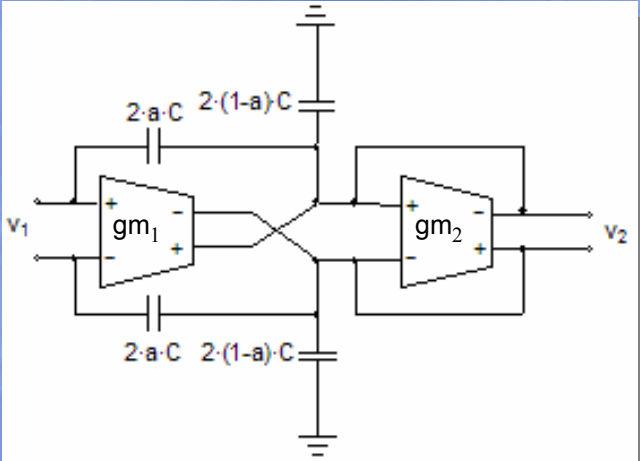
- Filtros de primer orden (*biquads*):

Asimétrica



$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{a \cdot s \cdot C + gm_1}{s \cdot C + gm_2}$$

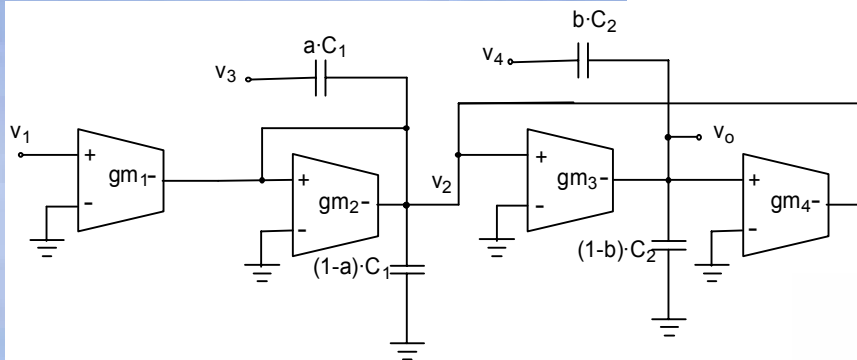
Diferencial



Filtros Gm-C

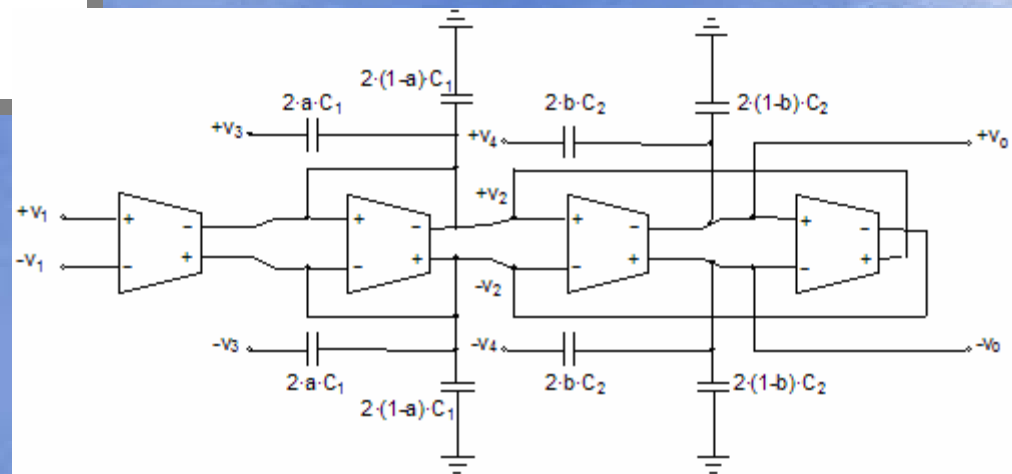
- Filtros de segundo orden (*biquads*):

$$T(s) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{s^2 \cdot \left(b \cdot \frac{V_4}{V_i} \right) + s \cdot \left(b \cdot \frac{gm}{C_1} \cdot \frac{V_4}{V_i} - a \cdot \frac{gm}{C_2} \cdot \frac{V_3}{V_i} \right) + \left(\frac{gm_1}{gm} \cdot \frac{V_1}{V_i} \right) \cdot \frac{gm_2}{C_1 \cdot C_2}}{s^2 + s \frac{gm}{C_1} + \frac{gm^2}{C_1 \cdot C_2}} = \frac{\alpha \cdot s^2 + \beta \cdot s + \omega_z^2}{s^2 + s \cdot \omega_0 / Q + \omega_0^2}$$



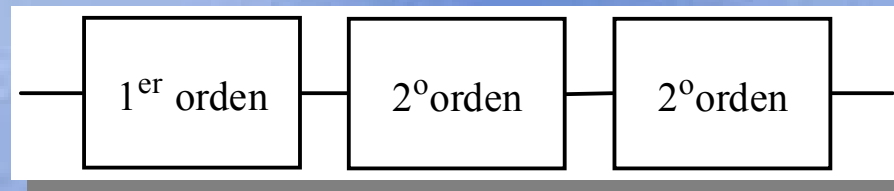
Asimétrica

Diferencial

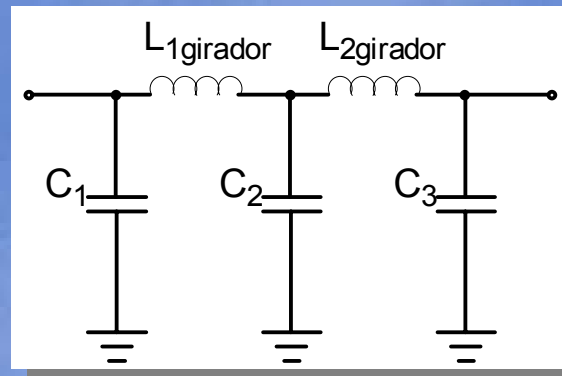


Filtros Gm-C

- Filtros de orden superior:
 - Conectar varias estructuras (*biquads*) de 1^{er} y 2^o orden en cascada:



- Simulación de filtros pasivos en escalera (*ladder*):

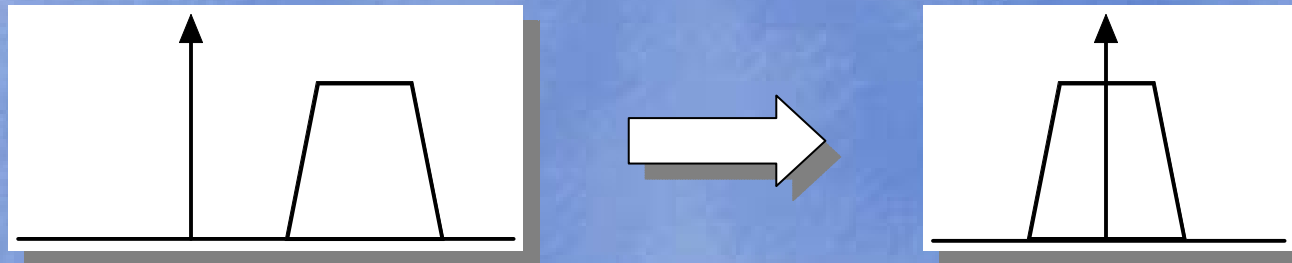


Filtros Gm-C

- Implementación:

- Objetivo: Filtro polifásico paso banda

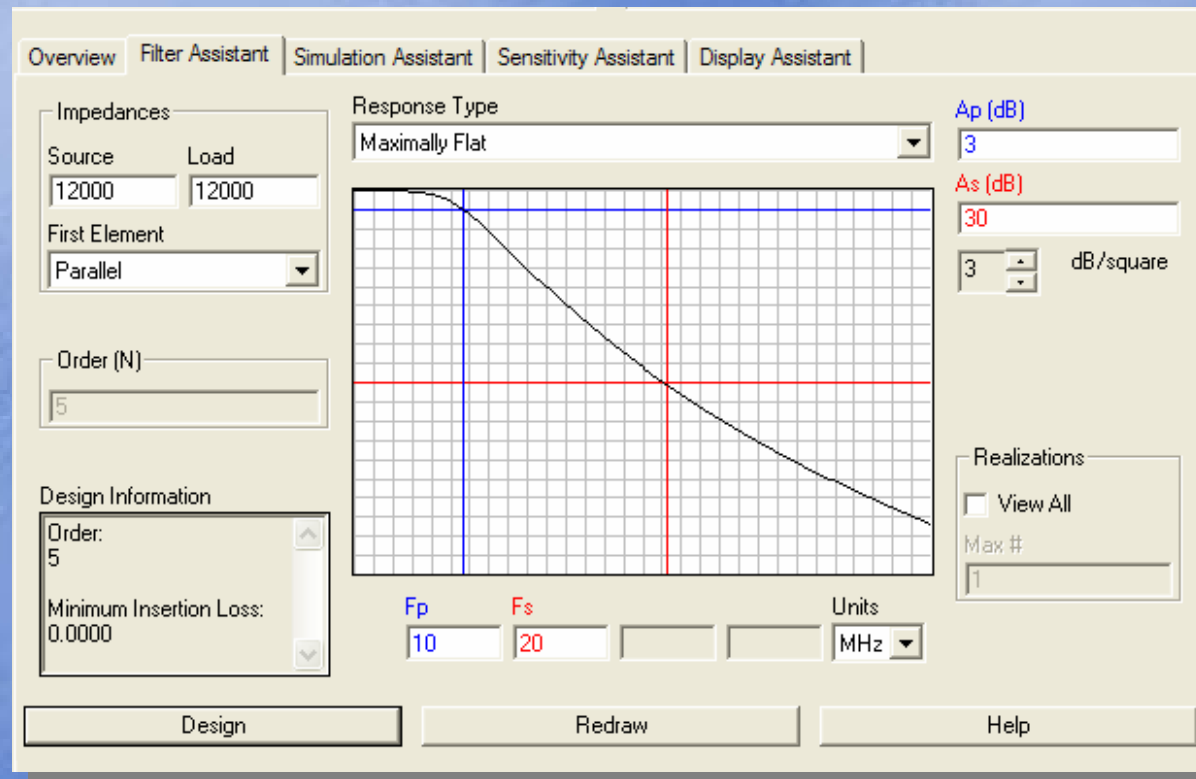
- Ancho de banda: 20MHz
- Frecuencia central: 20MHz
- Rechazo de banda: -30dB a 40MHz



- Ancho de banda: 10MHz
- Rechazo de banda: -30dB a 20MHz

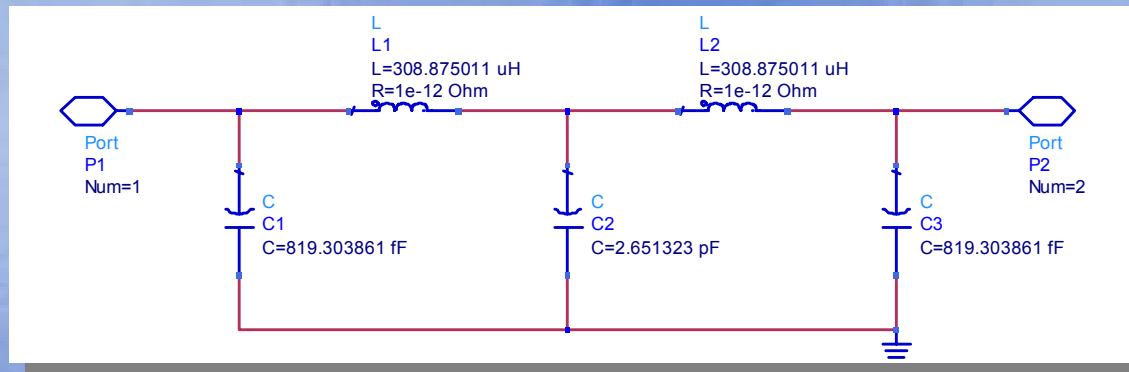
Filtros Gm-C

- ADS → 1) Filter Design Guide



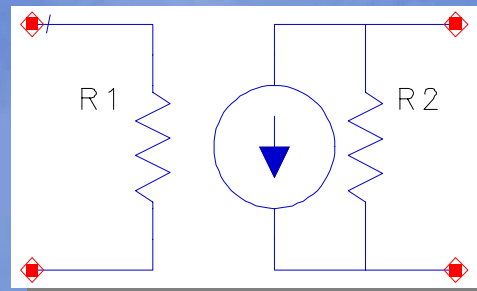
Filtros Gm-C

2) Crear el *ladder*.

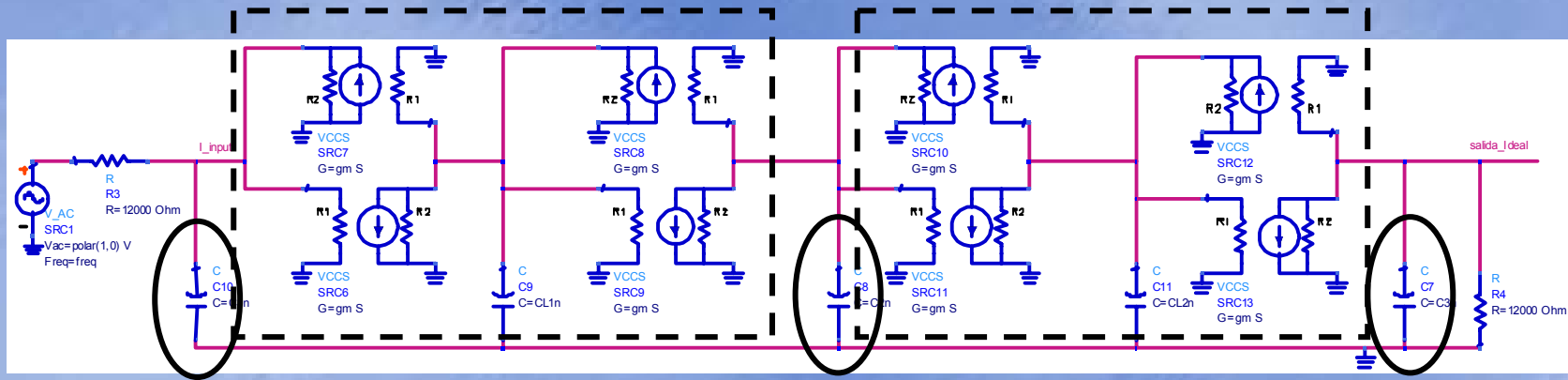


3) Sustituir las bobinas por giradores:

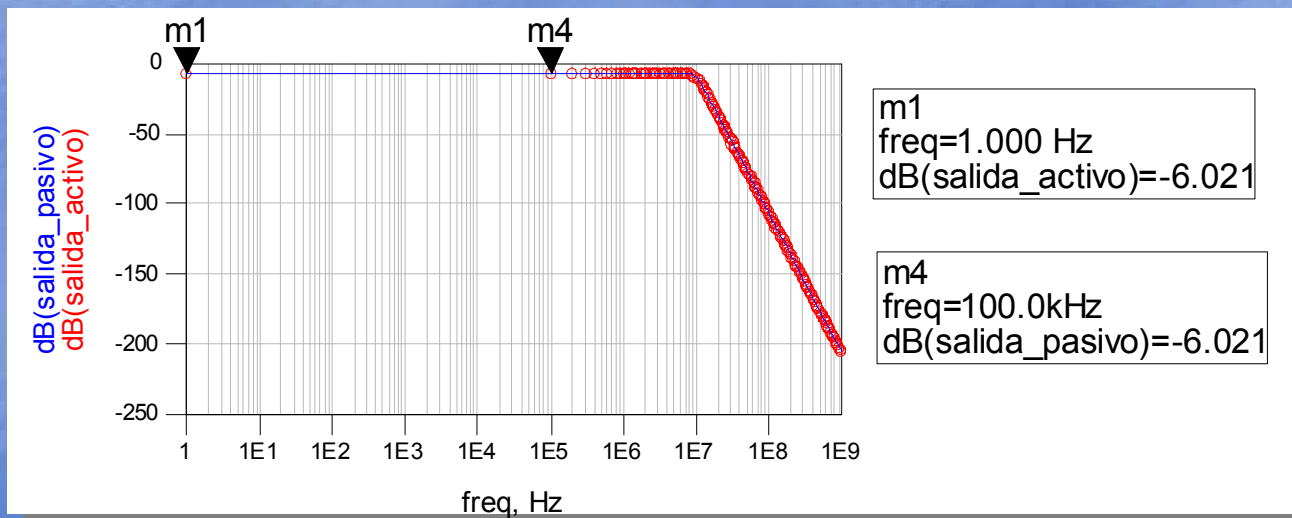
OTAs



Filtros Gm-C



4) Simular resultados:



Índice

BLOQUE I: Introducción

Introducción
Receptor de WLAN
Objetivos

BLOQUE II: Teoría y diseño de filtros paso bajo

Teoría general sobre filtros integrados
Diseño de filtros pasivos
Filtros Gm-C

BLOQUE III: Desarrollo del proyecto

Transconductor real de Nauta
Filtros polifásicos

BLOQUE IV: Conclusión

Conclusiones
Presupuesto

Transconductores

◆ OTA:

- Bloque más importante de los filtros gm-C
- Prestaciones adecuadas: ganancia mínima de 40dB y BW idóneo
- Valor mínimo de gm dependerá de la tecnología y de la inductancia:

$$g_m \geq \sqrt{\frac{C}{L}}$$

- r_o vendrá dada por:

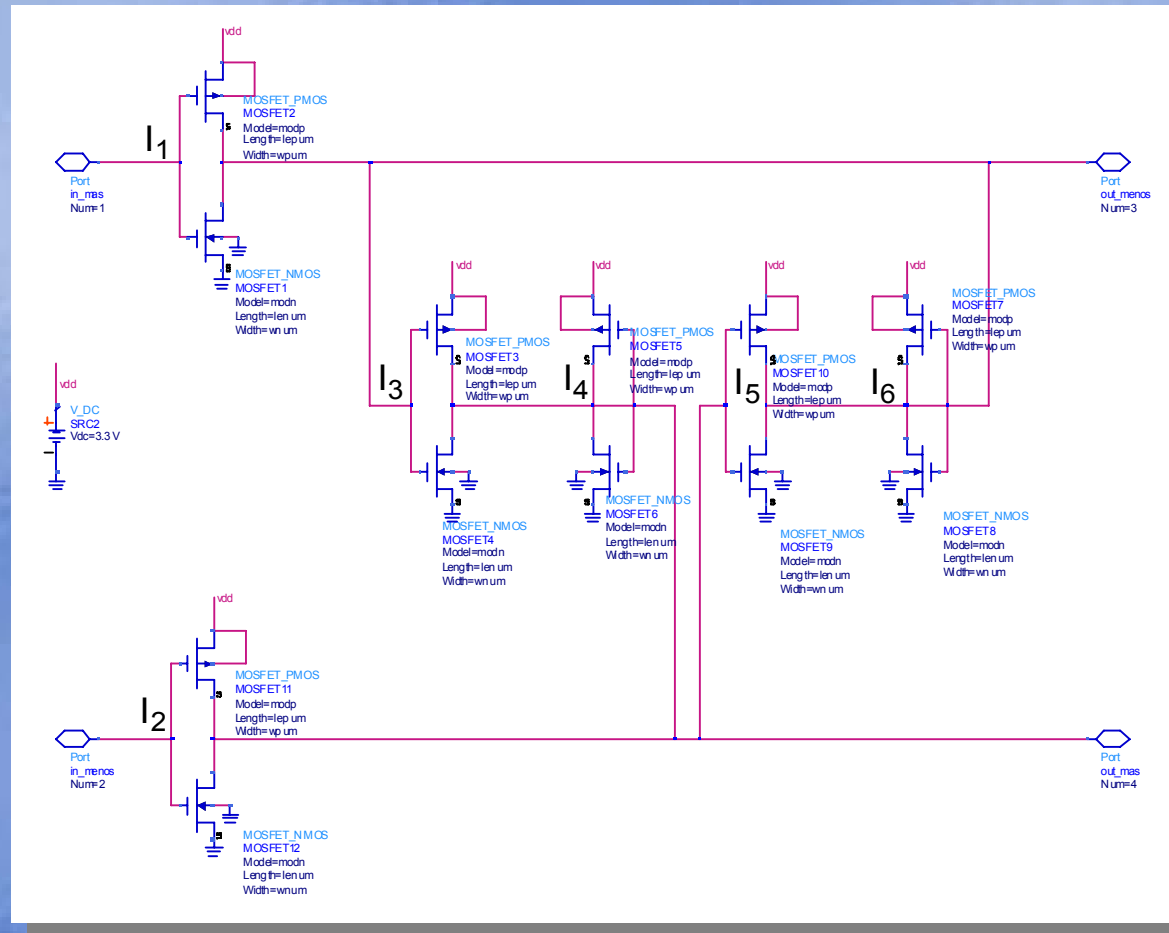
$$r_o \geq \frac{AV_{DC}}{g_m}$$

◆ OTA de Nauta:

- Basado en inversores CMOS
- Área reducida
- Idóneo para aplicaciones de baja tensión

Transconductor de Nauta

◆ OTA de Nauta:



Transconductor de Nauta

- Características principales:

- Carece de nodos internos

Combinar capacidades con el filtro

Filtros a frecuencias altas

Filtros de orden alto a frecuencias bajas

- R_o en modo común será:

$$R_{cm} = \frac{1}{gd_1 + gd_5 + gd_6 + gm_5 + gm_6} \rightarrow \downarrow \downarrow$$

- R_o en modo diferencial será:

$$R_{dm} = \frac{1}{gd_1 + gd_5 + gd_6 + gm_6 - gm_5} \rightarrow \uparrow \uparrow$$

Transconductor de Nauta

- Si las gm_i son iguales a gm y gd_i a gd , la ganancia será:

➤ en modo común:

$$A_{cm} = \frac{gm}{3 \cdot gd + 2 \cdot gm}$$

Como A_{cm} es menor que 1 es estable

➤ en modo diferencial:

$$A_o = \frac{gm}{3 \cdot gd}$$

A_o dependerá de gm y gd .

A frecuencias altas → longitudes de canal pequeñas → A_o pequeña → aumentar gm subiendo la corriente:

$$gm_6 \approx gm_5 - (gd_1 + gd_5 + gd_6)$$

Transconductor de Nauta

- Los transistores trabajan en saturación, por lo que el circuito será lineal si se satisface $\Delta V \leq V_T/2$ y $\Delta V \leq (V_{dd}/2) - V_T$
- La restricción obliga a que $V_{dd} > 3 \cdot V_T$ como mínimo

- Los inversores de salida pueden disminuir su tamaño.

(Proporcionan $\uparrow R_{dm}$, estabilidad y $\downarrow R_{cm}$)

- $gm_{out} = gm_{in} \times 0,5$
- gm_{out} baja
- Se reduce un 27% el consumo de potencia
- Disminuye el área de los transistores
- $(S/N)_{out}$ mejora
- \downarrow Corriente de salida y el ruido
- La linealidad mejora ligeramente

Transconductor de Nauta

- Diseño del transconductor:
 - Los transistores se diseñarán atendiendo a criterios de consumo de potencia
 - Ecuación en saturación de un MOSFET tipo n:

$$I_D = \frac{1}{2} K_n \frac{W_n}{L_n} (V_{sat})^2$$

- Pasos a seguir:
 - Datos conocidos: I_D , L , V_{sat} y el factor de ganancia ($\mu_n C_{ox} = K_n$)
 - W_n y W_p
 - Calculamos la gm:

$$gm = K_n \frac{W_n}{L_n} V_{sat}$$

Transconductor de Nauta

- Diseño del transconductor:

- Definimos los valores para la ecuación de saturación:

- $I_D = 36,5 \mu A$

- $L = 2 \mu m$

- $V_{CM} = \frac{V_{dd}}{2} = 1,65V \rightarrow V_{sat} = 0,825V$

- $K_n = 150 \mu A/V^2$ y $K_p = 45 \mu A/V^2$

- Despejamos y sustituimos en la ecuación tipo n primero y en la tipo p después:

$$W_n = \frac{2 \cdot 36,5 \mu \cdot 2 \mu}{150 \mu \cdot (0,825)^2} = 1,43 \mu m$$

$$W_p = \frac{2 \cdot 36,5 \mu \cdot 2 \mu}{45 \mu \cdot (0,825)^2} = 4,77 \mu m$$

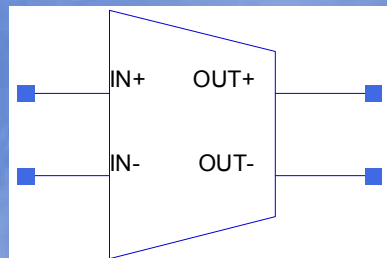
Transconductor de Nauta

- La transconductancia:

➤ tipo n: $gm = 150\mu \frac{1,43\mu}{2\mu} (0,825) = 88,48\mu S$

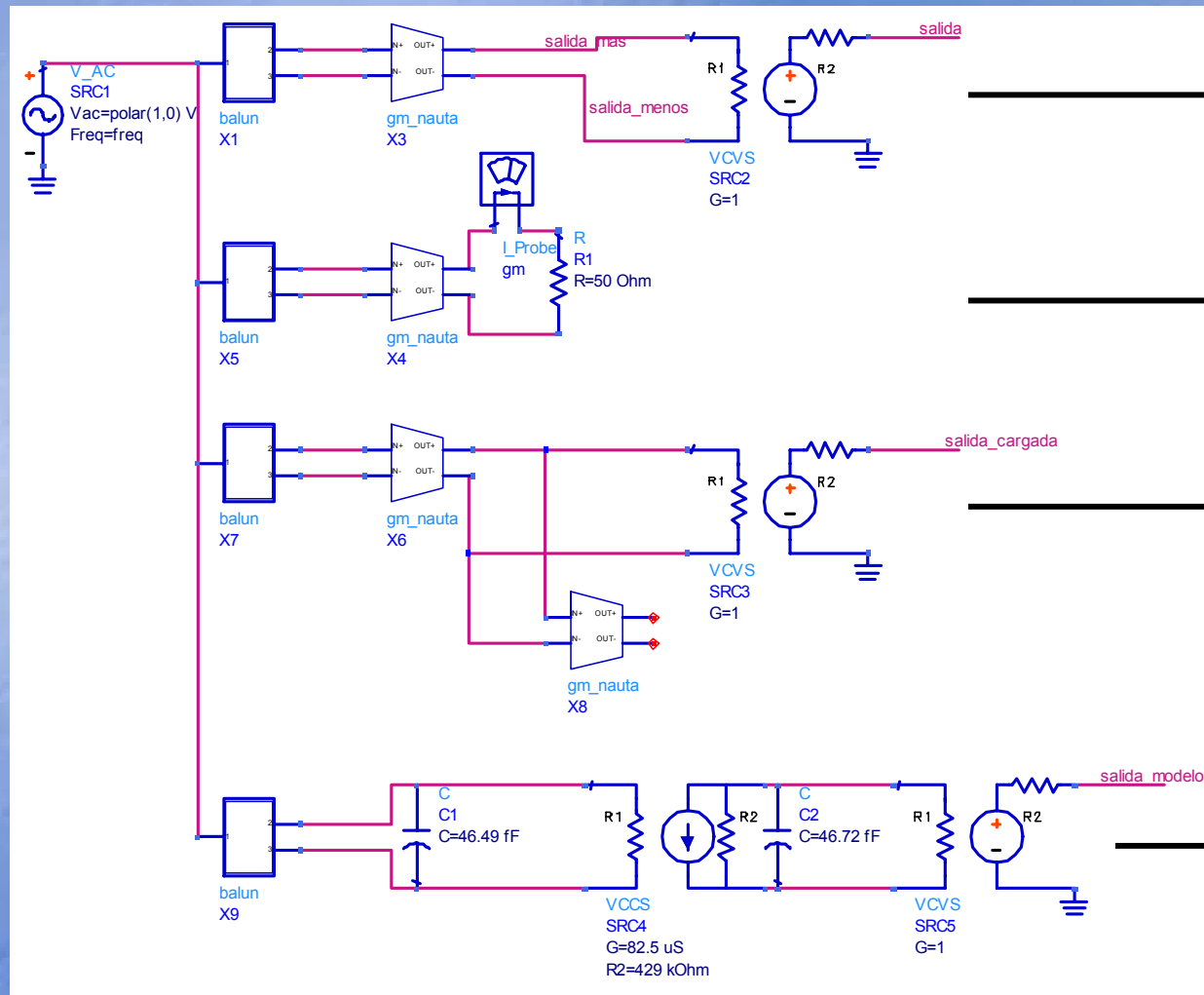
➤ tipo p: $gm = 45\mu \frac{4,77\mu}{2\mu} (0,825) = 88,54\mu S$

- Simulación del transconductor mediante el ADS:



Transconductor de Nauta

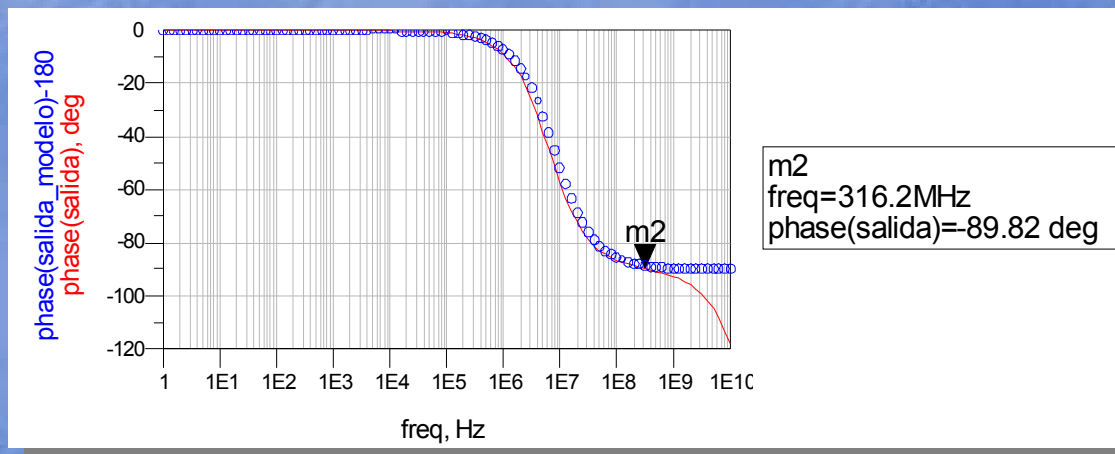
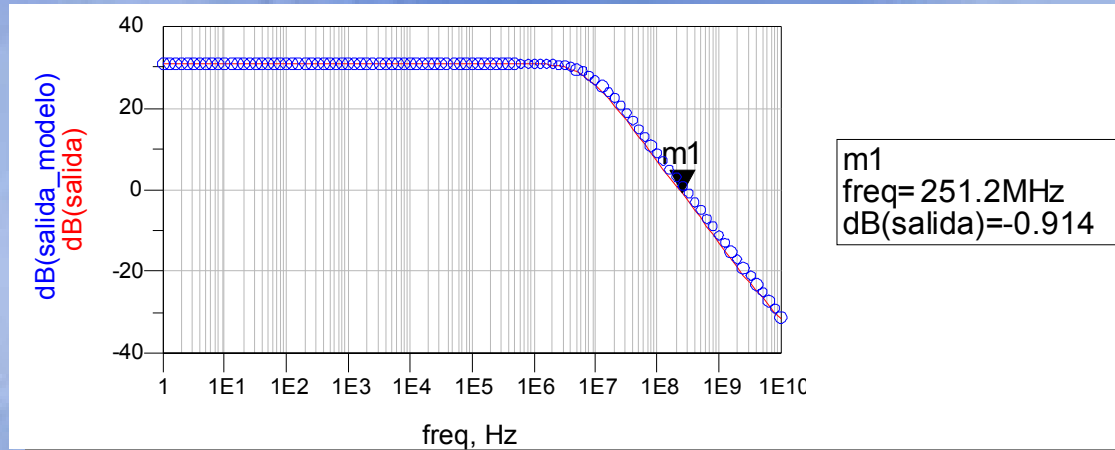
- Simulación del transconductor mediante el ADS:



- Respuesta en mag.
- Ganancia en continua
- Frecuencia a 3dB $\frac{I_{out}}{V_{in}}$
- El margen de fase $\frac{V_{in}}{ganancia}$
- $r_o = \frac{1}{gm}$
- La capacidad de salida $C_o = \frac{1}{2\pi r_o f_{3dB}}$
- $C_i = \frac{1}{(2\pi \cdot r_o \cdot f_{3dB_cargada})} - C_o$

Modelo del transconductor de Nauta con componentes ideales

Transconductor de Nauta

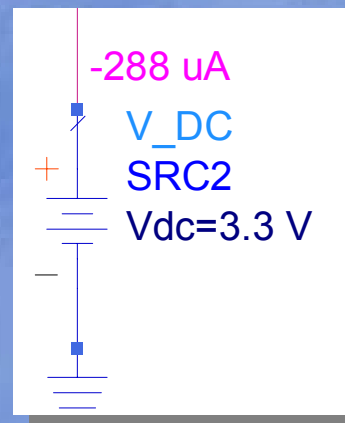


Transconductor de Nauta

- Parámetros del transconductor obtenidos por ADS:

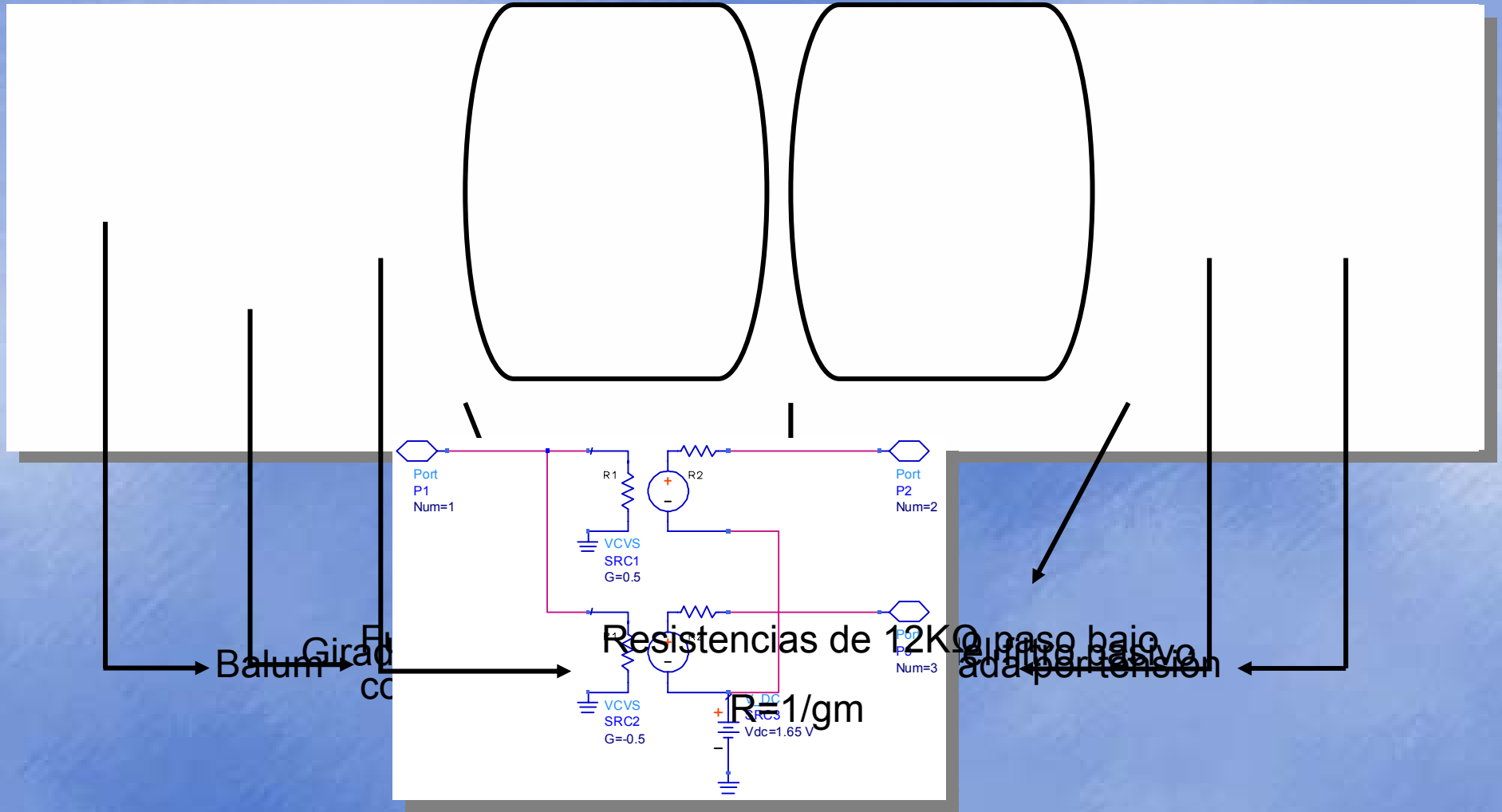
AV_{DC}	f_{3dB}	Margen de Fase	gm	r_o	C_o	C_i
35.38 dB	7.94MHz	89.82°	82.5 μ S	429k Ω	0.467pF	0.464pF

- Corriente del transconductor calculada con ADS:



Transconductor de Nauta

- Realización del filtro activo paso bajo:

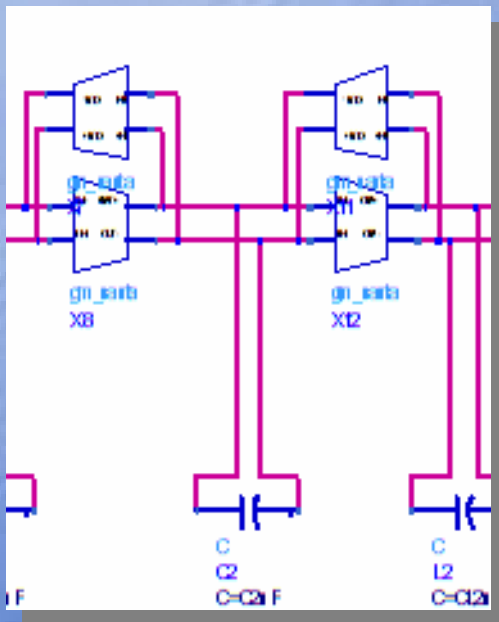


Transconductor de Nauta

- Los condensadores que simulan las inductancias vienen dados por:

$$C1 = L \cdot gm^2$$

- Las capacidades parásitas del transconductor:



$$C2n \Leftarrow C2n - 2C_i - 2C_o$$

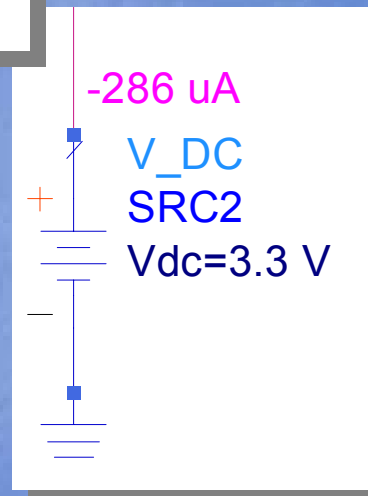
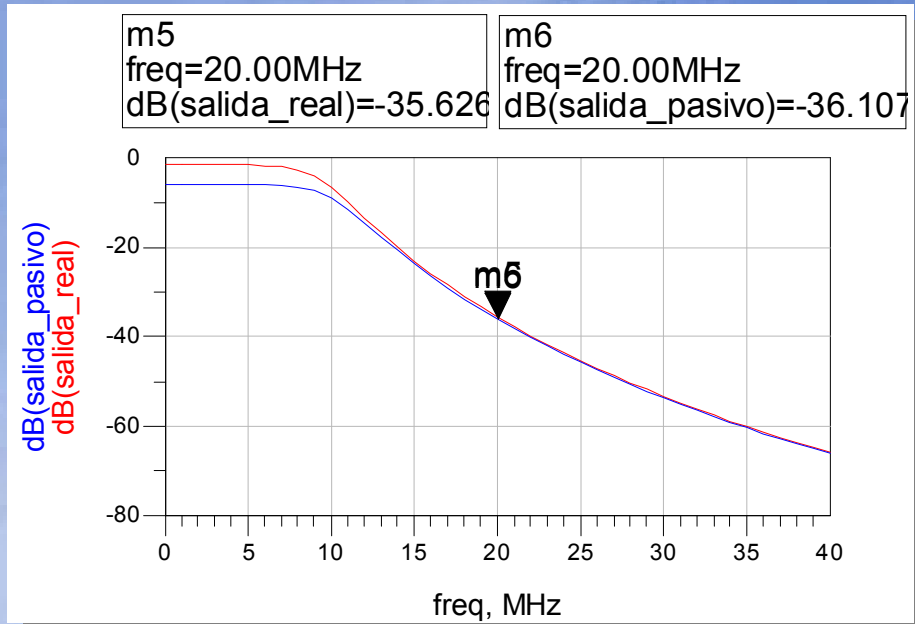
$$CL1n \Leftarrow CL1n - 2C_i - 2C_o$$

$$CL2n \Leftarrow CL2n - 2C_i - 2C_o$$

$$C1n \Leftarrow C1n - C_i - 2C_o$$

$$C3n \Leftarrow C3n - 2C_i - C_o$$

Transconductor de Nauta



$$286\mu\text{A} \times 12 = 3,432\text{mA}$$

Índice

BLOQUE I: Introducción

Introducción
Receptor de WLAN
Objetivos

BLOQUE II: Teoría y diseño de filtros paso bajo

Teoría general sobre filtros integrados
Diseño de filtros pasivos
Filtros Gm-C

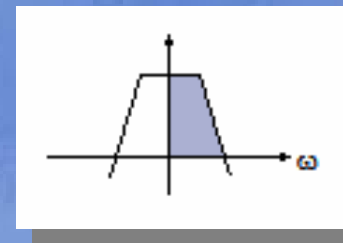
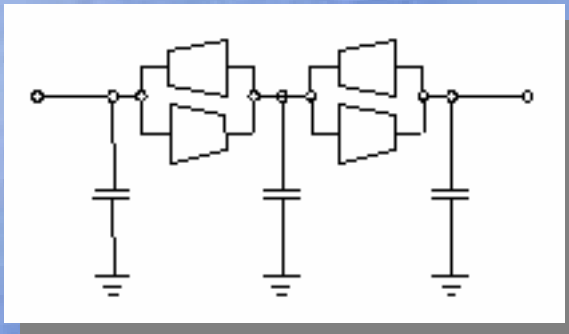
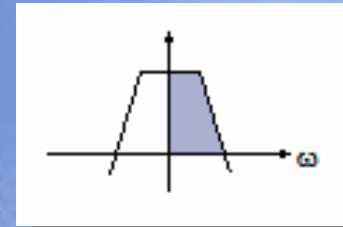
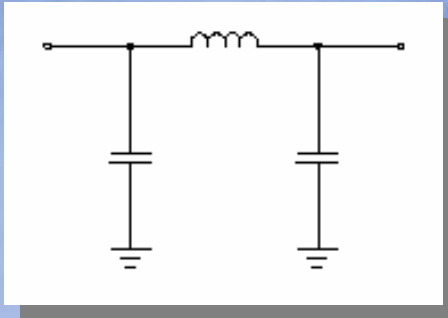
BLOQUE III: Desarrollo del proyecto

Transconductor real de Nauta
Filtros polifásicos

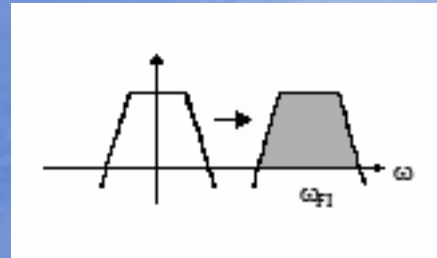
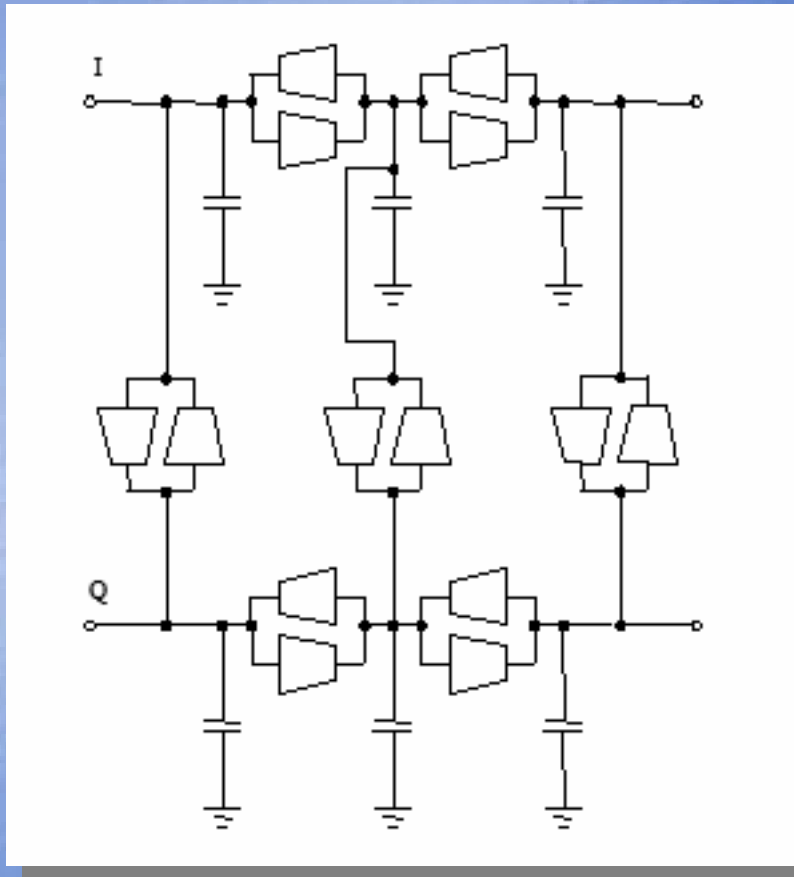
BLOQUE IV: Conclusión

Conclusiones
Presupuesto

Filtro polifásico



Filtro polifásico

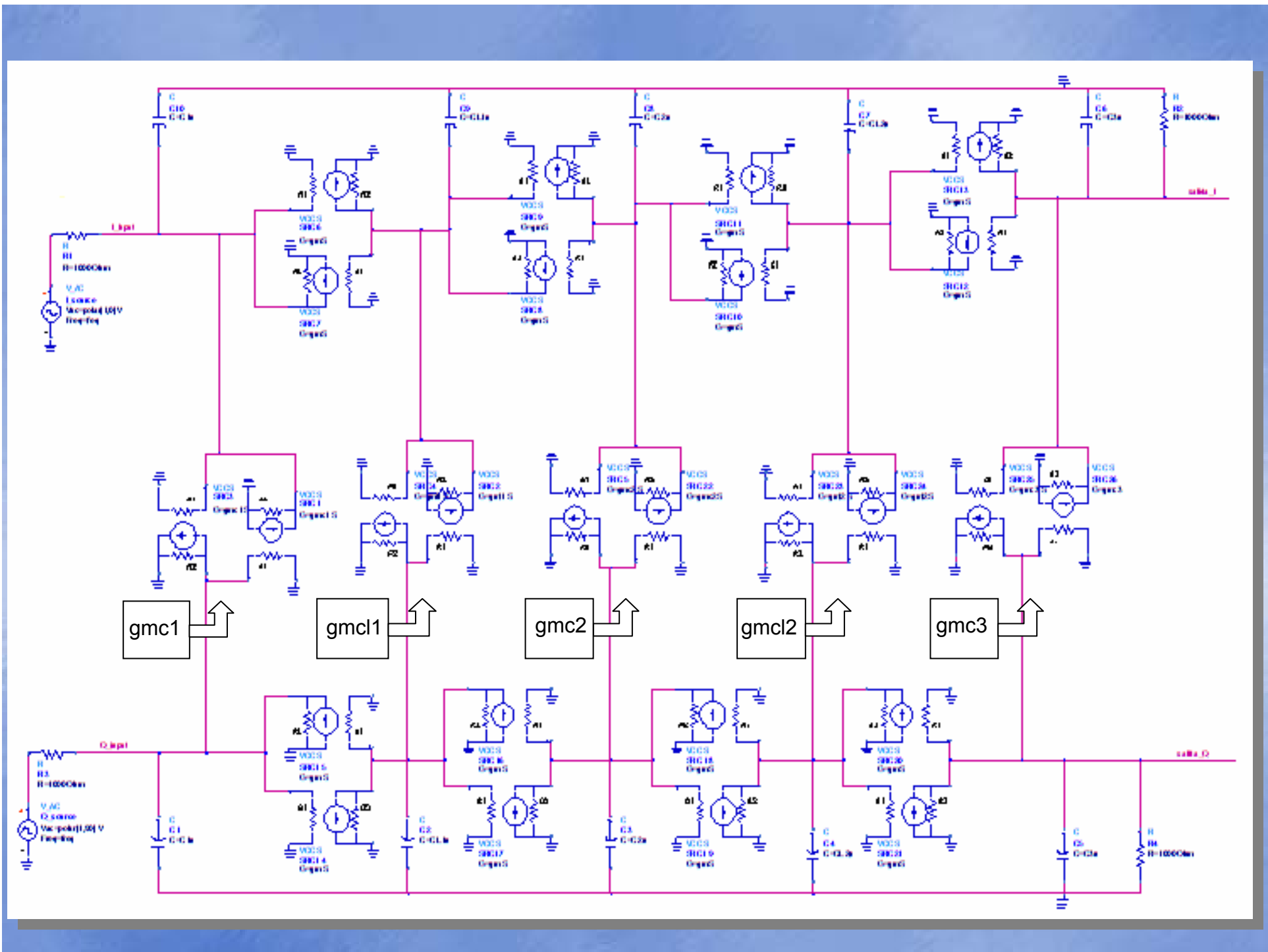


$$H(s) \rightarrow H(s - j \cdot \omega_{FI})$$

- Sea C un condensador cualquiera:

$$j \cdot \omega \cdot C \rightarrow j(\omega - \omega_{FI}) \cdot C = j \cdot \omega \cdot C - j \cdot \omega_{FI} \cdot C$$

es una conductancia de valor independiente de la frecuencia



Filtro polifásico

- Cálculo de los transconductores trasladadores de frecuencia:

$$gm_i = 2 \cdot \pi \cdot fc \cdot C_i$$

- $gm_i \rightarrow$ la transconductancia necesaria
- $fc \rightarrow$ la frecuencia central del filtro (20MHz)
- $C_i \rightarrow$ valor de cada condensador del filtro paso bajo

- “gmc1” o “gmc3”:

$$gmc1 = gmc3 = 2 \cdot \pi \cdot 20M \cdot 819,303861 f = 102,95 \mu S$$

- “gmc2”:

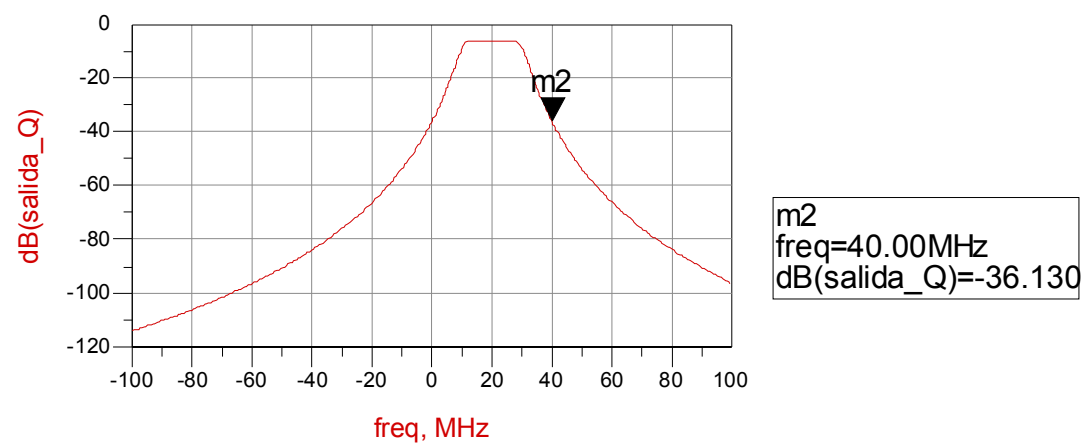
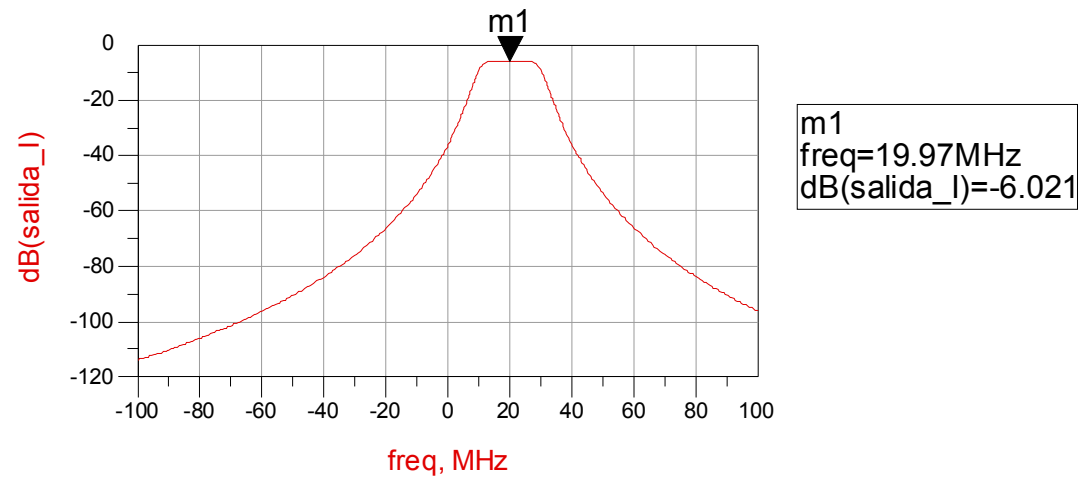
$$gmc2 = 2 \cdot \pi \cdot 20M \cdot 2,651323 p = 333,17 \mu S$$

- “gmcl1” o “gmcl2”:

$$Cl1 = Cl2 = L_1 \cdot gm^2 = 308,875011 \mu H \cdot (82,5)^2$$

$$gmcl1 = gmcl2 = 2 \cdot \pi \cdot 20M \cdot [308,875011 \mu \cdot (82,5)^2] = 264,18 \mu S$$

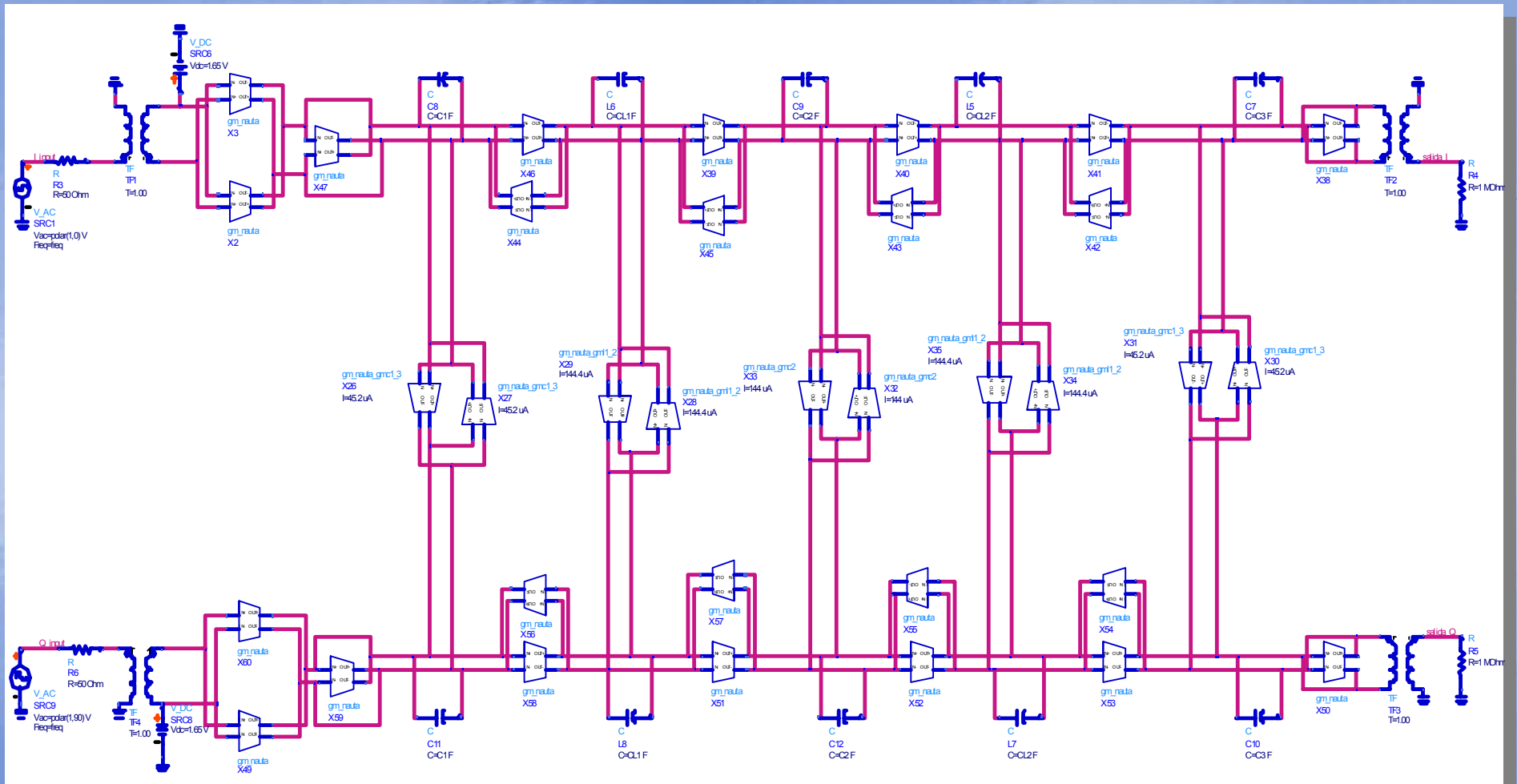
Filtro polifásico



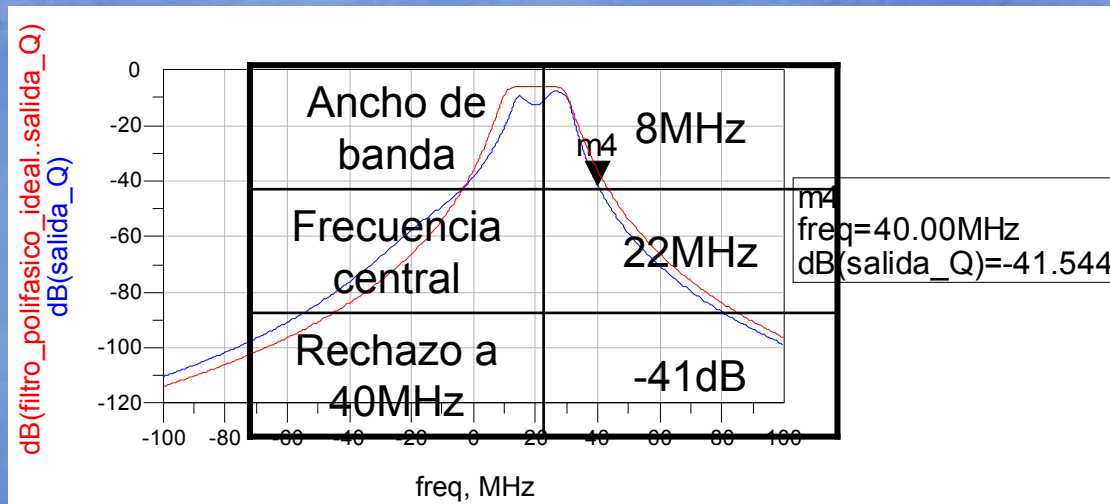
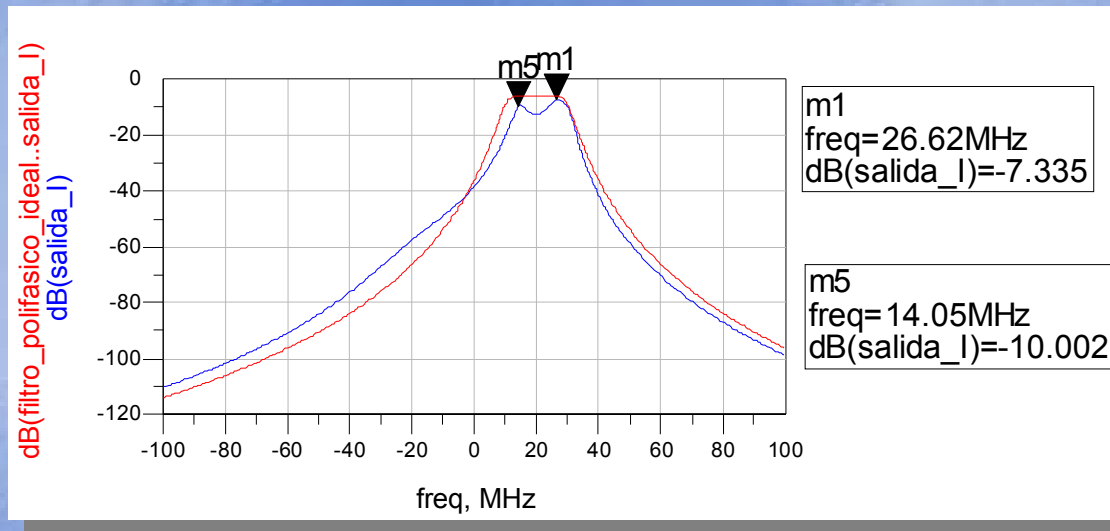
Filtro polifásico

- Implementación del filtro polifásico con transconductores de Nauta:
 - Convertimos el polifásico asimétrico (ideal) en diferencial (Nauta)
 - Diseñamos los transconductores responsables del desplazamiento en frecuencia (“gmc1”, “gmcl1”, “gmc2”, “gmcl2”, “gmc3”):
 - “gmc1” o “gmc3” → $g_m = 102,95 \mu\text{S}$ e $I_D = 59,67 \mu\text{A}$
 - “gmc2” → $g_m = 333,17 \mu\text{S}$ e $I_D = 193,33 \mu\text{A}$
 - “gmcl1” o “gmcl2” → $g_m = 264,18 \mu\text{S}$ e $I_D = 153,5 \mu\text{A}$

Filtro polifásico



Filtro polifásico

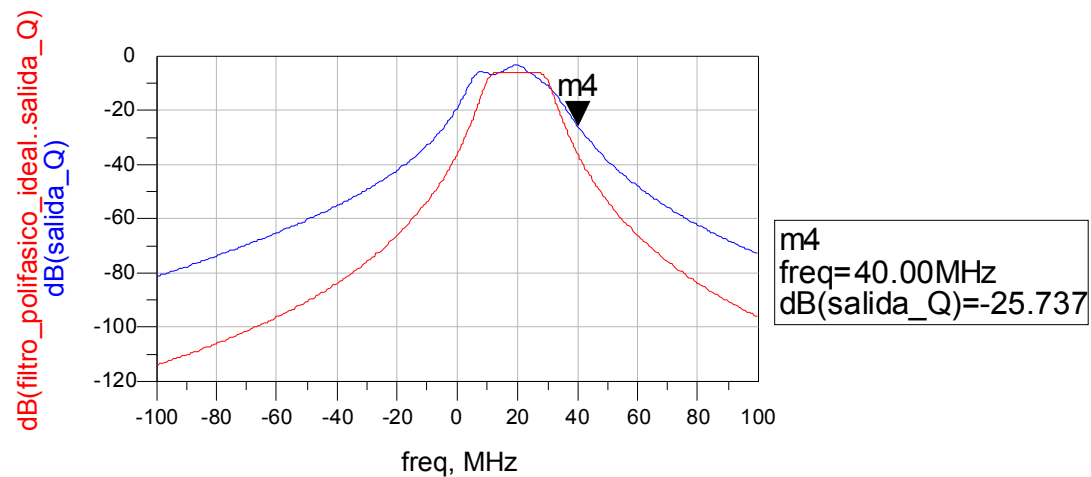


Filtro polifásico

$C1=819.303 \text{ f}$
 $C2=2.6513 \text{ p}$
 $C3=C1$
 $L1=308.875 \text{ u}$
 $L2=L1$
 $CL1=L1*gm^2$
 $CL2=L2*gm^2$



$C1=300 \text{ f}$
 $C2=2 \text{ p}$
 $C3=C1$
 $L1=300 \text{ u}$
 $L2=L1$
 $CL1=L1*gm^2$
 $CL2=L2*gm^2$



Ancho de banda	23MHz
Frecuencia central	18MHz
Rechazo a 40MHz	-25dB
Consumo	14,348mA

Índice

BLOQUE I: Introducción

Introducción
Receptor de WLAN
Objetivos

BLOQUE II: Teoría y diseño de filtros paso bajo

Teoría general sobre filtros integrados
Diseño de filtros pasivos
Filtros Gm-C

BLOQUE III: Desarrollo del proyecto

Transconductor real de Nauta
Filtros polifásicos

BLOQUE IV: Conclusión

Conclusiones
Presupuesto

Conclusiones

- Comparativa del filtro polifásico con otros trabajos similares:

Filtro polifásico	Nuestro proyecto	Pietro Andreani
Tecnología	0,35 μ m SiGe CMOS	0,35 μ m CMOS
Vdd (V)	3,3	2,3
Corriente (mA)	14,348	3,2
Frecuencia central	18MHz	3MHz
Ancho de banda	23MHz	1MHz
Tipo de filtro	Butterworth	Butterworth
Orden del filtro paso bajo	5	5+2 (etapa notch)

- Receptor de Bluetooth de corto alcance
- Etapa notch (\uparrow atenuación en la banda de rechazo, 53dB)
- Transconductores de Nauta ($L=7\mu\text{m}$ y $g_{m_{out}}=0,6 \cdot g_{m_{in}}$)
- Explica que el consumo \uparrow a medida que \uparrow su f_c

Conclusiones

- Comparativa del filtro polifásico con otros trabajos similares (continuación):

Filtro polifásico	Nuestro proyecto	Edgar Sánchez-Sinencio
Tecnología	0,35 μ m SiGe CMOS	0,35 μ m CMOS
Vdd (V)	3,3	2,7
Corriente (mA)	14,348	4,7
Frecuencia central	18MHz	2MHz
Ancho de banda	23MHz	1MHz
Tipo de filtro	Butterworth	Butterworth
Orden del filtro paso bajo	5	6

- Receptor de Bluetooth con frecuencia variable
- Implementado con 3 filtros gm-C de 2^o orden
- Transconductores específicos para este proyecto

Conclusiones

- Comparativa del filtro polifásico con otros trabajos similares (continuación):

Filtro polifásico	Nuestro proyecto	Chung-Yun Chou
Tecnología	0,35 μ m SiGe CMOS	0,25 μ m CMOS
Vdd (V)	3,3	2,5
Corriente (mA)	14,348	4,4
Frecuencia central	18MHz	18MHz
Ancho de banda	23MHz	24MHz
Tipo de filtro	Butterworth	-----
Orden del filtro paso bajo	5	-----

- Filtro rechazo de banda para un receptor de WLAN
- Implementado por 4 etapas polifásicas de banda estrecha a frecuencias diferentes (2 LPF y 2 HPF)
- Transconductores específicos para el diseño

Conclusiones

- Este proyecto se encuentra dentro de una línea de investigación más amplia y puede tener continuidad en trabajos como:
 - Desarrollo del *layout* y simulaciones *post-layout*
 - Fabricación y toma de medias del filtro
 - Integración en la cadena de recepción completa
 - Mejora de las prestaciones del diseño:
 - Variar el orden del filtro
 - Añadirle una etapa notch
 - Diseñar un nuevo filtro conociendo de antemano las carencias del filtro polifásico (después de crear el *layout*)

Índice

BLOQUE I: Introducción

Introducción
Receptor de WLAN
Objetivos

BLOQUE II: Teoría y diseño de filtros paso bajo

Teoría general sobre filtros integrados
Diseño de filtros pasivos
Filtros Gm-C

BLOQUE III: Desarrollo del proyecto

Transconductor real de Nauta
Filtros polifásicos

BLOQUE IV: Conclusión

Conclusiones
Presupuesto

Presupuesto

- A continuación se muestra el coste total del proyecto desglosado en sus diferentes partes:

Costes	Total (€)
Costes de recursos humanos	35.100
Costes de herramientas software	106,21
Costes de equipos informáticos	288,12
Otros costes	331
Subtotal	35.494,33
Presupuesto total (IGIC 5%)	37.269,05

**DISEÑO DE UN FILTRO POLIFÁSICO
ACTIVO EN TECNOLOGÍA SiGe 0.35 μm
PARA UN RECEPTOR BASADO EN EL
ESTÁNDAR IEEE 802.11a**

Autor: D. Tamara Delgado Alemán

Titulación: Sistemas Electrónicos

Tutores: Francisco Javier del Pino Suárez

Sunil Lalchand Khemchandani

