



Módulo 10:
Integridad de una señal
Compatibilidad electromagnética

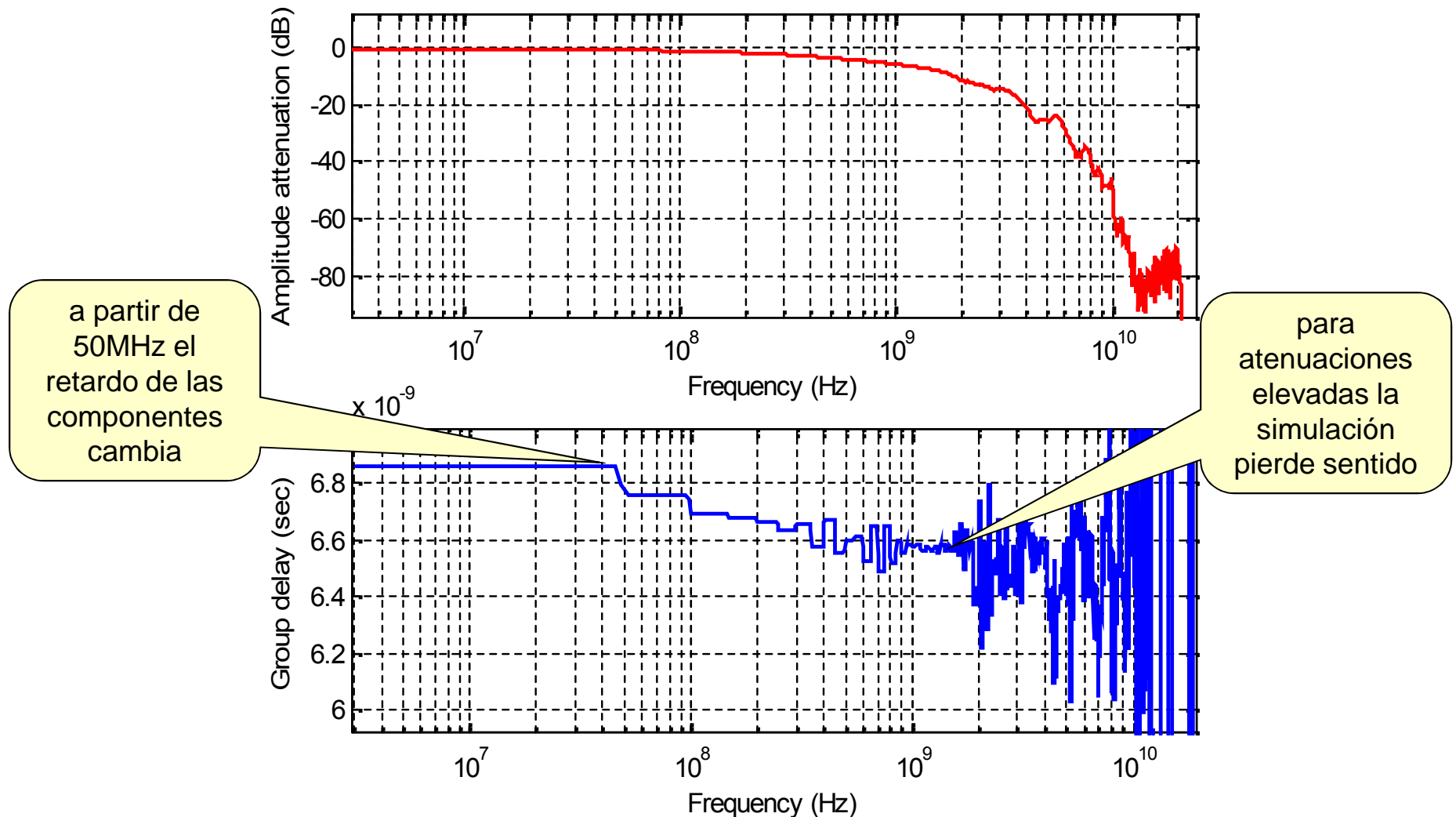
Contenidos del módulo 10

- El efecto de las distorsiones de amplitud y fase en la propagación de señales digitales.
- Diagrama de Ojo.
- Mejora de las características de transmisión mediante pre-énfasis.
- Mejora de las características de recepción mediante *Decision-Feedback-Equalizer*.
- EMC: compatibilidad electromagnética

El problema del retardo de grupo variable

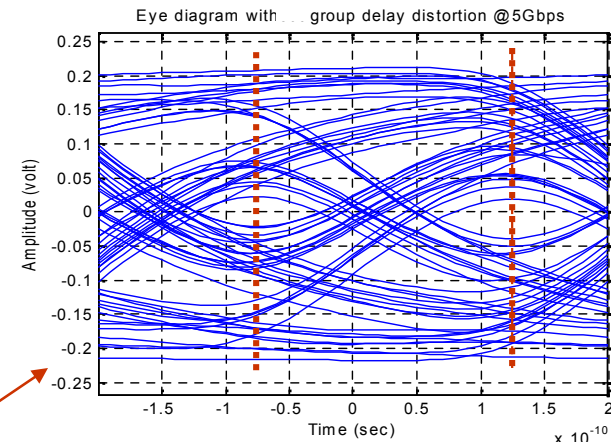
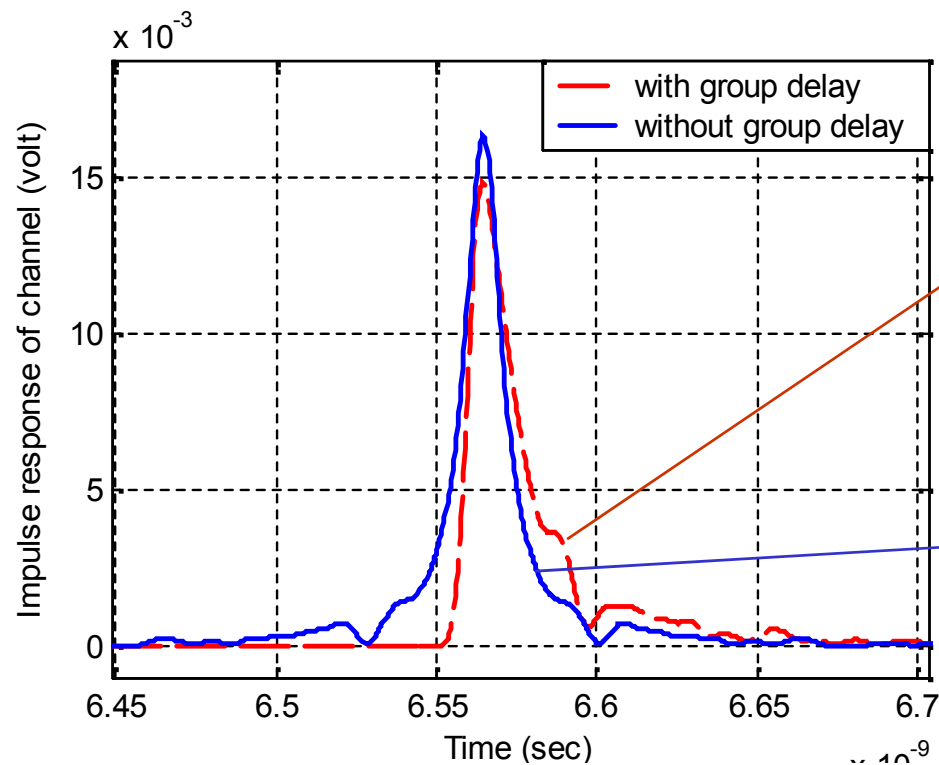
- Una señal puede ser imaginada como el resultado de la suma de componentes de distinta frecuencia, con cierta amplitud y fase relativa
- Si la señal sufre un retardo de tiempo constante, la forma se mantiene
- Pero si las distintas componentes sufren distintos retardos y también diferentes atenuaciones, aparecen dos problemas
 - Las distintas atenuaciones alteran la forma de la señal
 - Los distintos retardos hacen que además de deformar la señal, las componentes que corresponden a ciertos bits se desplacen al tiempo de ocurrencia de los bits vecinos, generando interferencia inter-símbolos (ISI)
- Este efecto es similar a un filtro con respuesta de amplitud variable y retardo de grupo variable, y las soluciones buscan:
 - Identificar esta transferencia y aplicar a la señal un filtro inverso (pre-énfasis y Decision Feedback Equalizer)
 - Disminuir las componentes de distintas frecuencias de la señal base (conformación Root Raised Cosine)

Atenuación y retardo de grupo (línea de 34" = 86cm)

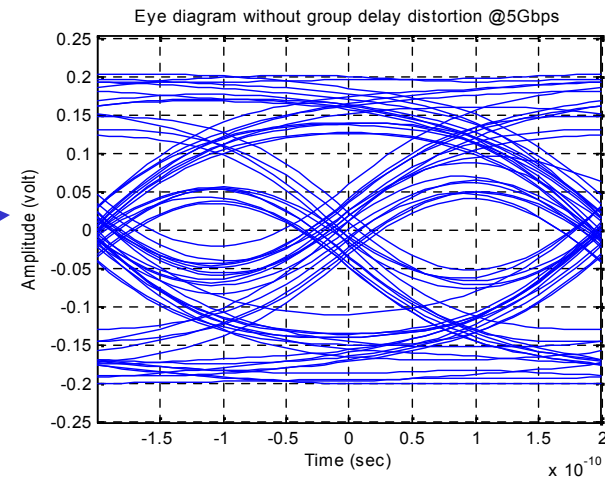


Atenuación y retardo de grupo (línea de 34" = 86cm)

Respuesta al impulso: un filtro con retardo de grupo constante tiene una respuesta al impulso simétrica, pero si el retardo de grupo es variable, la respuesta al impulso es asimétrica



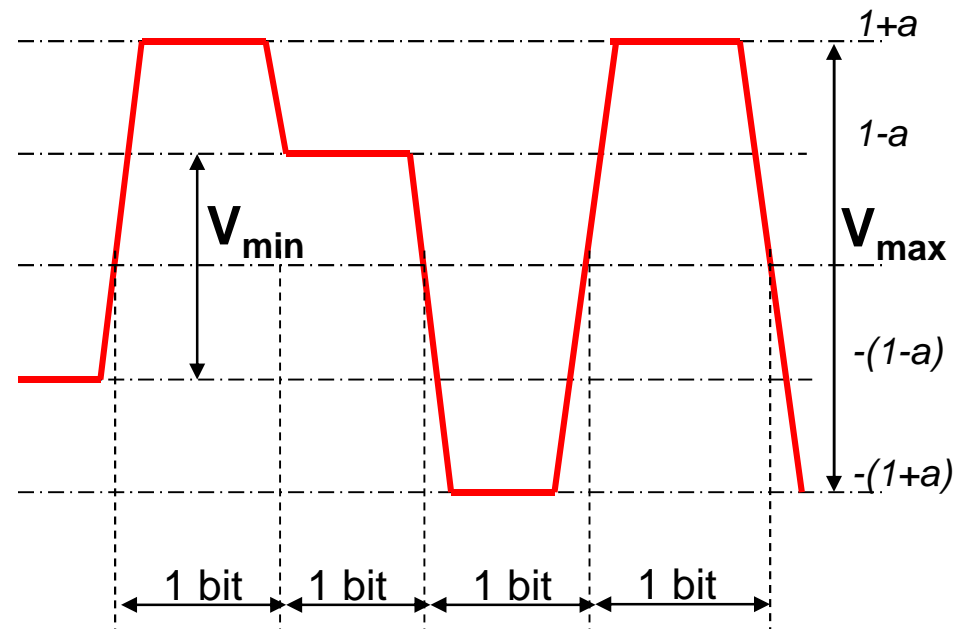
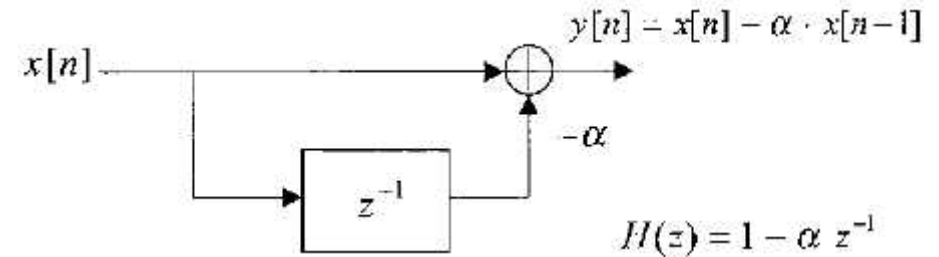
Incluyendo el retardo de grupo



Descontando el retardo de grupo

Pre-énfasis de señales de alta velocidad

- ❑ Una forma de compensar la atenuación en las frecuencias más altas es aplicar **pre-énfasis** a la señal en las etapas de transmisión, elevando la amplitud de las componentes de mayor frecuencia
- ❑ En forma digital el filtro incrementa el nivel del primer bit transmitido en cada secuencia de bits iguales.
- ❑ En la figura se observa que en el caso de dos bits sucesivos de igual valor sólo es elevada la amplitud del primero
- ❑ El uso de **pre-énfasis** contribuye a disminuir la tasa de errores de bit
- ❑ En el caso de la familia Cyclone III se soportan dos niveles de pre-énfasis (ON/OFF) y en el caso de Stratix III cuatro niveles (cero, bajo, medio y alto)

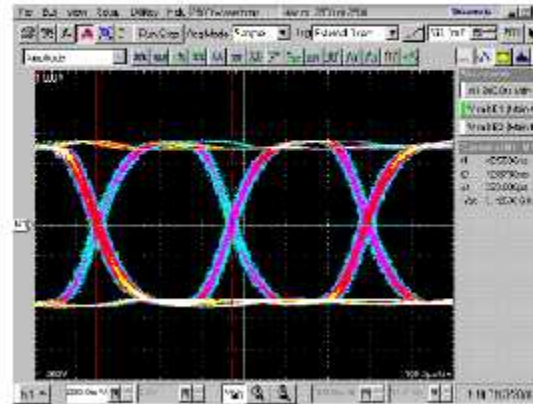


Pre-énfasis de señales de alta velocidad

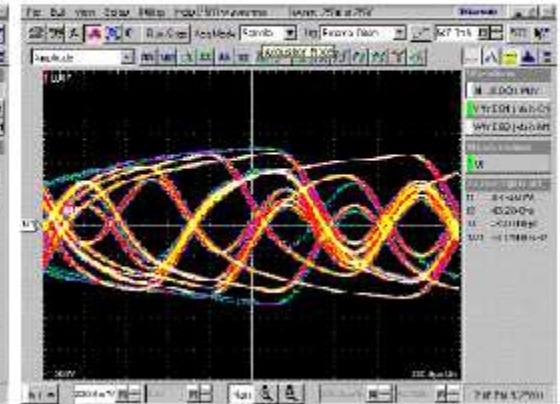
- Las fotos muestran las señales observadas en los extremos transmisor y receptor de una línea de transmisión de 40 pulgadas (aprox. 1 metro) operando a 3.125 Gbps
- En la fila superior no se usa *pre-énfasis*, la salida del transmisor es “limpia” pero en el receptor es difícil de detectar
- En la fila inferior se observa cómo el *pre-énfasis* en el transmisor hace que el receptor vea una señal más limpia

NO PRE-EMPHASIS

Transmit

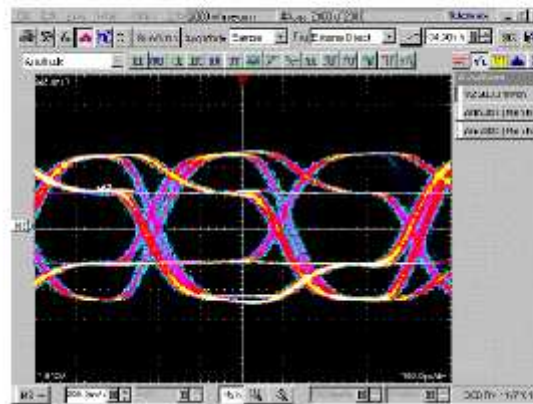


Receive after 40 inches

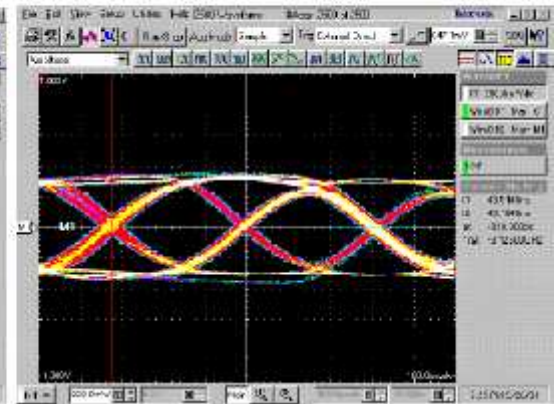


WITH PRE-EMPHASIS

Transmit

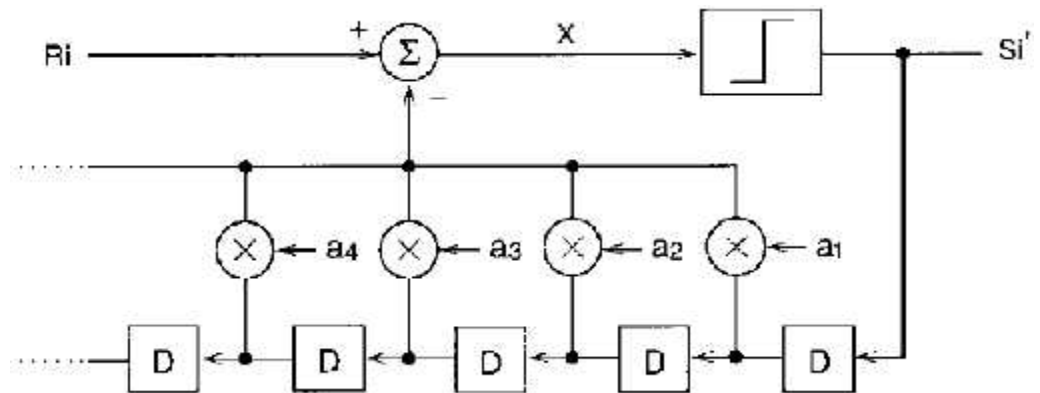
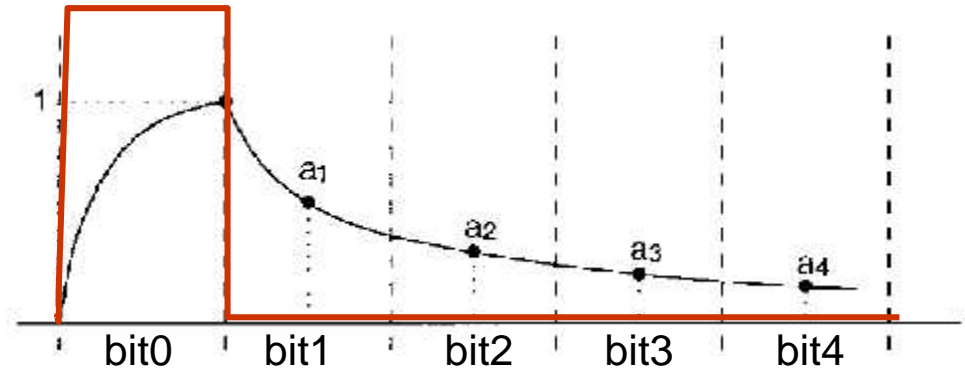


Receive after 40 inches



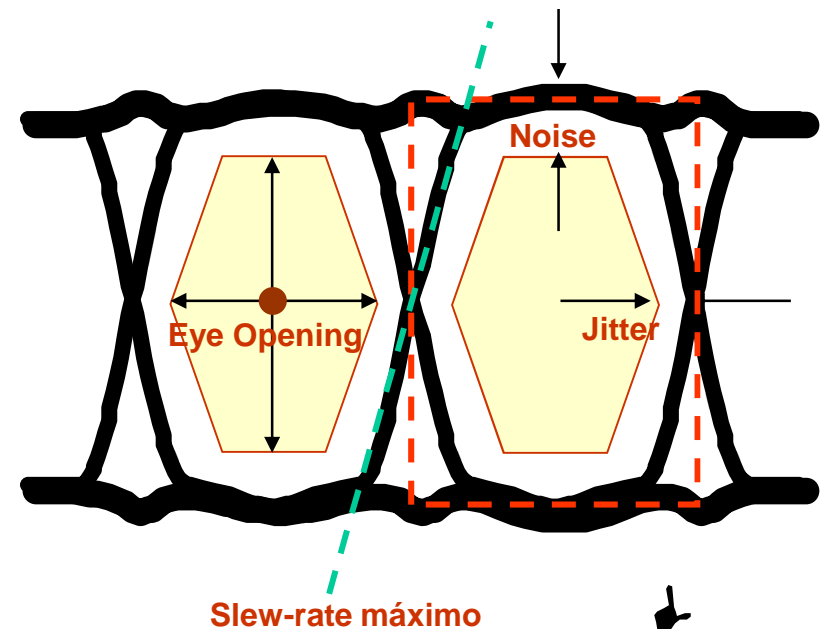
Ecualización de recepción en señales de alta velocidad

- ❑ Si se supone conocida la respuesta al impulso de una línea es posible realizar un filtro que compense la interferencia intersímbolos (ISI) que esa respuesta genera sobre bits adyacentes
- ❑ Suponiendo que un bit de valor '1' agrega en el centro de los bits siguientes una interferencia a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , un filtro como el mostrado compensa este efecto
- ❑ Todo depende que la señal S_i' haya sido correctamente decodificada
- ❑ El método se llama **DFE (Decision Feedback Equalizer)**

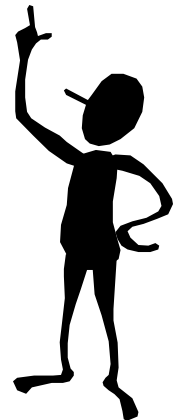


Descripción de niveles válidos mediante el “diagrama de ojo”

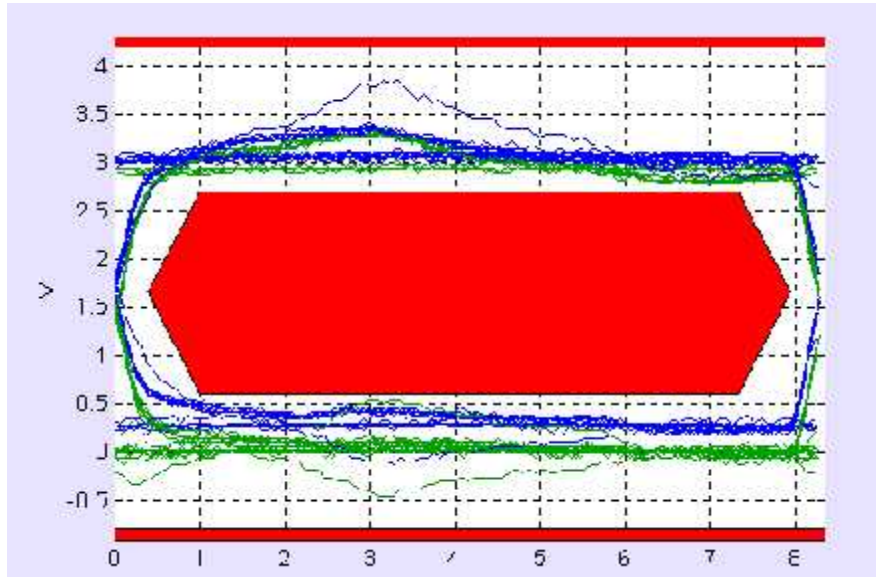
- Una señal digital vista en un osciloscopio con memoria correctamente sincronizado, genera una imagen como la de la figura
- En cada tiempo de bit, la señal “ideal” deja de serlo por varias causas:
 - El slew-rate limitado del transmisor y del canal
 - Ruido adicionado a la señal
 - La interferencia intersímbolos (ISI): cómo el valor de bits previos influye sobre el bit actual.
- Estas causas afectan dos valores, que se ven en la **apertura del ojo**:
 - **Noise**: dispersión de valores respecto al máximo en el centro del bit
 - **Jitter**: dispersión de valores de valor intermedio en la zona de transición de bits



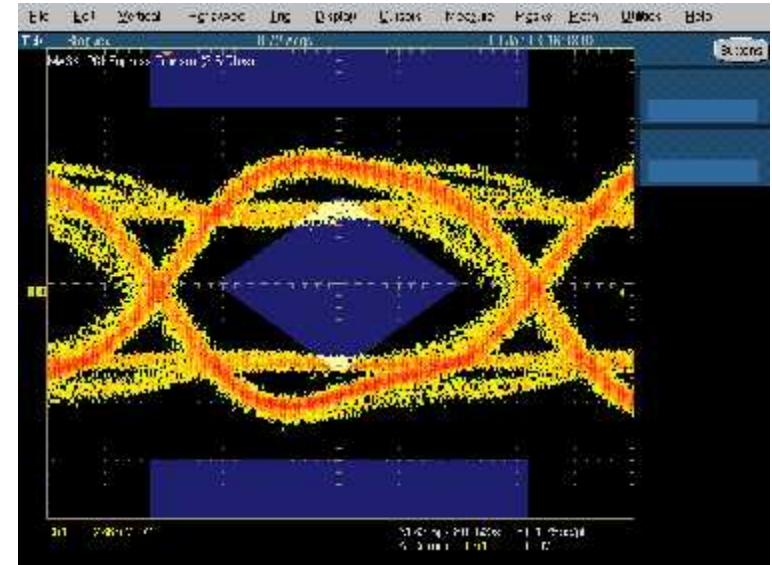
Grandes aperturas indican mejor sensibilidad, y tienen una relación directa con la tasa de errores de bit (BER)



Descripción de niveles válidos mediante el “diagrama de ojo”



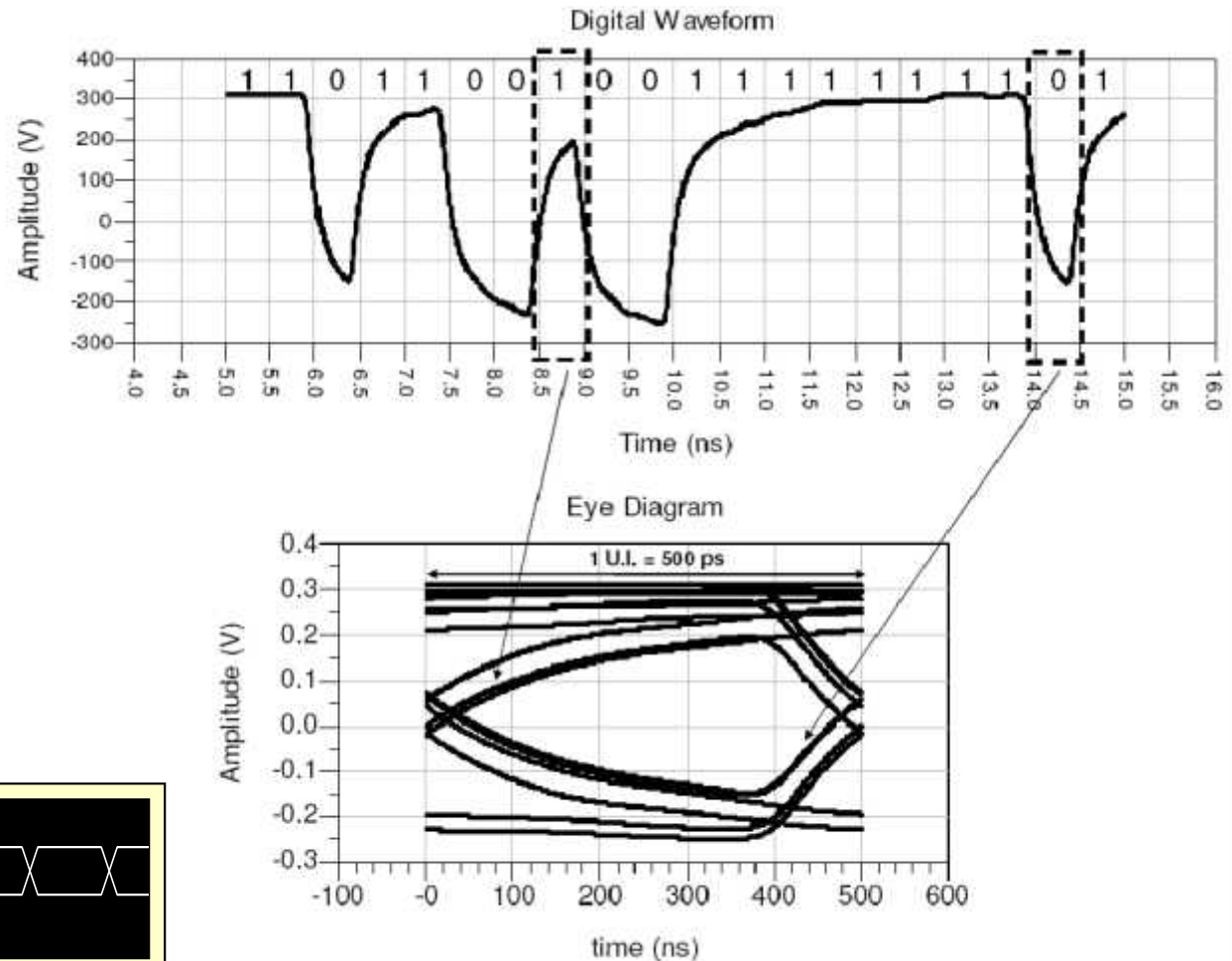
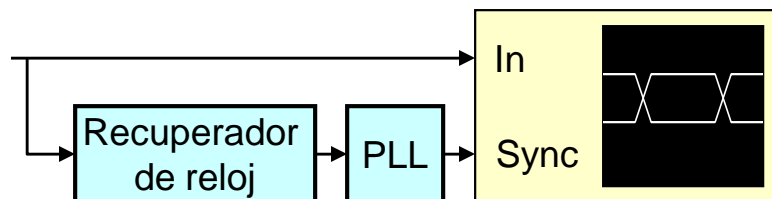
☐ La figura muestra una señal USB 2.0 real observada con un osciloscopio y correctamente sincronizada, y como los valores de la señal dejan una apertura de ojo importante, por lo tanto con bajo BER



☐ La figura muestra una señal PCI Express (2.5Gbps) que por efecto de la atenuación y el retardo de grupo no satisface la especificación que impone el diagrama de ojo, por lo tanto con mayor BER

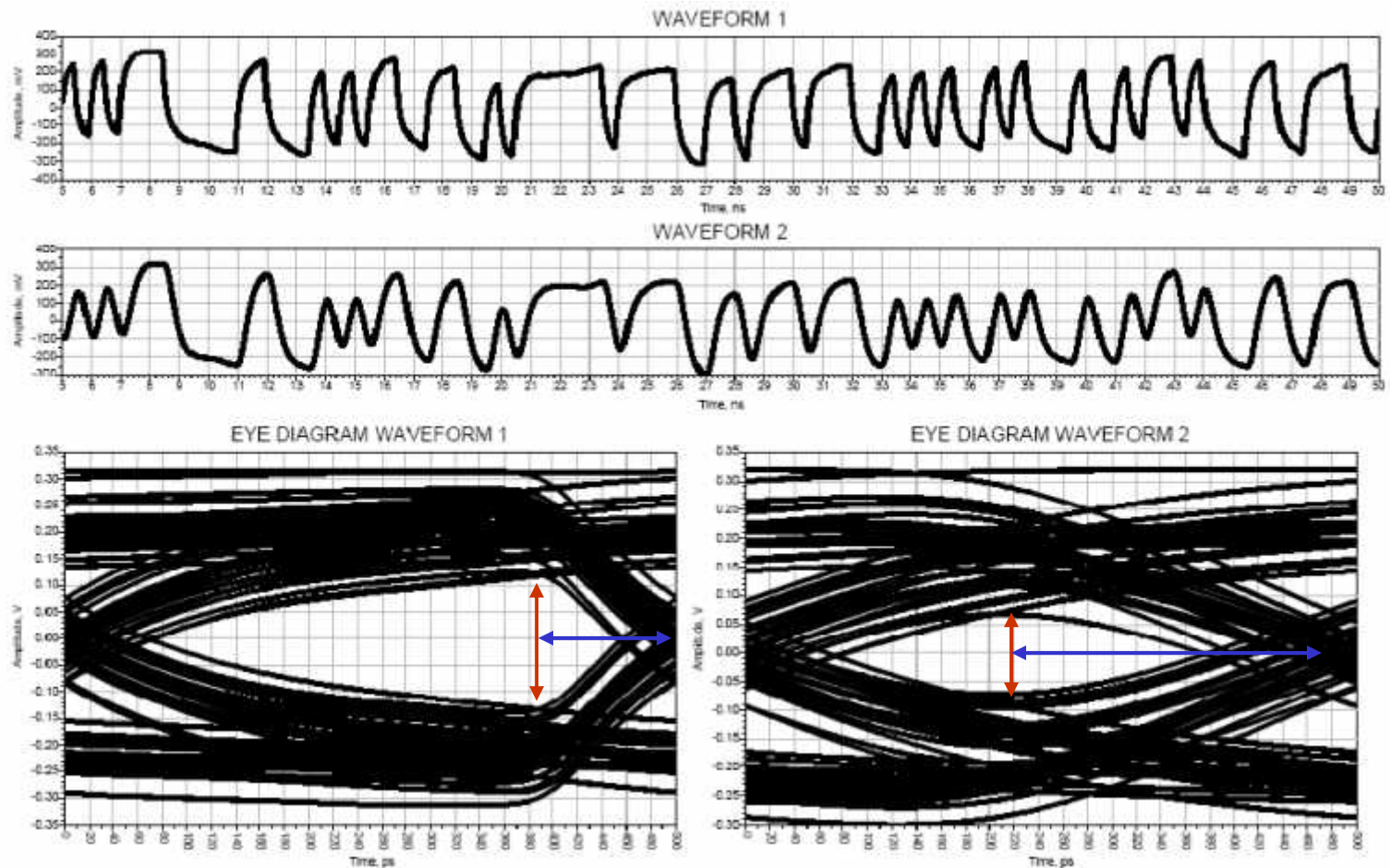
Cómo se construye el diagrama de ojo?

- Requiere sincronizar el sistema de captura con la señal de transmisor y capturar y superponer la señal del receptor
- Si la señal es equiprobable, el jitter de fase debe tener valor medio nulo, y un recuperador de reloj con PLL puede servir como reloj de sincronización



Ventajas del diagrama de ojo para comparar señales

Ejemplo: comparar la “calidad” de WAVEFORM1 respecto a WAVEFORM2, mirando las formas de onda, y mirando los diagramas de ojo



Además de la
amplitud
permite
decidir sobre
el mejor
momento de
decisión!



Modelado de excitadores y receptores (drivers y receivers)

Para poder simular el comportamiento de una línea de transmisión es también fundamental conocer qué es lo que está conectado en los extremos de esa línea

Disponibilidad de modelos

Para simular el comportamiento de una señal en una línea de transmisión se debe conocer qué está conectado en sus extremos. Para ello hay tres opciones:

1. Usar modelos SPICE provistos por el vendedor

- Difíciles de conseguir, o con NDA, por razones de secreto comercial.
- Dependen del SPICE usado, que suele diferir entre el de microelectrónica con el usado para diseño de PCBs.
- Un modelo SPICE suele agregar complejidad innecesaria a la simulación.
- En general, es una alternativa complicada.

2. Usar modelos IBIS provistos por el vendedor

- Al no mostrar detalles innecesarios o de valor comercial, los modelos IBIS están comenzando a ser más disponibles que los SPICE
- Y poseen precisión más que suficiente para modelar los problemas de transmisión.

3. Desarrollar modelos propios simples basados en parámetros básicos de los drivers como Rise time, Fall time, e impedancia de salida.

Los modelos IBIS de los distintos tipos de salidas

- ❑ Al diseñarse un circuito impreso, la evaluación del ajuste entre la impedancia de salida de un transmisor, de la línea de PCB, de los eventuales orificios de conexión (vias), de las derivaciones (taps) y de la impedancia del receptor pueden ser hechos por el software de diseño, y, conociendo las características de los conductores y del dieléctrico, las adaptaciones pueden ser optimizadas mediante el ajuste del ancho de la pista.
- ❑ Para modelar los transmisores y receptores no basta un simple modelo lineal Thevenin, y debe realizarse una descripción tipo SPICE de los componentes activos (transistores MOS P y N, y diodos de enclavamiento) y pasivos.
- ❑ Los modelos IBIS (por I/O Buffer Information Specification) están estandarizados por la norma ANSI/EIA-656-B, y el modelo de interconexión ICM (por IBIS Interconnect Modeling Specification) por la norma ANSI/GEIA-STD-0001.
- ❑ Programas como Quartus_II, de ALTERA, incluyen una herramienta que automáticamente genera un archivo IBIS en función del pinout del diseño y el tipo de salidas elegidas para cada una.

Qué es IBIS: Input/Output Buffer Information Specification

IBIS es una descripción estándar del comportamiento analógico de un buffer.

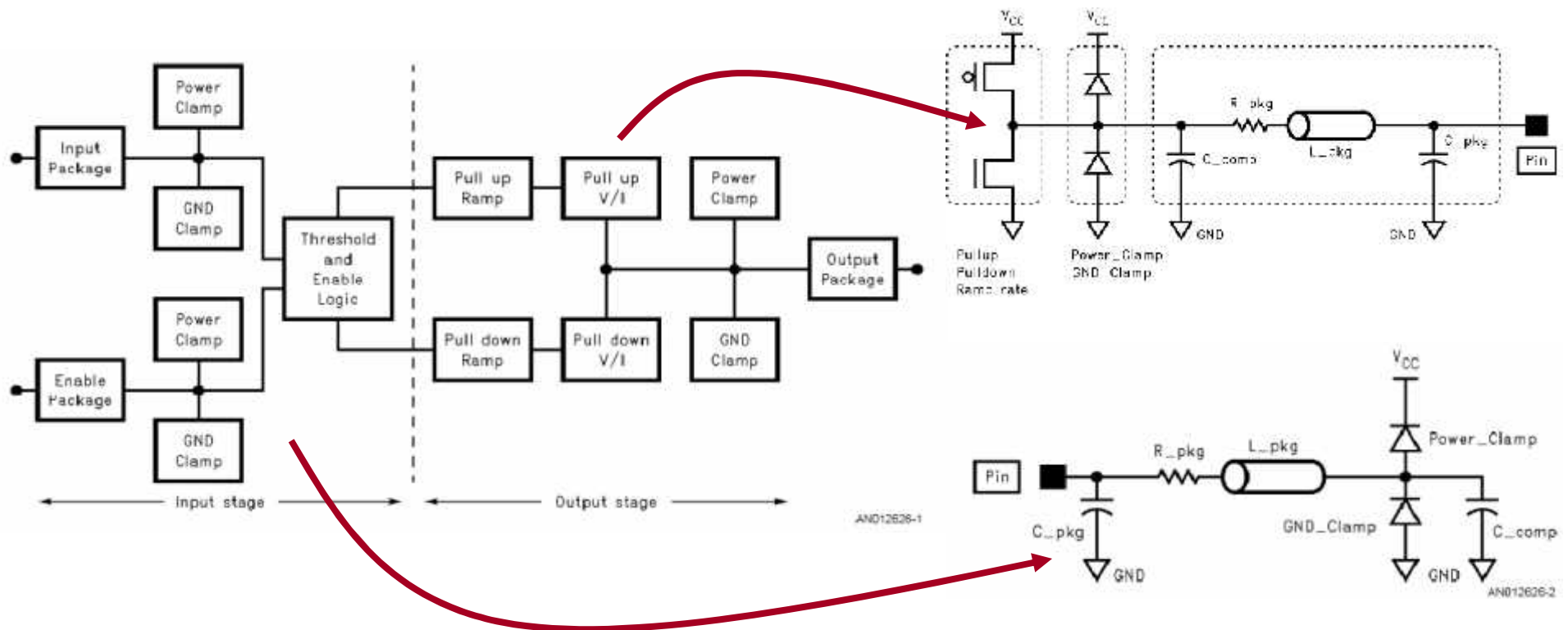
Es una descripción a nivel de texto que al ser procesada (parsed) detalla características Voltaje/Corriente, Voltaje/Tiempo, componentes parásitas, capacidad de entrada, y otro tipo de información temporal, para distintas estructuras de I/O.

Estas descripciones modelan con precisión el comportamiento de estos elementos, por lo que son usados para simular el comportamiento eléctrico y temporal de circuitos y evaluar los problemas de integridad de señal. Sus ventajas son:

- Portabilidad: entre herramientas EDA
- Precisión adecuada
- Modelo más simple de simular que SPICE
- Incorporación de modelos de encapsulado
- Capacidad de automatizar los procesos de verificación de comportamiento temporal e integridad de señales

Qué es un modelo IBIS? El modelo de comportamiento

El modelo de un buffer CMOS tiene elementos básicos de la etapa de entrada y de la etapa de salida, que son modelados

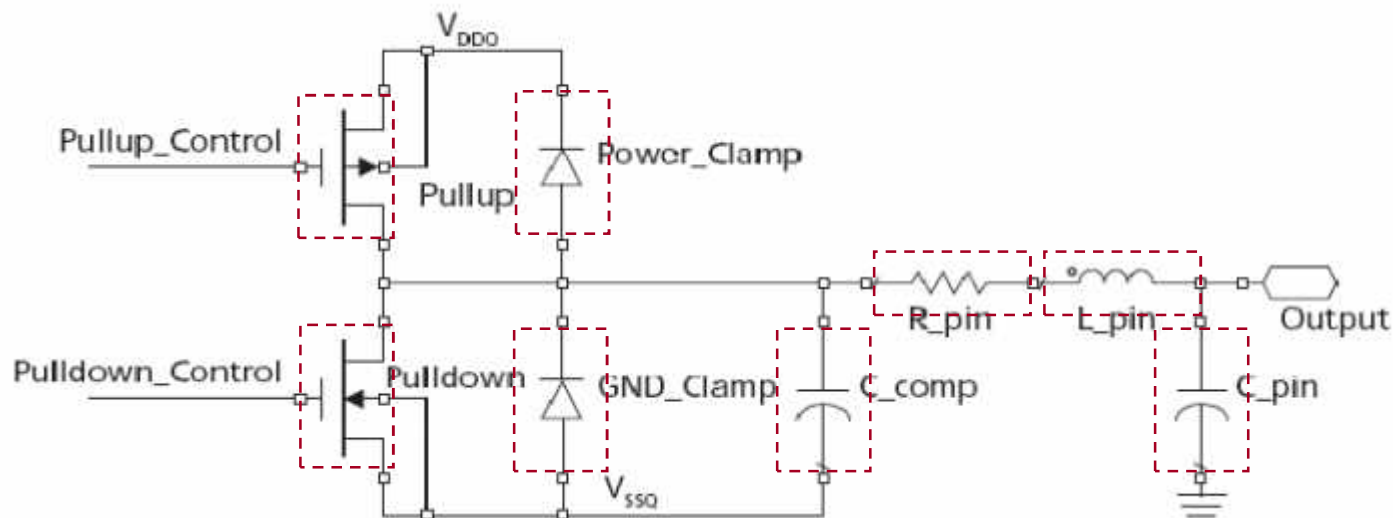


Qué es un modelo IBIS?

Un modelo IBIS se compone de una serie de palabras clave, tales como [File Name] y [Model].

El encabezado contiene información general como nombre del archivo, versión/revisión de IBIS, y notas sobre historial del modelo, limitaciones, y otras cosa sobre la forma de uso. El resto se compone de modelos de entrada, salida, buffers de I/O y modelos de encapsulados.

Por ejemplo, los elementos de una salida CMOS básica son:



Qué es un modelo IBIS?

Las secciones estáticas

La sección [Model] contiene la información necesaria para modelar una configuración de una entrada, salida o buffer bidireccional. Por ejemplo, una entrada sólo requiere detallar los diodos de clamp, la capacidad de entrada, y los umbrales de conmutación.

La sección [Package] sirve, por ejemplo, para detallar valores mínimos, máximos y típicos de R, L y C en todas las patas de un dado encapsulado, en tanto que [Component] puede usarse para describir valores individuales de R, L, y C. [Package Model] puede ser usado para definir matrices multisegmentos de acoplamiento entre las redes RLC de un dado encapsulado.

[Pin Mapping]: indica las fuentes de provisión de energía a cada buffer, para modelado del efecto de fuentes (power integrity simulation).

[Diff_pin] : usada cuando un componente usa señales diferenciales

[Model Selector]: para asociar ciertas opciones de buffers (Ej: ODT: on-die termination) a patas específicas de un componente.

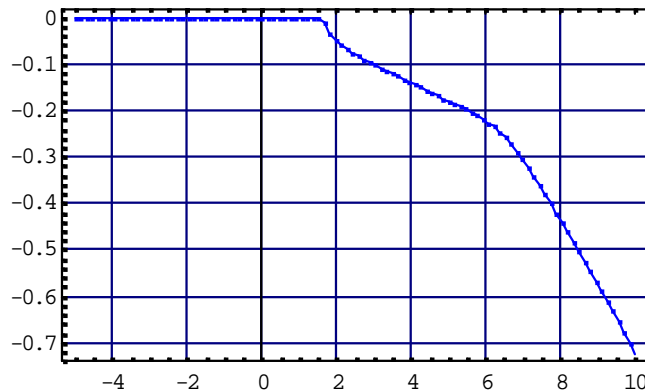
Qué es un modelo IBIS?

Las secciones estáticas

- [POWER Clamp] y [GND Clamp]: son tablas de datos que describen las curvas I-V de los diodos de clamping (power/ground clamp diodes), con sus comportamientos mínimo (más lento), típico, y máximo (más rápido), lo que es útil para el análisis del modelo del buffer de caso peor a caso mejor.
- Dentro de la sección [Model], el parámetro C_comp es usado para describir la capacidad máxima, típica y mínima (modelo simple, capacidad constante).
- En la sección [Model Spec] el campo [Receiver Thresholds] agrega información detallada sobre un conjunto de umbrales de conmutación, incluso aquellos que dependen de una VREF externa, siendo de importancia en el modelado temporal extremo a extremo de una señal.

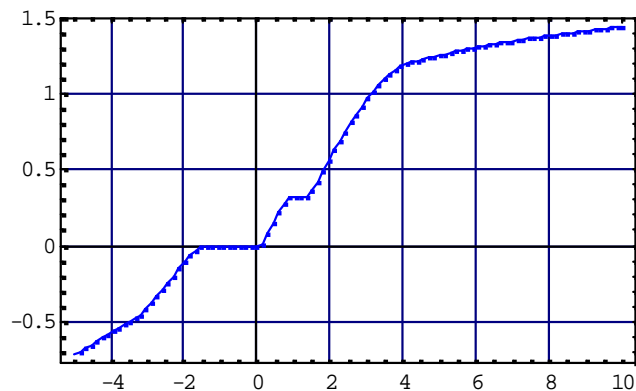
Curvas de salida (I/V curves) de un buffer ABT 244

De igual modo, los transistores NMOS y PMOS del driver son descriptos por tablas de datos asociadas a las palabras [Pulldown] y [Pullup], con las curvas I-V de los dispositivos.



Curva del transistor PMOS
(Pull-up curve) referenciada a VCCQ

- Y-axis: Current [A]
- X-axis: Voltage [V]



Curva del transistor NMOS
(Pull-down curve)
referenciada a VSSQ

- Y-axis: Current [A]
- X-axis: Voltage [V]

Qué es un modelo IBIS?

Las secciones dinámicas

Para el modelado del comportamiento dinámico de un buffer, el modelo IBIS contiene secciones [Ramp], [Rising Waveform], y [Falling Waveform]. Cada una de estas descripciones describe una transición excitando un carga de test estándar (típicamente 50 ohms). En ciertos casos las tablas [Rising Waveform], y [Falling Waveform] son duplicadas, para modelar el caso de la resistencia de carga conectada a VSSQ o a VDDQ.

La sección [Ramp] es un sumario de las tablas previas, donde se indican los tiempos de conmutación entre el 20% y 80% de los extremos de los datos dados en [Rising Waveform] y [Falling Waveform].

source (540 time steps)

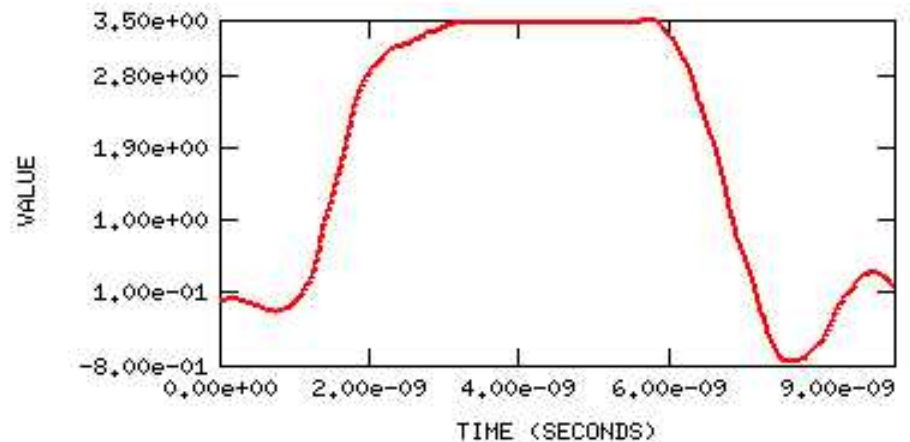


Grafico combinado de las tablas
[Rising Waveform], y [Falling
Waveform].

Qué es un modelo IBIS?

Extensiones

Permiten conectar al modelo IBIS con descripciones de otros lenguajes, u objetos más complejos:

- Las palabras clave [External Circuit] y [External Model] fueron agregadas para aumentar la compatibilidad con modelos SPICE, VHDL-AMS, y Verilog-AMS.
- La palabra clave [Algorithmic Model] se agregó para soportar el modelado algorítmico de bloques embebidos complejos como los serializadores y deserializadores (SERDES) usados en PCI-Express y similares.
- A su vez, las palabras [ISSO PD], [ISSO PU], y [Composite Current] permiten modelar el efecto de conmutaciones simultáneas (simultaneous switching output SSO), que afectan los caminos de distribución de energía y generan problemas como “Ground-bouncing”.

- Compatibilidad electromagnética
- Susceptibilidad electromagnética
- Emisión electromagnética

EMI/EMC: Compatibilidad electromagnética

- el Informe Técnico de la Comisión Electrotécnica Internacional 61000-1-1, se define a la compatibilidad electromagnética como:

"la capacidad de cualquier aparato, equipo o sistema para funcionar de forma satisfactoria en su entorno electromagnético sin provocar perturbaciones electromagnéticas sobre cualquier cosa de ese entorno"

- La compatibilidad electromagnética se ocupa de dos problemas diferentes, que dan lugar a dos ramas de la misma:

Ese aparato, equipo o sistema debe ser capaz de operar adecuadamente *en ese entorno* sin ser interferido por otros (*inmunidad o susceptibilidad* electromagnética).

Además, no debe ser fuente de interferencias que afecten a otros equipos de ese entorno (*emisiones* electromagnéticas).

EMI/EMC: Normas europeas

- La Directiva 2004/108/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15/12/04, relativa a la aproximación de las legislaciones en materia de EMC, derogó la Directiva 89/336/CEE con efectos a partir del 20/7/07.
- Según la nueva Directiva, un producto no modificado podría introducirse en el mercado hasta el 20/7/09 si cumpliera los requisitos esenciales de la Directiva 89/336/CEE y la primera unidad se hubiera introducido en el mercado antes del 20/7/07.
- Enlaces e información útiles sobre compatibilidad electromagnética
 - Comisión Europea:
 - http://ec.europa.eu/enterprise/electr_equipment/emc/index.htm
 - Guía para la Directiva 2004/108/CE, sobre compatibilidad electromagnética:
 - http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/electrical/files/emc_guide__updated_20100208_v3_en.pdf
 - Normas armonizadas publicadas en el ámbito de la compatibilidad electromagnética:
 - <http://ec.europa.eu/enterprise/newapproach/standardization/harmstds/reflist/emc.html>

EMI/EMC: Normas europeas

- La Directiva 2004/108/CE excluye:
 - Equipos de radio y telecomunicaciones cubiertos por la Directiva 1999/5/EC12; pero incluye a receptores de TV y comunicaciones, y transmisores de RF por debajo de 9kHz o por sobre 3000 GHz.
 - Productos aeronáuticos cubiertos por la Regulation 1592/2002, en tanto dicha regulación impone requisitos más exigentes aún. De igual modo a todo equipamiento marino que sea cubierto por la Directiva 96/98/EC20
 - Equipamiento Radio amateur (definido por la ITU), por ser equipos experimentales. NO excluye a equipos comerciales que puedan usar los radioaficionados
 - A vehículos motorizados, cubiertos por la Directiva 72/245/EEC16 y 2004/104/EC, pero NO excluye al equipamiento after-market no incluido en dicha norma. Idem vehículos de dos o tres ruedas regulados por la Directiva 97/24/EC
 - Dispositivos médicos implantables activos, regulados por la Directiva 90/385/EEC 17
 - Dispositivos médicos: regulados por la Directiva 93/42/EEC18
 - Dispositivos médicos de diagnóstico In vitro, regulados por la Directiva 98/79/EC19
 - Equipamiento agrícola y forestal regulado por la Directiva 75/322/EEC21

Inmunidad a señales conducidas de baja frecuencia

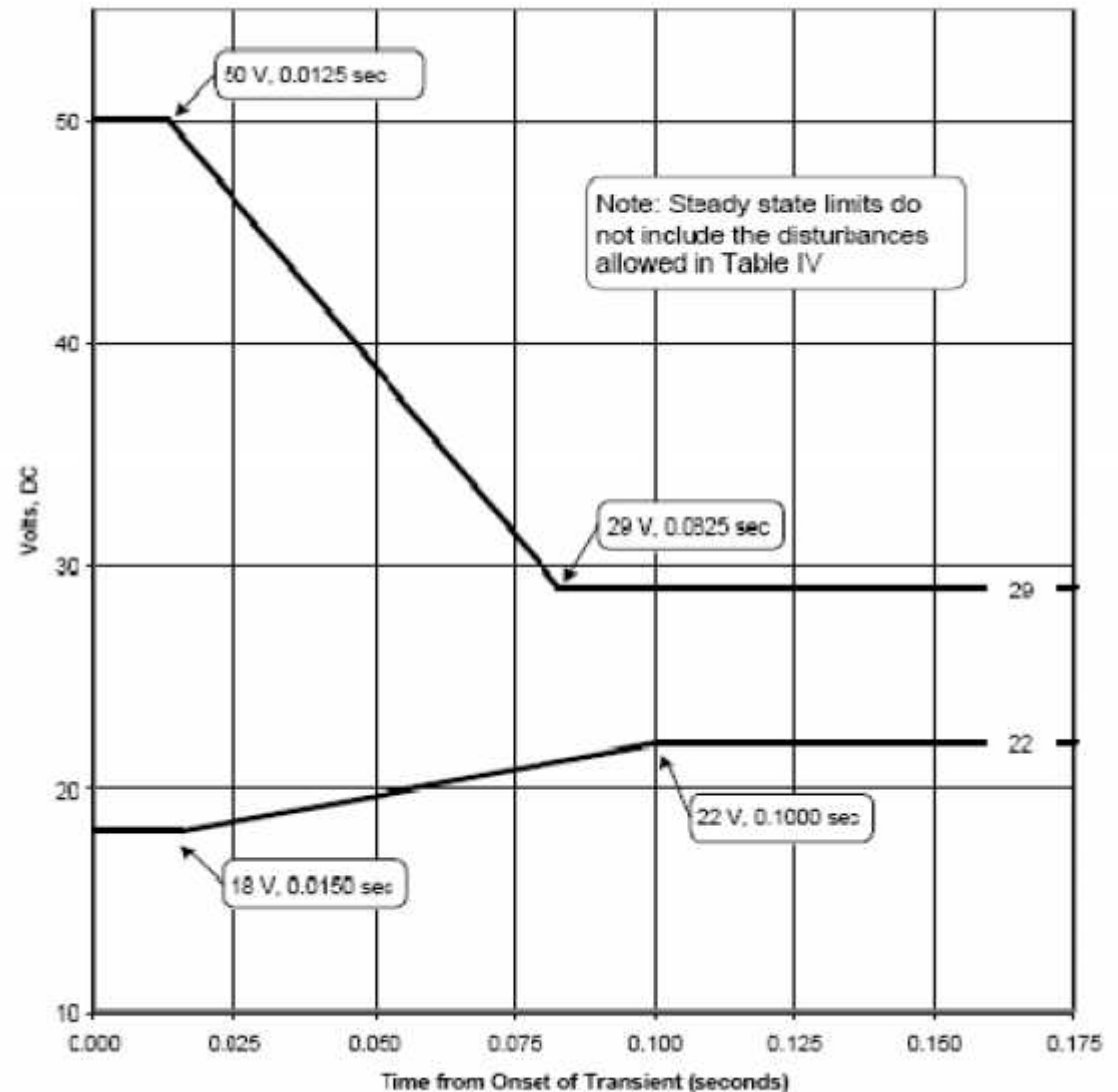
- a) armónicos en la alimentación de energía: puede ser importante cuando es necesario realizar operaciones sensibles al momento del cruce por cero.
- b) señales superpuestas a las líneas de energía: como los dispositivos de protección por corrientes residuales de componentes DC en redes AC.
- c) fluctuaciones de voltaje en las líneas de energía: un sistema debe tolerar ciertos rangos de variación de energía, pero en equipos con suministro de energía conmutado debe considerarse el fenómeno de encendido (por ejemplo, en el arranque de un generador).
- d) transitorios y caídas de voltaje en la alimentación.
- e) desbalances de voltaje en alimentaciones de energía polifásica.
- f) variación de frecuencia de alimentación de CA (como sucede en las UPS).
- g) voltajes inducidos en conexiones de sensores e instrumentos.

Inmunidad a señales radiadas de baja frecuencia

- a) campos magnéticos, continuos y transitorios: suele ser relevante sólo en equipos que incluyen algún tipo de sensado (efecto Hall, magnetoresistencias) o que operan empleando campos magnéticos (por ejemplo, tubos CRT).
- b) campos eléctricos: depende del tipo de equipamiento.

Susceptibilidad: Inmunidad a señales conducidas de baja frecuencia

- Por ejemplo, la norma MIL-STD-704F, NOTICE 1, del 30/12/2008, referida a provisión de energía a bordo de aeronaves, describe los transitorios que deben tolerar los equipos de vuelo, tanto en magnitud como en duración
- La necesidad de poder tolerar sobrevoltajes de hasta 50V en una línea de alimentación con operación nominal máxima a 19V impone consideraciones de diseño especiales



INMUNIDAD A SEÑALES CONDUCIDAS DE ALTA FRECUENCIA

- a) voltajes y corrientes inducidas
- b) transitorios unidireccionales y oscilatorios

En general este tipo de interferencia tiene efectos importantes en casi todos los equipos electrónicos. Por ejemplo, las fuentes de alimentación switcheadas de las lámparas de bajo consumo, de los balastos electrónicos son una fuente habitual de este tipo de interferencia. En el ámbito hospitalario ciertos equipos como los de electrocirugía y fisioterapia generan fuerte interferencia en frecuencias elevadas. Y en la industria los motores DC, los equipos de soldadura por arco.

Los transitorios de alta frecuencia también suelen ingresar por cables de alimentación y sensores, y son especialmente peligrosos en redes de potencia o datos de largo alcance, por la existencia de fenómenos atmosféricos de gran energía (Ej: descargador gaseoso en telefonía)

Susceptibilidad: Tolerancia a descargas electrostáticas

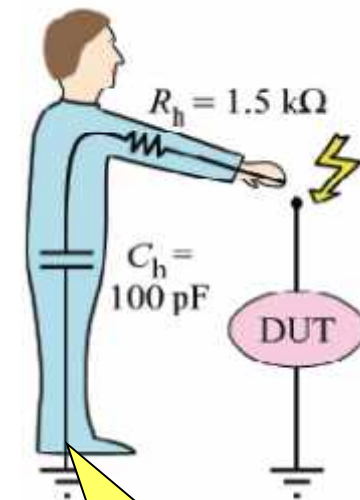
Son test requeridos en aplicaciones donde existe la posibilidad de generación de cargas electrostáticas:

– Human Body Model (HBM): Mil-Std-883, TM3015.8

Class	ESD withstand voltage, V_w
0	0 ~ 250 V
1A	250 ~ 500 V
1B	500 ~ 1000 V
1C	1000 ~ 2000 V
2	2000 ~ 4000 V
3A	4000 ~ 8000 V
3B	> 8000 V

– Charged Device Model CDM): JESD22-C101C

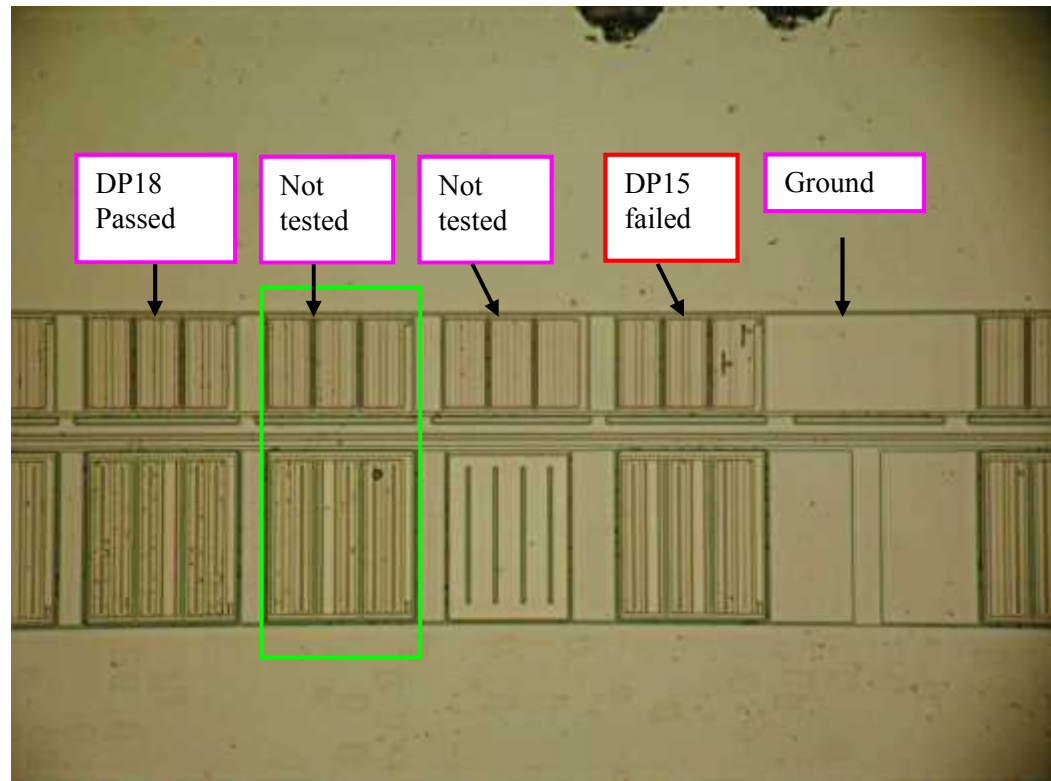
– Machine Model (MM): JESD22-A115-A. Similar a HBM con $R_h=0$, $C_h=200\text{pF}$, y $R=500$ en paralelo al DUT



El modelo de voltaje, carga y resistencia depende de la aplicación, por eso diferentes normas

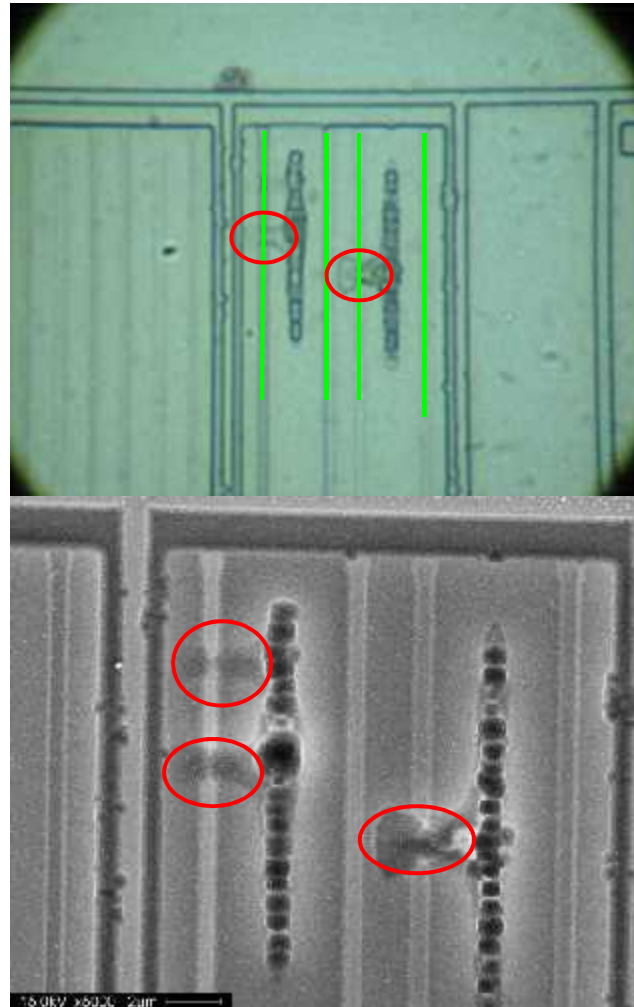
Susceptibilidad: Tolerancia a descargas electrostáticas

- En un buffer de I/O el rectángulo verde encierra a los transistores de salida y los diodos de protección ESD.
- Los rectángulos superiores son los transistores de canal N y los inferiores los de canal P.
- En el PAD 15 existen transistores dañados



Susceptibilidad: Tolerancia a descargas electrostáticas

- En una vista más cercana se observan los caminos de conducción generados por el fenómeno de ruptura electrostática
- Las líneas verdes señalan la ubicación de los poly gates
- Y los óvalos rojos la ubicación de los daños source-drain



INMUNIDAD A SEÑALES RADIADAS DE ALTA FRECUENCIA

- campos magnéticos
- campos eléctricos
- campos electromagnéticos (señales de RF)
 - ondas continuas y/o moduladas
 - transitorios

En general afectan a todos los aparatos, y sobre todo en aquellos que poseen sensores externos que miden señales de bajo nivel (un electroencefalógrafo, por dar un ejemplo), donde las señales de RF son rectificadas por las etapas de protección y agregan error a las medidas.

- En todo blindaje de RF debe considerarse la continuidad absoluta. Un blindaje con una ranura es una antena!!!
- Lo mismo sucede con todos los cables, que también funcionan como antenas

Las señales electromagnéticas pulsadas son propias de ámbitos industriales

EMI: Emisión electromagnética

Equipos “inherentemente benignos”

- Si sus características físicas los hacen incapaces de generar emisiones que puedan afectar las comunicaciones de otros equipos, y pueden operar sin gran degradación en presencia de perturbaciones electromagnéticas. Por ejemplo:
 - Cables, cuando son vendidos separadamente
 - Cargas resistivas sin ningún tipo de control (estufas simples)
 - Baterías o acumuladores (sin circuitos cargadores)
 - Auriculares o altavoces (que no posean amplificadores incorporados)
 - Equipos de protección que pueden producir disturbios sólo durante su activación excepcional (llaves térmicas, disyuntores, sin electrónica)
 - Capacitores, por ejemplo los usados para control del factor de potencia
 - Motores de inducción
 - Lámparas de filamento
 - Llaves de encendido/apagado (sin partes electrónicas)
 - Antenas pasivas
 - Fichas, tomacorrientes, bloques de terminales, termostatos.
 - Componentes electrónicos aislados (R, L, C, D, CI, PCB, relays)

En bajas frecuencias

- Conducida: variaciones de voltaje/corriente y generación de armónicos producido sobre la línea de alimentación por aparatos diseñados para su conexión directa a la red pública de distribución de energía de bajo voltaje.

Por ejemplo:

- Rectificadores con filtro capacitivo
- Control de fase con tiristores o triacs
- Conmutador de escobillas de motores DC
- Saturación de núcleos magnéticos de transformadores
- Circuitos electrónicos como fuentes de switching
- Controles de temperatura con termostatos o con triac por semiciclos completos
- Lámparas gaseosas (ej: tubos fluorescentes)
- Radiada: en general no es de importancia

Emisión electromagnética

En altas frecuencias, conducida

- En general es de importancia para la mayoría de los aparatos electrónicos y eléctricos, salvo excepciones. Se caracterizan por inducir voltajes o corrientes que influyen sobre equipos a los que se interconectan, o sobre la red de energía.
- La interferencia puede ser:
 - Ondas continuas
 - Ondas moduladas
 - Ondas discontinuas

Muchos equipos de switching directo desde la red (fuentes flyback, inversores de energía, por ejemplo) generan picos de consumo de corriente de muy alta frecuencia, que si bien deberían ser suministrados por la etapa de rectificador, puede ser conducidos a la red. Lo mismo vale para sistema de corrección de factor de potencia.

Esta interferencia puede tener componentes de modo común, diferencial o ambas

En altas frecuencias, radiada:

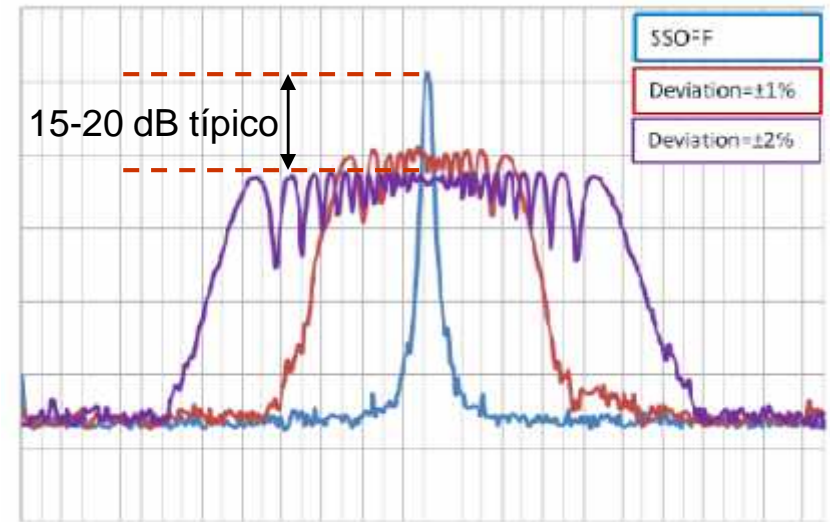
- campos magnéticos
- campos eléctricos
- campos electromagnéticos (RF)
 - ondas continuas, moduladas y transitorios.
- A ser considerada en prácticamente todos los equipos electromagnéticos
- Los campos magnéticos se evalúan hasta cerca de 30MHz, y los electromagnéticos desde 30MHz en adelante ... aunque nada es absoluto

Una fuente habitual de energía radiada son los tubos fluorescentes (por su longitud funcionan como antenas cuando son excitados mediante balastos electrónicos), y las señales de los teléfonos celulares.

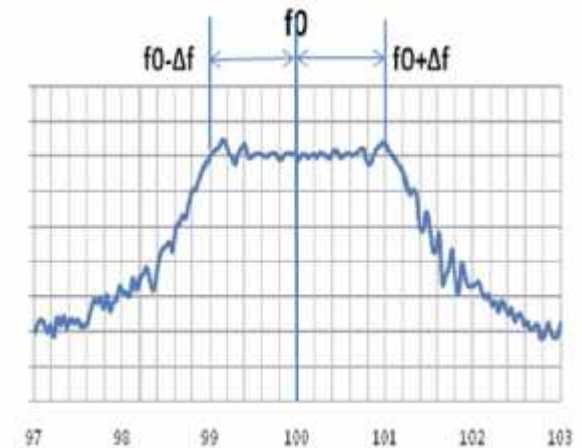
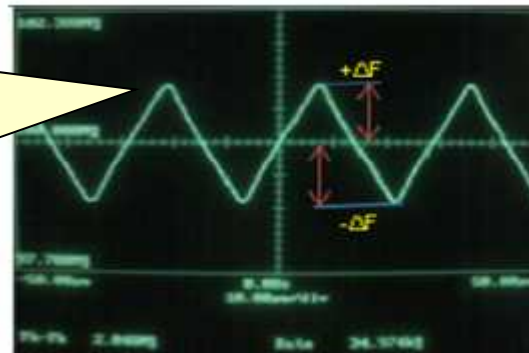
Si se debe blindar un equipo que pueda radiar RF debe considerarse la continuidad absoluta. Un blindaje con una ranura es una antena!!! No generalizar de forma ingenua el concepto de Jaula de Faraday!

Dithering

- La EMI depende de la energía que un objeto emite, y de cuán concentrada está esa energía en el espectro de frecuencias, y una señal de reloj de frecuencia constante es un ejemplo típico de energía sumamente concentrada
- Lo que las regulaciones buscan no es limitar la energía total radiada sino su densidad espectral de ruido (W/Hz).
- El dithering se emplea en osciladores pero también en otros equipos (SPS)



Eso puede lograrse modulando la frecuencia del reloj con una señal que distribuya (spread) la emisión en un rango más amplio de frecuencias, y la FCC ha definido formas de hacerlo



Dithering: Formas de realizarlo

- Es posible realizar la dispersión de frecuencia sin necesidad de usar componentes especiales,
- En un circuito de microprocesador estándar, ello puede lograrse mediante el uso de un Timer del microprocesador y agregando un Varicap D1 (o varactor), tres resistencias (R1, R2 y R3) y dos condensadores (C1 y C2)
- La salida digital del timer es filtrada por R1+C1, y en C1 se genera una onda casi triangular (en realidad tramos de exponenciales)
- Esta señal, a través de R2 y R3 cambia la polarización inversa de D1, cuya capacidad cambia
- Y este cambio de capacidad, aislado de componente de DC por C2, afecta la capacidad de carga que ve el oscilador de cristal

