



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS
DE GRAN CANARIA



Diseño de una librería de inductores integrados en tecnología UMC 0.18 μm

Autor: D. Octavio Medina Day

Tutores: Dr. D. Javier del Pino Suárez

Dr. D. Antonio Hernández Ballester



Índice

1. Introducción
2. ADS: Momentum
3. Estudios Previos
4. Diseño de la librería de inductores
5. Herramientas desarrolladas
6. Conclusiones y líneas futuras
7. Presupuesto

Introducción

- Avance tecnológico
- Requerimientos de menor área y consumo, mayor calidad
- Numerosos estándares de comunicaciones



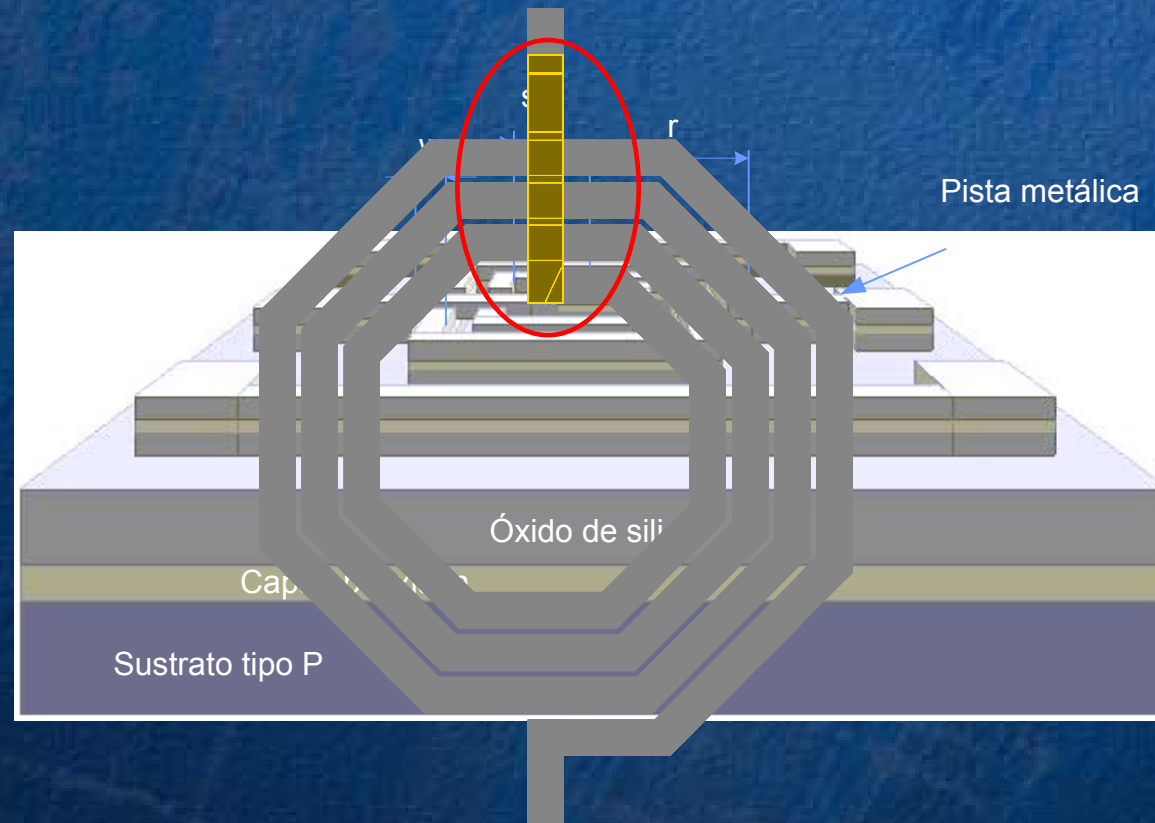
Introducción

- Mejora no tan evidente en dispositivos pasivos como activos
- Inductores, elemento crítico en RF



Introducción

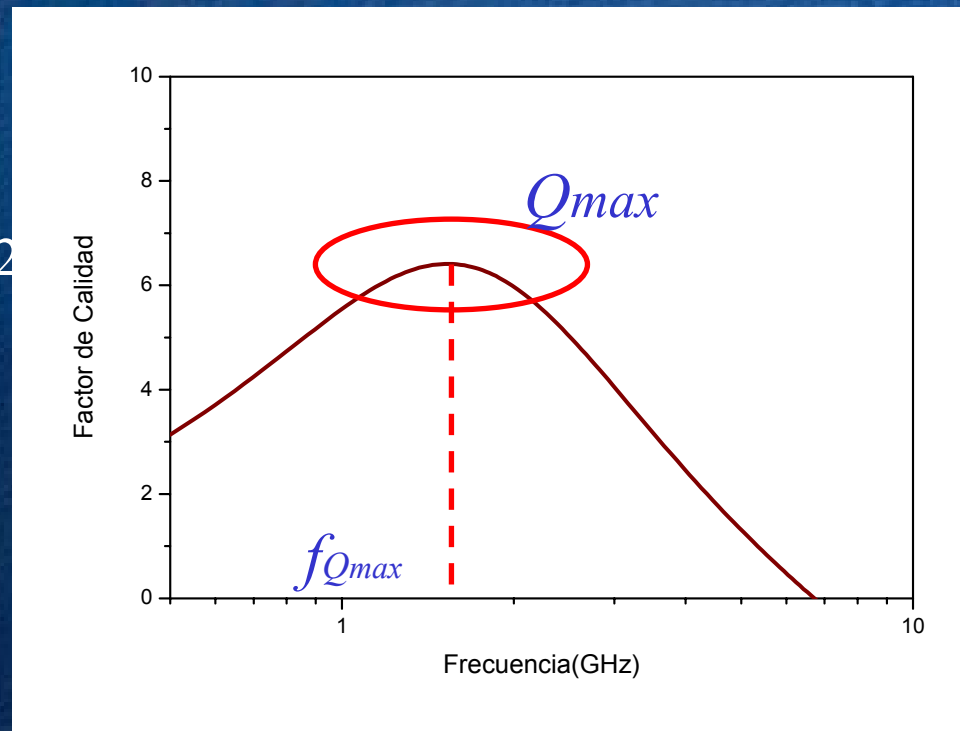
- Inductores integrados
 - Proceso de fabricación



Introducción

- Inductores integrados
 - Inductancia
 - Factor de calidad

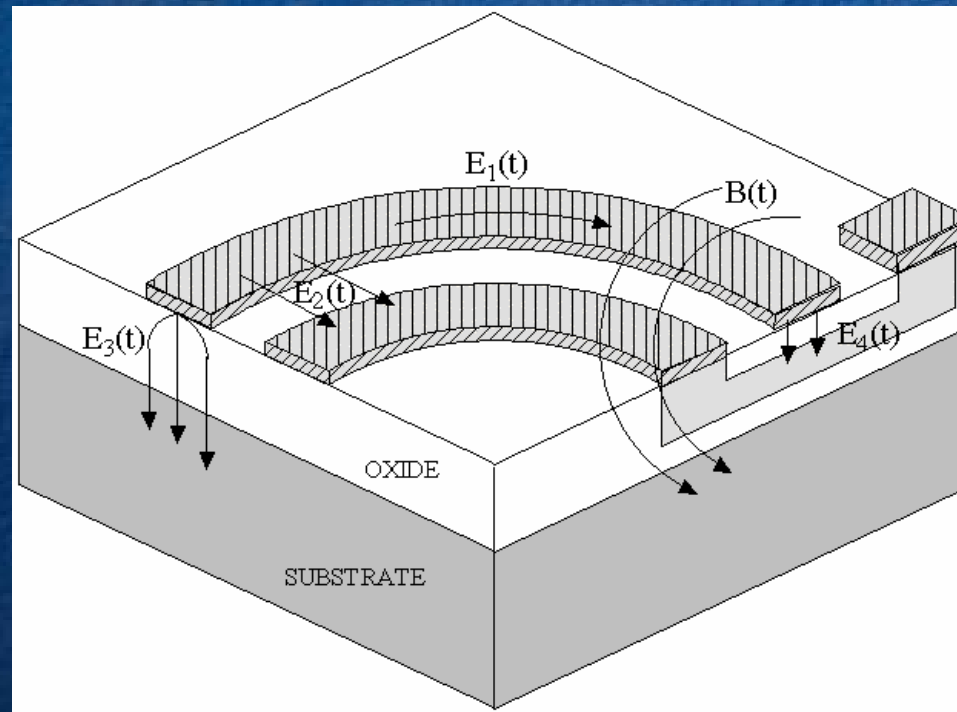
$$Q = 2$$



de pico eléctrica
lo

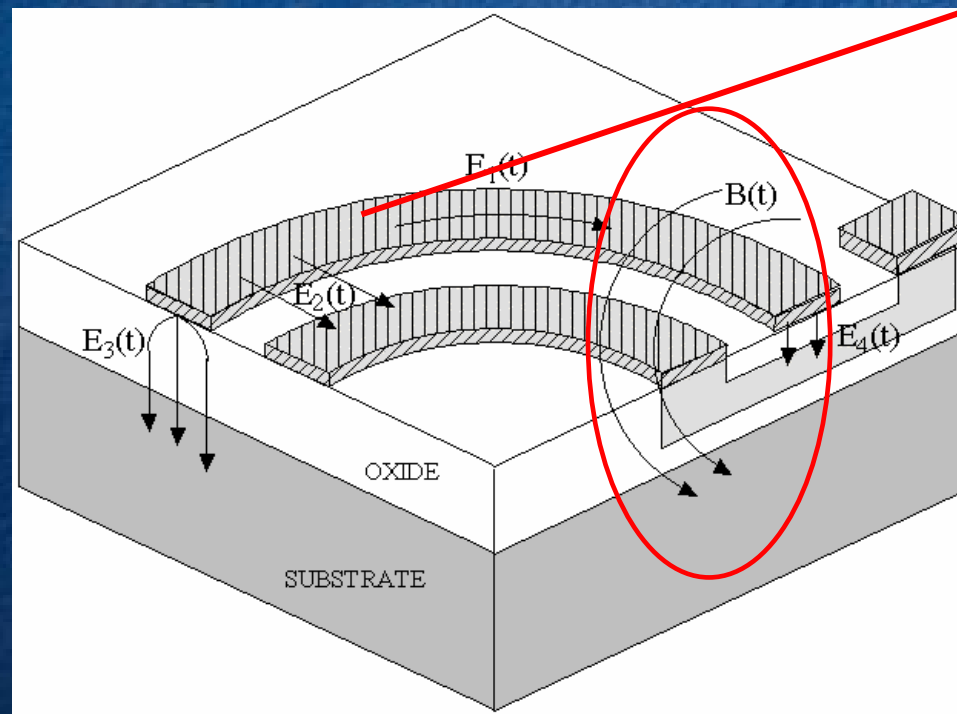
Introducción

- Inductores integrados
 - Campos electromagnéticos



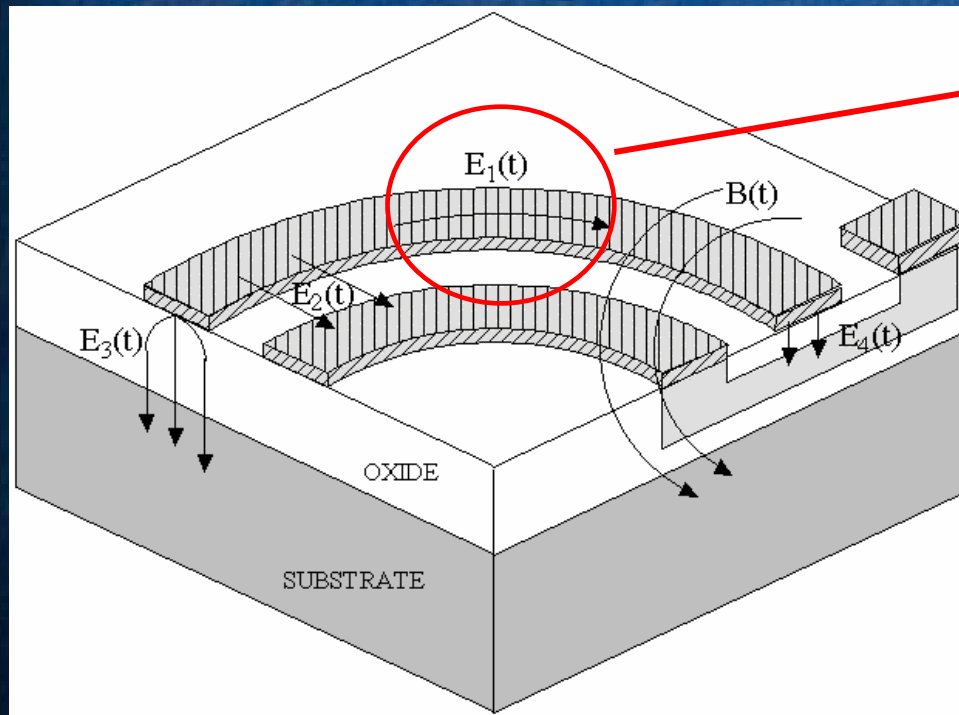
Introducción

- Inductores integrados
 - Campo magnético $B(t)$



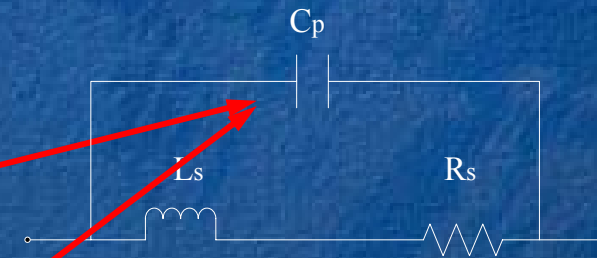
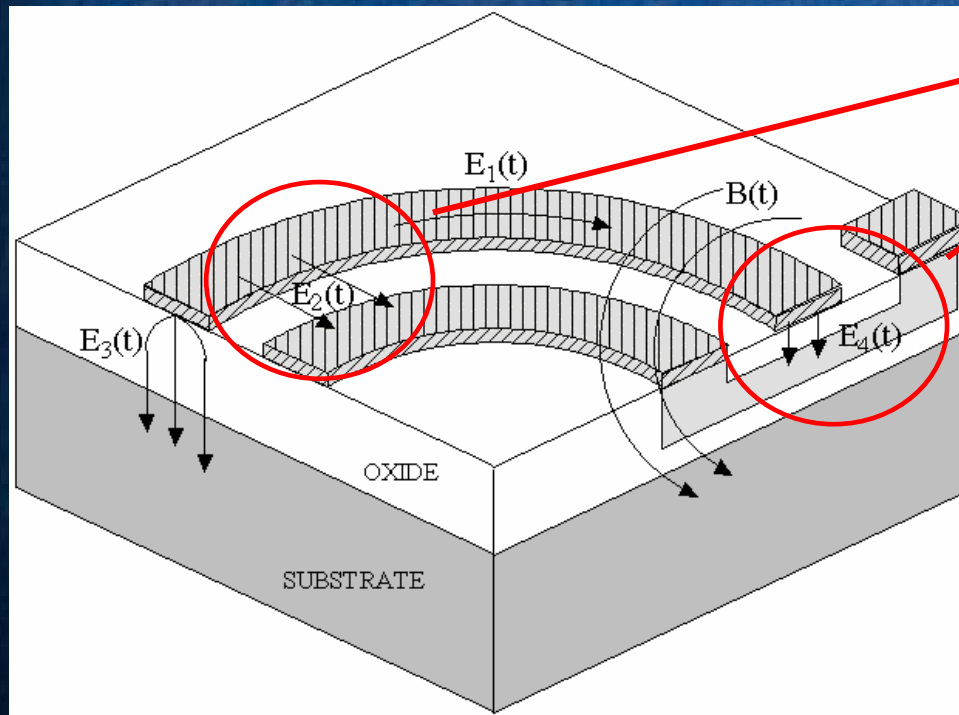
Introducción

- Inductores integrados
 - Campo eléctrico $E_1(t)$



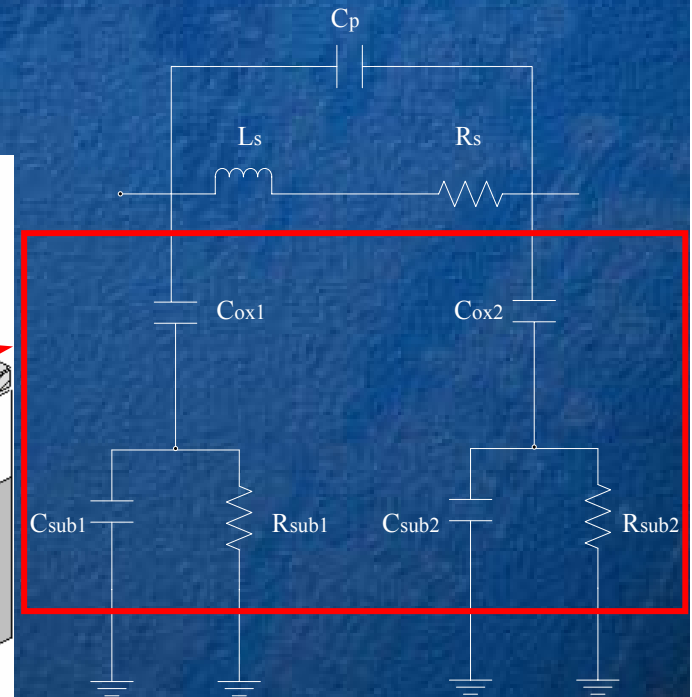
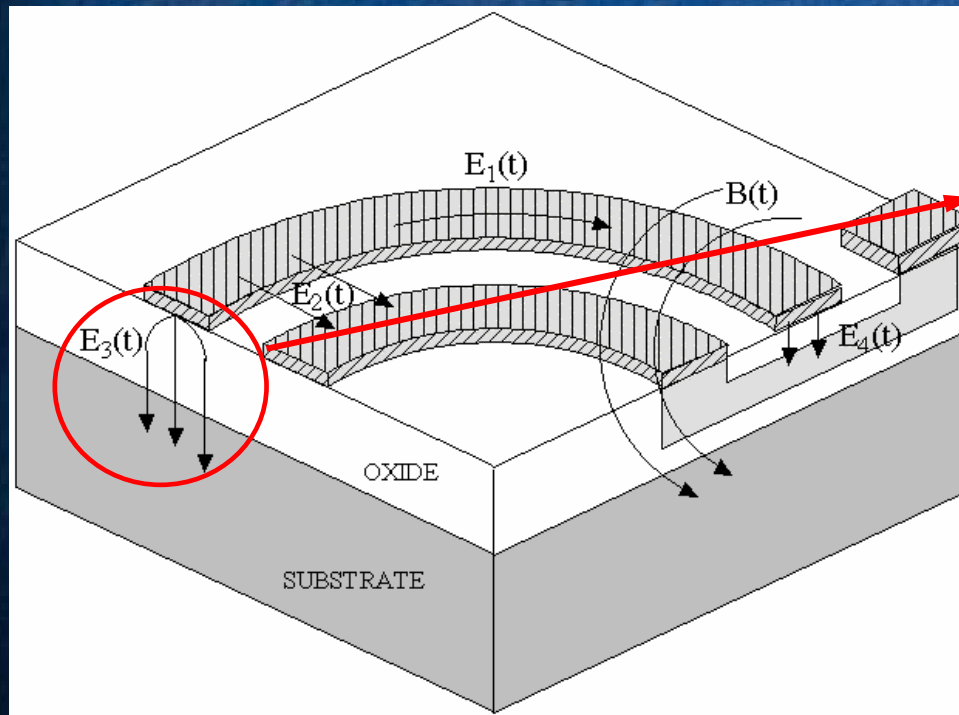
Introducción

- Inductores integrados
 - Campos eléctricos $E_2(t)$ y $E_4(t)$



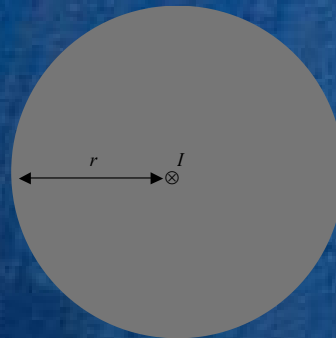
Introducción

- Inductores integrados
 - Campo eléctrico $E_3(t)$

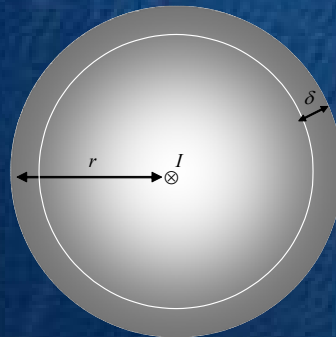


Introducción

- Fuentes de pérdidas
 - Efecto pelicular (efecto *skin*)



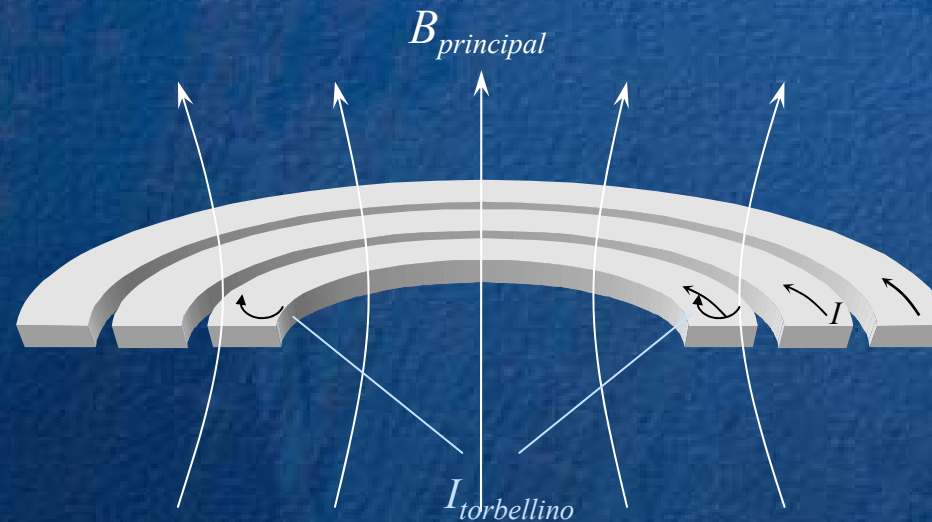
- Distribución uniforme de la corriente



- Distribución no uniforme de la corriente
- Concentración en los bordes $\rightarrow \delta$
- Aumento de la resistencia

Introducción

- Fuentes de pérdidas
 - Corrientes de torbellino (corrientes *eddy*)



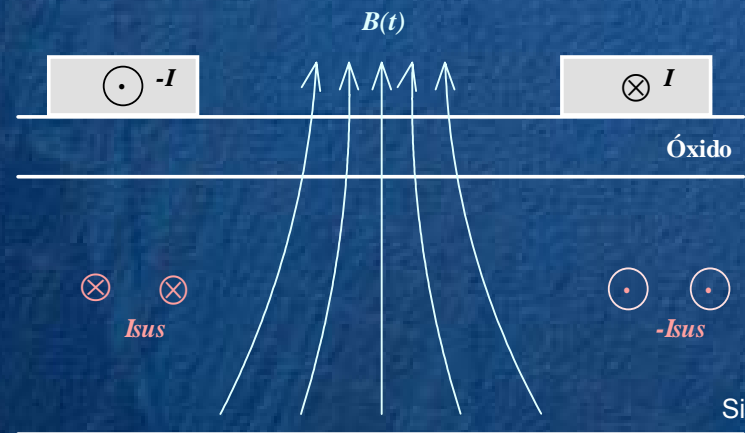
Pistas interiores → Distribución no uniforme de la corriente

↑ I en el interior
↓ I en el exterior

→ ↑ Resistencia

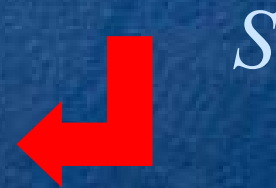
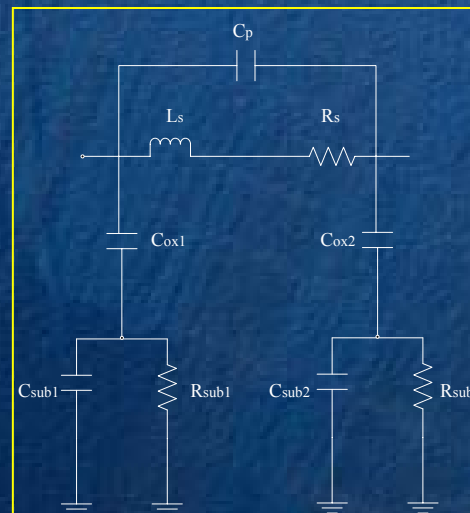
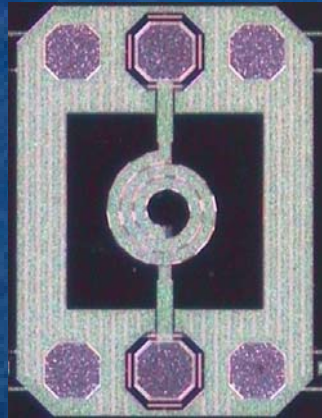
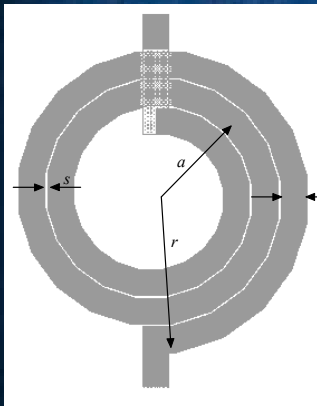
Introducción

- Fuentes de pérdidas
 - Corrientes en el sustrato de Si



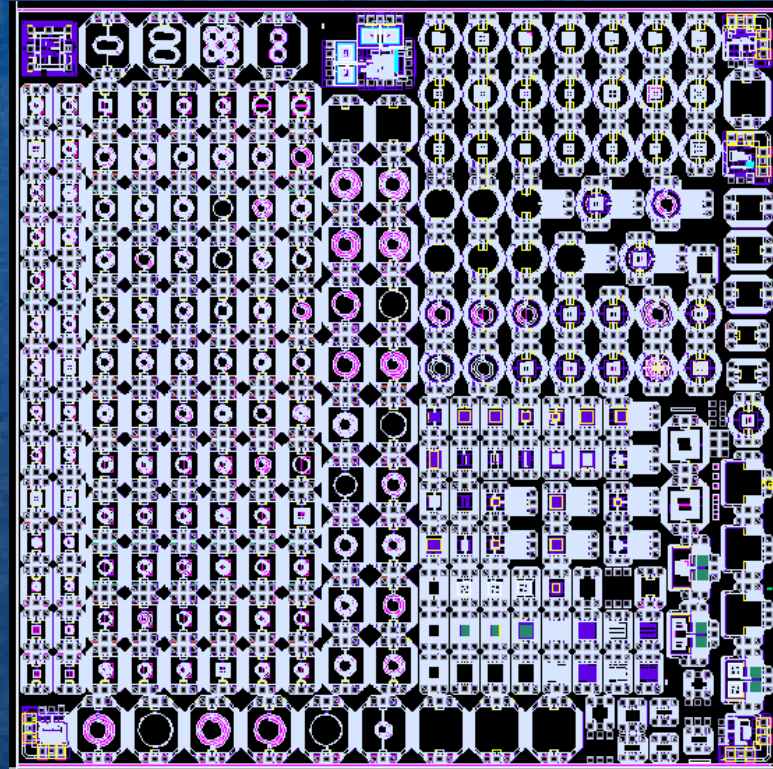
Introducción

- Diseño y fabricación de un inductor integrado



Introducción

- Generación de una librería completa
 - Mismo proceso múltiples veces
 - Elevado coste económico
 - Requiere mucho tiempo



Introducción

- Objetivo:
 - Generar una librería de inductores integrados

↓ Coste económico

↓ Coste en tiempo

USO DE SIMULADORES ELECTROMAGNÉTICOS

Índice

1. Introducción
2. ADS: Momentum
3. Estudios Previos
4. Diseño de la librería de inductores
5. Herramientas desarrolladas
6. Conclusiones y líneas futuras
7. Presupuesto

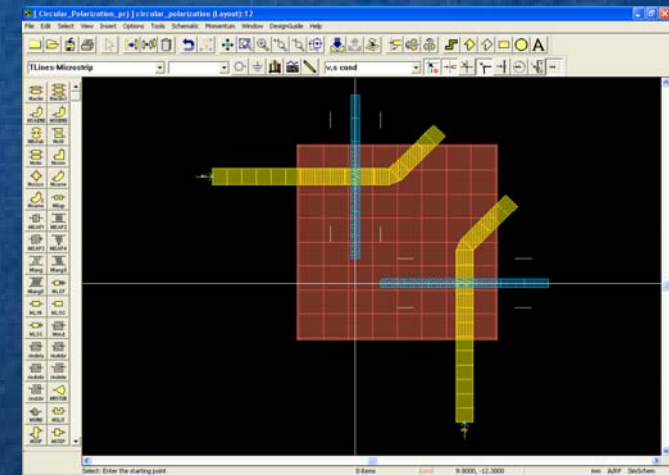
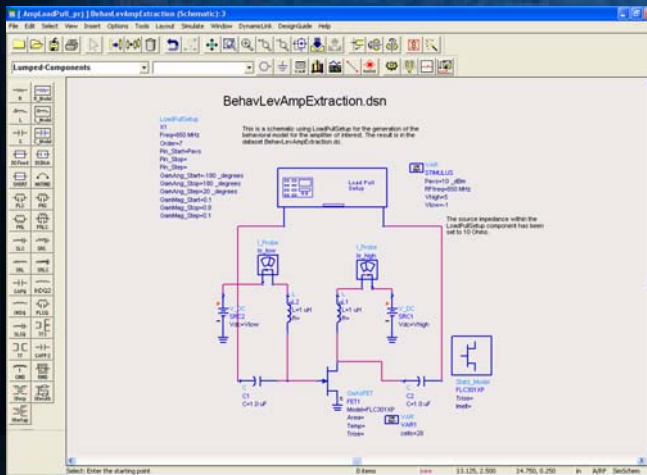
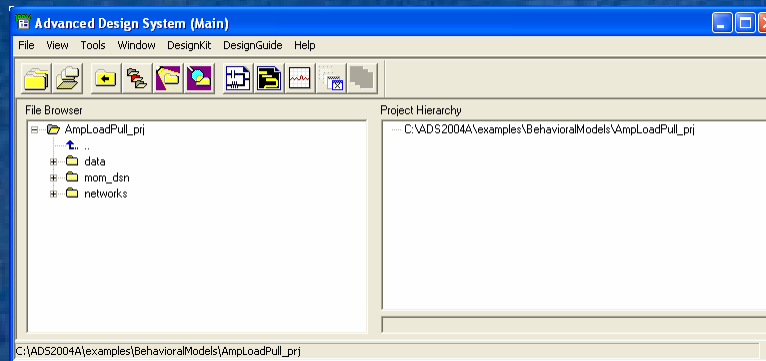
ADS: Momentum

- ADS
 - Paquete CAD de Agilent Technologies
 - Distintos tipos de simulaciones
 - Típicas en otros paquetes SW: DC, lineal, transitorio,...
 - Avanzadas: HB, S, electromagnético,...



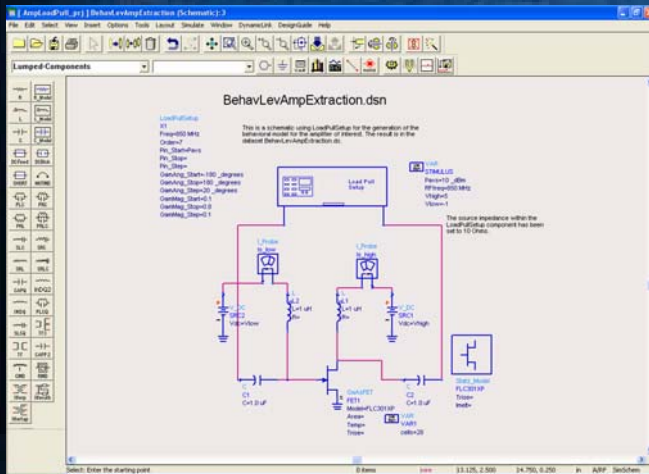
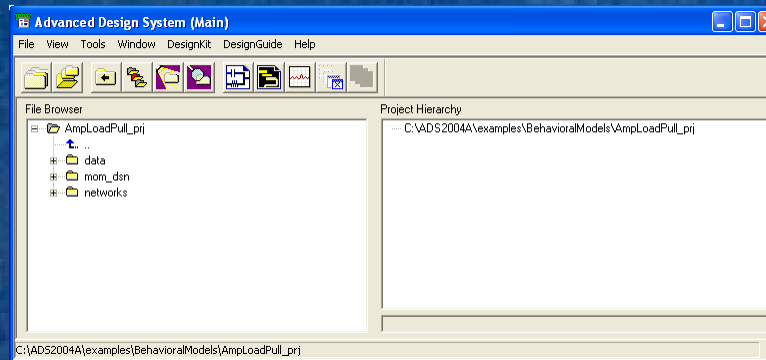
ADS: Momentum

- Entorno

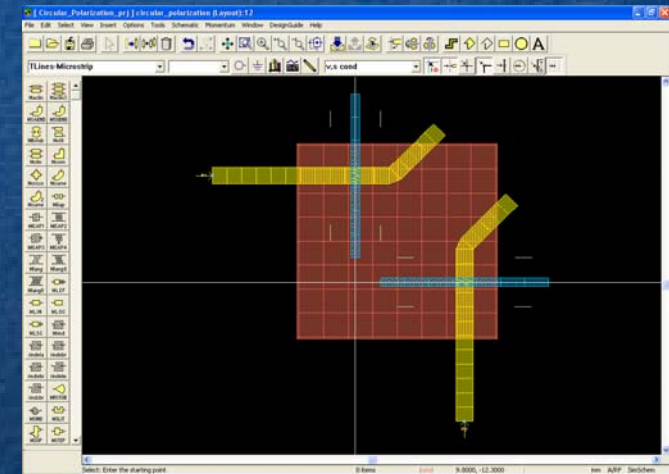


ADS: Momentum

- Entorno

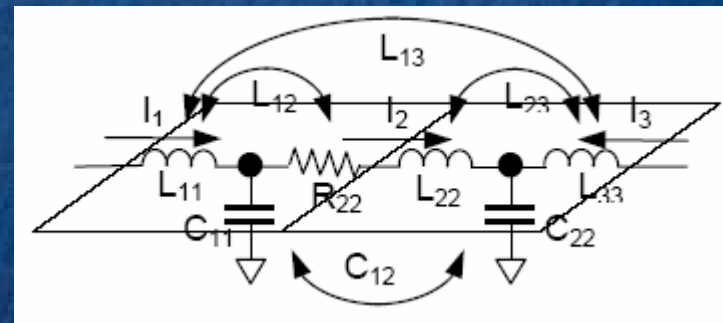
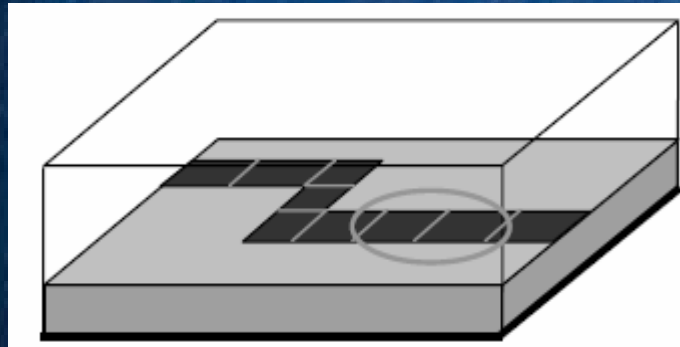


←
Caja negra



ADS: Momentum

- Momentum
 - Simulador electromagnético
 - Basado en el “método de los momentos”



ADS: Momentum

- Momentum
 - Momentum RF

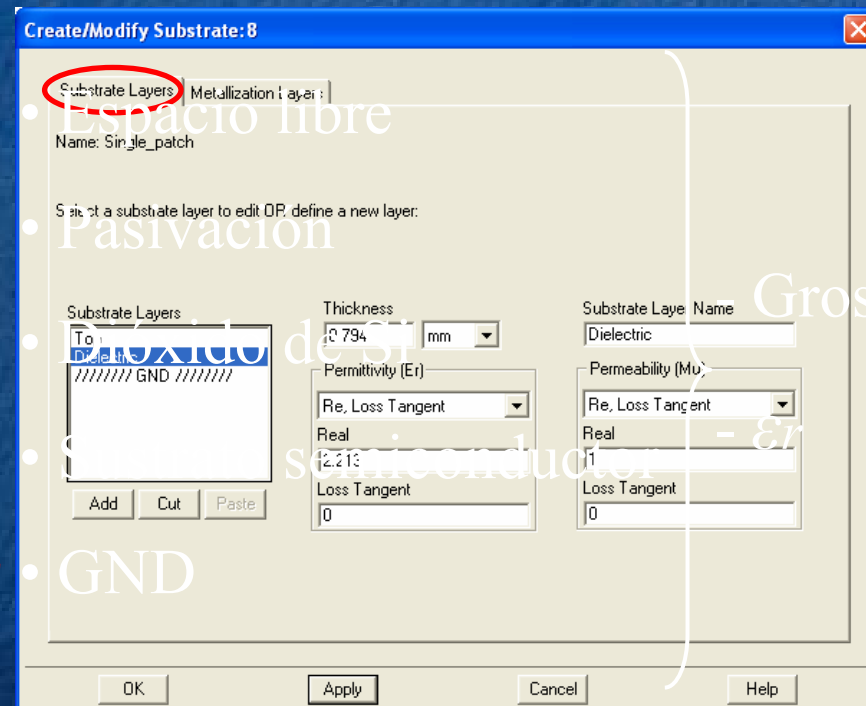
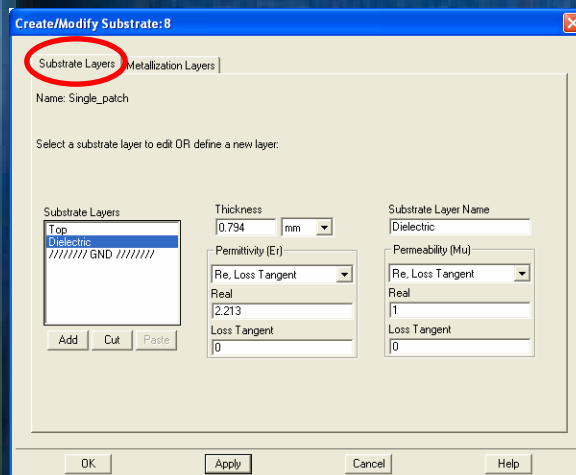
↑ Precisión

↓ Coste computacional

} Banda de RF

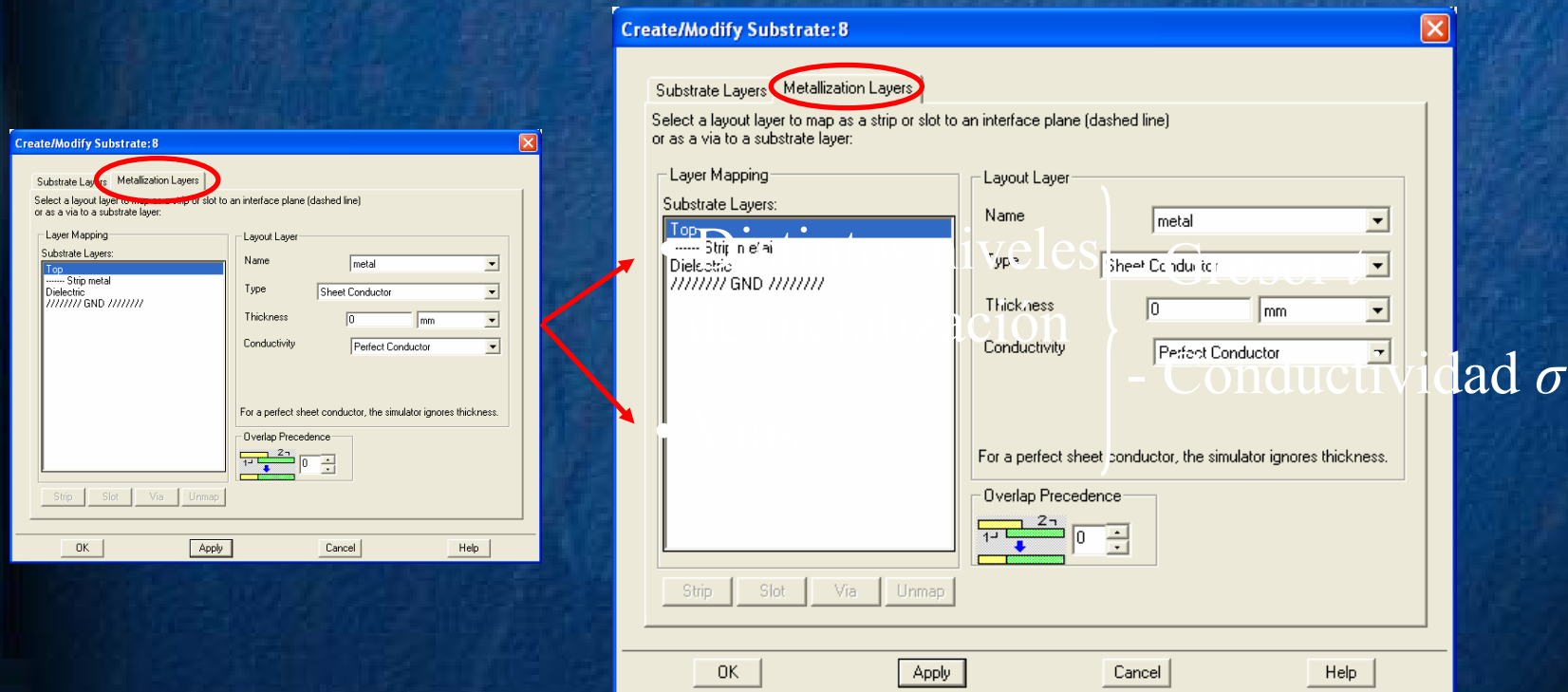
ADS: Momentum

- Momentum
 - Definición de las capas de sustrato



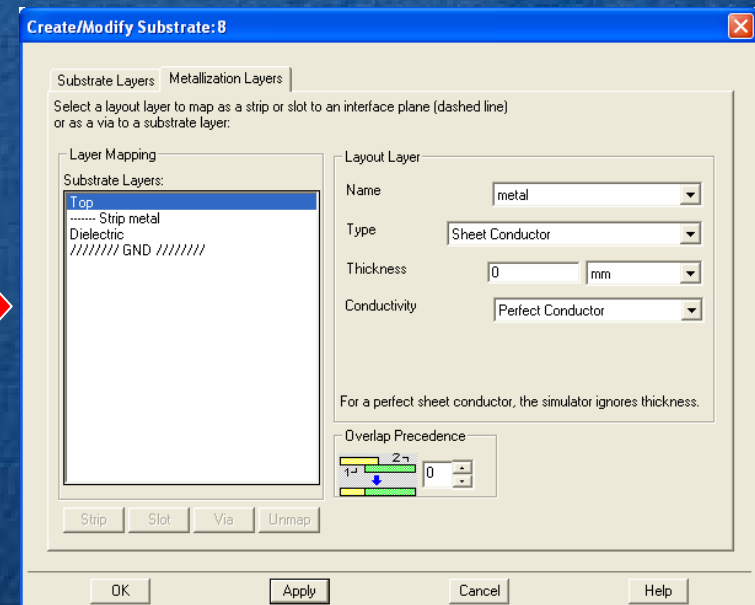
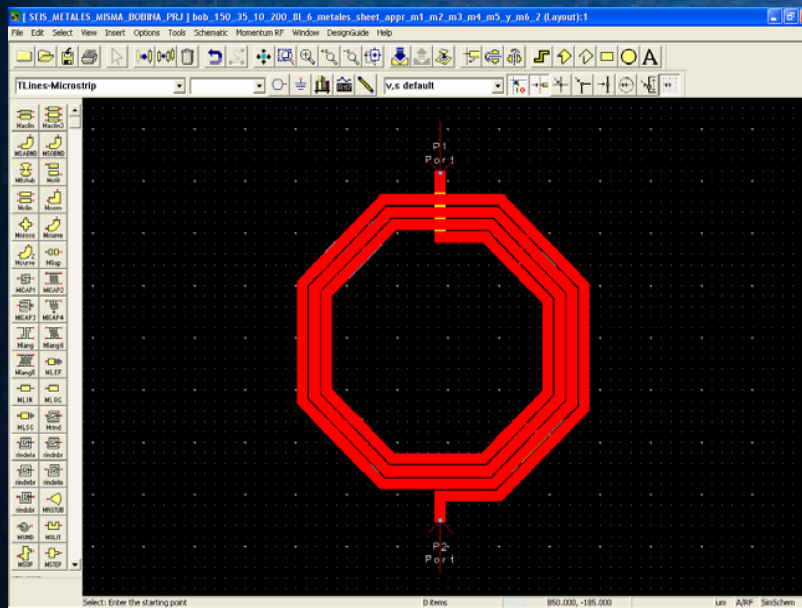
ADS: Momentum

- Momentum
 - Definición de las capas de metalización



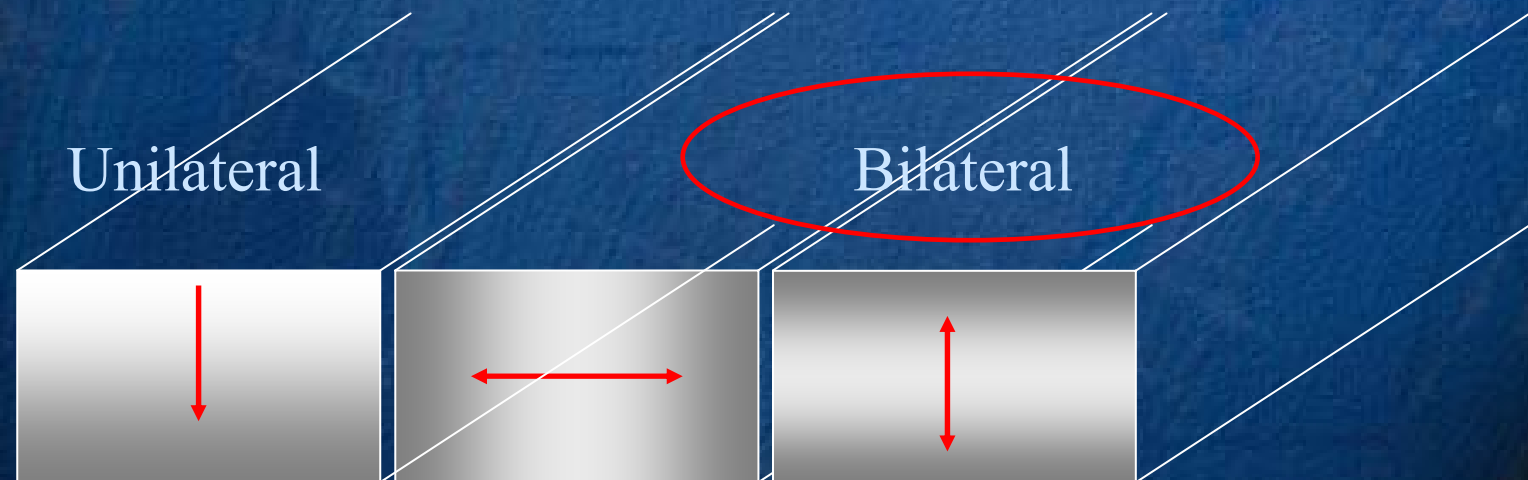
ADS: Momentum

- Momentum
 - Relación entre capas



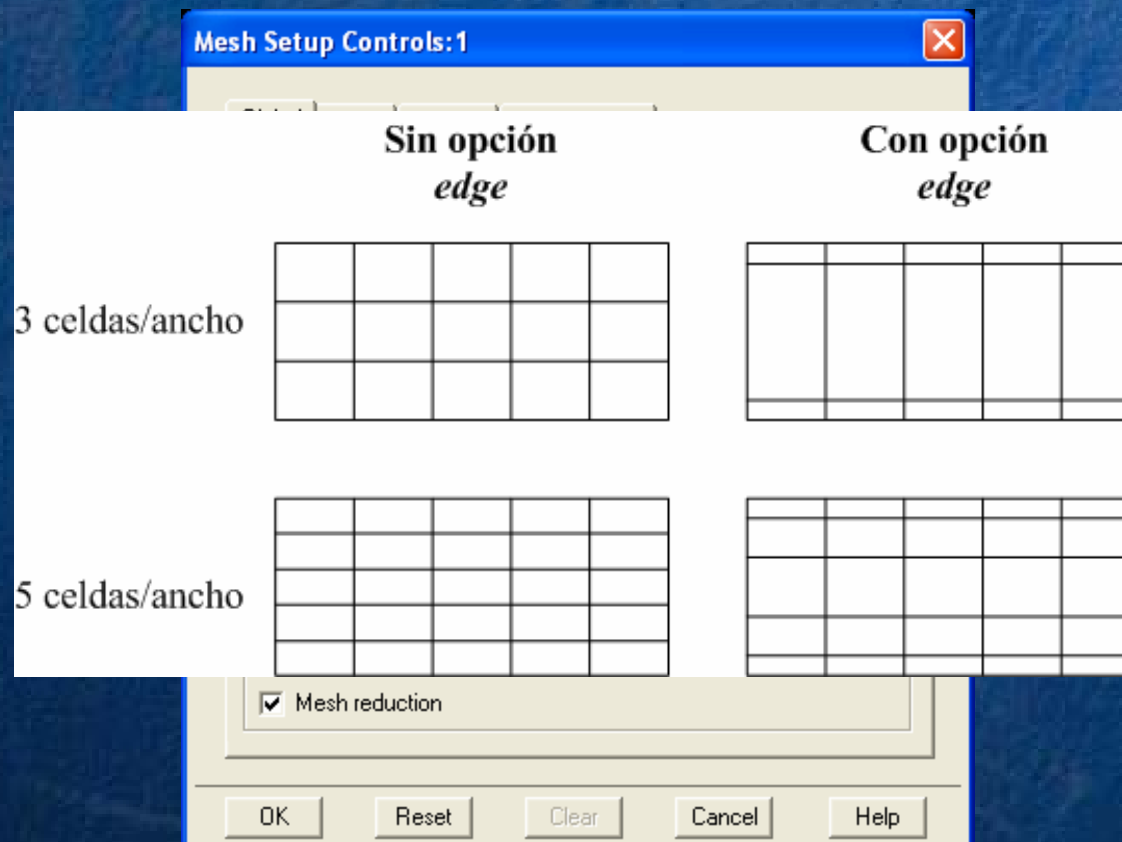
ADS: Momentum

- Momentum
 - Efecto pelicular. Separa en:
 - Efecto *edge*
 - Efecto *skin*



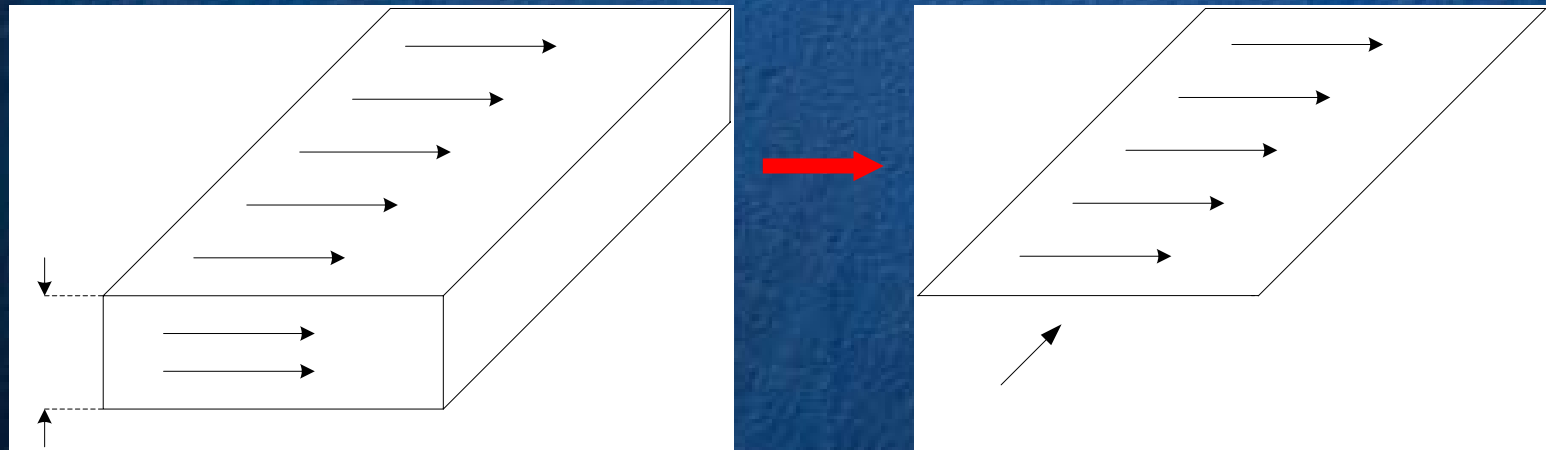
ADS: Momentum

- Momentum
 - Efecto *edge*. Mallado especial



ADS: Momentum

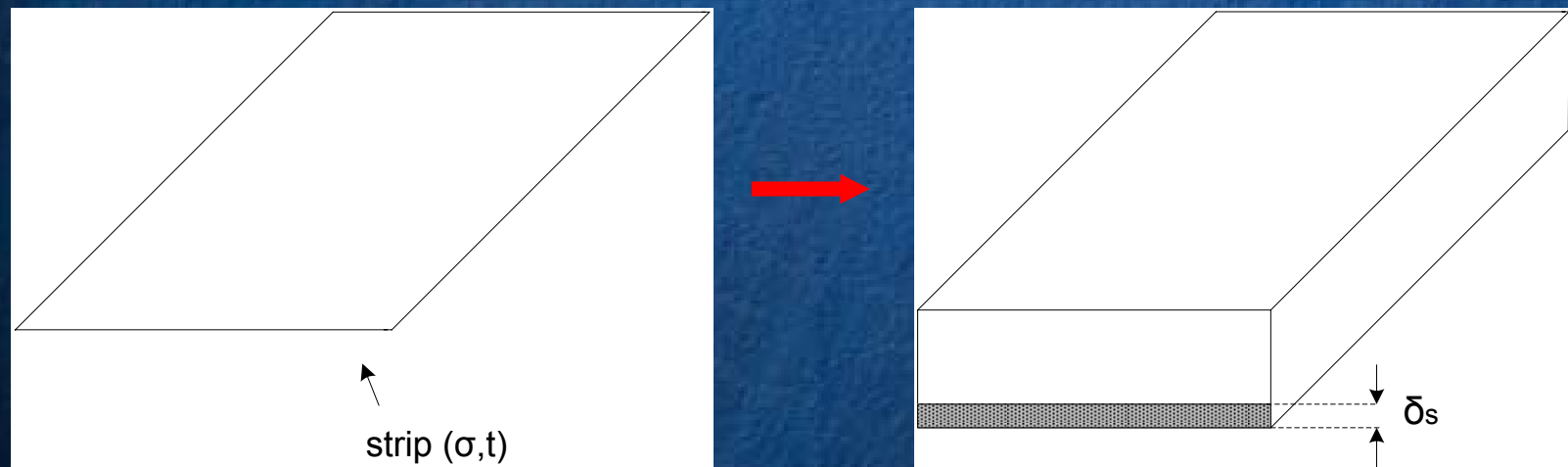
- Momentum
 - Grosor de las capas metálicas. Efecto *skin*
 - Aproximación de grosor nulo (*sheet*)



Z_s función de t y σ

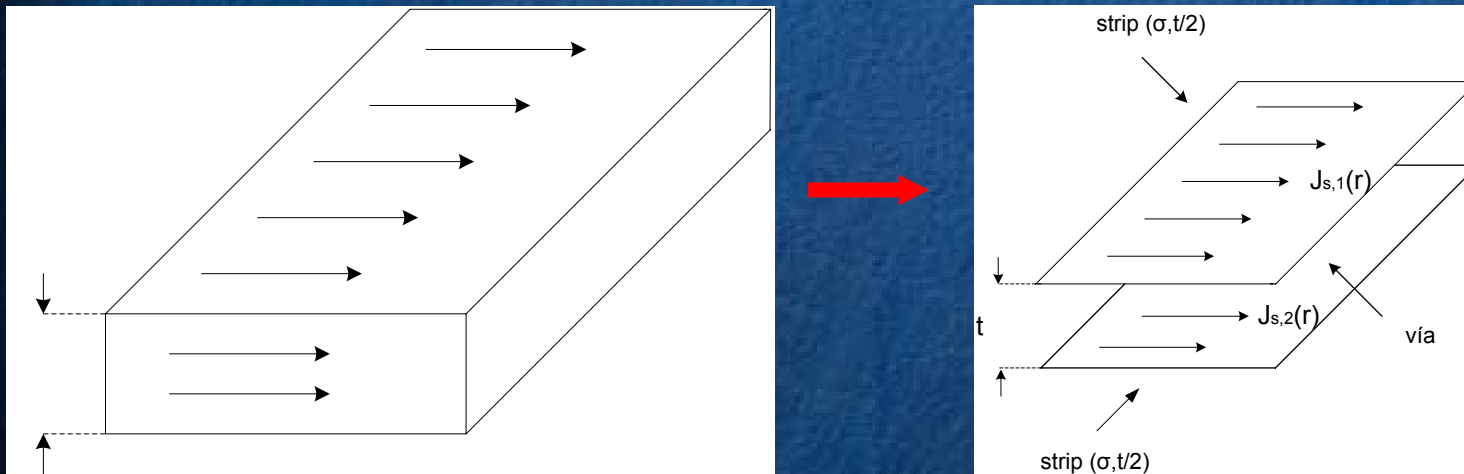
ADS: Momentum

- Momentum
 - Grosor de las capas metálicas. Efecto *skin*
 - Aproximación de grosor nulo (*sheet*)



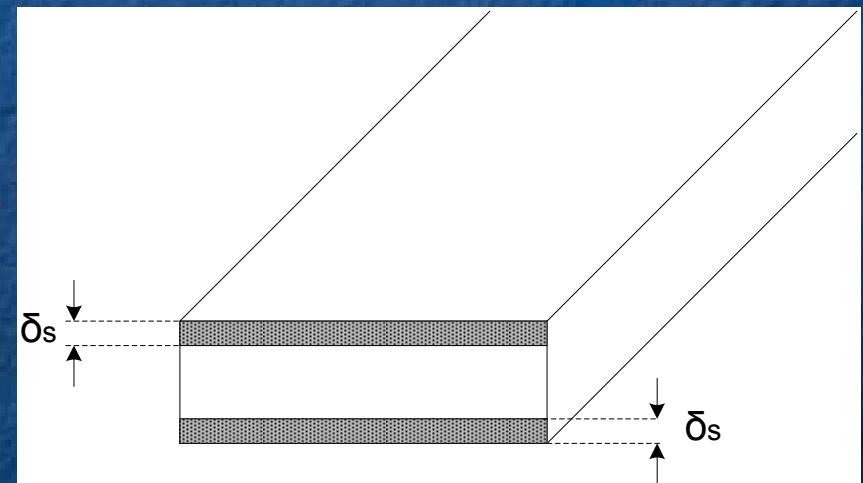
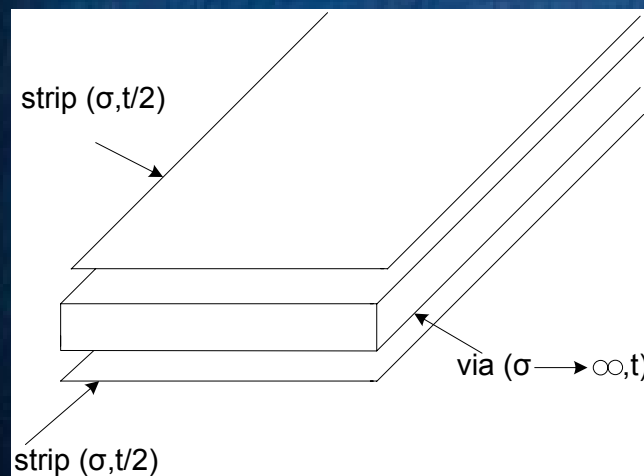
ADS: Momentum

- Momentum
 - Grosor de las capas metálicas. Efecto *skin*
 - Aproximación de grosor finito (*thick*)



ADS: Momentum

- Momentum
 - Grosor de las capas metálicas. Efecto *skin*
 - Aproximación de grosor finito (*thick*)

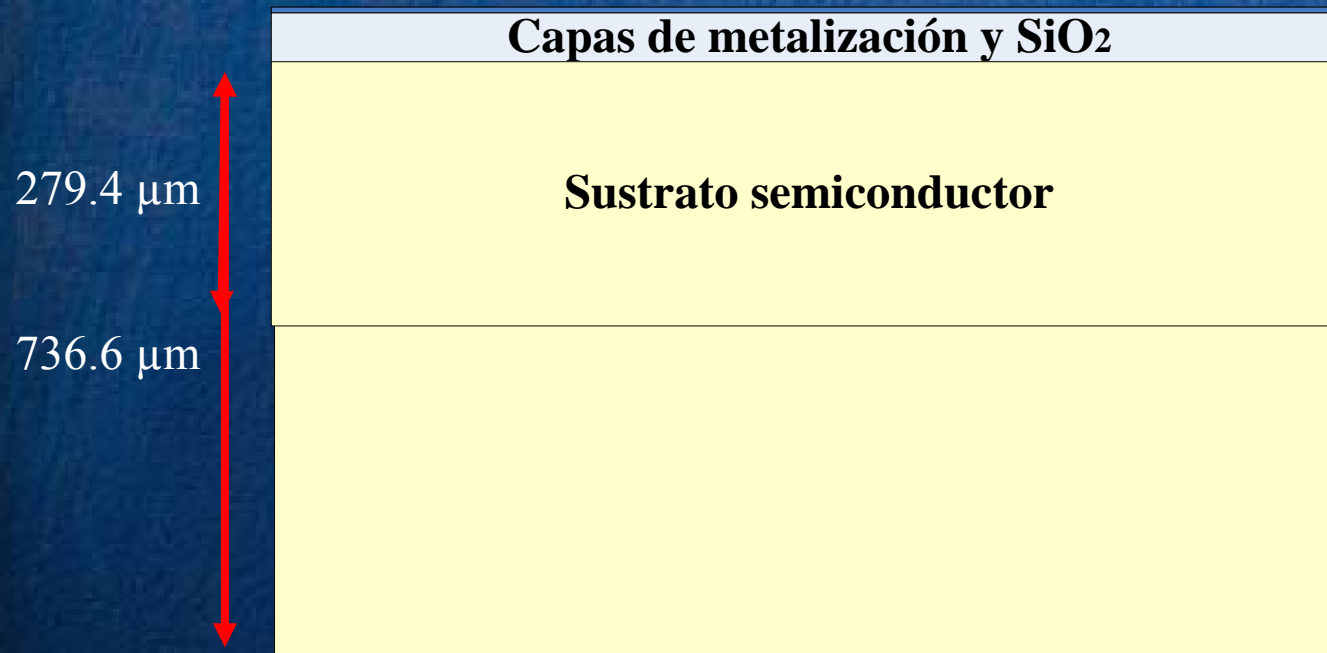


Índice

1. Introducción
2. ADS: Momentum
3. Estudios Previos
4. Diseño de la librería de inductores
5. Herramientas desarrolladas
6. Conclusiones y líneas futuras
7. Presupuesto

Estudios previos

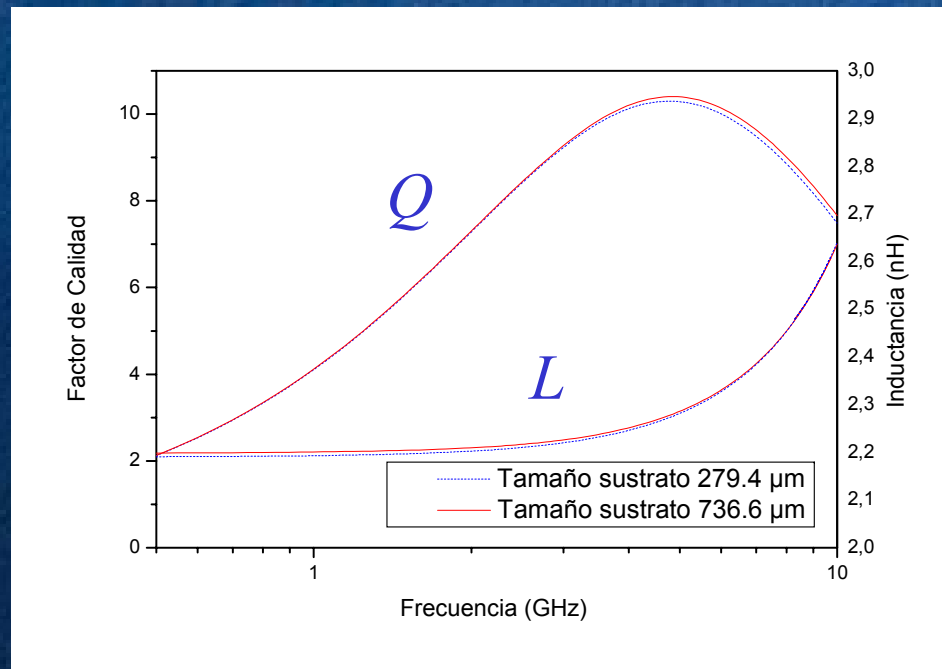
- Tecnología UMC 0.18 μm



Estudios previos

- Estudio del grosor del sustrato semiconductor
 - Grosor 279.4 μm /736.6 μm

$r = 88.5 \mu\text{m}$, $n = 3.5$ vueltas, $w = 10 \mu\text{m}$, $s = 2 \mu\text{m}$, M6_2



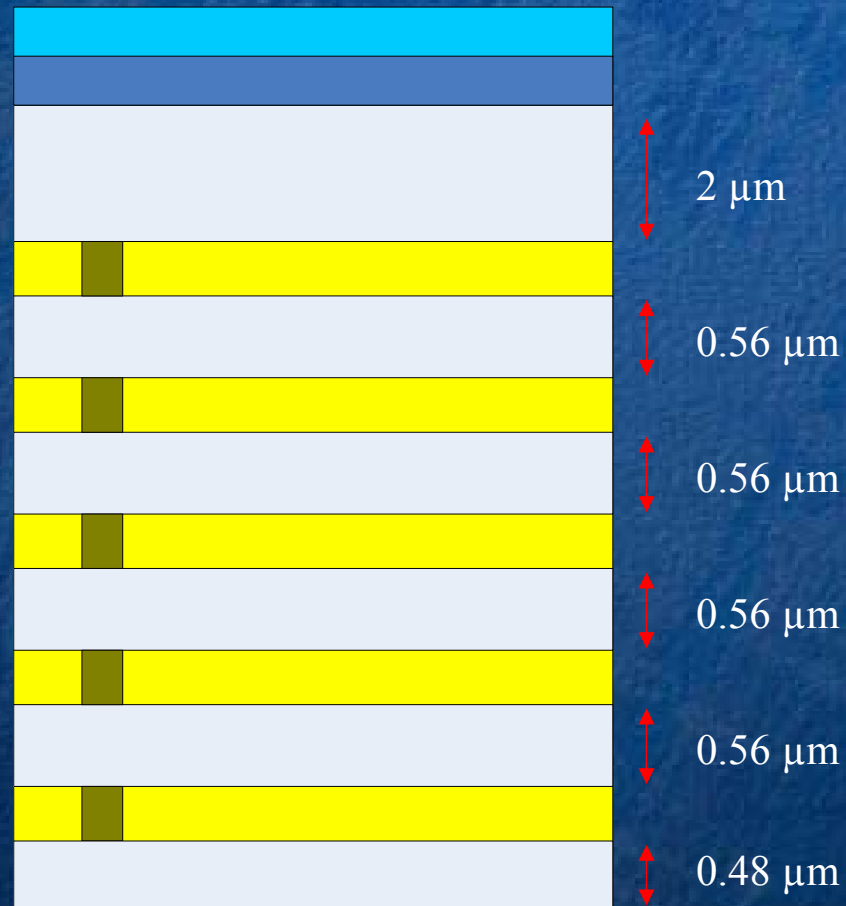
Estudios previos

- Tecnología UMC 0.18 μm



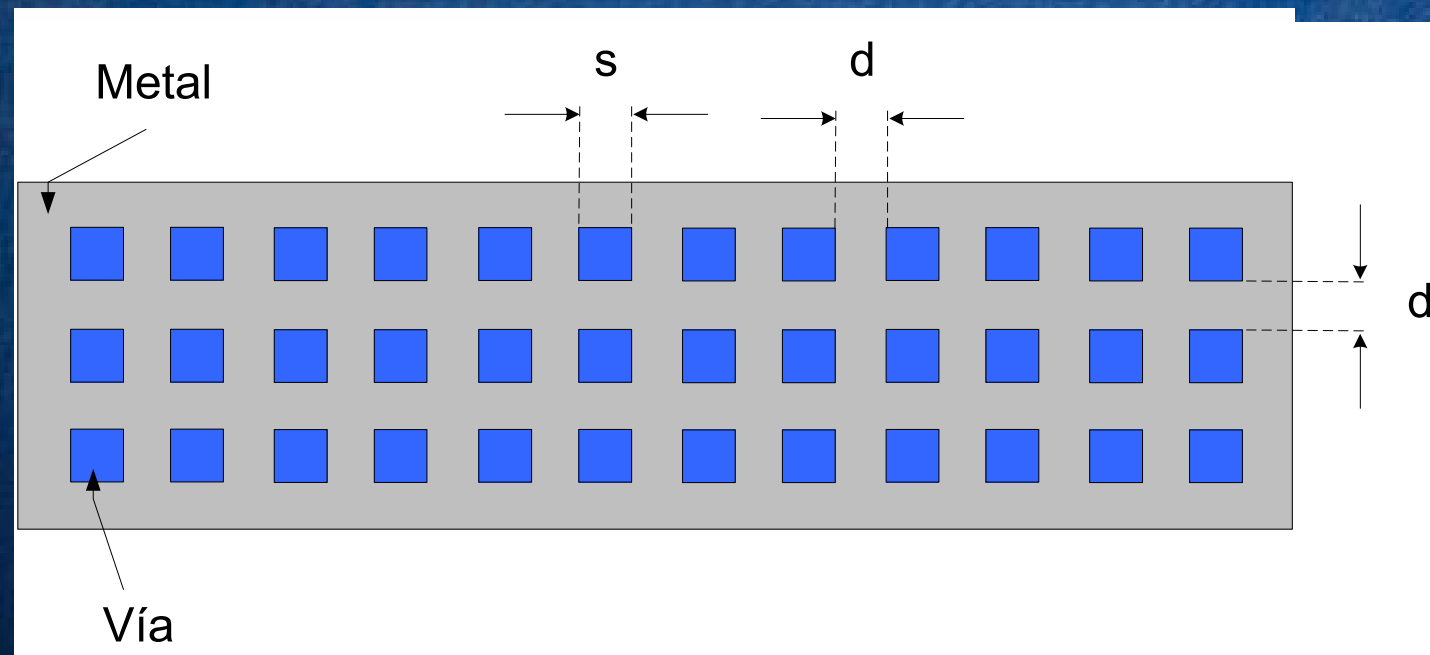
Estudios previos

- Tecnología UMC 0.18 μm



Estudios previos

- Disposición de las vías entre capas metálicas
 - Literatura: vías continuas
 - Reglas de diseño: vías distribuidas
 - Simulador Momentum: no permite vías distribuidas

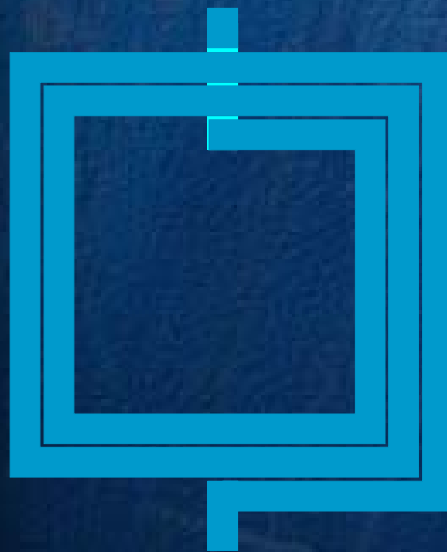


Estudios previos

- Parámetros geométricos
 - Número de lados

$$r = 120 \mu\text{m}, n = 2.5 \text{ vueltas}, w = 15 \mu\text{m}, s = 2 \mu\text{m}$$

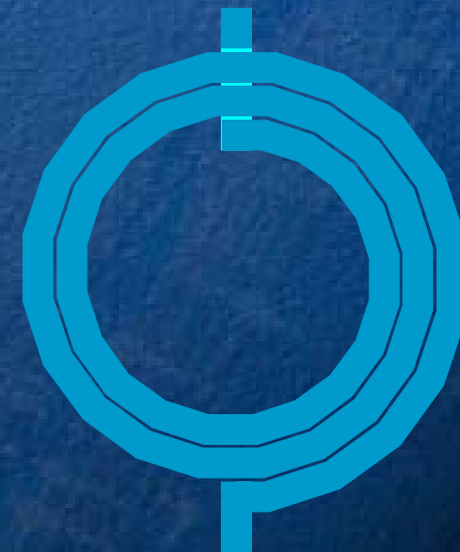
4 lados



8 lados

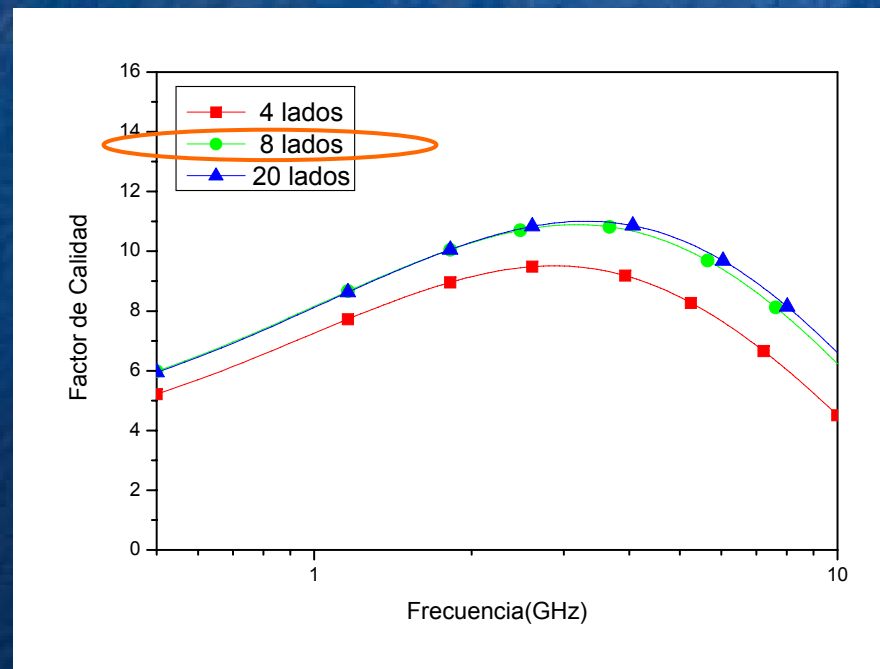


20 lados

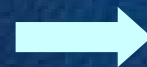


Estudios previos

- Parámetros geométricos
 - Número de lados



↑ lados

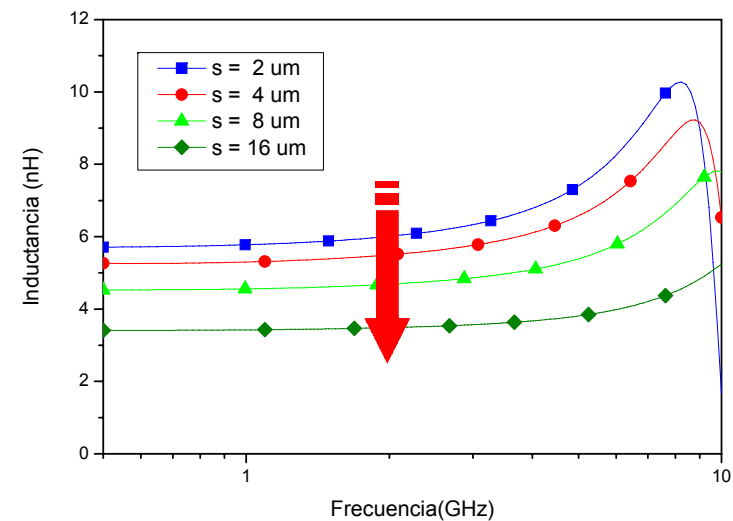
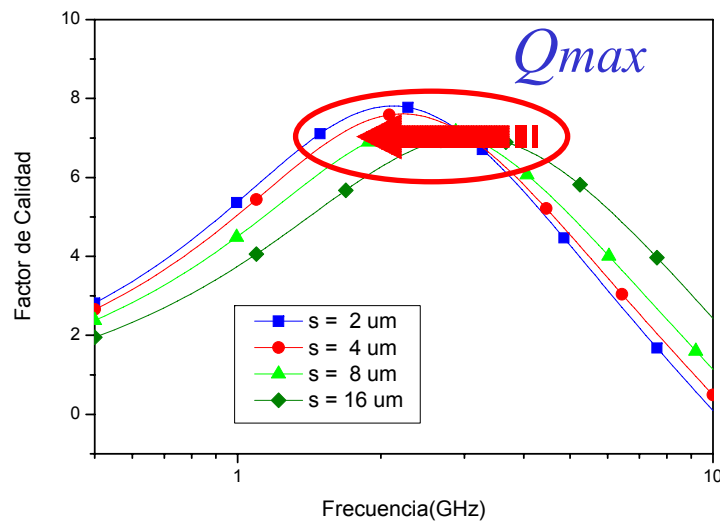


↑ Factor de calidad

Estudios previos

- Parámetros geométricos
 - Espaciado entre pistas metálicas s

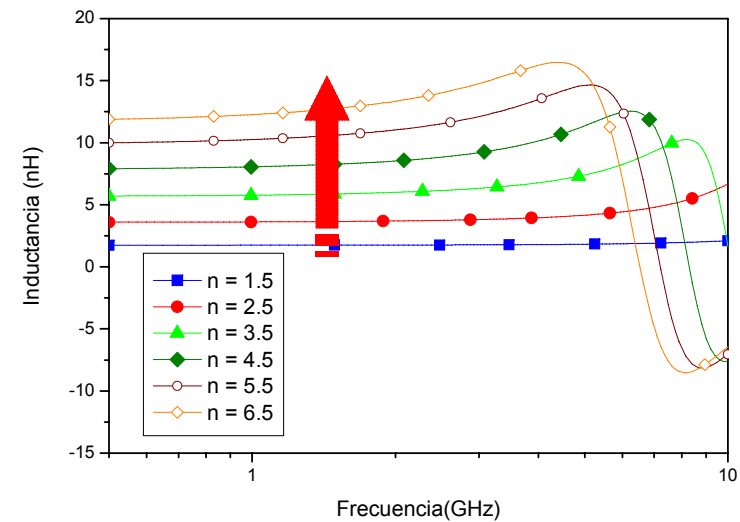
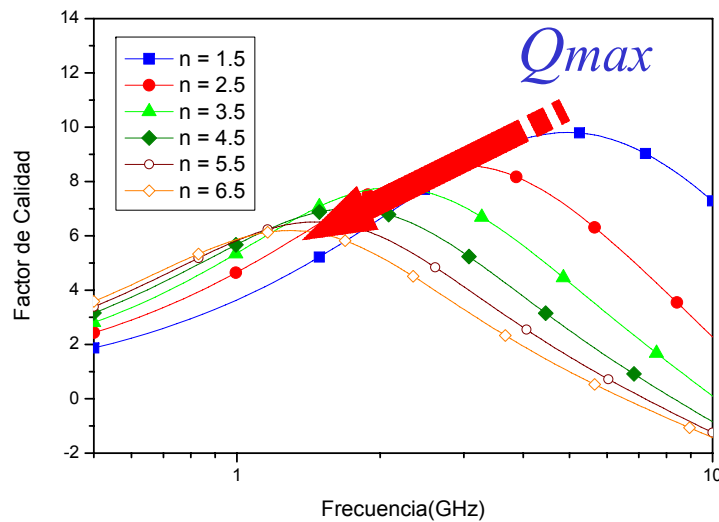
$$r = 150\mu\text{m}, n = 3.5 \text{ vueltas}, w = 10 \mu\text{m}$$



Estudios previos

- Parámetros geométricos
 - Número de vueltas n

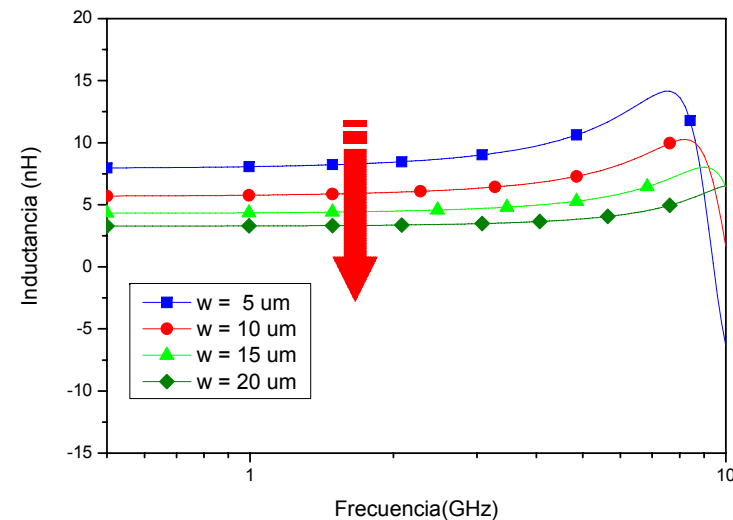
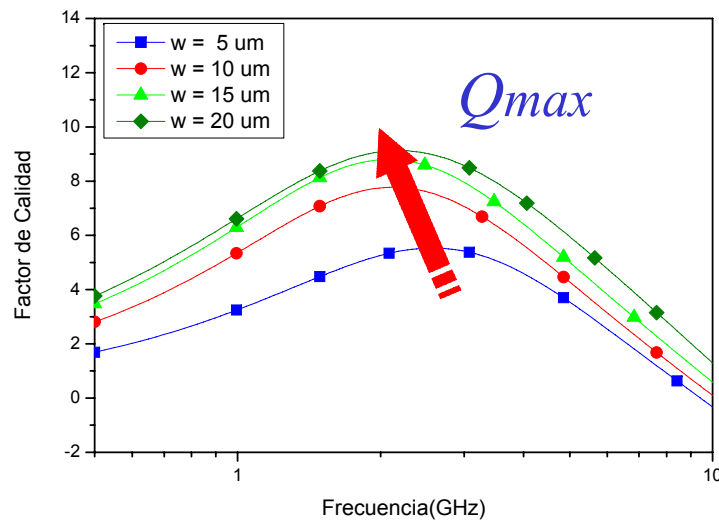
$$r = 150\mu\text{m}, w = 10\mu\text{m}, s = 2\mu\text{m}$$



Estudios previos

- Parámetros geométricos
 - Ancho de pista w

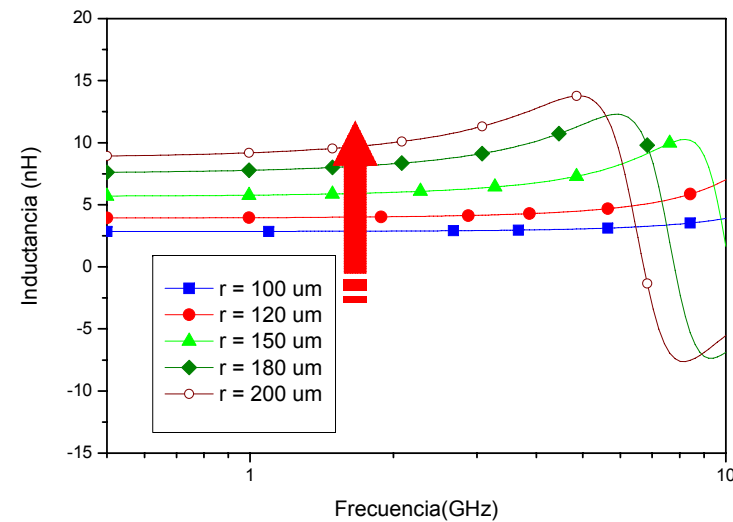
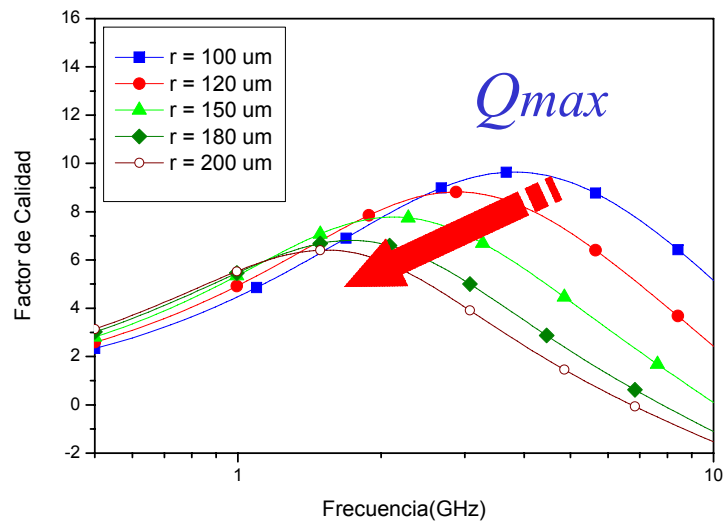
$$r = 150\mu\text{m}, n = 3.5 \text{ vueltas}, s = 2\mu\text{m}$$



Estudios previos

- Parámetros geométricos
 - Radio exterior r

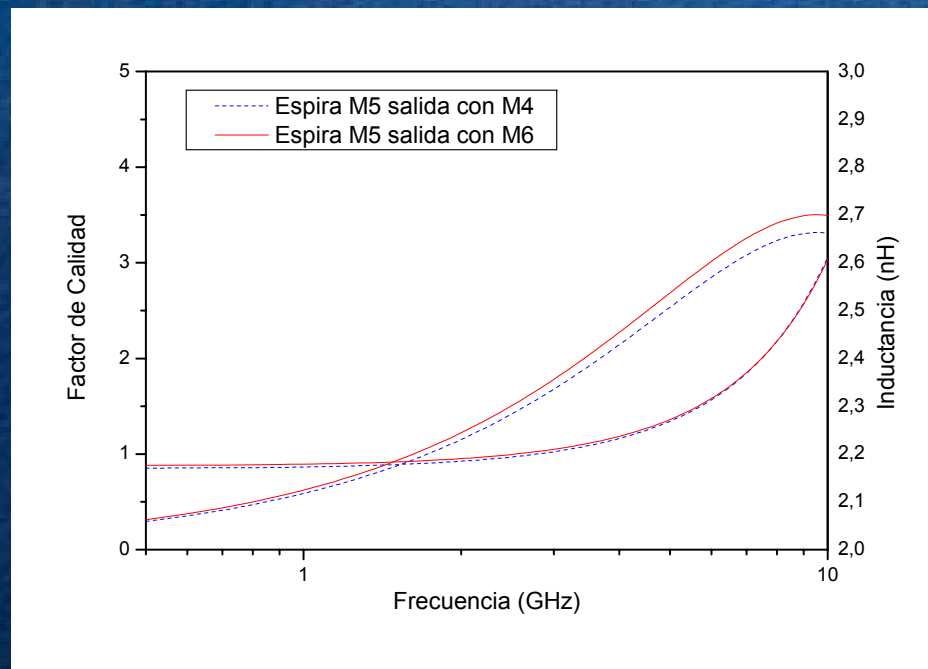
$$n = 3.5 \text{ vueltas}, w = 10 \mu\text{m}, s = 2 \mu\text{m}$$



Estudios previos

- Parámetros estructurales
 - Metal auxiliar de salida

$r = 90 \mu\text{m}$, $n = 3.5$ vueltas, $w = 10 \mu\text{m}$, $s = 2 \mu\text{m}$

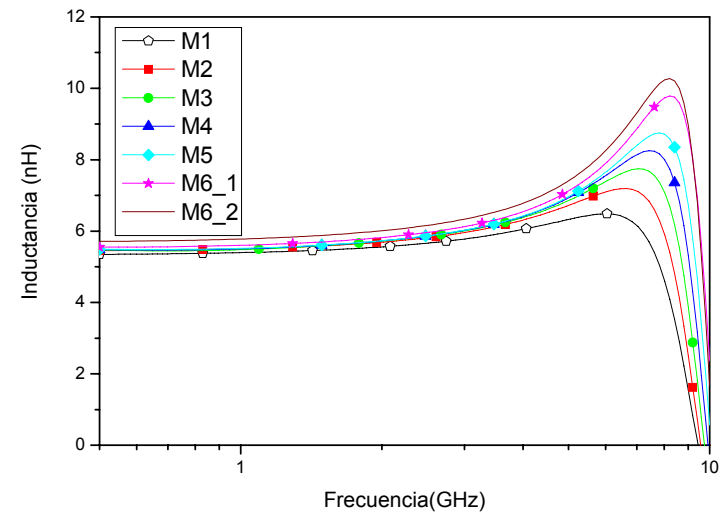
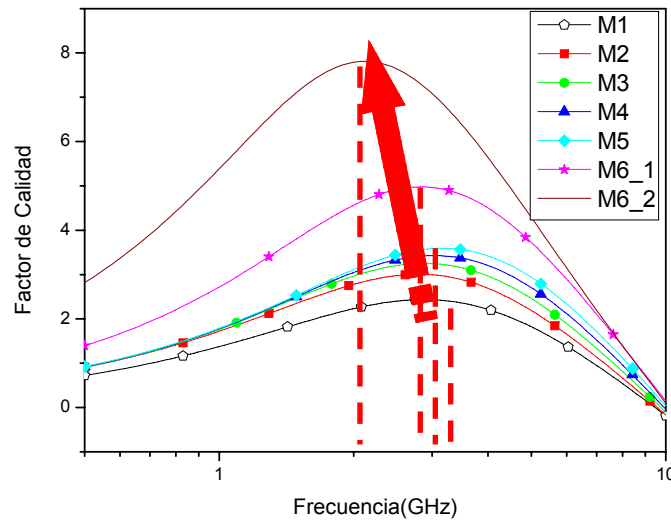


Estudios previos

- Parámetros estructurales
 - Metales que forman el inductor

$$r = 150\mu\text{m}, n = 3.5 \text{ vueltas}, w = 10 \mu\text{m}, s = 2 \mu\text{m}$$

1 metal

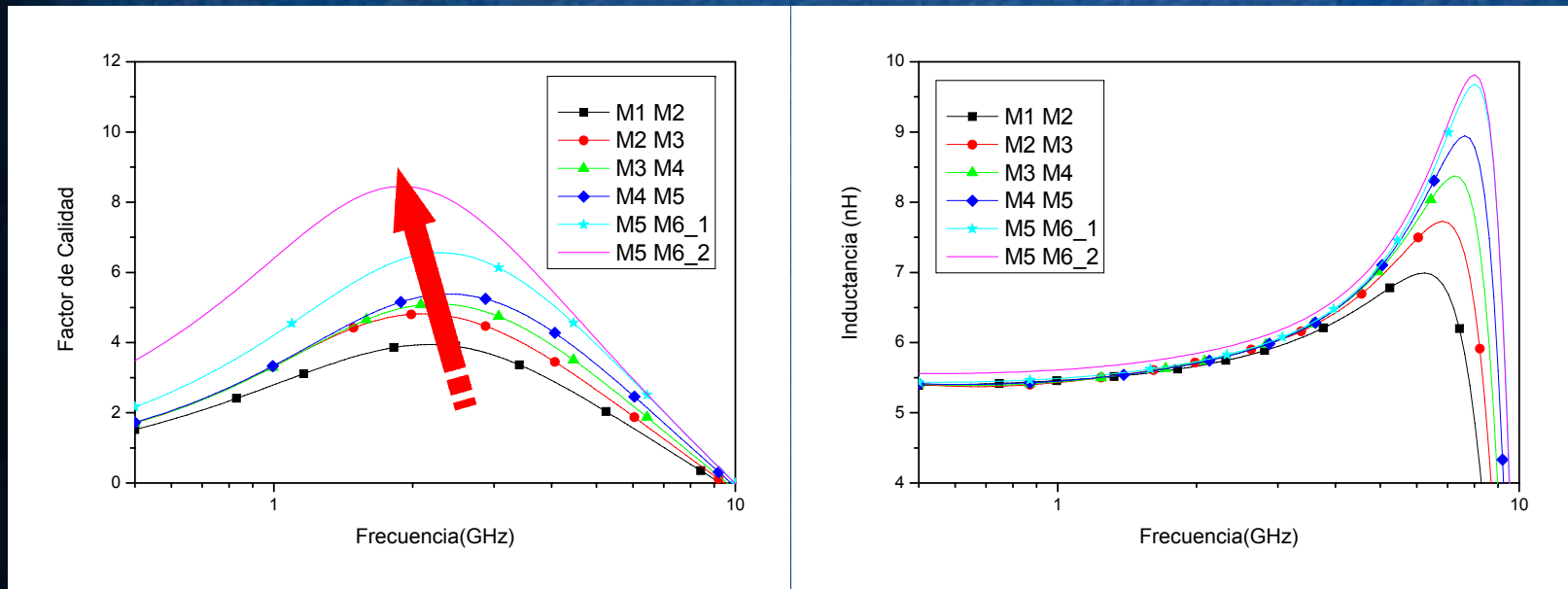


Estudios previos

- Parámetros estructurales
 - Metales que forman el inductor

$$r = 150\mu\text{m}, n = 3.5 \text{ vueltas}, w = 10 \mu\text{m}, s = 2 \mu\text{m}$$

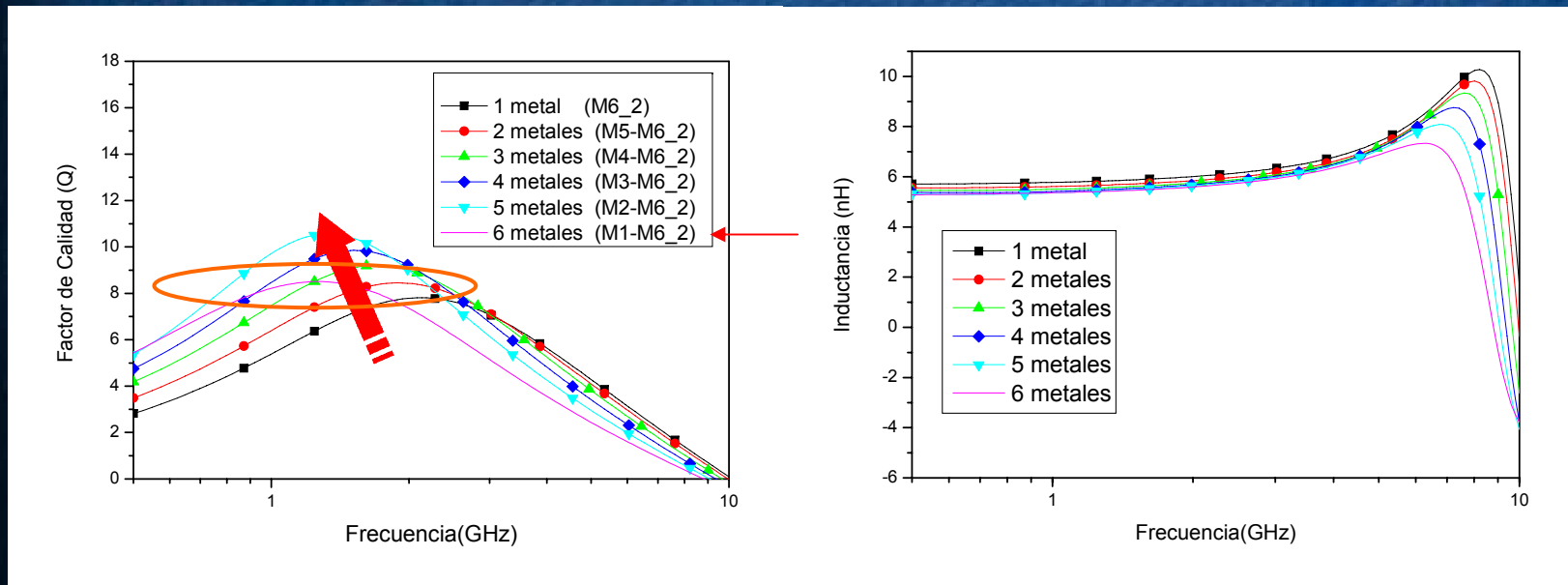
2 metales



Estudios previos

- Parámetros estructurales
 - Metales que forman el inductor

↑ Q → Uso de M6 especial (M6_2)

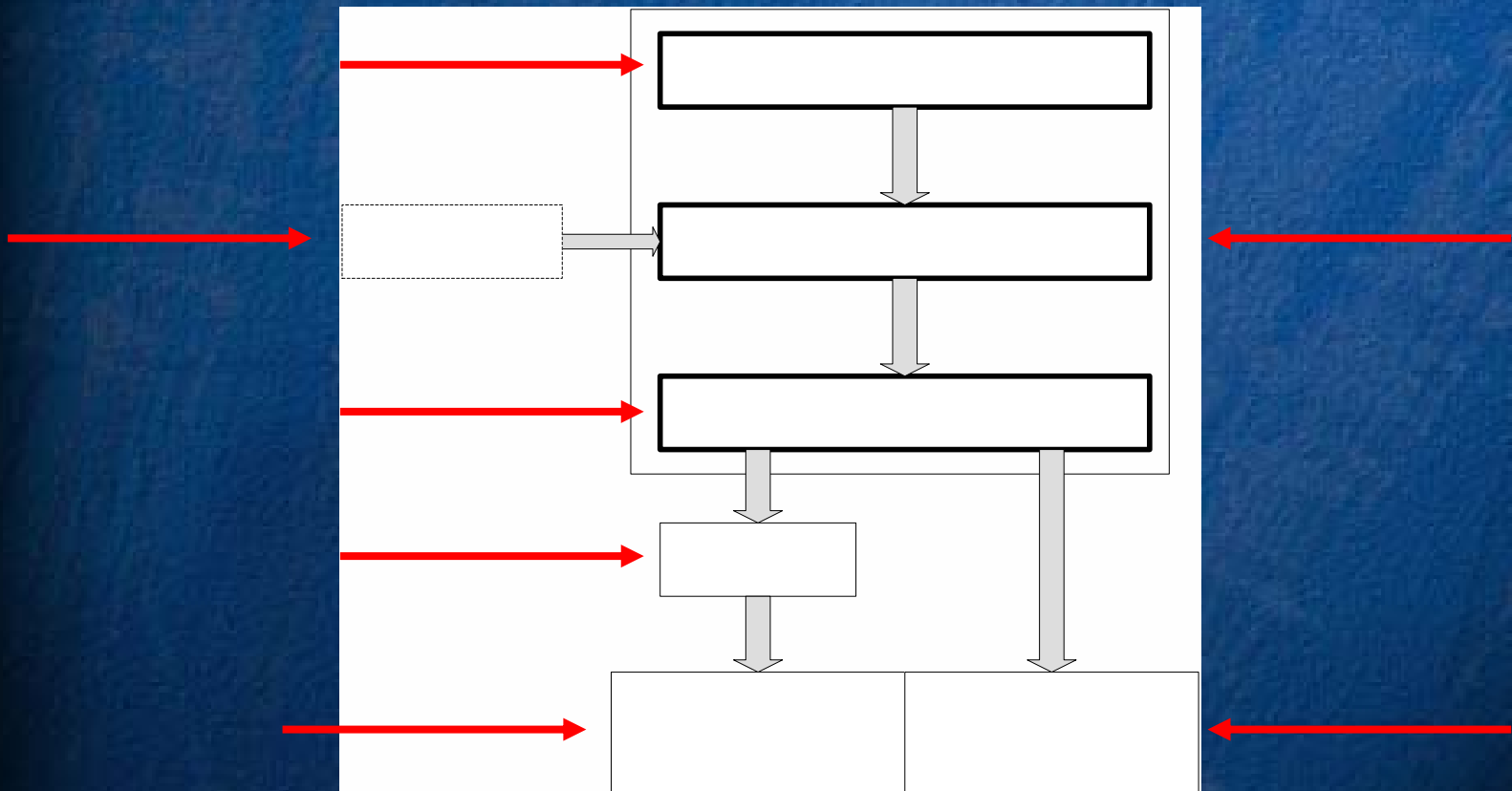


Índice

1. Introducción
2. ADS: Momentum
3. Estudios Previos
4. Diseño de la librería de inductores
5. Herramientas desarrolladas
6. Conclusiones y líneas futuras
7. Presupuesto

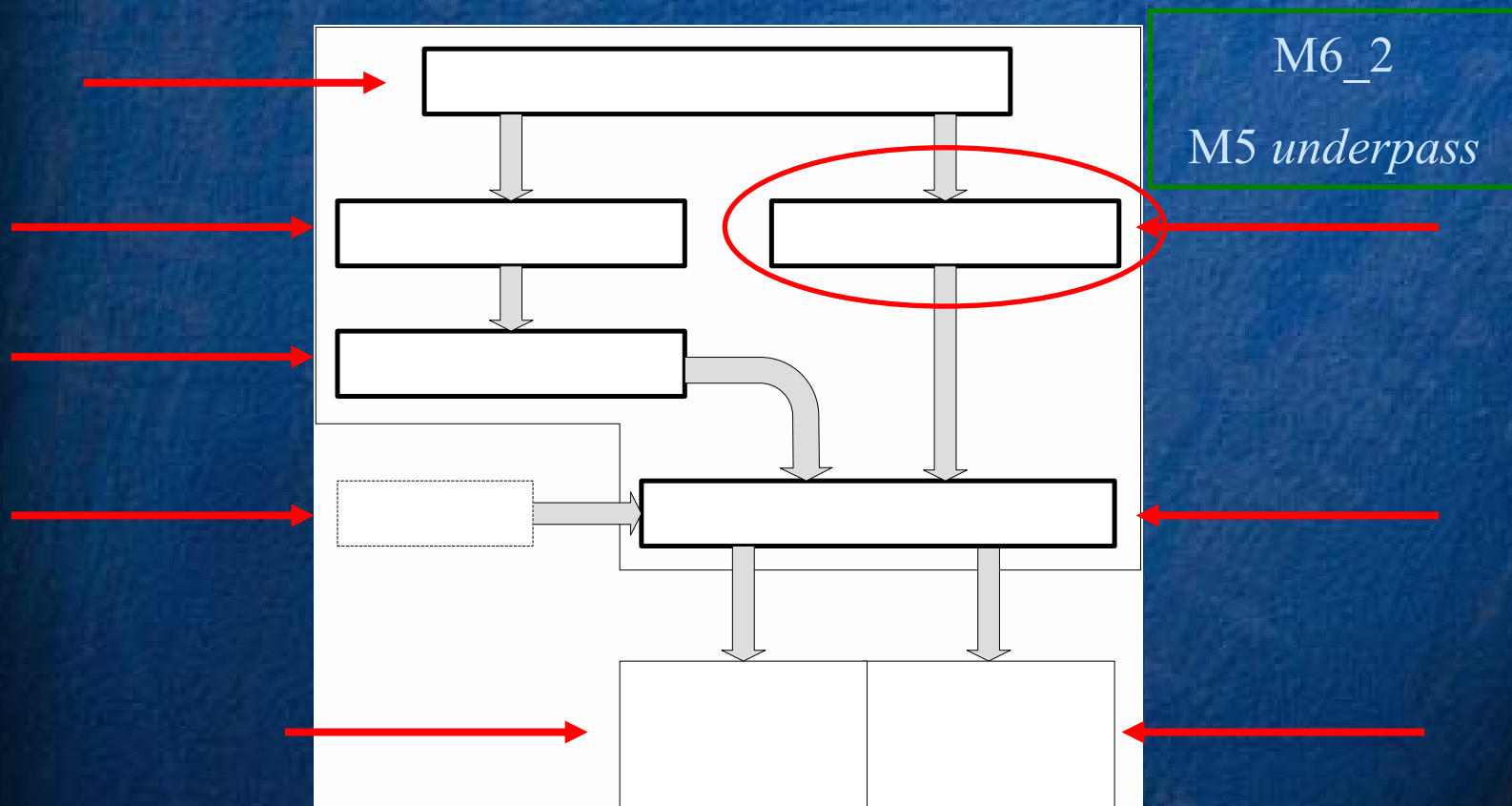
Librería de inductores integrados

- Método habitual para obtención de librería



Librería de inductores integrados

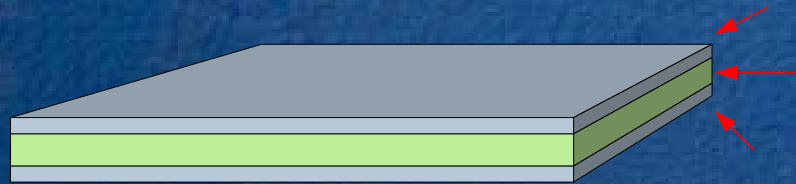
- Nuevo método para obtención de librería



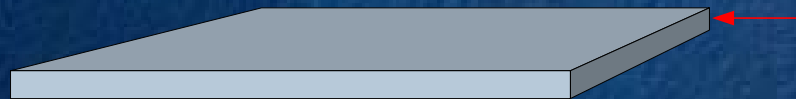
Librería de inductores integrados

- Ajuste del simulador Momentum a las medidas

Aproximación



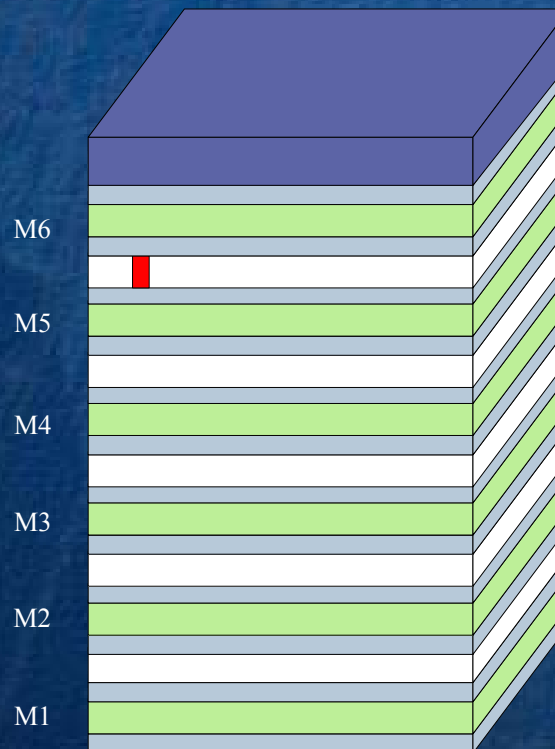
Aproximación



Librería de inductores integrados

- Ajuste del simulador Momentum a las medidas

Aproximación *thick* todos los metales

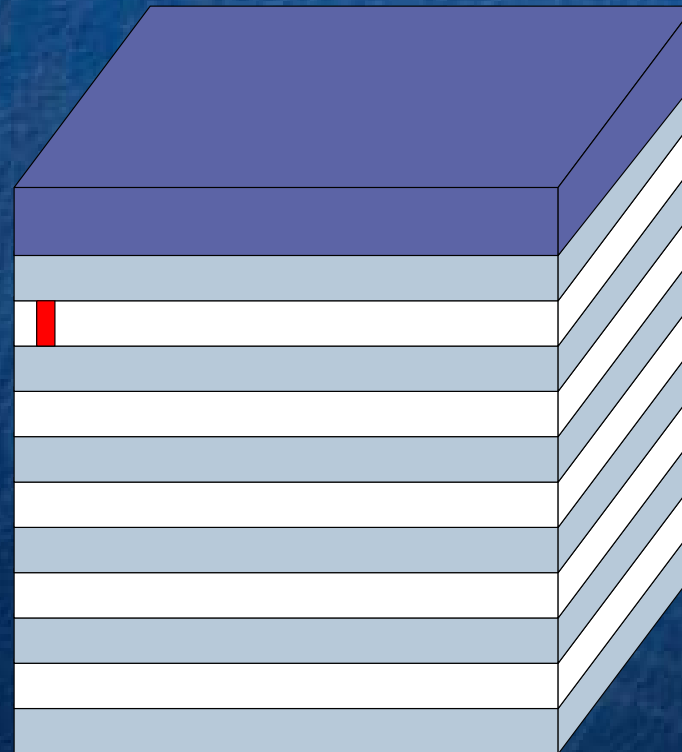


Opción 1

Librería de inductores integrados

- Ajuste del simulador Momentum a las medidas

Aproximación *sheet* todos los metales



Opción 2

Librería de inductores integrados

- Ajuste del simulador Momentum a las medidas

Aproximación *thick* M1-M4/*sheet* M5-M6_2/vía mayor

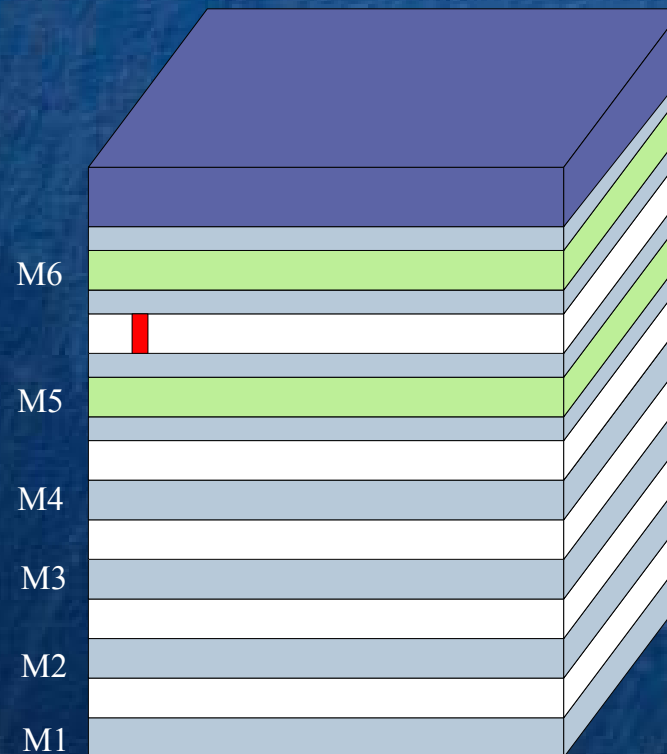


Opción 4

Librería de inductores integrados

- Ajuste del simulador Momentum a las medidas

Aproximación *sheet* M1-M4/*thick* M5-M6_2



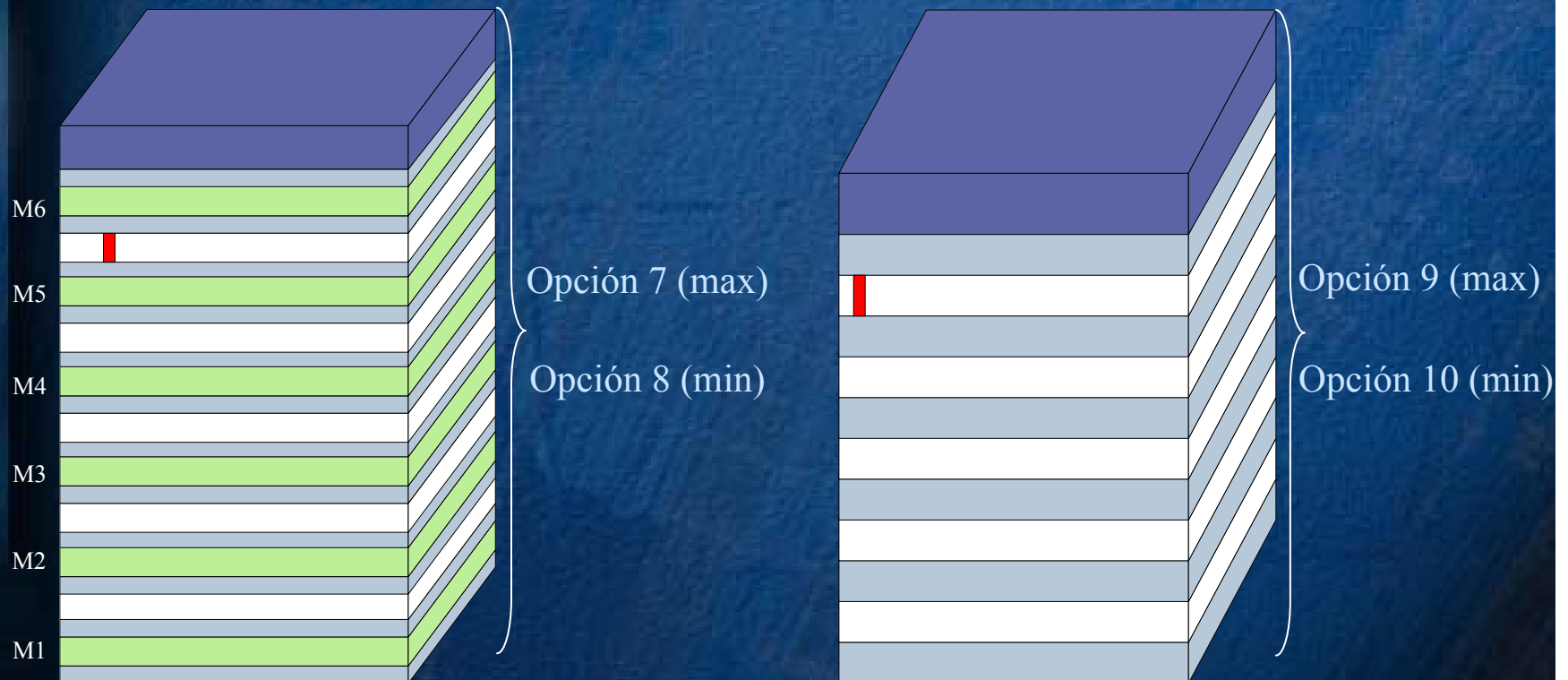
Opción 6

Librería de inductores integrados

- Ajuste del simulador Momentum a las medidas

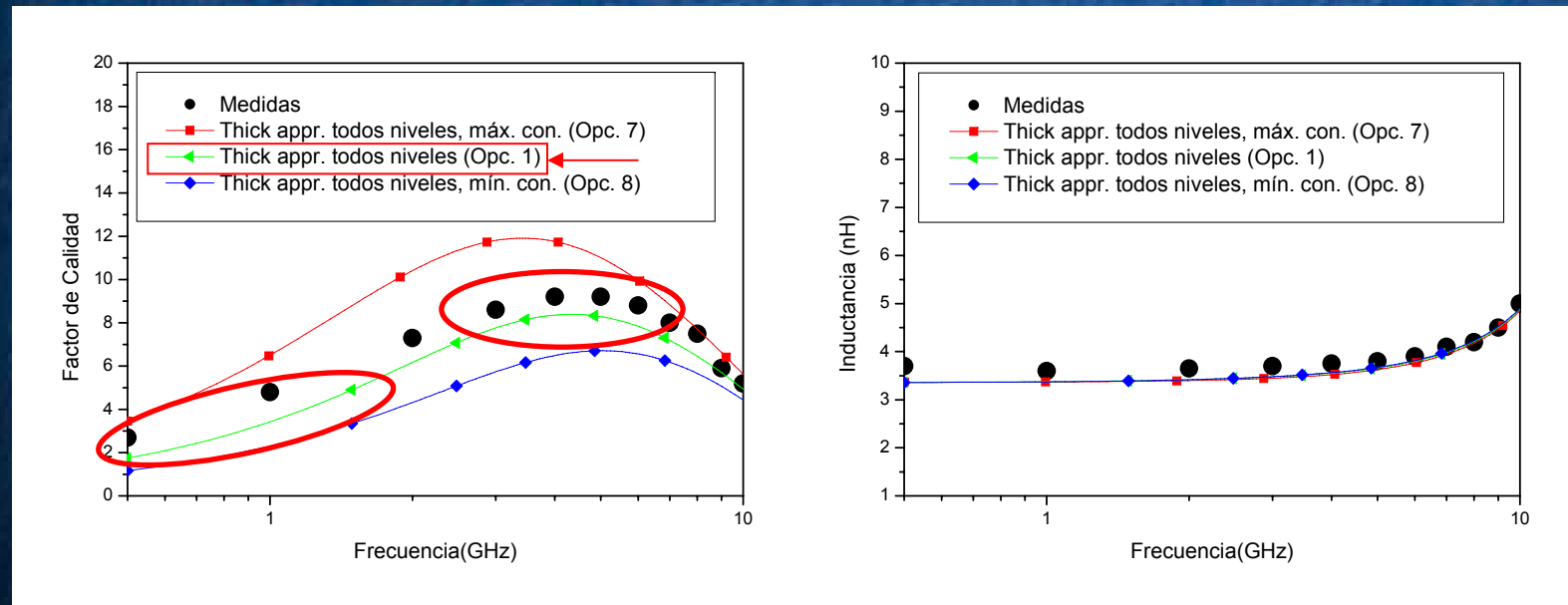
Aproximación *sheet/thick* todos los metales

Máxima y mínima conductividad



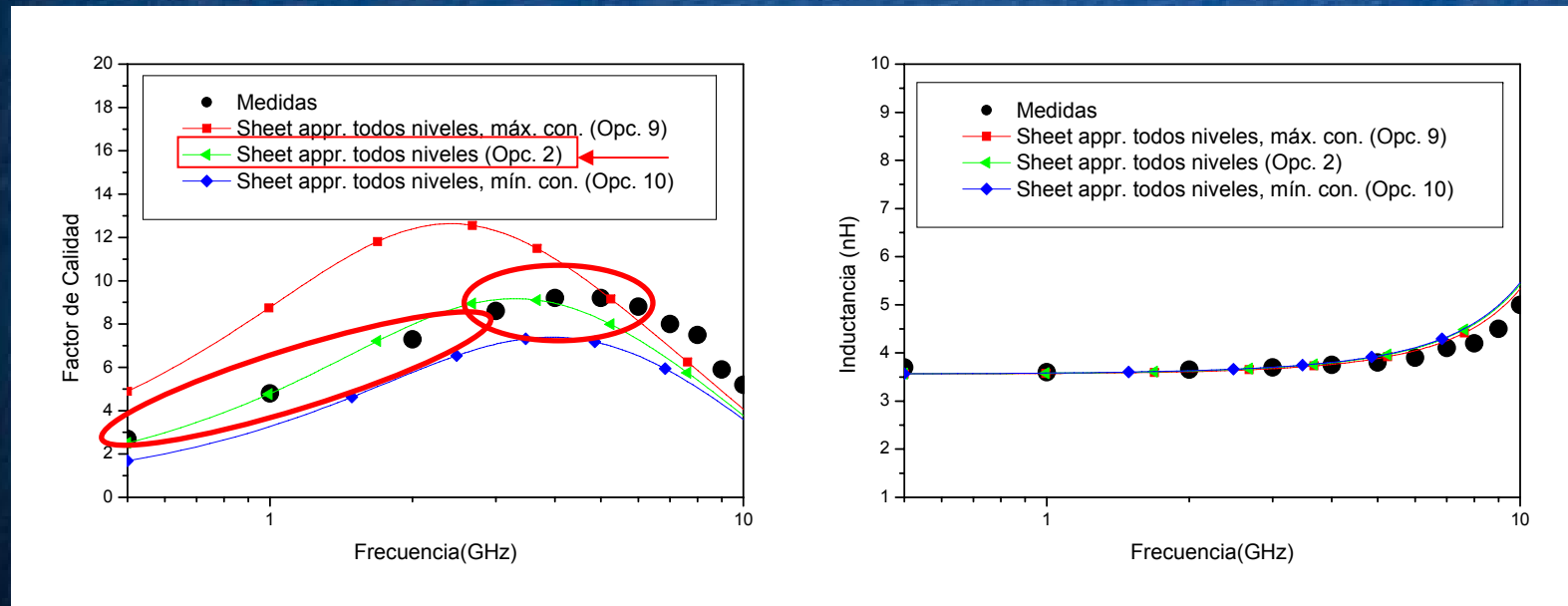
Librería de inductores integrados

- Ajuste del simulador Momentum a las medidas



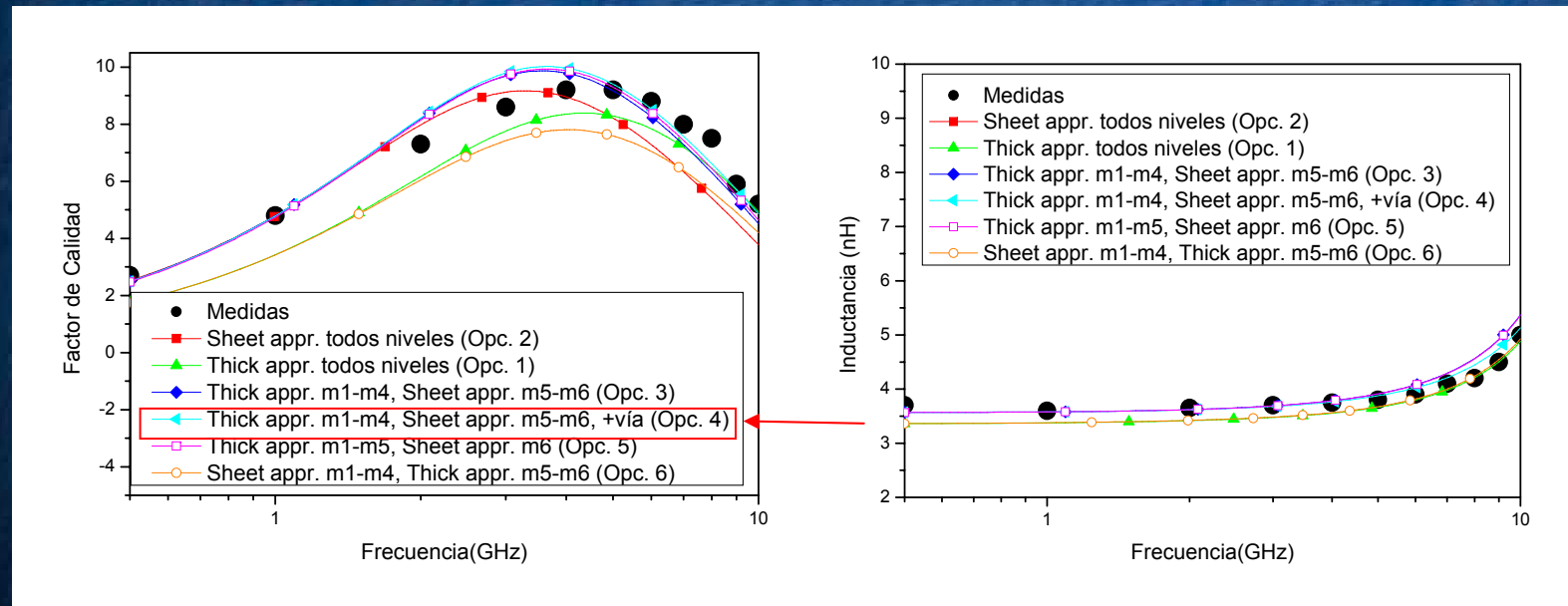
Librería de inductores integrados

- Ajuste del simulador Momentum a las medidas



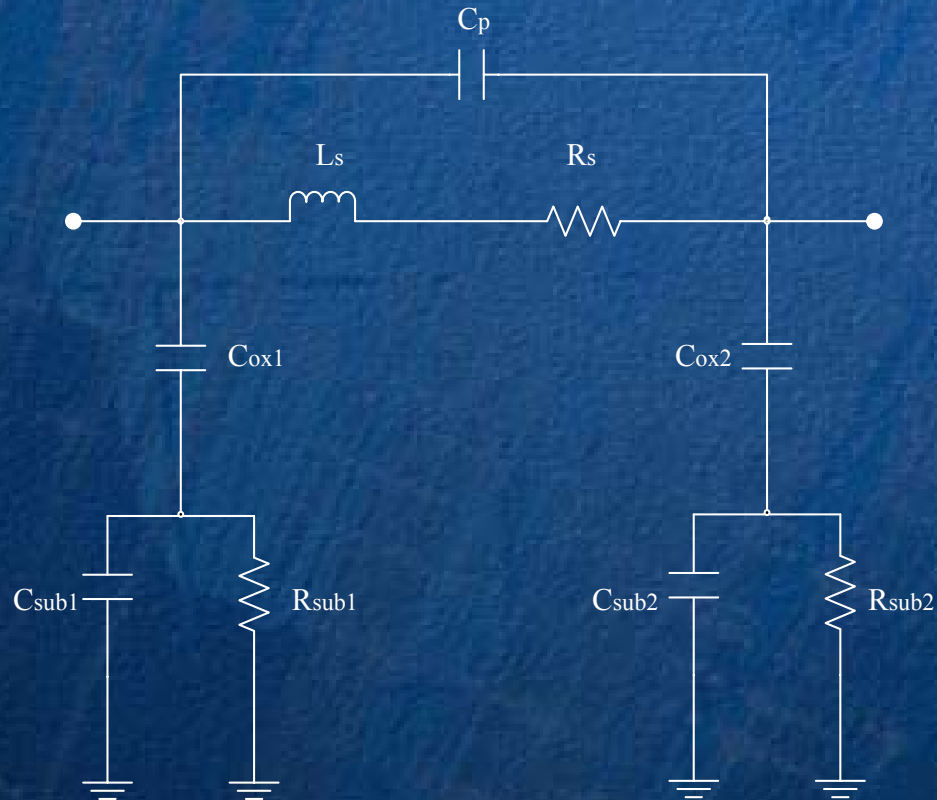
Librería de inductores integrados

- Ajuste del simulador Momentum a las medidas



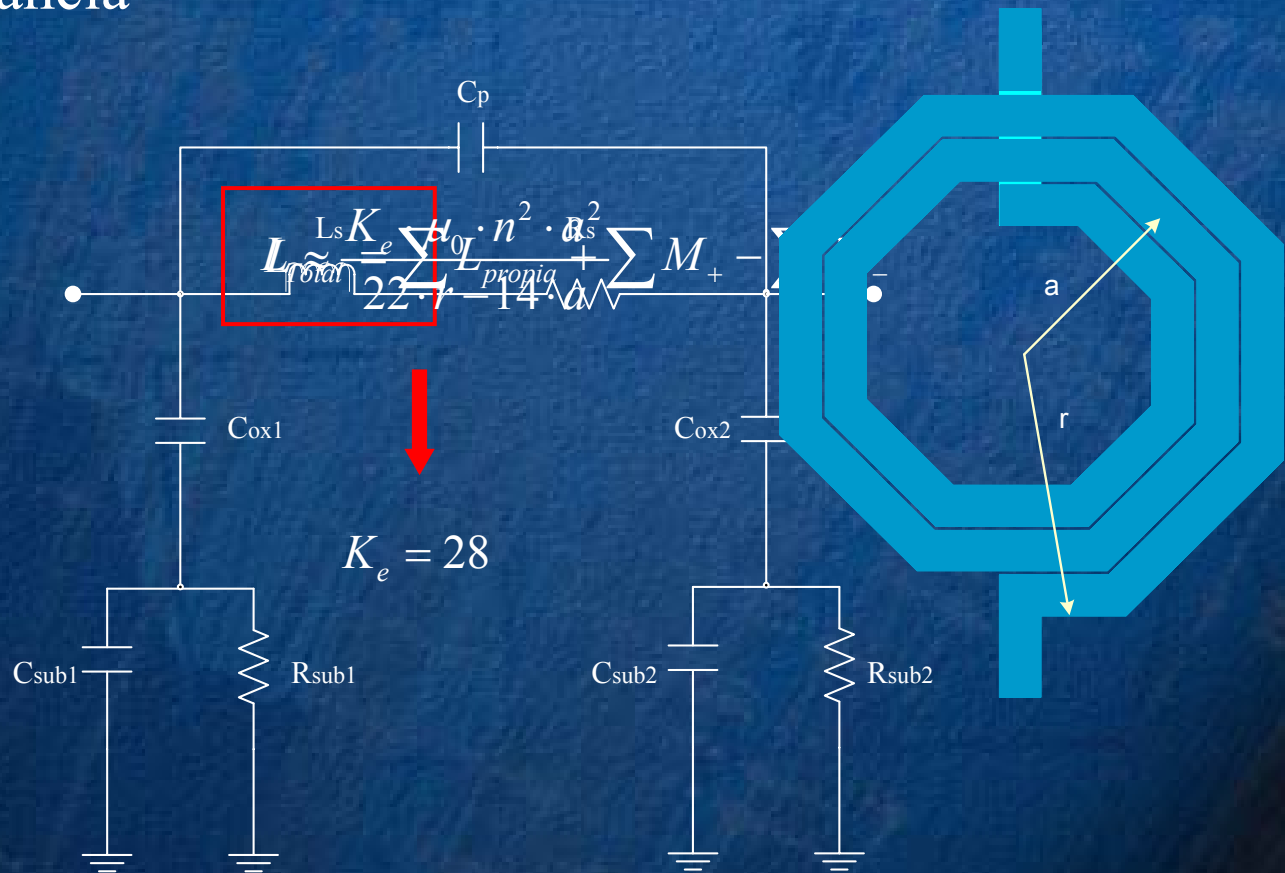
Librería de inductores integrados

- Modelo paramétrico
 - Objetivo: ecuación para cada elemento del circuito equivalente



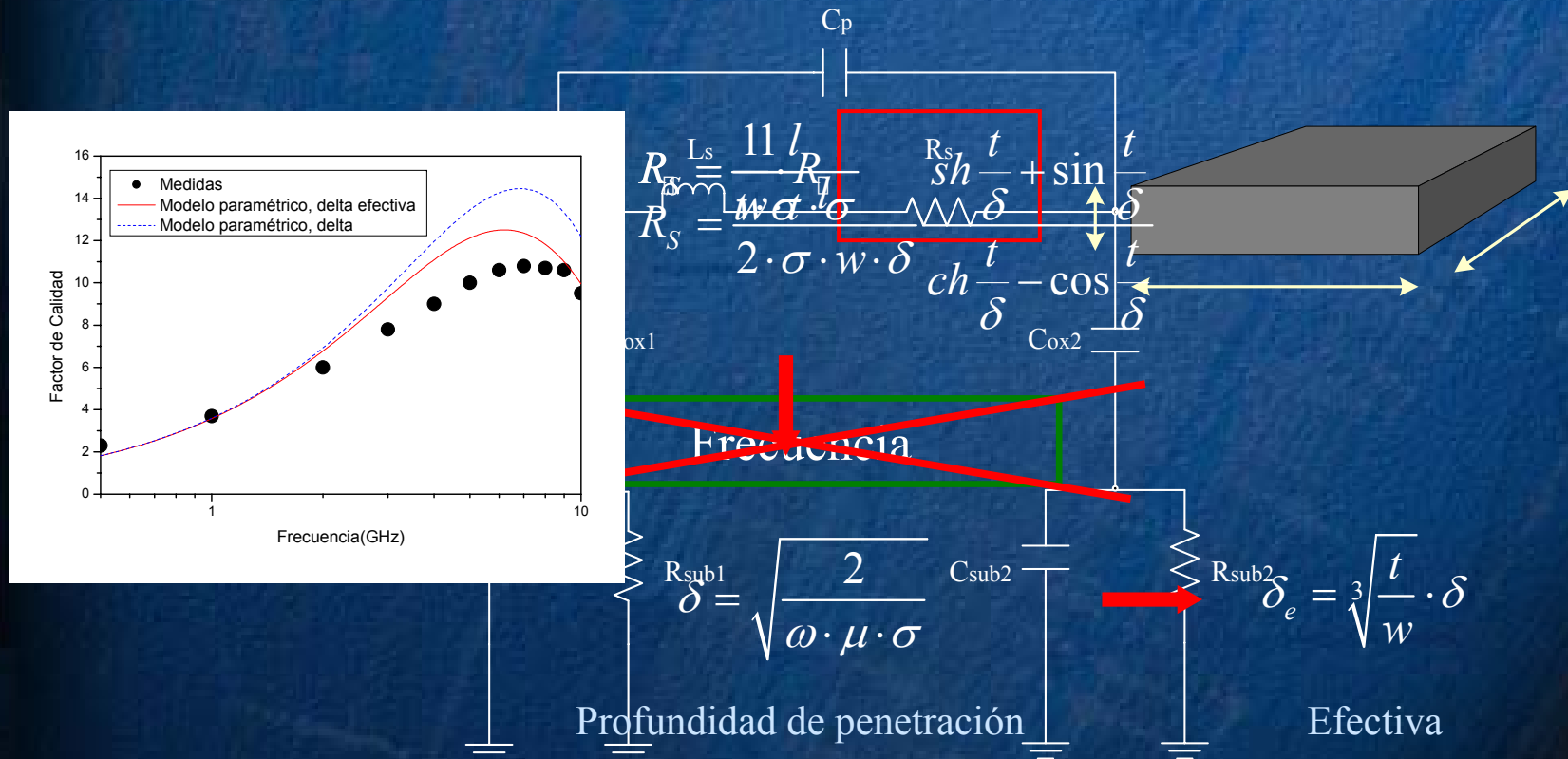
Librería de inductores integrados

- Modelo paramétrico
 - Inductancia



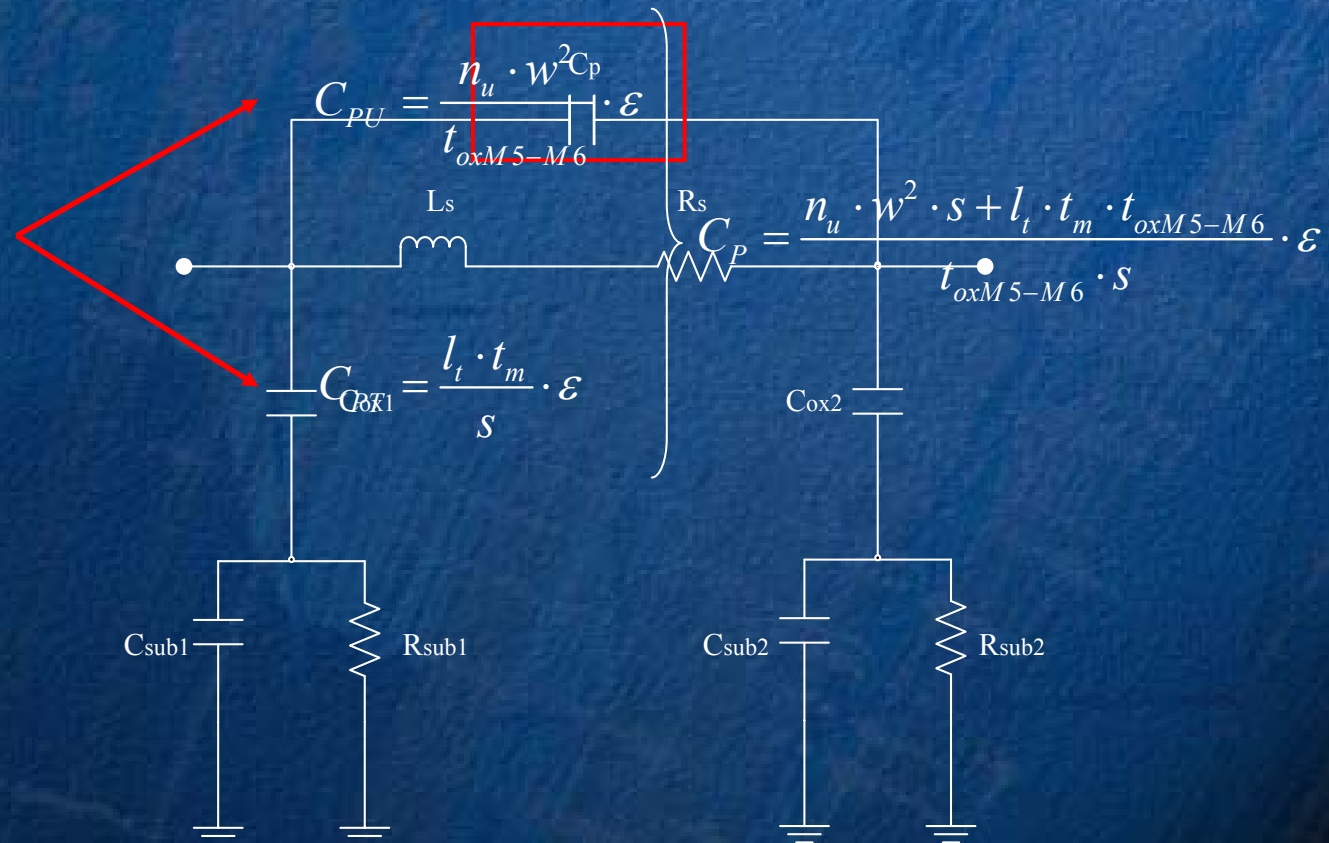
Librería de inductores integrados

- Modelo paramétrico
 - Resistencia serie



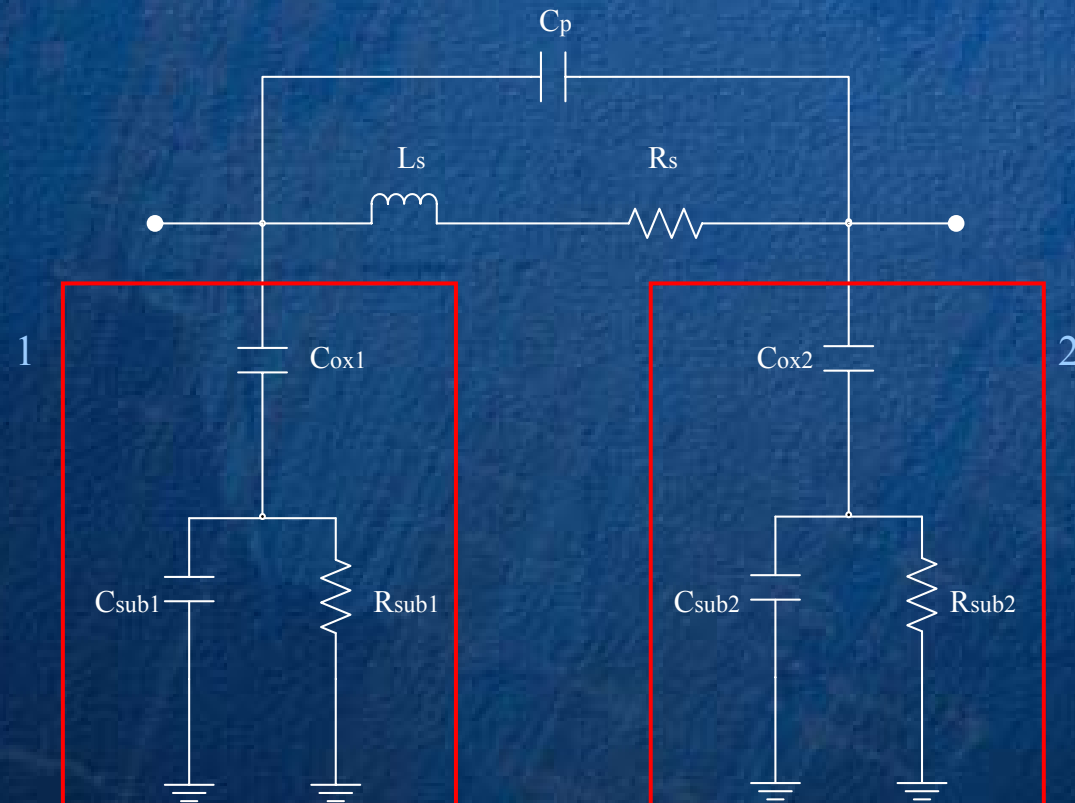
Librería de inductores integrados

- Modelo paramétrico
 - Capacidad paralela



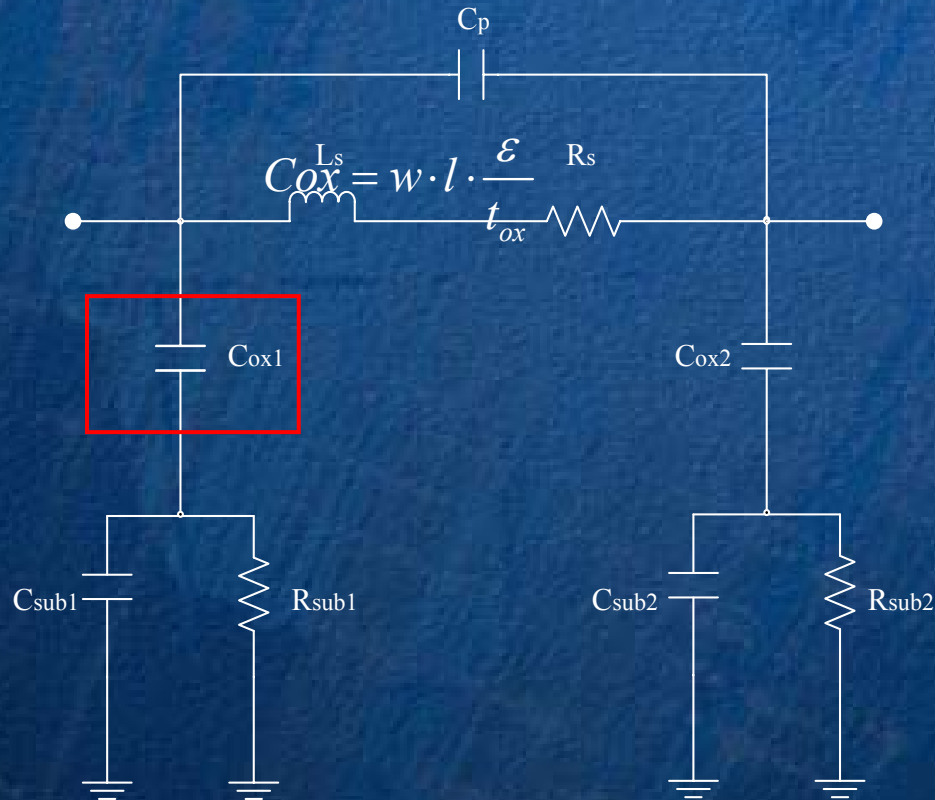
Librería de inductores integrados

- Modelo paramétrico
 - 2 Puertos



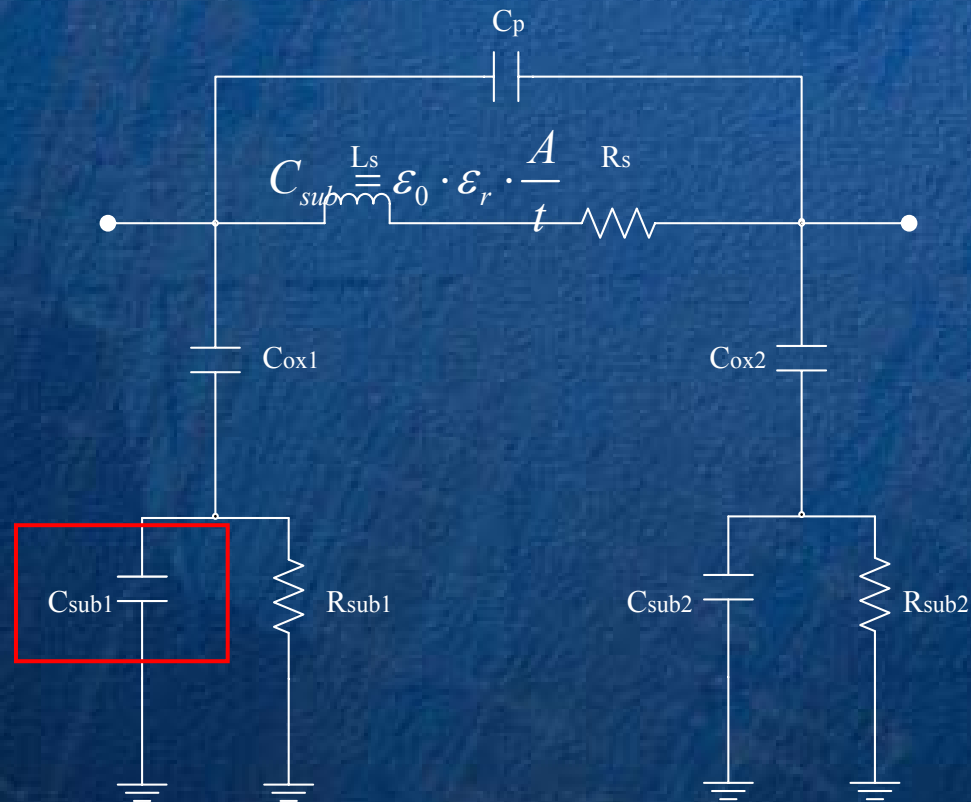
Librería de inductores integrados

- Modelo paramétrico
 - Capacidad entre espiral y sustrato



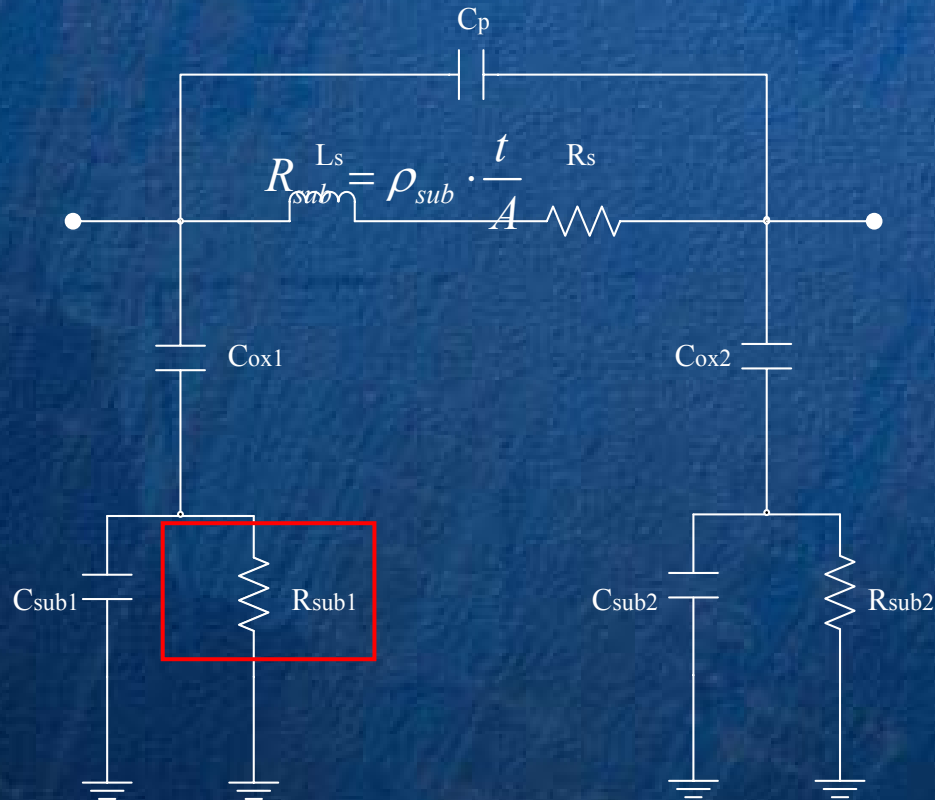
Librería de inductores integrados

- Modelo paramétrico
 - Capacidad del sustrato



Librería de inductores integrados

- Modelo paramétrico
 - Resistencia del sustrato



Librería de inductores integrados

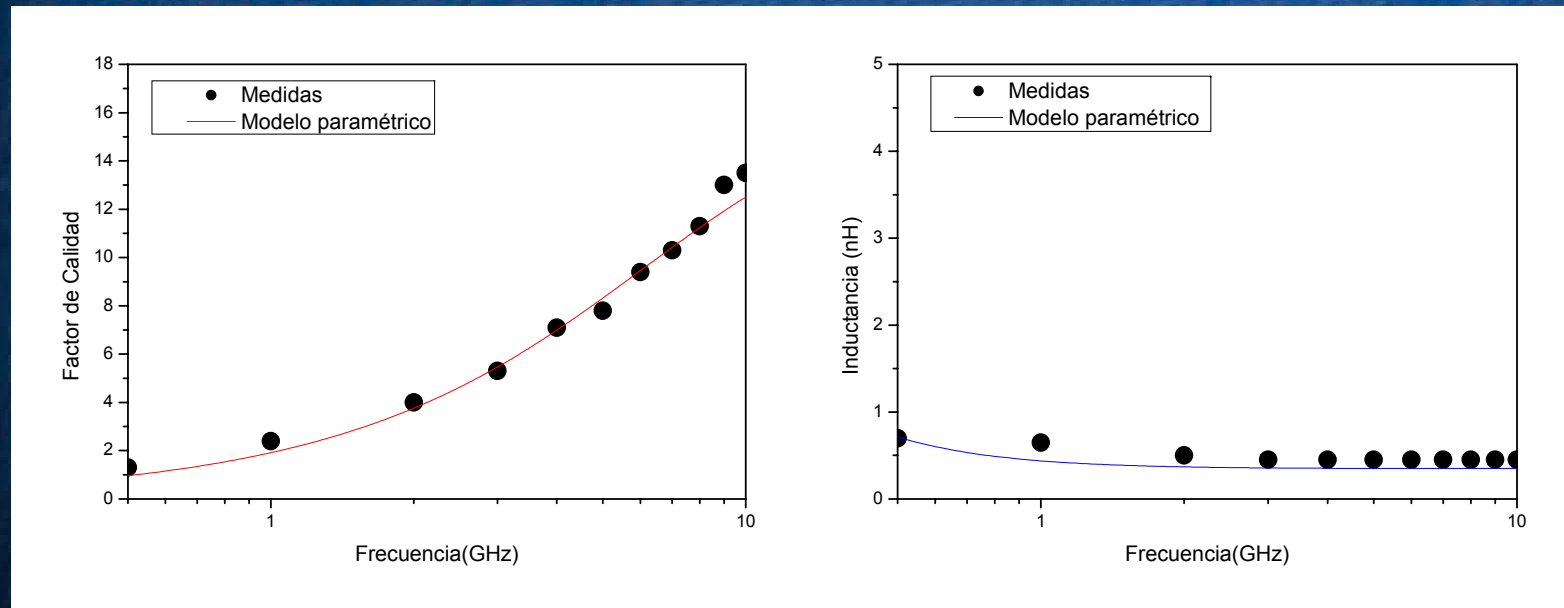
- Modelo paramétrico
 - Resultados del modelo

Inductores con medidas

$r(\mu\text{m})$	n	$w(\mu\text{m})$	$s(\mu\text{m})$
64.5	1.5	10	2
76	2.5	10	2
88.5	3.5	10	2
100.5	4.5	10	2
112.5	5.5	10	2

Librería de inductores integrados

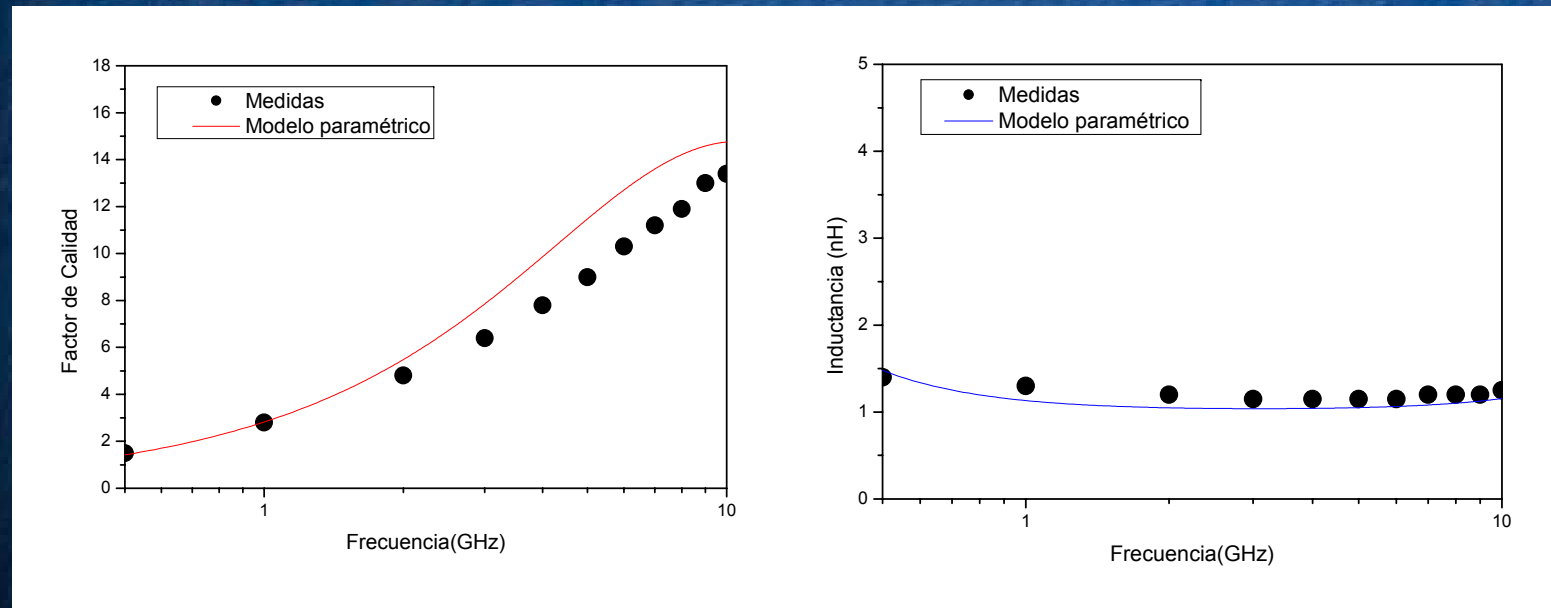
- Modelo paramétrico
 - Resultados del modelo



1.5 vueltas

Librería de inductores integrados

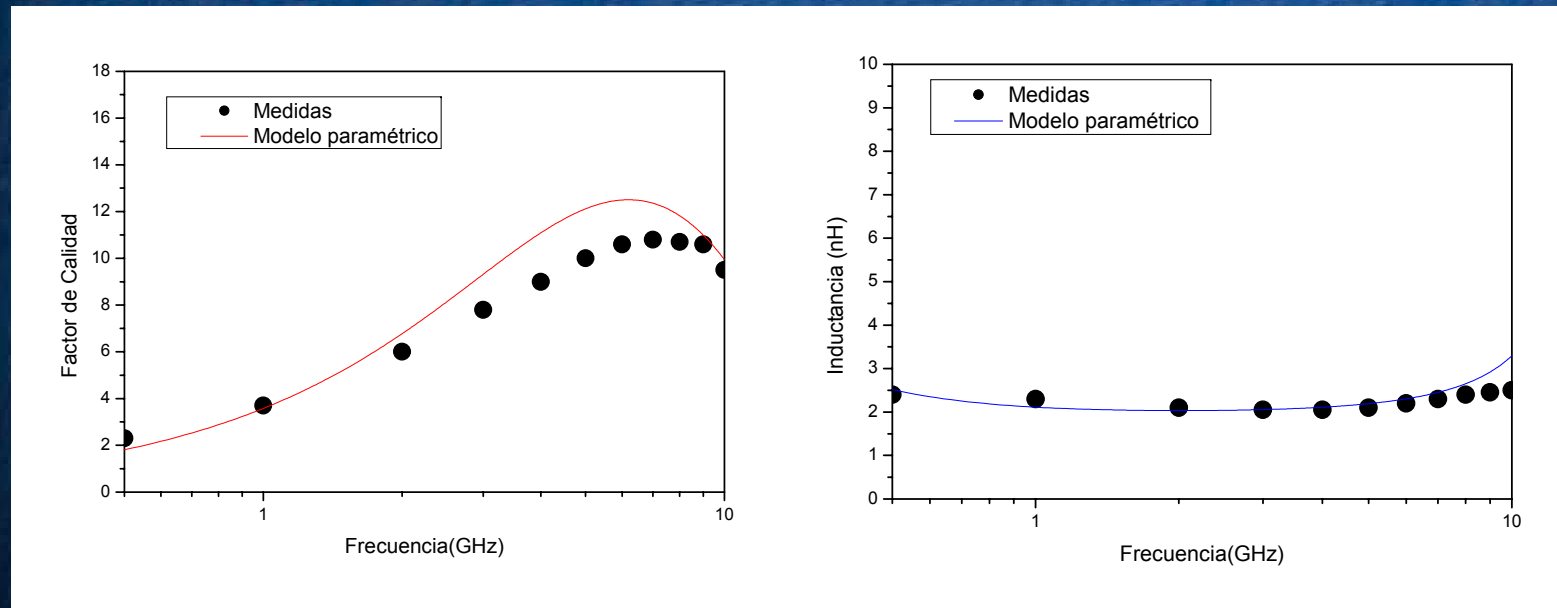
- Modelo paramétrico
 - Resultados del modelo



2.5 vueltas

Librería de inductores integrados

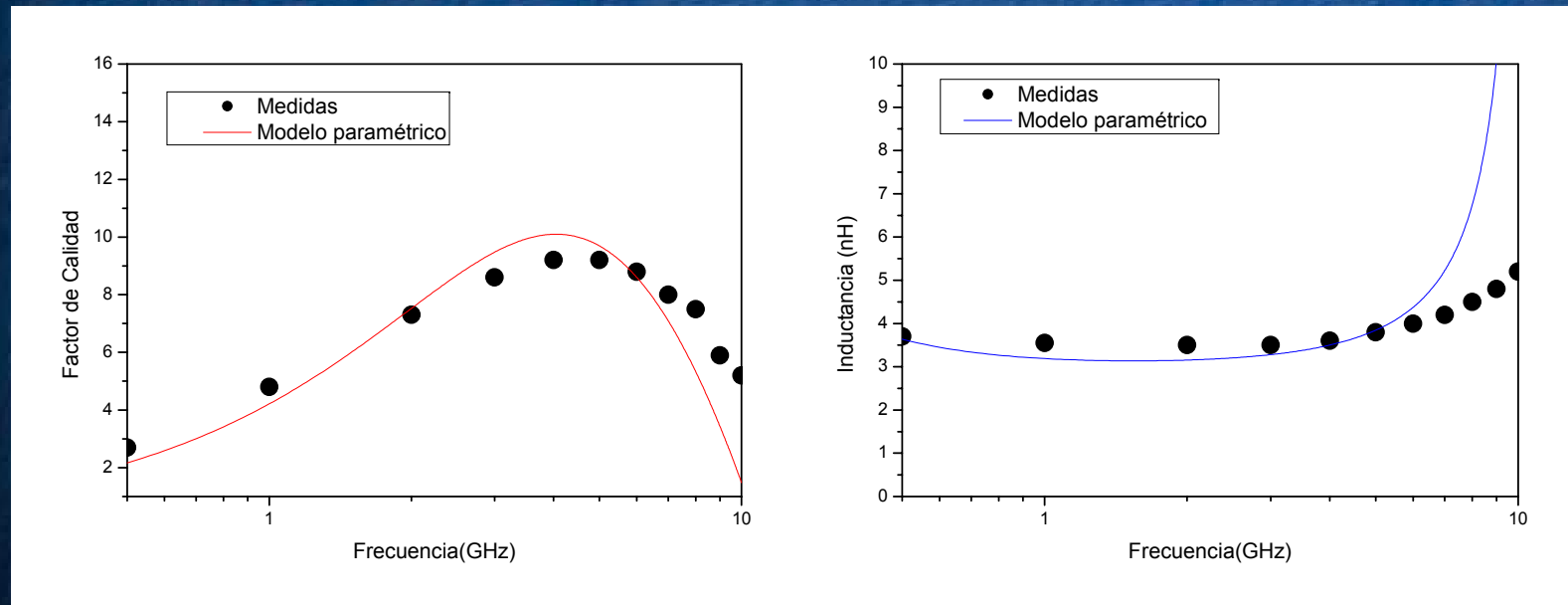
- Modelo paramétrico
 - Resultados del modelo



3.5 vueltas

Librería de inductores integrados

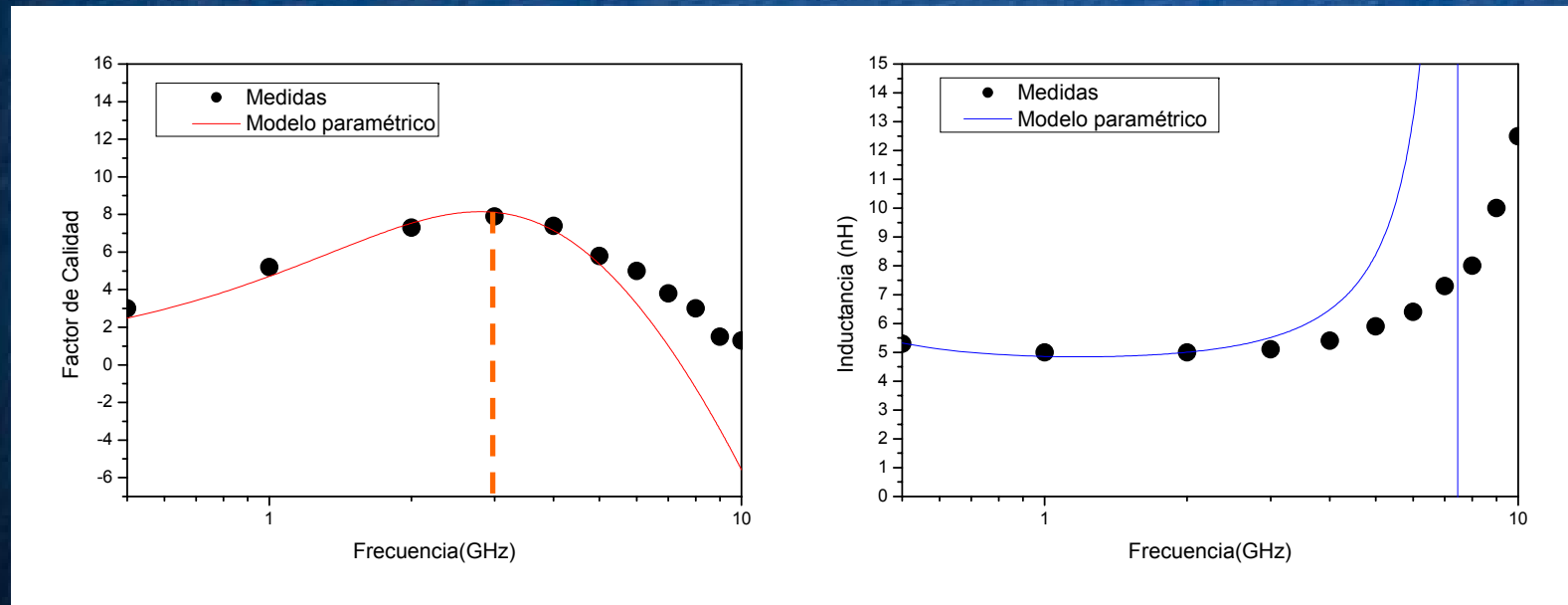
- Modelo paramétrico
 - Resultados del modelo



4.5 vueltas

Librería de inductores integrados

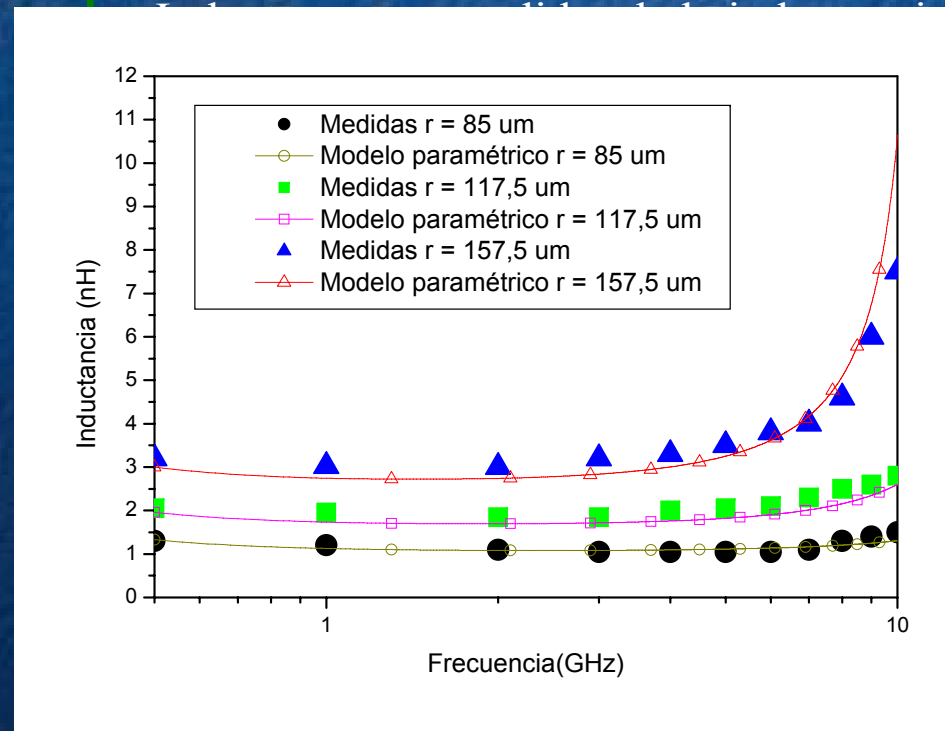
- Modelo paramétrico
 - Resultados del modelo



5.5 vueltas

Librería de inductores integrados

- Modelo paramétrico
 - Resultados del modelo

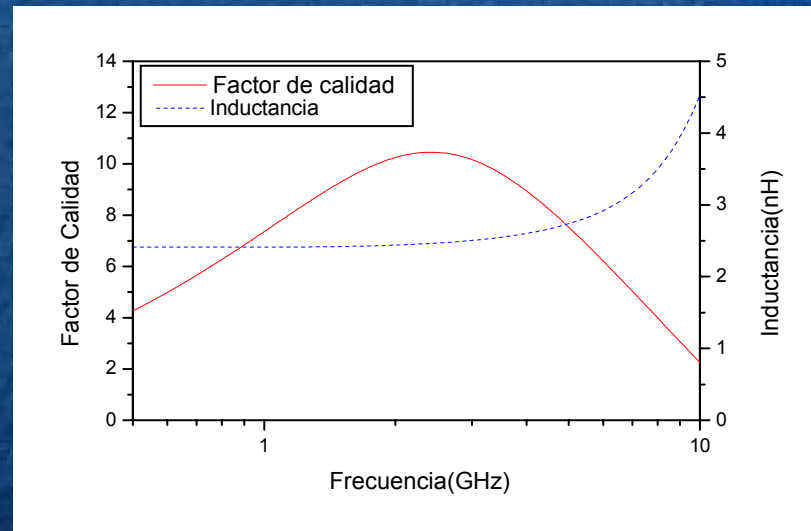


Librería de inductores integrados

- Librería de inductores
 - Implementación del modelo en un algoritmo de búsqueda para máximo factor de calidad
 - Frecuencias: 0.85, 1.5, 1.8, 2.4, 5.6 GHz
 - Inductancias: entre 0.5 y 6.5 nH
 - Radio exterior (r): entre 25 y 300 μm
 - Número de vueltas (n): entre 1.5 y 15.5 vueltas
 - Espaciado entre pistas (s): 1.5 μm .
 - Anchura de pistas (w): entre 5 y 50 μm

Librería de inductores integrados

- Librería de inductores
 - Parámetros geométricos, inductancia y factor de calidad basados en simulaciones de Momentum



Librería de inductores integrados

- Librería de inductores
 - Parámetros geométricos, inductancia y factor de calidad

Frecuencia (GHz)	0.85	1.5	1.8	2.4	5.6
Q_{Medio}	7.17	8.81	9.40	9.94	10.10
r_{Medio} (μm)	245.38	198.08	172.7	147.31	94.67
n_{Medio}	2.57	2.81	3.03	3.35	3.81
w_{Medio} (μm)	42.86	32.15	27.61	22.73	11.25

Librería de inductores integrados

- Librería de inductores
 - Modelo paramétrico para 2 metales en paralelo

Nº metales	Q_{Medio}	r_{Medio} (μm)	n_{Medio}	w_{Medio} (μm)
1	7.17	245.38	2.57	42.86
2	8.28	220.48	2.88	40.1

Índice

1. Introducción
2. ADS: Momentum
3. Estudios Previos
4. Diseño de la librería de inductores
5. Herramientas desarrolladas
6. Conclusiones y líneas futuras
7. Presupuesto

Herramientas desarrolladas

- Software *IMODEL*

The screenshot displays the IMODEL software interface with the following components:

- Input Parameters:**
 - Frecuencia: 2 GHz
 - Inductancia: 1 nH
 - Tolerancia: 0.2 nH
 - Numero metales: 1 Metal
- Calculated Values:**
 - Inductancia calculada: 0 nH
 - Q calculado: 0
- Equivalent Circuit Model (MODELO EQUIVALENTE EN PI):**
 - C_p : 43.618 fF
 - L_s : 1.610 nH
 - $R_s(f)$: 2.984 Ohm
 - C_{ox} : 56.639 fF
 - R_{sub} : 4154.6 Ohm
 - C_{sub} : 4.9845 fF
- Geometric Parameters (PARAMETROS GEOMETRICOS):**
 - r : 100 μm
 - w : 10 μm
 - s : 1.5 μm
 - n : 2.5 vueltas
- Visualizations:**
 - Diagram of an inductor with parameters r , w , and s .
 - Buttons for "Representa L y Q", "Busca inductor maximo Q", "Representa Curvas de Nivel", and "Representa 3D".
- Navigation:** Buttons for "AYUDA", "RESET", "SALIR", and "PARAMETROS".

Herramientas desarrolladas

- Generador de inductores basado en el modelo paramétrico

Create Instance

Hide Cancel Defaults Help

Mosaic Rows: 1 Columns: 1
Delta Y: 217.82 Delta X: 197.25
Magnification: 1

Rotate Sideways Upside Down

Inductance(nH): 4
Frequency(GHz): 4
Choice: 1

	Q	L	R
1	9.65	3.81nH	110um
2	9.49	4.00nH	90um
3	9.25	3.97nH	125um
4	8.90	3.86nH	165um
5	8.59	3.86nH	175um
6	7.13	4.13nH	70um
7	6.38	4.12nH	200um
8	4.16	3.81nH	225um
9	2.48	3.81nH	260um
10	2.35	3.93nH	275um

Turns: 3.5
Width: 9.00u M
Radii: 110.00u M
Separation: 1.5u M

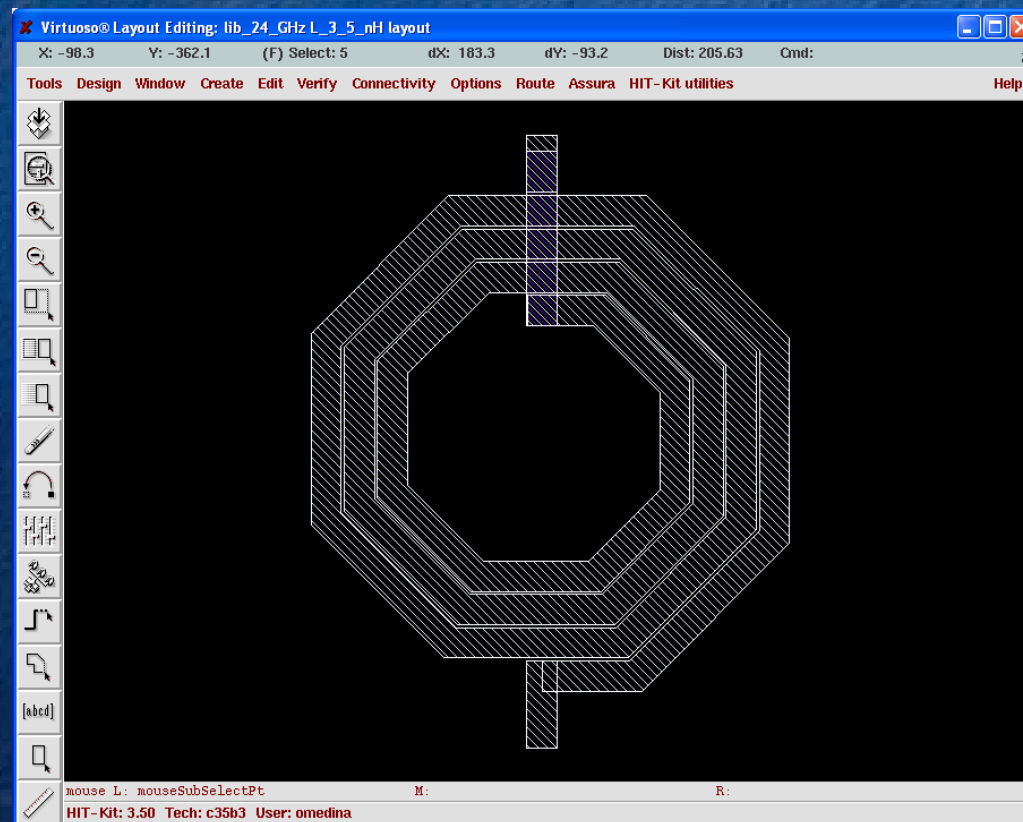
Inductance(nH): 4
Choice: 1

	Q	L	R
1	9.65	3.81nH	110um
2	9.49	4.00nH	90um
3	9.25	3.97nH	125um
4	8.90	3.86nH	165um
5	8.59	3.86nH	175um
6	7.13	4.13nH	70um

Turns: 3.5
Width: 9.00u M
Radii: 110.00u M
Separation: 1.5u M

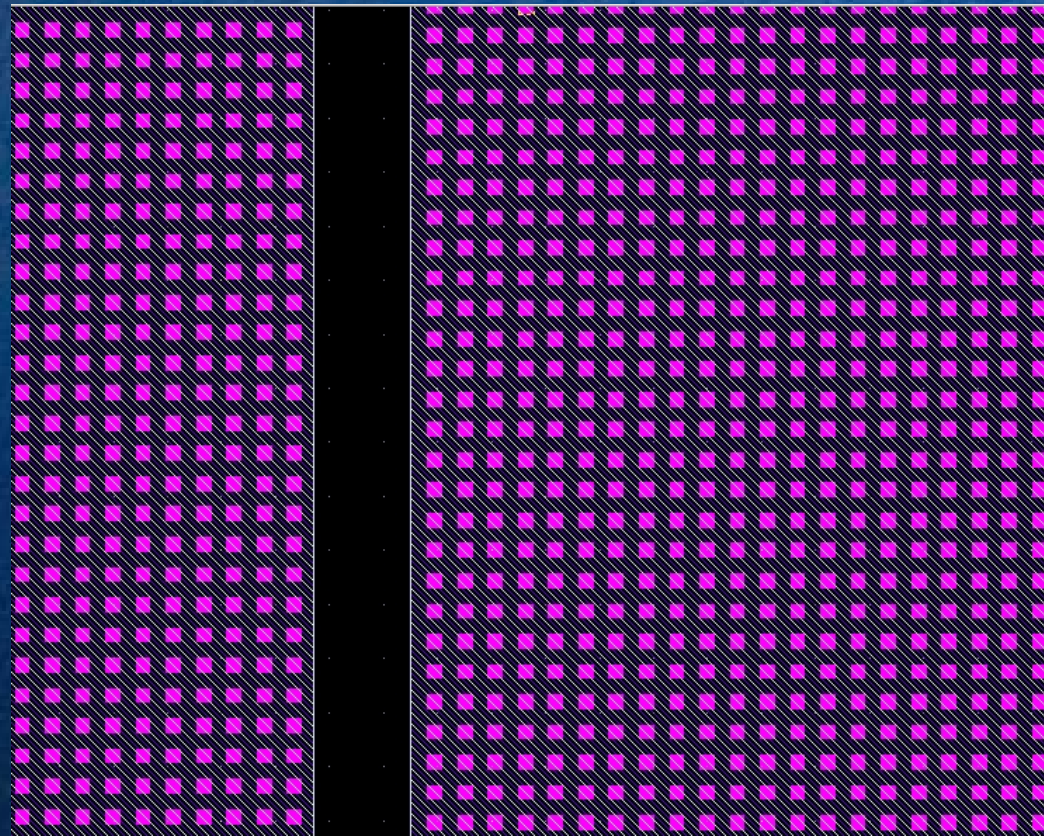
Herramientas desarrolladas

- Generador de inductores basado en el modelo paramétrico



Herramientas desarrolladas

- Mejora del generador automático de *layouts*
 - Vías distribuidas



Índice

1. Introducción
2. ADS: Momentum
3. Estudios Previos
4. Diseño de la librería de inductores
5. Herramientas desarrolladas
6. Conclusiones y líneas futuras
7. Presupuesto

Conclusiones

- Momentum. Guía de uso
- Fruto de simulaciones → guías de diseño
 - El grosor del sustrato semiconductor no determinante
 - Aumento no lineal de Q con aumento del número de lados
 - Mayor Q en BF con varios metales en paralelo
- Desarrollo de un modelo paramétrico para búsqueda de máximo Q

Conclusiones

- Amplia librería de inductores integrados en tecnología UMC 0.18 μm
- Desarrollo de una serie de herramientas software para el diseño y análisis
- Nueva metodología

Parámetro	Procedimiento Habitual	Procedimiento Propuesto
Consumo de tiempo	Alto	Bajo
Coste	Alto	Bajo
Precisión en la definición de la librería	Bajo	Alto
Precisión en los datos de la librería	Alto	Medio/Alto

Líneas futuras

- Fabricación de inductores
- Análisis de otros parámetros internos en el funcionamiento de Momentum. Ej: densidad efectiva en el mallado
- Estudio de estructuras alternativas en la fabricación. Bobinas apiladas
- Uso de modelos alternativos de circuito equivalente de un inductor integrado
- Estudiar la implementación del modelo paramétrico en estándares de Ultra-Wide-Band
- Análisis de los efectos del campo eléctrico lateral

Índice

1. Introducción
2. ADS: Momentum
3. Estudios Previos
4. Diseño de la librería de inductores
5. Herramientas desarrolladas
6. Conclusiones y líneas futuras
7. Presupuesto

Presupuesto

Concepto	Coste
Trabajo tarificado por tiempo empleado	72237.60 €
Amortización del material hardware	3095.00 €
Amortización del material software	1541.25 €
Redacción del proyecto	5154.99 €
Derechos de visado del COIT	257.45 €
Gastos de tramitación y envío	6.01 €
TOTAL (sin IGIC)	82292.30 €
IGIC (5%)	4114.61 €
TOTAL	86406.91 €



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS
DE GRAN CANARIA



Diseño de una librería de inductores integrados en tecnología UMC 0.18 μm

Autor: D. Octavio Medina Day

Tutores: Dr. D. Javier del Pino Suárez

Dr. D. Antonio Hernández Ballester

