

# Contadores digitales

---

Carlos A. Zerbini

Cátedra Medidas Electrónicas 2

Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Córdoba

Año lectivo 2019

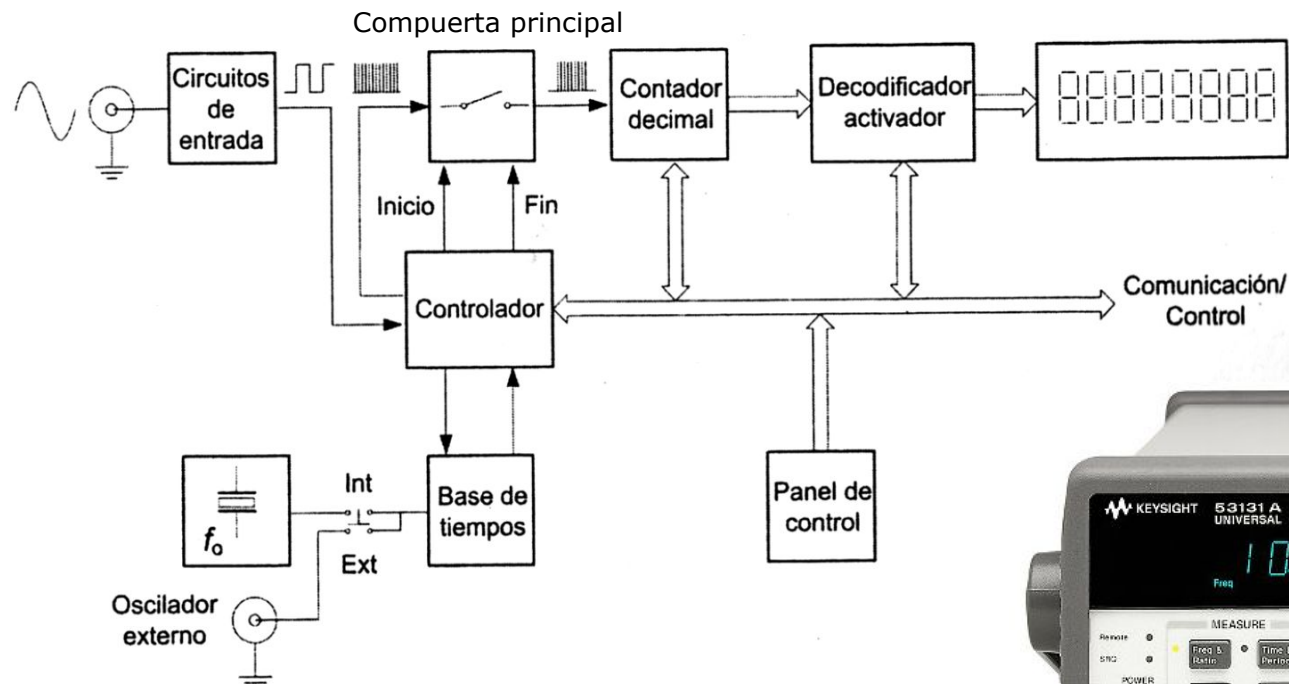
## Generalidades

- Un **contador** cuenta el **número de eventos** producidos **entre un instante inicial y un instante final**, elegidos **a voluntad**, y presenta luego el resultado en forma numérica.
- La **frecuencia** de una señal **repetitiva** es el **número de ciclos (repeticiones)** de esa señal **por unidad de tiempo**. Se puede medir mediante un contador que **cuenta el número de ciclos**, pero durante **un tiempo determinado internamente con muy baja incertidumbre**. En este caso, decimos que el contador funciona como **frecuencímetro**.
- La **frecuencia** y el **tiempo** están relacionados, por lo que un contador puede además medir **diferencia entre dos frecuencias, intervalos de tiempo (en una señal o entre dos señales), defasaje entre dos señales, ancho de pulso, ciclo de trabajo, cálculos estadísticos, etc.**
- **RESOLUCION:** # de dígitos.
- **SENSIBILIDAD EN FRECUENCIA:** # de dígitos y tiempo de compuerta.

**$f = n / t$     número de ciclos  $n$  de la señal repetitiva que se producen en el intervalo  $t$ . Si  $t=1$  sec,  $f$  estará en ciclos por segundo o Herz.**

La clave está en la precisión de  $t$ . Se usa una base de tiempos de muy buena estabilidad. Valores comunes son  $3 \cdot 10^{-7}$  -  $3 \cdot 10^{-9}$  partes/mes. Debe ser 3-5 veces menor que el sistema ( $< .5 \cdot 10^{-7}$  para GPS)

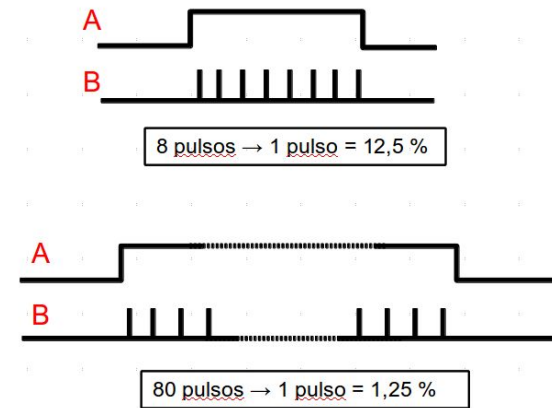
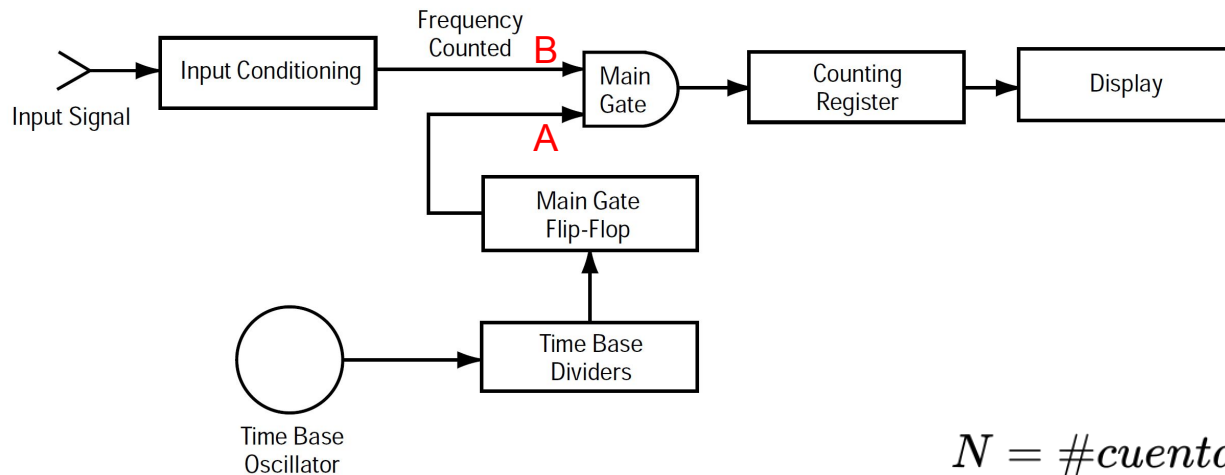
## Diagrama en bloques / aspecto general



## Diagrama en bloques

- El núcleo del sistema es el **contador**, cuya tecnología define la **máxima frecuencia** a medir.
- El **circuito de entrada** acondiciona la señal a medir para adecuarla a **circuitos que trabajan con niveles lógicos de tensión (es decir, por encima o por debajo de ciertos umbrales)**
- La **unidad de control** determina **qué señal se contará** (i.e., la entrada de la base de tiempos) y **por cuánto tiempo se contará** (i.e., la entrada de la compuerta principal o main gate). Esto se verá luego cómo **dos casos separados**.
- La **base de tiempos** brinda intervalos de tiempo de baja incertidumbre para **abrir y cerrar la compuerta principal**. Se parte de un oscilador muy estable (cuarzo, 1,5 a 10 MHz) y luego se va dividiendo.

## Medición de frecuencia

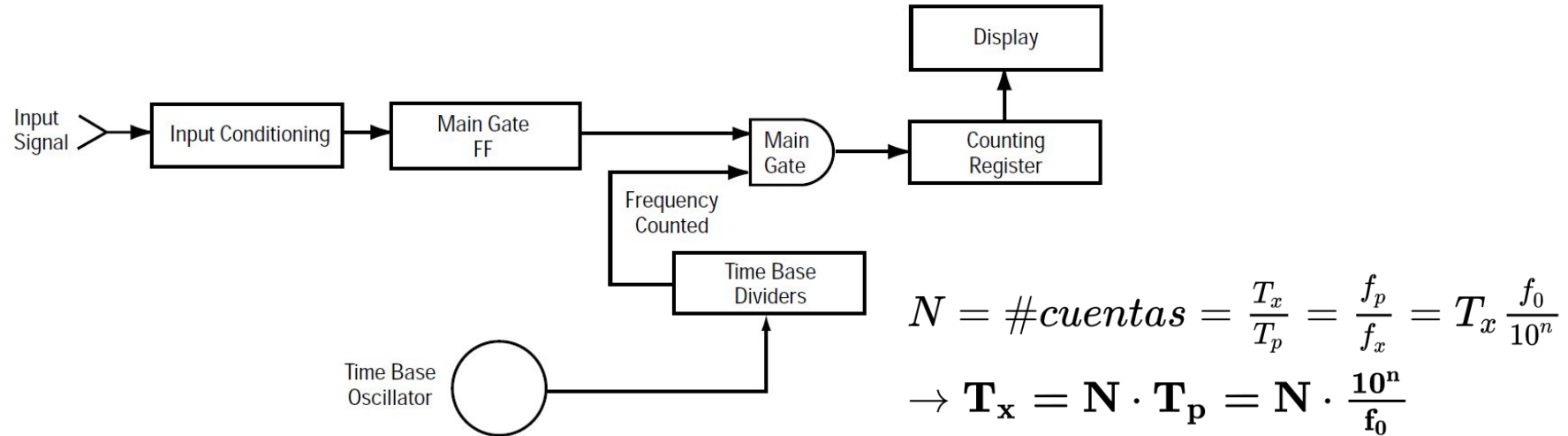


$$N = \#cuentas = \frac{T_p}{T_x} = \frac{f_x}{f_p} = f_x t_p = f_x \frac{10^n}{f_0}$$

$$\rightarrow f_x = \frac{N}{t_p}$$

- La compuerta principal se habilita mediante la base de tiempo interna, pasando por el flip-flop de compuerta
- Cuanto **más baja es la frecuencia a medir, mayor es el error de medición**
- La **peor precisión, es decir error 100%**, se da cuando  $T_{comp} = T_{señal}$

## Medición de periodo



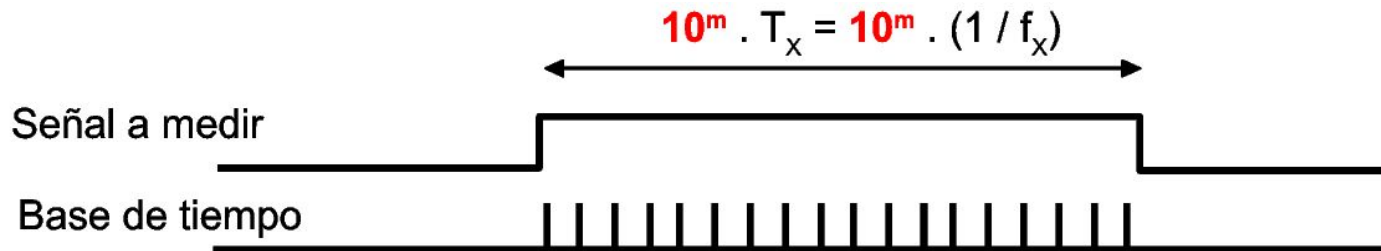
- Se intercambian los caminos. La **señal de entrada** va al FF de compuerta, y se cuentan ciclos del **oscilador de referencia (luego de los divisores)**
- El error de medición es menor cuanto **menor es la frecuencia de la señal de entrada**
- Ejemplo: señal de 100 Hz ( $T=10$  ms). Si uso 10 MHz como base de tiempo, el error es de 1 ciclo cada  $10^6/100=100000$  ciclos, es decir 0,00001 o 0,001%. Si midiera **frecuencia** con base de tiempo 1 Hz ( $T_p=1s$ ), tendría 100 cuentas y el error sería  $1/100 = 0,01$  o 1%.

## Medición de periodo

- Si además tomo **múltiples ciclos de la señal de entrada**, disminuye el error. Esto se llama **periodo promediado**.

$$N = \#cuentas = \frac{T_x}{T_p} = \frac{f_p 10^m}{f_x} = T_x \frac{f_0}{10^n} \times \frac{10^m}{f_x}$$

$$\rightarrow T_x = \frac{N}{10^m} T_p = \frac{N}{10^m} 10^n T_0 = \frac{N}{10^m} \cdot \frac{10^n}{f_0}$$



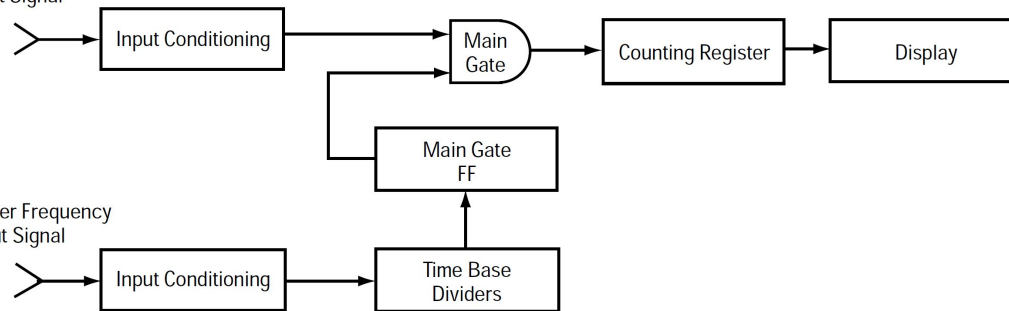
- En resumen:
  - Frecuencias **ELEVADAS** (periodos chicos) → conviene medir **FRECUENCIA**
  - Frecuencias **BAJAS** (periodos GRANDES) → conviene medir **PERIODO**

## Contadores digitales

### Medición de relación de frecuencias

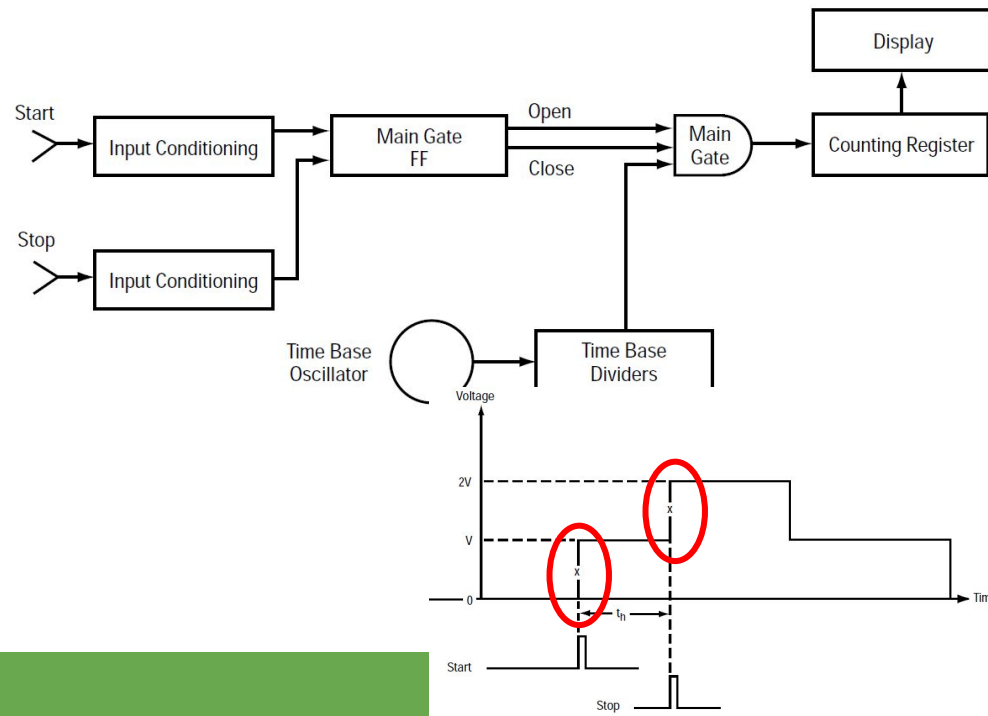
Se cuentan ciclos de la señal de **mayor frecuencia**. La **compuerta** se controla mediante la señal de **menor frecuencia**.

Higher Frequency  
Input Signal



### Medición de intervalos de tiempo

Se tienen **dos entradas, cada una con su acondicionador**. Se utiliza un FF set/reset (SR). Se pueden medir intervalos **entre dos señales o sobre dos zonas de una sola señal (single/both)**, usando distintas condiciones de trigger.



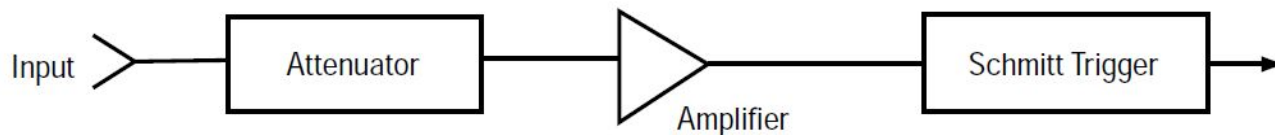
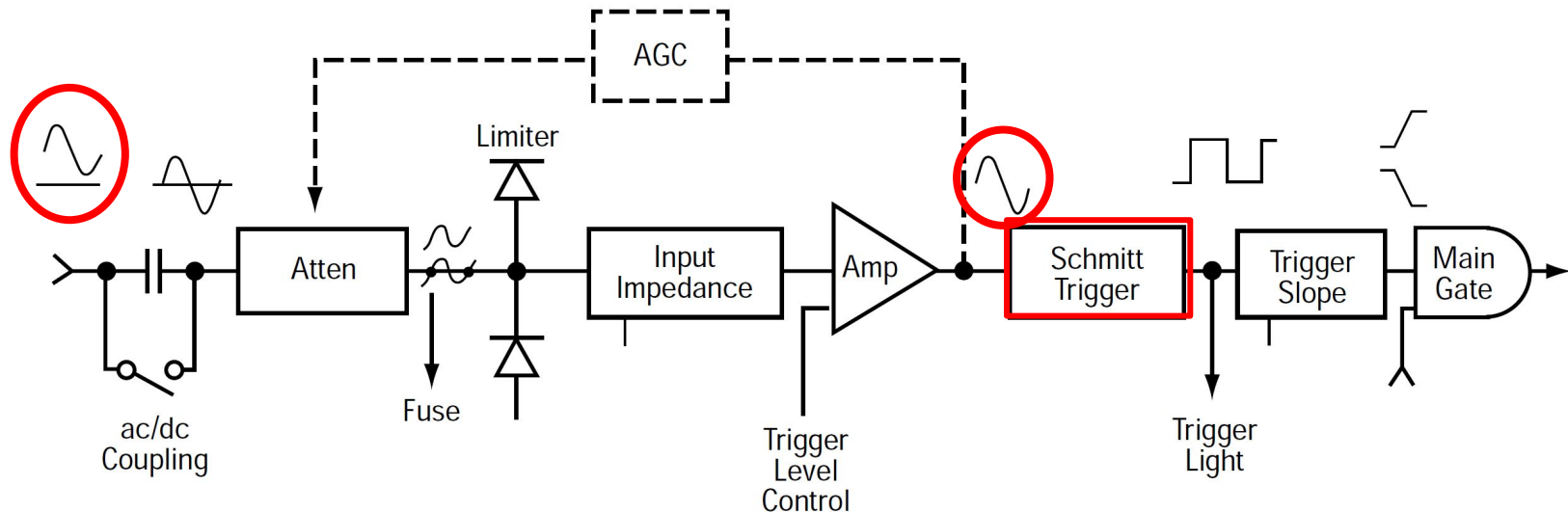
### Otras aplicaciones

- Normalizador: realiza cálculos automáticos, no es muy utilizado.
- Con pre-scaler: divisores sobre la señal
- Totalizador: #eventos en un periodo específico. **No se usa base de tiempos.**



## Circuitos acondicionadores de entrada

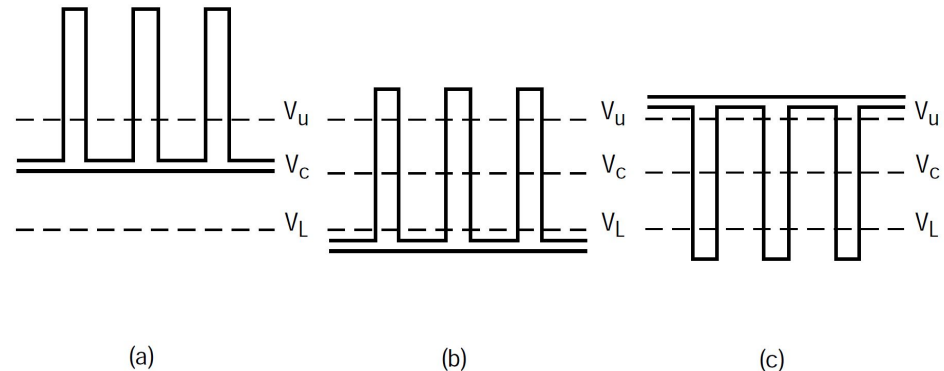
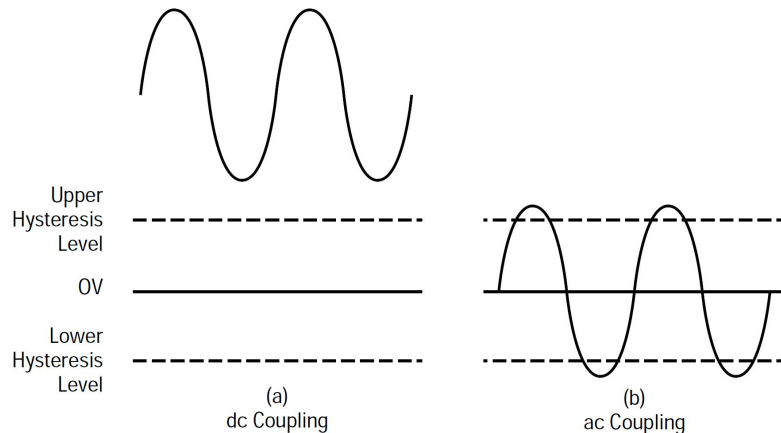
- Las señales analógicas de entrada son señales **repetitivas, con distintas formas y amplitudes**
- El trigger de Schmitt posee en su entrada una **cierta banda de trabajo**
- **El acondicionador de señal adapta la señal de entrada a la banda requerida por el trigger**



## Circuitos acondicionadores de entrada

**Acoplamiento AC/DC:** lleva señales **senoidales** a un nivel **simétrico respecto a 0 V**. Se usa **principalmente para señales senoidales**.

**Nivel de disparo (offset):** el acoplamiento AC/DC no es útil para **señales con ciclo de trabajo muy chico o variable (p.ej. PWM)**, ya que no detectaría señal o el nivel se movería constantemente. El control de offset **desplaza uno o ambos niveles de histéresis**, permitiendo llevar una gran variedad de señales a la ventana del trigger de Schmitt.



## Circuitos acondicionadores de entrada

### Atenuador y limitadores:

- El amplificador posee un rango dinámico, por fuera del cual se produce **distorsión por saturación** (bajan  $z_{in}$  y slew rate).
- Para mantenerse dentro del **rango dinámico** se utiliza el atenuador. Puede ser **por pasos o continuo** (“ajuste de sensibilidad”). **Por fuera del rango fijado, actúan los enclavadores fijos (por ej  $\pm 0,7V$ ) y un fusible rápido (energía).** 300-400V para  $Z_{in}$  alta, 5-12 V para  $Z_{in} = 50$  ohms.
- El atenuador es mandatorio cuando el rango dinámico es bajo, y **maximiza la SNR**
- **Para frecuencia  $\rightarrow$  atenúo mucho, para periodo  $\rightarrow$  atenúo poco (se verá más adelante)**

### Adaptador de impedancias:

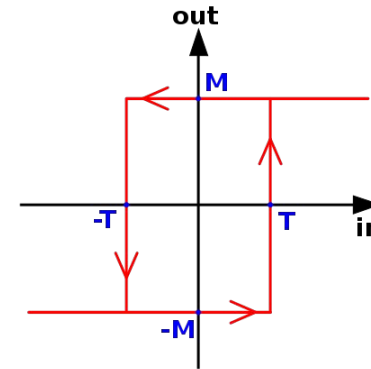
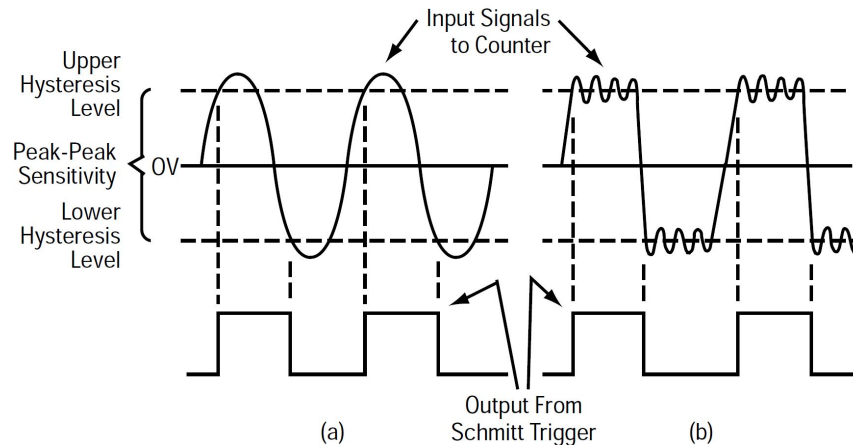
- Hasta  $\sim 10$  MHz  $\rightarrow Z_{IN} = 1$  M $\Omega$  y  $C_{IN} = 35$  pF, para no cargar la fuente. Se usa sensibilidad de 25-50 mV teniendo en cuenta el ruido.
- $> 10$  MHz  $\rightarrow$  la  $C_{IN}$  anterior formaría un **cortocircuito**. Se utiliza  $Z_{IN} = 50\Omega$  y baja capacidad ( $X_C$  muy grande). La sensibilidad es 20-25 mV.
- Medición de **circuitos digitales**  $\rightarrow$  **niveles ad-hoc**

## Circuitos acondicionadores de entrada

**Trigger de Schmitt**

- Permite pasar de una señal analógica a **pulsos binarios**
- **Junto al amplificador, define la sensibilidad (o resolución) de tensión:**  $S = V_{TU} - V_{TL} (V_{RMS})$ 
  - Señal mínima que puede ser contada
  - **Se define como un valor eficaz de una señal de entrada senoidal**, ya que este tipo de señal **no depende del ciclo de trabajo**. Si se desea saber para otra señal, se obtiene el Vpp:

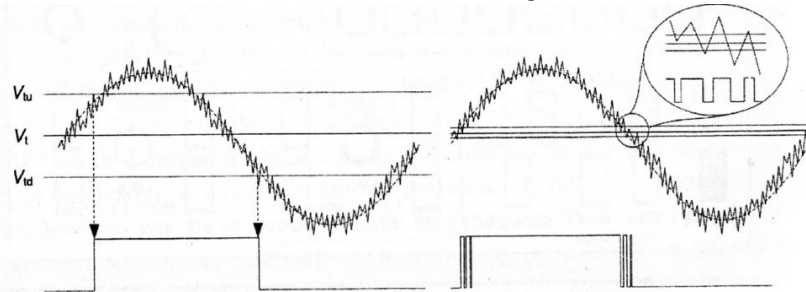
Senoidal:  $V_{ef} = V_{pico} / \sqrt{2} \rightarrow V_{pp} = 2 V_{ef} \sqrt{2}$  La entrada debe satisfacer este valor.



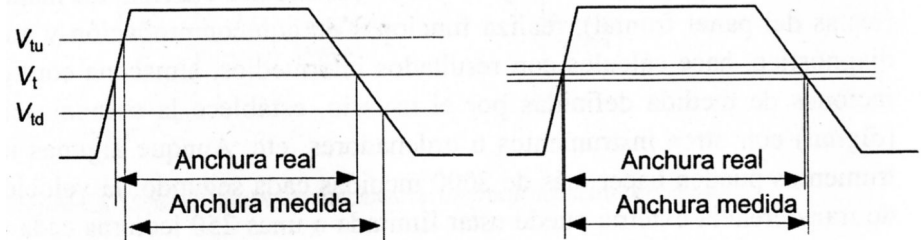
## Circuitos acondicionadores de entrada

**Trigger de Schmitt**

- No necesariamente es bueno mucha sensibilidad, ya que el trigger es de banda ancha y el ruido puede causar falsas conmutaciones. La sensibilidad óptima depende de la **impedancia de entrada**.
- **Ciclo de histéresis más amplio** → **mayor inmunidad al ruido, menor sensibilidad.**
- Además, la señal debe **permanecer un tiempo mínimo fuera del ciclo** para que sea detectada.
- **Mediciones de frecuencia** → interesa una banda ancha para rechazar cuentas falsas por ruido
- **Mediciones de periodo** → interesa una banda de histéresis angosta a fin de minimizar errores por diferencias de pendiente



Error en medición de frecuencia



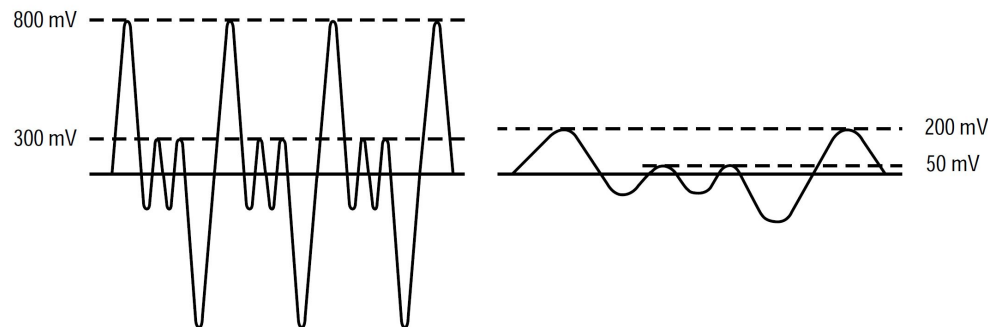
Error en medición de periodo

**Control de pendiente (slope):** mantiene o invierte la salida del trigger antes de la compuerta principal

## Circuitos acondicionadores de entrada

**Control automático de ganancia (AGC)**

- **Control de sensibilidad ajustado automáticamente. Actúa sobre el atenuador.**
- Se utiliza en **señales que varían su amplitud junto a su frecuencia**, y no pueden ser ajustadas manualmente. **Ejemplo:** transductor magnético,  $V_{señal} = f(d\theta / dt)$



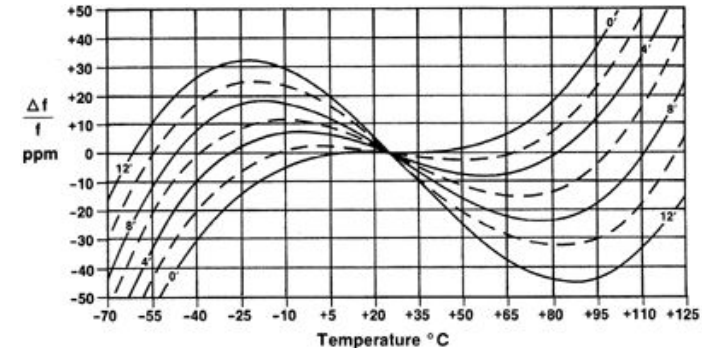
- Si se ajusta el amplificador para la primera señal (3000 Hz), al variar la velocidad de la máquina a la segunda señal de 500 Hz el contador no la detectará.
- El AGC se basa sólo en los **picos de señal** por lo que tiene dificultad siguiendo señales tales como una portadora modulada en AM.

## Oscilador de base de tiempo

- Es **fundamental** para tener una **referencia estable y de baja incertidumbre. Da origen al error conocido como error de base de tiempo**, que es uno de los errores del contador.
  - Sólo para el uso como **contador de eventos** este factor no es de importancia
- Oscilador a cristal, **exacto y preciso** + cadena de divisores por décadas

### Tipos de derivas

- **Con la temperatura:** depende del corte del cristal.  
**Se compensa de tres modos:**
  - Room temperature Crystal Oscillator (RTXO)
  - Temperature compensated crystal oscillator (TCXO)
  - Oven controlled crystal oscillator
- **Con variaciones de tensión de alimentación:** cambios en la polarización del circuito asociado a del horno de control. OCXOs pueden variar 1 parte en  $10^{10}$  para 10% de variación, mientras que un RTXO puede variar 1 parte en  $10^7$ .



## Oscilador de base de tiempo

### Tipos de derivas

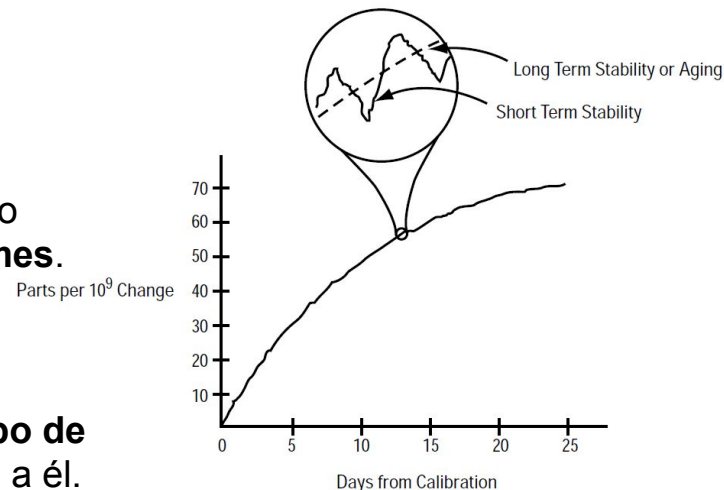
- Estabilidad a largo plazo (envejecimiento)**

Característica física del cristal que produce un corrimiento progresivo de su frecuencia. Se mide por mes, ya que para periodos menores es enmascarado por los corrimientos a corto plazo. Un buen OCXO puede tener **1,5 partes cada  $10^8$  por mes**.

- Estabilidad a corto plazo (time-domain stability)**

Resultante del ruido generado en el oscilador (fluctuaciones aleatorias de **fase y frecuencia**). Se debe especificar el **tiempo de medida**, ya que el ruido medido es inversamente proporcional a él.

Se toma la **varianza de Allen**, que es  $\sigma (\Delta f / f) \cdot t$



	Room Temperature Crystal Oscillators	Temperature Compensated Crystal Oscillators	Simple Switching Oven Oscillators	Proportional Oven Oscillators
Temperature (0°C - 50°C)	$<2.5 \times 10^{-6}$	$<5 \times 10^{-7}$	$<1 \times 10^{-7}$	$<7 \times 10^{-9}$
Line Voltage (10% change)	$<1 \times 10^{-7}$	$<5 \times 10^{-8}$	$<1 \times 10^{-9}$	$<1 \times 10^{-10}$
Aging	$<3 \times 10^{-7} / \text{mo}$	$<1 \times 10^{-7} / \text{mo}$	$<1 \times 10^{-7} / \text{mo}$	$<1.5 \times 10^{-8} / \text{mo}$ or $<5 \times 10^{-10} / \text{day}$
Short Term (1 sec avg.)	$<2 \times 10^{-9} \text{ rms}$	$<1 \times 10^{-9} \text{ rms}$	$<5 \times 10^{-10} \text{ rms}$	$<1 \times 10^{-11} \text{ rms}$



## Fuentes de error

**Sistemáticos**  
(puedo ponderarlos y corregirlos)

{ Retardo diferencial entre canales  
Error de tiempo de disparo (Schmitt)  
Error en la base de tiempos (largo plazo)

**Aleatorios**  
(sólo puedo conocerlos y minimizarlos)

{ Error de cuantización (+-1 cuenta)  
Error de trigger aleatorio (Schmitt)  
Error de base de tiempos (corto plazo)

Independientes  
Schmitt trigger  
Base de tiempos

The diagram illustrates the relationship between error sources and their characteristics. On the left, two categories are listed: 'Sistemáticos (puedo ponderarlos y corregirlos)' and 'Aleatorios (sólo puedo conocerlos y minimizarlos)'. In the center, two curly braces group specific error types under each category. On the right, three labels are listed: 'Independientes' (red), 'Schmitt trigger' (blue), and 'Base de tiempos' (green). Colored arrows connect the error types to these labels: a red arrow from 'Retardo diferencial entre canales' to 'Independientes'; a blue arrow from 'Error de tiempo de disparo (Schmitt)' to 'Schmitt trigger'; a green arrow from 'Error en la base de tiempos (largo plazo)' to 'Base de tiempos'; a red arrow from 'Error de cuantización (+-1 cuenta)' to 'Independientes'; a blue arrow from 'Error de trigger aleatorio (Schmitt)' to 'Schmitt trigger'; and a green arrow from 'Error de base de tiempos (corto plazo)' to 'Base de tiempos'.

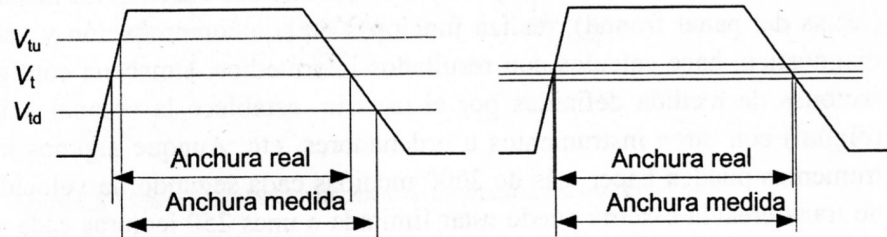
## Fuentes de error

## A) SISTEMATICOS

**A1) Retardo diferencial:** diferencia de longitudes entre las entradas del contador.

Importante para **medición de tiempo entre dos eventos**. Similar al caso del VNA, pero en este caso las longitudes son MECANICAS, no eléctricas. También influyen las impedancias de entrada.

**A2) Tiempo de gatillado (error sistemático de gatillado): importante para mediciones de intervalo de tiempo.** Ocurre cuando  $t_{\text{raise}} \neq t_{\text{fall}}$  ya que el trigger detecta la distancia entre cruces de  $V_{\text{TH}}$  y  $V_{\text{TL}}$ , que en este caso no será la misma QUE LA DISTANCIA ENTRE PUNTOS MEDIOS. **Corrección** → aumentar la amplitud de señal (bajar aten. / subir gan.) para bajar al influencia, siempre que no se agrande demasiado el ruido!



**A3) Error en base de tiempos (largo plazo):** se debe al **envejecimiento del cristal**; no depende de la temperatura. NO puedo compensarlo; se lleva a calibración cada cierto tiempo para que nos digan **cuanto se corrió** respecto a un patrón.

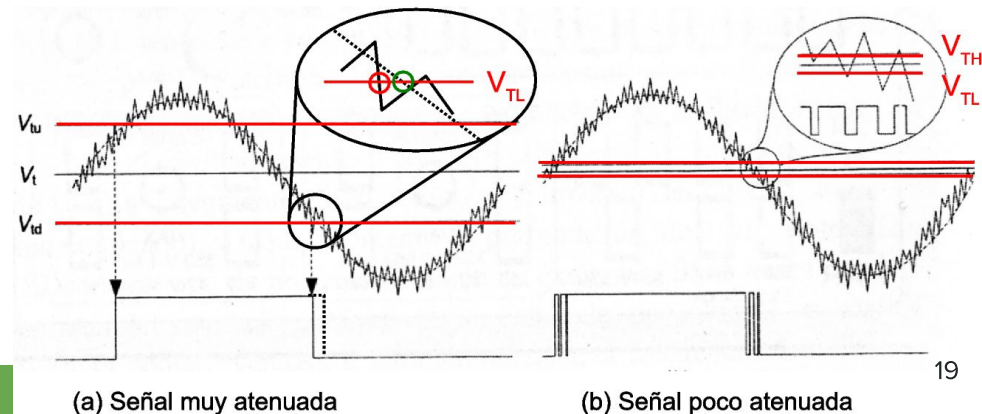
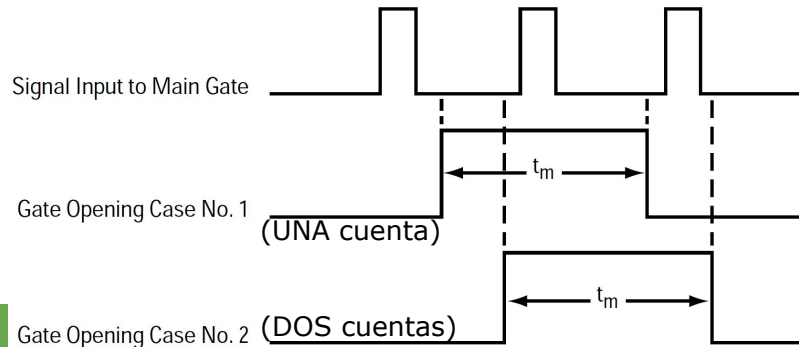
## Fuentes de error

## B) ALEATORIOS

**B1) Error de cuantización (+-1 cuenta):** debido a la **falta de coherencia (sincronismo) entre el reloj interno y la señal de entrada**, en el tiempo de compuerta puede entrar un flanco más o menos, dependiendo de la fase relativa de ambos. Esto no se puede en general predecir. Se expresa en partes por millón, y **afecta a todas las mediciones del contador**.

**B2) Error aleatorio de gatillado:** causado por el **ruido de la señal y del canal de entrada**. Produce que los límites se crucen antes o después de donde cruzaría la señal original. **Produce error aleatorio en mediciones de periodo y de intervalos de tiempo**.

**B3) Error de base de tiempo (corto plazo):** se expresa en partes por millón, y se minimiza mediante las técnicas ya mencionadas (TCXO, OCXO).



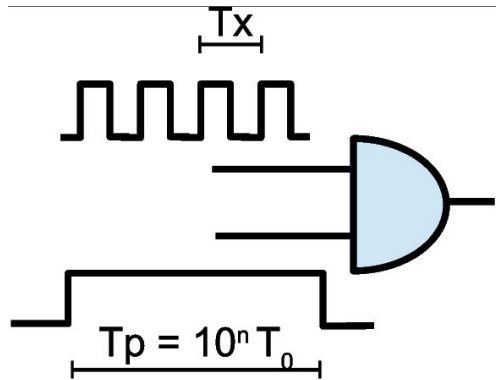
## Influencia de los errores en las mediciones [an200, an200-4]

Fuente de error	Frecuencia	Periodo	Intervalos	Tipo error
Retardo diferencial	NO	NO	SI	SISTEMATICO
Trigger sistemático	NO	NO	SI	
Base de tiempo largo plazo	SI	SI	SI	
Error de cuenta	SI	SI	SI	ALEATORIO
Trigger aleatorio	NO	SI	SI	
Base de tiempo corto plazo	SI	SI	SI	

## Errores en medición de frecuencia

Es la suma del **error de +1 cuenta** y el **error total de la base de tiempos (error a largo plazo, A3)**.

a) Error de cuenta:



$$N = \#cuentas = \frac{T_p}{T_x} = \frac{f_x}{f_p} = f_x T_p = f_x \frac{10^n}{f_0}$$

$$\rightarrow f_x = \frac{N}{T_p}$$

**Valor relativo del ciclo contado = error de cuenta =  $\Delta f / f$**

$$= \pm T_x = \boxed{\pm 1 / f_x}$$

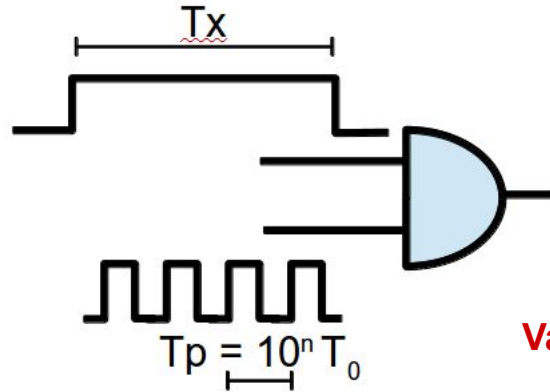
b) Error total de la base de tiempos: se expresa en **partes por millón**.

(dependiente de la señal,  
disminuye al aumentar  $f_x$ )

## Errores en medición de periodo

Es la suma del **error de +-1 cuenta**, el **error total de base de tiempos**, y los **errores de trigger**.

a) Error de cuenta:



$$N = \#cuentas = \frac{T_x}{T_p} = \frac{f_p}{f_x} = T_x \frac{f_0}{10^n}$$

$$\rightarrow T_x = N \cdot T_p = N \cdot \frac{10^n}{f_0}$$

**Valor relativo del ciclo contado = error de cuenta =  $\Delta T / T$**

$$= \pm T_x / N = \pm T_p = \pm 10^n / f_0$$

b) Error total de la base de tiempos: se expresa en **partes por millón**.

c) Error por trigger:

(dependiente de la base, constante al variar  $f_x$ )

$$\text{rms trigger error} = \frac{1.4 \sqrt{x^2 + e_n^2}}{\Delta V / \Delta T} \text{ sec rms}$$

where

$x$  = noise contributed by the counter's input channels (less than several hundred microvolts in some counters to as high as several millivolts in others)

$e_n$  = rms noise contributed by signal source measured over the counter's bandwidth

$V/T$  = slew rate at trigger point of input signal

## Errores en medición de frecuencia y periodo (**CONSIDERANDO SÓLO ERROR DE CUENTA**)

### Ejemplo 1

Se desea medir una  $f_x = 1 \text{ MHz}$  (**alta**) con resolución de al menos  $10^{-6}$  (1 cuenta de error cada  $10^6$  cuentas).

Las opciones de medición son:

#### 1) Si se mide frecuencia:

Para tener resolución (o error) de  $10^{-6}$ , intuitivamente se ve que **un ciclo de  $f_x$  debería ser una millonésima parte de un ciclo de  $f_p$  (tiempo de compuerta)**. Para ello, se necesita realizar **al menos**  $N=10^6$  cuentas. De esto,  $N=f_x \cdot T_p \Rightarrow$  el tiempo necesario (función costo) para lograr esta resolución será  $T_p = 10^6 / 1 \text{ MHz} = 1 \text{ segundo}$ . Esto es un valor normal por lo que es factible esta medición. Si deseamos mayor resolución, se deberá esperar más ( $T_p$  mayor).

#### 2) Si se mide periodo:

Nuevamente, observamos intuitivamente que la cantidad de cuentas para que un ciclo de la base de tiempo represente 1 millonésima parte del periodo medido  $T_x$ . A partir de la fórmula  $T_x = N \cdot (10^n / f_0)$  obtenemos que  $(10^n / f_0) = 10^{-6} \text{ s} / 10^6 = 10^{-12} \text{ seg}$ . Esto significa que para obtener esta resolución **para la misma señal de  $f_x=1 \text{ MHz}$ , pero midiendo periodo, tendría que utilizar una  $f_0$  de 1 THz**, lo cual es muy inconveniente. **Mediante ejemplo vemos que, para frecuencias altas, es conveniente medir frecuencia y no periodo.**

## Errores en medición de frecuencia y periodo (**CONSIDERANDO SÓLO ERROR DE CUENTA**)

### Ejemplo 2

Se desea medir una  $f_x = 1 \text{ Hz}$  (**baja**) con resolución de al menos  $10^{-6}$  (1 cuenta de error cada  $10^6$  cuentas).

Las opciones de medición son:

#### 1) Si se mide frecuencia:

Como en el anterior ejemplo, para obtener la resolución requerida se necesita realizar **al menos**  $N=10^6$  cuentas. De esto,  $N=f_x \cdot T_p \Rightarrow$  el tiempo necesario (función costo) para lograr esta resolución será  $T_p = 10^6 / 1 \text{ Hz} = \mathbf{10^6 \text{ segundos} = 11 \text{ días}}$ . Esto es un valor excesivo, por lo que no es conveniente medir 1 Hz mediante medición directa de frecuencia.

#### 2) Si se mide periodo:

El periodo  $T_x$  para una señal de un Hz es 1 segundo. A partir de la fórmula  $T_x = N \cdot (10^n / f_0)$  obtenemos que  $(10^n / f_0) = 1 \text{ s} / 10^6 = 10^{-6} \text{ seg}$ . Esto significa que para obtener esta resolución **para la misma señal de  $f_x=1 \text{ Hz}$ , pero midiendo periodo, es necesaria como mínimo una base de tiempo  $f_0 / 10^n = 1 \text{ MHz}$** , que es un valor normal. Por ejemplo, se puede utilizar un oscilador a cristal en 1 MHz sin dividir ( $n=0$ ). Se ve así que, en este caso representativo de frecuencias bajas, es conveniente hacer medición directa de periodo y luego eventualmente calcular frecuencia.



## Relación entre errores frecuencia / periodo (CONSIDERANDO SÓLO ERROR DE CUENTA)

Error relativo por cuenta en medición de **frecuencia** =  $\pm 1 / f_x$   
 Error relativo por cuenta en medición de **periodo** =  $\pm 10^n / f_0$

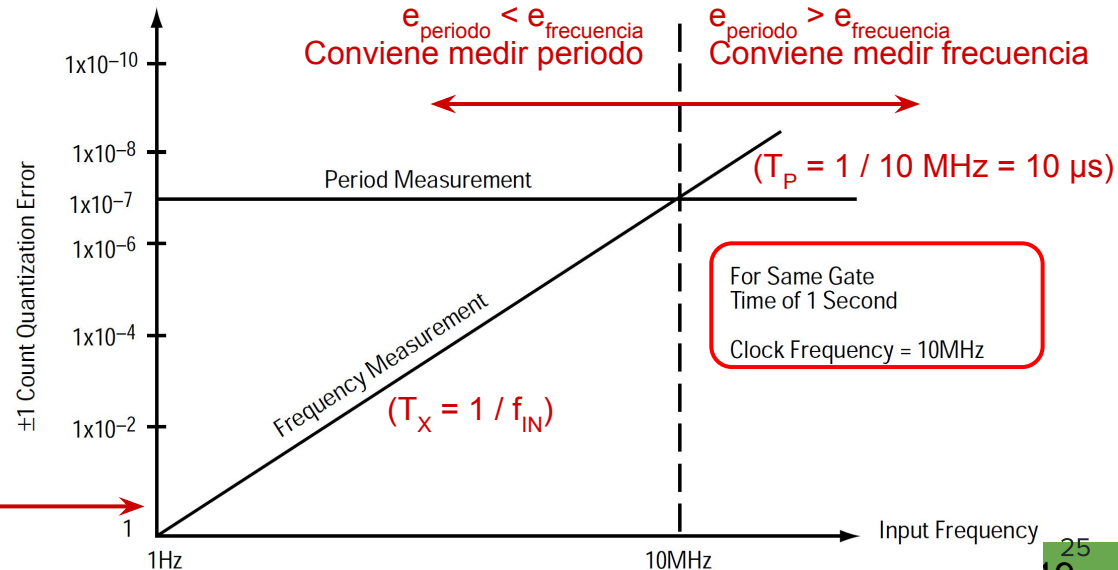
### Para un tiempo de compuerta determinado y constante:

- El error de cuantización para medición de frecuencia es **inversamente proporcional a  $f_{IN}$** .
- Para medición de periodo, el error es **constante, determinado por  $T_P$  e igual a  $10^n / f_0$**

La medición de periodo **tiene menor error de cuenta para toda  $f_{IN} < f_C$**

La medición de frecuencia **tiene menor Error de cuenta para  $f_{IN} > f_C$**

Esto se utiliza en el **contador recíproco**,  
 El cual **conmuta los métodos de medición**  
 según se encuentre de un lado u otro  
 del límite



**ATENCION:** El error **DECRECE** hacia arriba!

## Bibliografía

***Fundamentals of Electronic Counters, Keysight AN200***

*Understanding Frequency Counter Specifications, Keysight AN200-4* (complementaria para parte de errores)