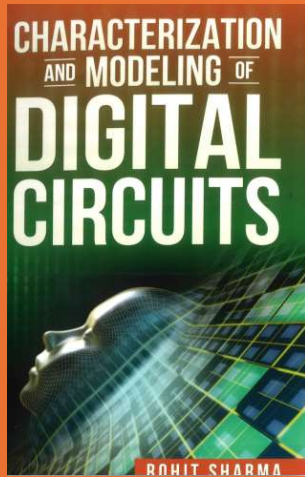




# Diseño Circuitos Integrados Digitales

2024 – 2do Cuatrimestre

# Unidad 6

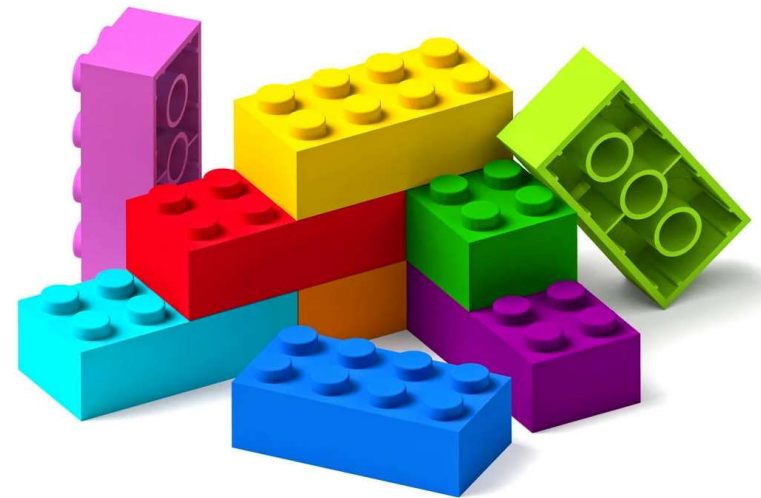


- Standard Cells: ASIC building blocks
  - Flujo de Diseño
  - Caracterización
  - Qué es y cómo se crea un archivo Liberty?

# Standard Cells

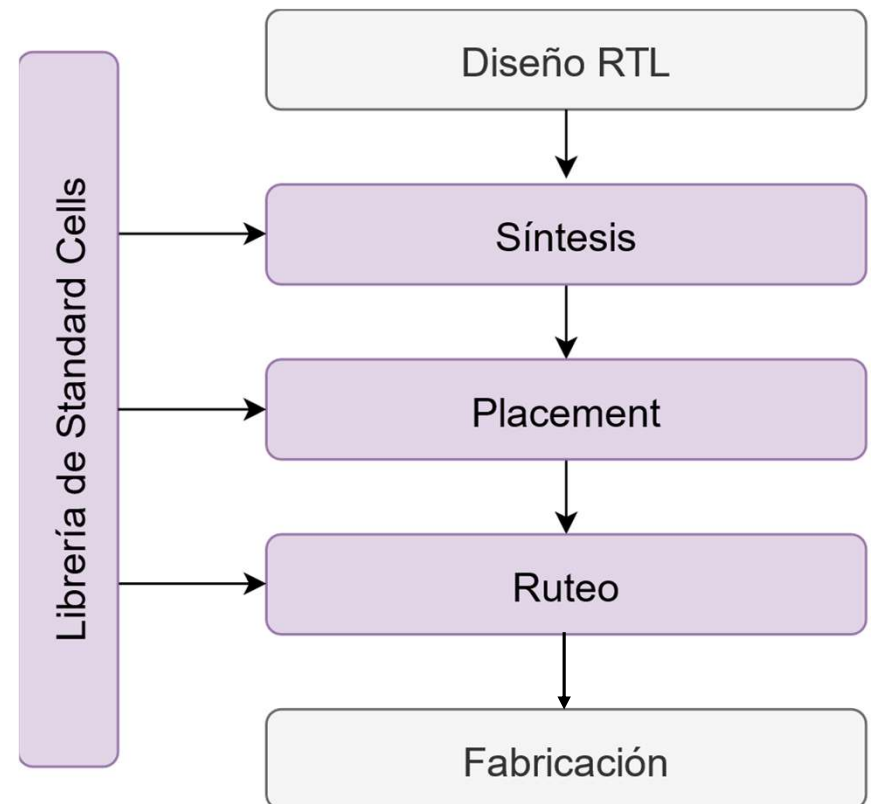
---

- Una celda estándar es un grupo de transistores e interconexiones que proporcionan:
  - Función lógica booleana (como AND, OR, XOR, inversores)
  - almacenamiento (flip-flop, latch)
  - Físicas:
    - Antenna para proteger contra acumulación de carga
    - Fillers para llenar espacios vacíos en el diseño,
    - Decoupling capacitors (dcaps) para estabilizar la alimentación de energía.
- Bloque Básico que se combina con otros para formar circuitos más complejos



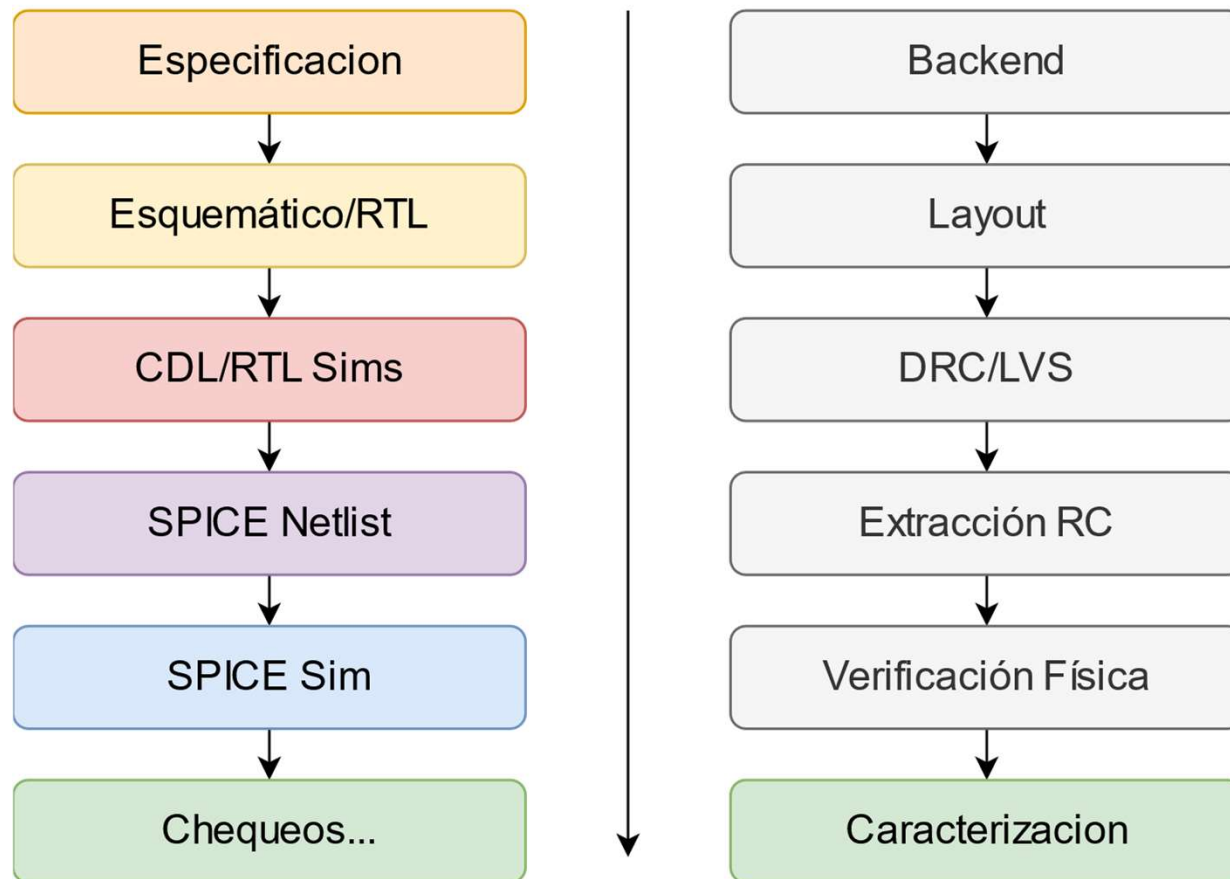
# Standard Cells: Dónde se utilizan?

- Conocer la función lógica de una celda no es suficiente para construir circuitos eléctricos funcionales. La velocidad y el consumo de energía de una celda afectan todo el circuito, y estos factores varían según la carga de salida.
- Los modelos de librería de celdas son indispensables para el diseño de chips digitales, desde la simulación lógica hasta la síntesis y ruteo.



# Standard Cells: Flujo de Diseño

---



# Standard Cells: Tipos

---

Compuertas Lógicas  
Básicas

HA / FA

Mux

Buffers

ICG

Tie-Cells

AOI/OAI

Flip Flops

Scan Flops

Latches

Fillers

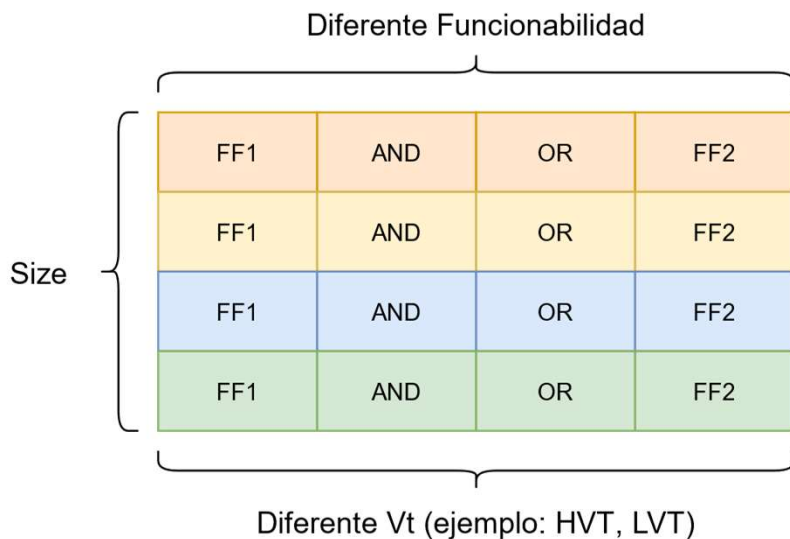
Tap Cells

End-Cap-Cells

D-Cap Cells

Antenna Cells

# Standard Cells: Variaciones



- Track Cell

- 6T
- 7.5T
- 9T
- 10.5T
- 12.5T

- Drive Strength

- 1X
- 2X
- 4X
- 8X
- 12X

↑ Width Transistor

- Threshold Voltage:

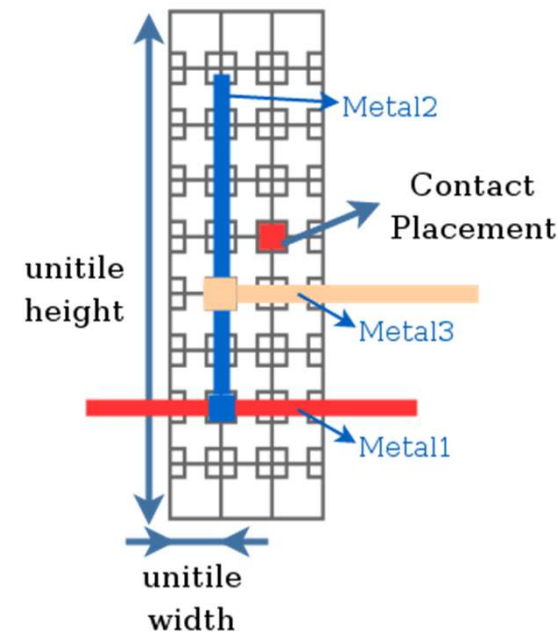
- Ultra Low-VT
- Low-VT
- Standard-VT
- High-VT
- Ultra High-VT

↑ Tox, delay

↓ Leakage Power

# Standard Cells: Tracks

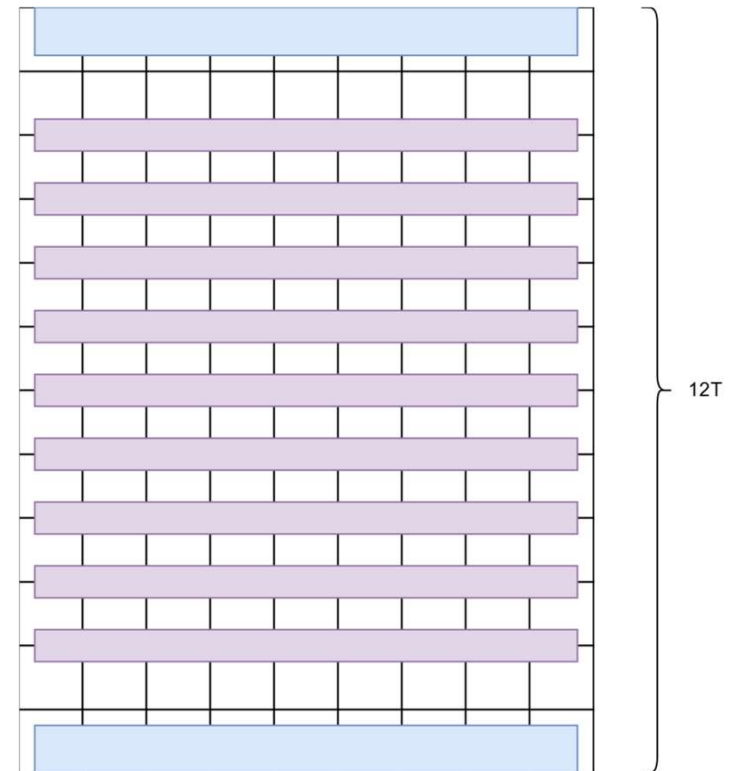
- Una decisión importante de diseño para toda librería es la altura de las celdas
  - Celdas mas altas tienen transistors con mayor width, resultando en mayor velocidad
  - Además, también tienen más espacio disponible para rutear wires, lo que significa una menor congestión.
- La altura de la celda se mide en términos de los “tracks de ruteo” de la capa de metal más baja que no es de interconexión.
  - Un track es el espacio más pequeño por donde podemos rutear un wire.
  - Típicamente se define en términos de las reglas de diseño del PDK
- Generalmente 9-tracks (9T) es el standard
  - 12T se utiliza para diseños de alta velocidad
  - 7T para diseños de alta densidad.





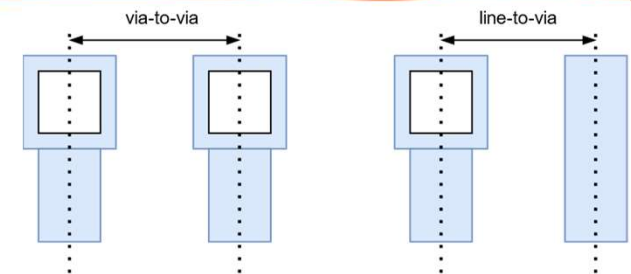
# Standard Cells: Tracks (2)

- Ejemplo: 12T
  - Notar que a pesar de tener 12 tracks de alto, podemos utilizar 9 tracks para wires de ruteo
  - Los Power Rails también ocupan lugar dentro de los tracks
- Celdas de distinto track proven una simple solución al tradeoff speed vs area
  - Generalmente no se mezclan en el mismo diseño.
  - Si podriamos tener distintos power domains con distintas librerías.

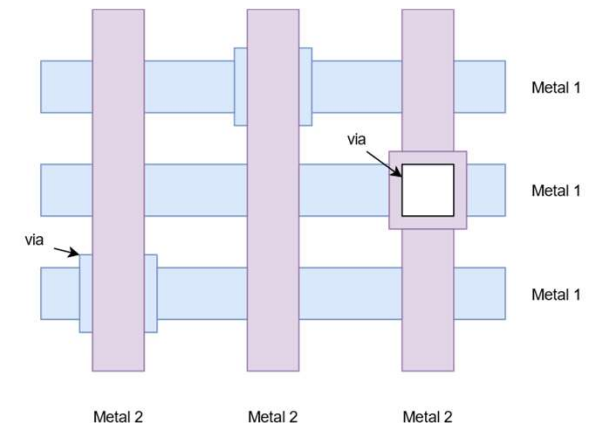


# Standard Cells: Track Pitch and Direction

- El paso (***pitch***) con el que se espacian los *wires* definen el tamaño de un ***routing track***.
  - Puede definirse de vía a vía o de línea a vía.
- Para simplificar ***Place and Route***, los *metal layers* se usan en direcciones alternas:
  - Layers impares para ruteo horizontal.
  - Layers pares para ruteo vertical (HVH).
  - En nodos tecnológicos avanzados, es común que los primeros 2 layers de metales se usen para ruteo horizontal.

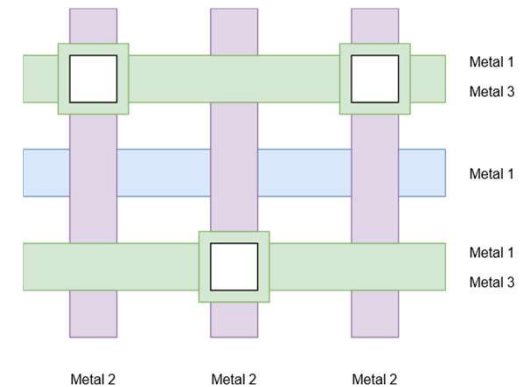


Line to via: Mínimo pitch en donde se puede poner una via al lado de un routing track

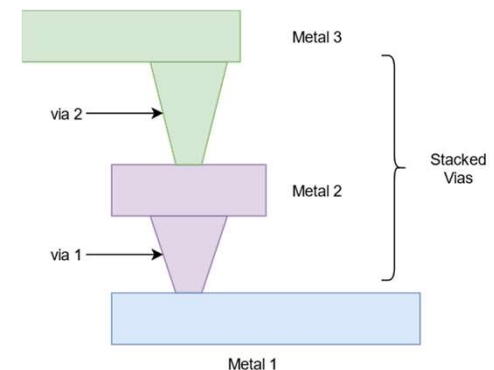


# Routing Grid: Definiciones

- Distintos **Layers** con la misma dirección de ruteo pueden tener diferentes grosores y espaciados, lo que crea un ***pitch diferente***.
- Ejemplo: Si las pistas de M3 y M1 tienen una proporción de pitch como 11:8, las pistas horizontales se superpondrán, dificultando o incluso haciendo imposible la creación de un contacto entre M3 y M1.
- Es importante usar proporciones simples como 1:1, 1:2, 2:3, 3:4 entre pistas adyacentes con la misma dirección de ruteo.
- Es deseable que las pistas estén alineadas para permitir el uso de vías apiladas.

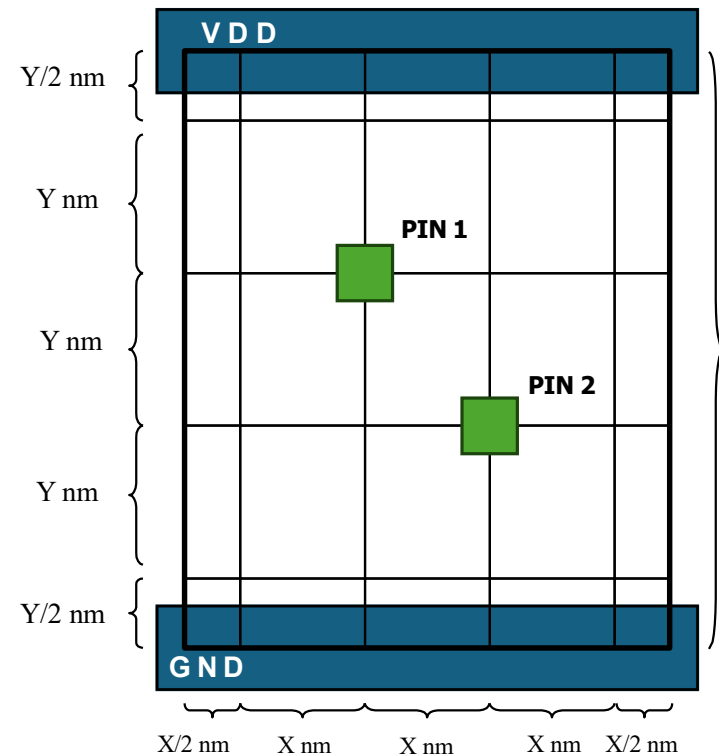


Ejemplo 1:2 M3-M1 ratio



# Layout y Power Grid

- Los pines deben colocarse sobre la grilla de ruteo para reducir el esfuerzo de routing.
- Pines escalonados (staggered): Colocar los pines de manera escalonada, cuando sea posible (alcanzables por layers de metal horizontales y verticales)
- Power routing con **abutment**: Las señales de power (VDD, GND) se rutean a través de la unión de las celdas estándar, lo que incrementa la densidad.

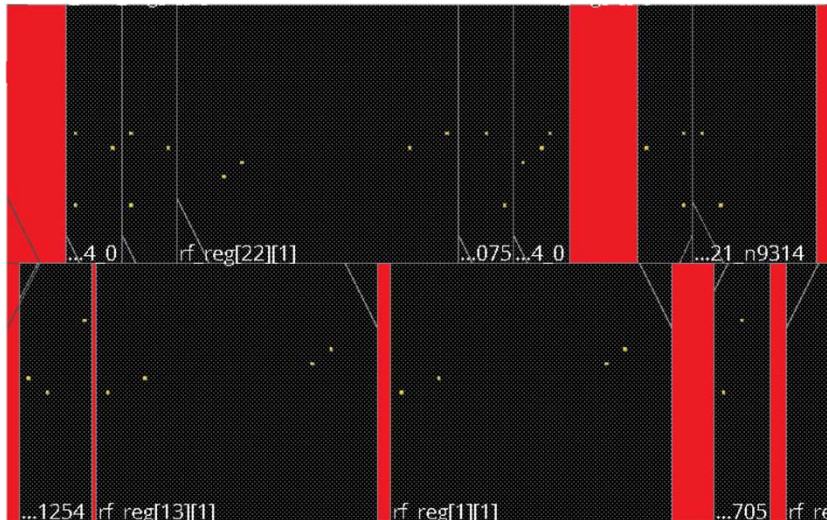


Power rails diseñado para permitir abutment.

# Standard Cells: Dimensiones

---

- La altura de las celdas estándar debe ser la misma en toda la librería.
- No se permiten espacios entre las celdas y deben llenarse con celdas de relleno (**filler cells**).
- El ancho de todas las celdas estándar debe ser múltiplo entero de la celda filler más pequeña.
  - Cuanto menor sea este divisor común, menos espacio se desperdicia.



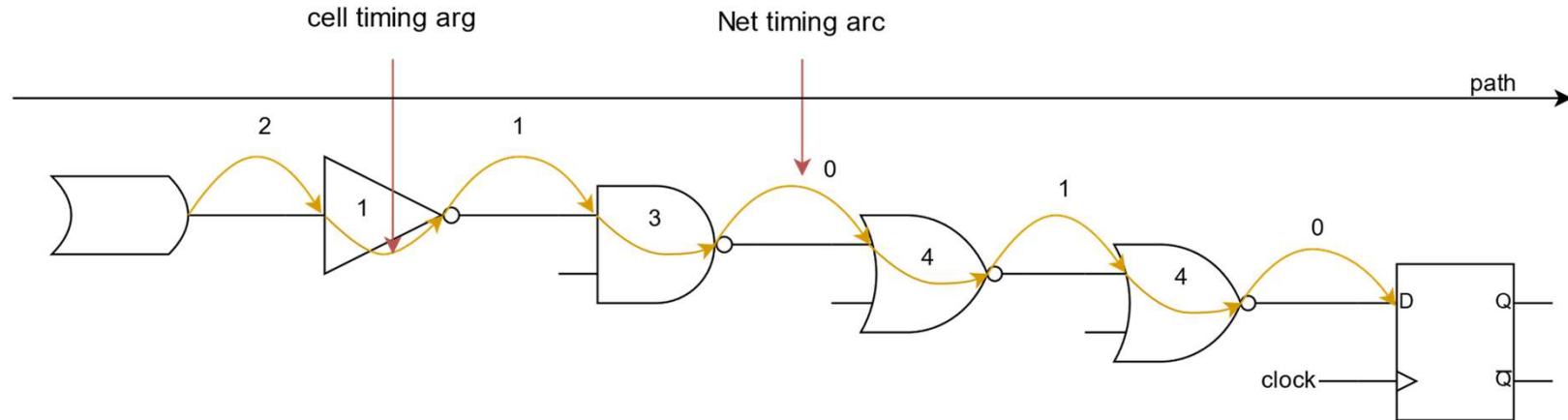
# Vista LEF

- LEF/DEF es un formato globalmente utilizado para representar reglas de diseño, información abstracta de celdas estándar y **layout** de circuitos.
- Es un formato completamente basado en texto y utilizado por la mayoría de las herramientas EDA.
- **LEF (Library Exchange Format)** proporciona información abstracta sobre las celdas para ser usada durante **PnR**, como ubicaciones de pines, obstrucciones de routing y restricciones de antena.
- Se generan vistas LEF de todas las celdas para facilitar su uso.

```
MACRO ADDFX1
  CLASS CORE ;
  ORIGIN 0 0 ;
  FOREIGN ADDFX1 0 0 ;
  SIZE 7.04 BY 6.66 ;
  SYMMETRY X Y ;
  SITE 18T ;
  PIN A
    DIRECTION INPUT ;
    USE SIGNAL ;
    PORT
      LAYER met1 ;
      RECT 5.01 1.735 5.3 1.965 ;
      RECT 0.34 1.765 5.3 1.935 ;
      RECT 2.35 1.735 2.64 1.965 ;
      RECT 0.34 1.735 0.63 1.965 ;
    END
  END A
  PIN B
    DIRECTION INPUT ;
    USE SIGNAL ;
    PORT
      LAYER met1 ;
      RECT 4.12 2.475 4.41 2.705 ;
      RECT 0.34 2.51 4.41 2.675 ;
      RECT 4.06 2.505 4.41 2.675 ;
```

# Análisis de Tiempo Estático (STA)

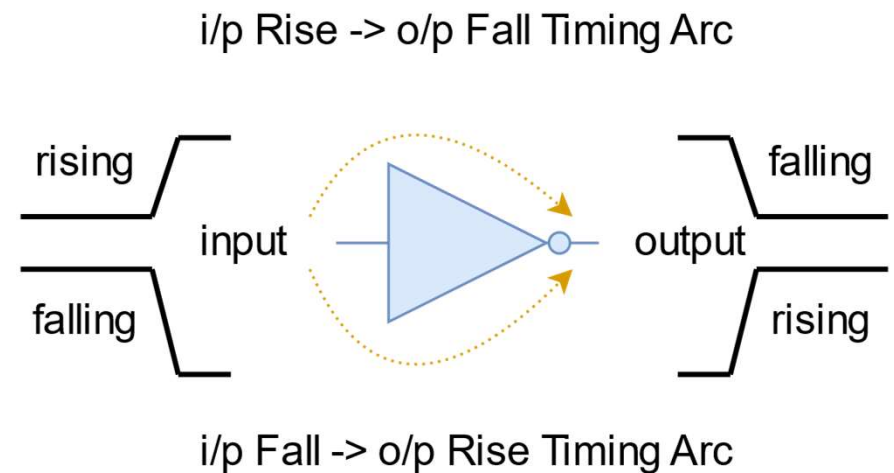
- Método utilizado para verificar **timing** en circuitos digitales.
- Combina cell y net delay para finalmente calcular los **path delay**.
- Los path delays se verifican contra las especificaciones de tiempo.
- Garantiza que el diseño funcione a la velocidad de clock prevista.



$$\text{Path Delay} = 2 + 1 + 1 + 3 + 0 + 4 + 1 + 4 + 0 = 16 \text{ time units}$$

# Timing Arc

- Representa una relación causal (un cambio en la entrada causa un cambio en la salida).
- Los **timing arcs** siempre tienen dos pines, ya que la relación es entre estos dos pines.
- Por ejemplo, un inversor no tiene un output timing arc. Tiene un arc que relaciona el pin de salida con el pin de entrada.
- Estos arcs forman los bloques básicos para STA.

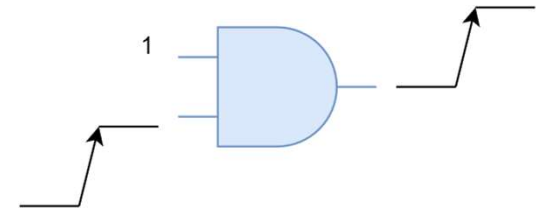




# Unateness

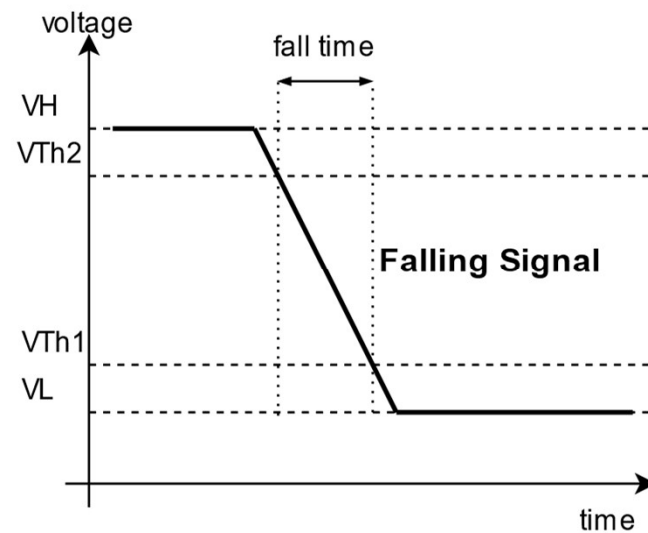
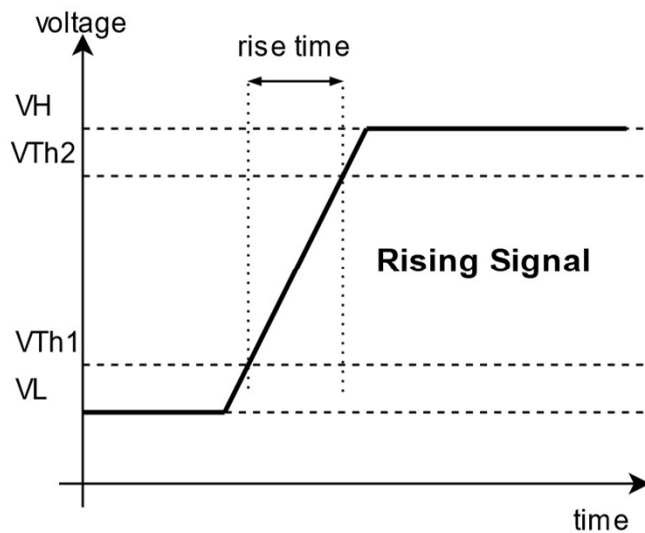
Describe cómo cambia la salida de una celda en respuesta a cambios en la entrada.

- Existen tres estados de unateness:
  - Positive Unate:** Una transición ascendente en la entrada provoca que la salida suba o no cambie, y una transición descendente en la entrada provoca que la salida baje.  
Ejemplo: OR y AND
  - Negative Unate:** En este caso, una transición ascendente en la entrada provoca que la salida baje o no cambie, y una transición descendente en la entrada provoca que la salida suba.  
Ejemplo: NOR y NAND.
  - Non Unate:** El estado de otras entradas determina la transición de la salida.  
Ejemplo: XOR ya que su salida depende del estado de varias entradas, no de una sola.



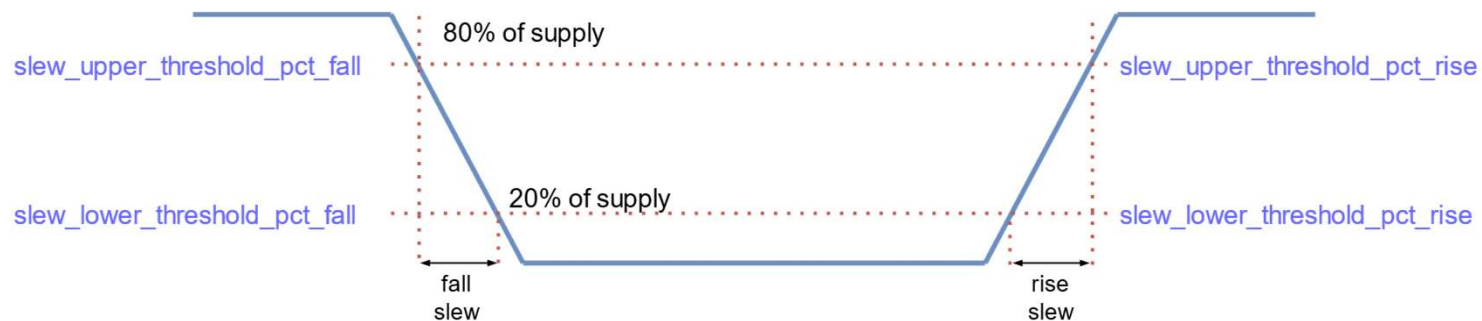
# Transition Time

Es el tiempo que tarda una señal en cambiar de estado entre dos niveles específicos. Los tiempos de transición de subida y bajada son propiedades de un timing arc



# Slew

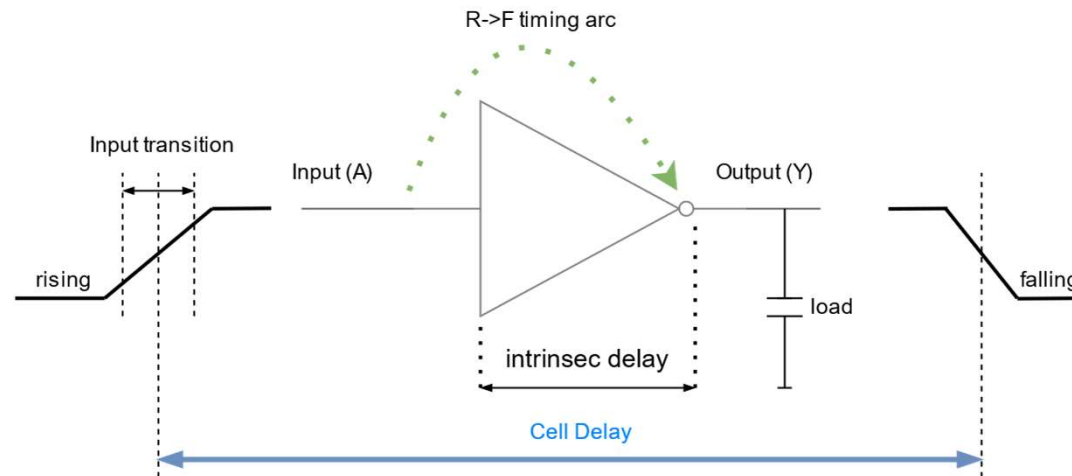
- Se mide típicamente en términos de transition time y está relacionado con el slew rate de la señal.
  - Los umbrales de tiempo de transición de la señal se usan para medir el slew.
- En la figura se especifica que el **falling slew** es la diferencia entre los puntos de tiempo cuando el borde descendente alcanza el 80% y el 20% del valor de suministro.
- **Los umbrales de slew se eligen** típicamente para corresponder a la parte de la forma de onda que es **lineal**.
- En **tecnologías más recientes**, las bibliotecas pueden establecer estos umbrales entre el **30% y el 70%** del valor de suministro.



# Cell Delay (propagation delay)

El retardo de propagación a través de una celda se conoce comúnmente como **cell delay**.

- Slew de la señal de entrada y la carga conectada a la celda influyen en el valor.
  - Por lo tanto, los valores de delay se caracterizan por diferentes valores **de input slew y output load**.
- Las mediciones típicas de delay se realizan desde el 50% de la señal de entrada al 50% de la señal de salida.
- El atributo **related\_pin** define el/los pin(es) que representan el punto de inicio del timing arc. Este atributo es requerido en todos los grupos de tiempo.



# Librerías EDA

- **Formato Liberty (LIB):** Proporciona modelos de temporización con delays, transiciones, tiempos de setup/hold, y función lógica de celdas.
- Formato basado en texto y compatible con herramientas EDA.
- Bibliotecas completamente caracterizadas con scripts para facilitar su expansión.
- Disponibles archivos CCS, ECSM, y VHDL/Verilog con anotaciones.
  - Bloques specify, specparam

## Delay Information

Delay(ns) to Y rising :

Cell Name	Timing Arc(Dir)	Delay(ns)		
		First	Mid	Last
AND2X1	A->Y (RR)	0.07489	0.20503	0.65648
	B->Y (RR)	0.07985	0.20601	0.65841
AND2X2	A->Y (RR)	0.08542	0.20967	0.70273
	B->Y (RR)	0.09034	0.20929	0.69907
AND2X4	A->Y (RR)	0.11595	0.24205	0.79319
	B->Y (RR)	0.12084	0.24136	0.78209
AND2X6	A->Y (RR)	0.14558	0.27412	0.86364
	B->Y (RR)	0.15042	0.27399	0.84680
AND2X8	A->Y (RR)	0.17518	0.30612	0.91873
	B->Y (RR)	0.18007	0.30631	0.89836
AND2XL	A->Y (RR)	0.08460	0.22592	0.66372
	B->Y (RR)	0.08984	0.22668	0.66538

# Combinational Timing Arcs

---

- Estos arcs describen el tiempo para elementos combinacionales, que principalmente consisten en el delay.
- El arc estará asociado a un pin de salida, y el related\_pin generalmente será una entrada.
- Tipos de combinational timing arcs:

```
combinational  
combinational_rise  
combinational_fall  
three_state_disable  
three_state_disable_rise  
three_state_disable_fall  
three_state_enable  
three_state_enable_rise  
three_state_enable_fall
```

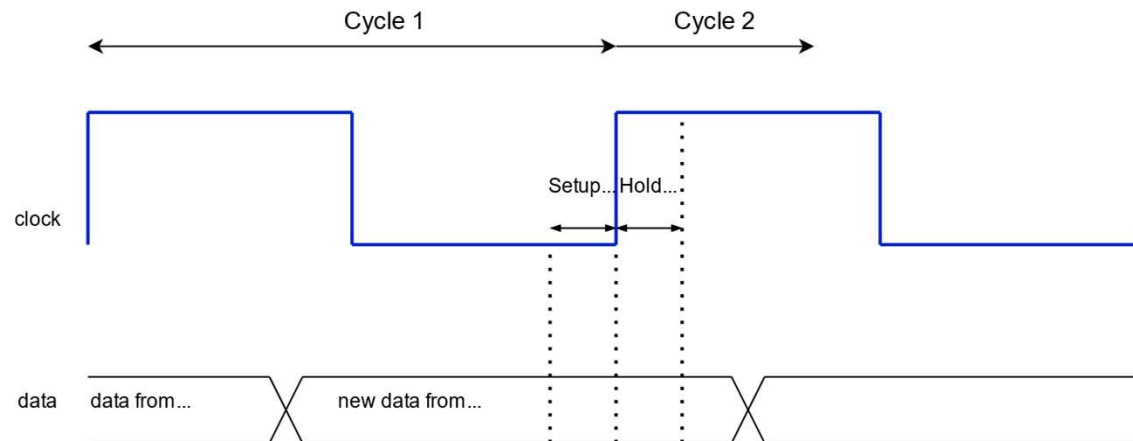
# Sequential Timing Arcs

---

- Estos arcs describen el tiempo para elementos secuenciales.
  - Pueden ser un delay arc (transición de clock a la salida de datos; es decir, de entrada a salida) o un constraint arc (transición de clock a la entrada de datos; es decir, de entrada a entrada).
- Tipos de sequential timing arcs:
  - Edge-sensitive (rising\_edge o falling\_edge)
  - Preset o clear
  - Setup u hold (setup\_rising, setup\_falling, hold\_rising, o hold\_falling)
  - Setup u hold no secuenciales (non\_seq\_setup\_rising, non\_seq\_setup\_falling, non\_seq\_hold\_rising, o non\_seq\_hold\_falling)
  - Recovery o removal (recovery\_rising, recovery\_falling, removal\_rising, o removal\_falling)
  - Sin cambio (nochange\_high\_high, nochange\_high\_low, nochange\_low\_high, o nochange\_low\_low)
- Timing Sense:
  - Este atributo se utiliza en la biblioteca para especificar unateness en el archivo .lib.

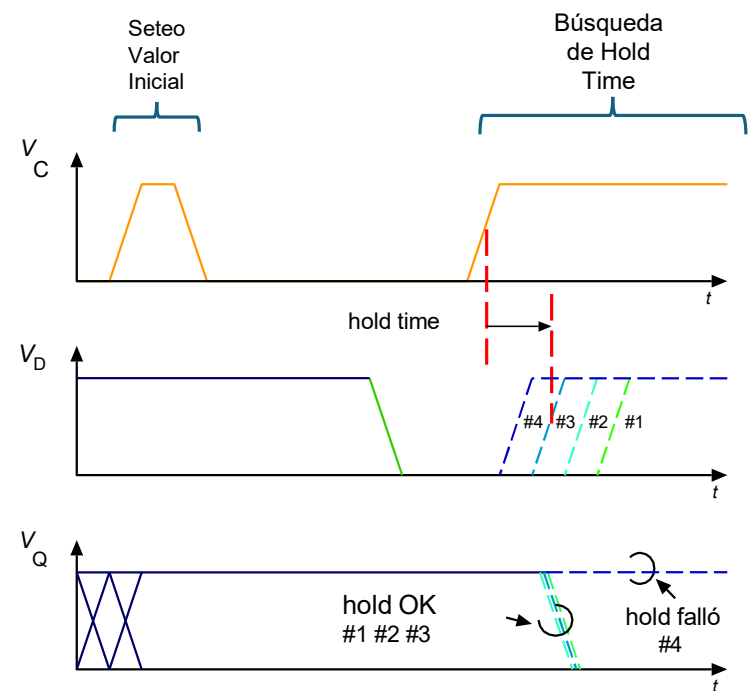
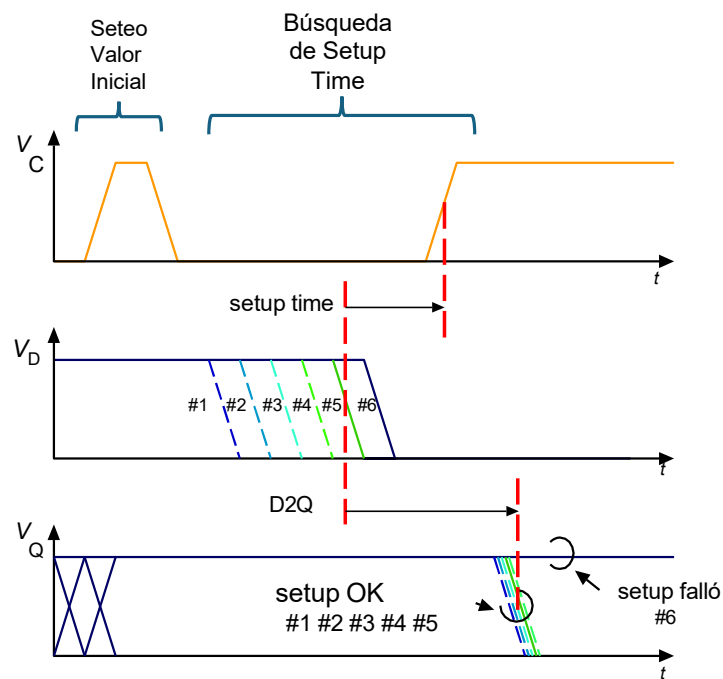
# Setup and Hold Time

- Estos controles de tiempo sincrónicos aseguran la correcta propagación de datos a través de celdas secuenciales.
- El **setup time** es el tiempo durante el cual los datos de entrada deben permanecer estables antes del borde de disparo del clock.
- El **hold time** es el tiempo durante el cual los datos de entrada deben permanecer estables después del borde de disparo del clock.





# Búsqueda Tiempos de Setup/Hold



# Setup/Hold: Valores negativos

- **Setup Time Negativo:**

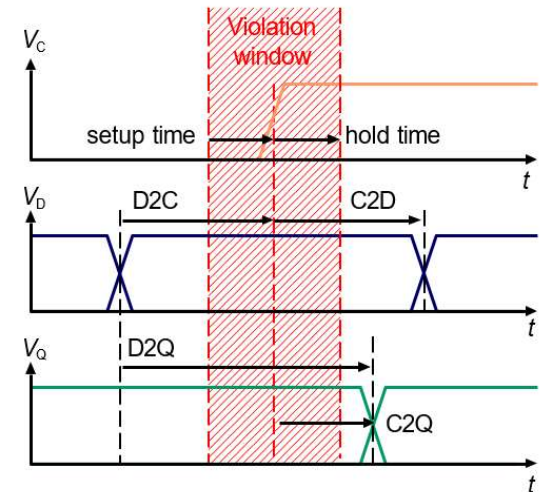
- Los datos pueden cambiar después del borde de clock y aún cumplir con el control de setup.
- Ocurre cuando hay un retraso significativo entre el pin de clock y el uso interno del clock.

- **Hold Time Negativo:**

- Los datos pueden cambiar antes del borde de clock y aún cumplir con el control de hold.
- También ocurre por retrasos entre el pin de clock y el uso interno del clock.

- **Condición Importante:**

- **Si el setup o hold es negativo, su suma debe ser positiva** para que la medición sea válida.
- **Ejemplo:** Un setup time negativo debe estar acompañado de un hold time suficientemente positivo



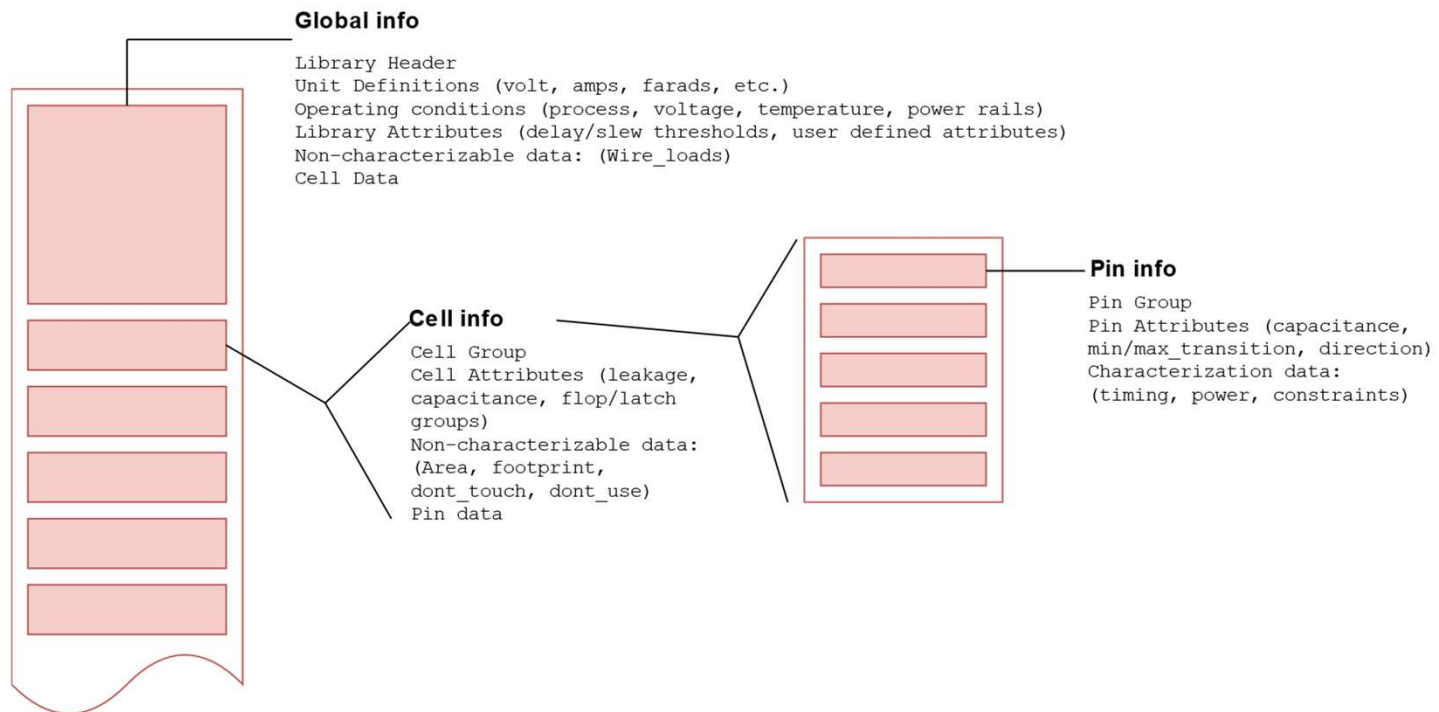
# Otras condiciones

---

- Side Pins Condition, When Condition, SDF\_COND, Arcs Dependientes del Estado
- Estos términos se refieren a las expresiones booleanas para un timing arc que especifican el valor (0 o 1) de otros pines en el bloque (conocidos como **side pins**) mientras se prueba un arc.
- El archivo **Liberty** utiliza los atributos "**when**" y "**sdf\_cond**" para establecer los valores de tiempo dependientes del estado.

# Liberty File: Estructura

- Las partes significativas son:



# Unidades

---

- Las herramientas de STA utilizan las **unidades especificadas** en esta sección para identificar las unidades de medida en la biblioteca.
- No se especifican directamente las unidades para la potencia dinámica interna.
  - Se derivan de la fórmula: corriente \* tiempo \* voltaje.
  - **Típicamente**, la corriente se mide en mA, el tiempo en ns y el voltaje en volts.
  - Por lo tanto, la potencia dinámica interna se mide en pJ (picojoules).

```
capacitive_load_unit (1,pf);  
current_unit: "1mA"  
leakage_power_unit: "1nW";  
pulling_resistance_unit: "1kohm";  
time_uni: "1ns";  
voltage_unit: "1V"
```

# Condiciones Operativas

- El contenido de esta sección es autoexplicativo, excepto por el valor de la variable de proceso.
- El ajuste de la variable de proceso permite que la biblioteca, caracterizada en un punto de proceso particular, se utilice para cálculos en un punto de proceso diferente.
- Este valor generalmente se establece en 1

```
operating_conditions(PVT_09V_125C) {  
    process      : 1;  
    temperature  : 125;  
    voltage      : 0.9;  
}
```

Corner

Worst	Typ	Best
1p5V_190	1p8v_25C	3p2v_n45C

# Thresholds

---

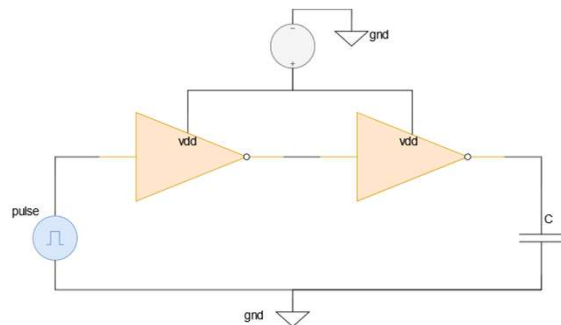
- Los valores de umbral de entrada/salida (50% del suministro en el ejemplo) indican los puntos de umbral utilizados para calcular los delays de subida y bajada.
- Los umbrales de slew indican los puntos de corte para los tiempos de transición de subida y bajada de una señal.
- Los valores se especifican como un porcentaje del valor de suministro.

```
slew_lower_threshold_pct_fall : 20.0;  
slew_upper_threshold_pct_fall : 80.0;  
slew_lower_threshold_pct_rise : 20.0;  
slew_upper_threshold_pct_rise : 80.0;  
input_threshold_pct_fall      : 50.0;  
input_threshold_pct_rise      : 50.0;  
output_threshold_pct_fall     : 50.0;  
output_threshold_pct_rise     : 50.0;
```

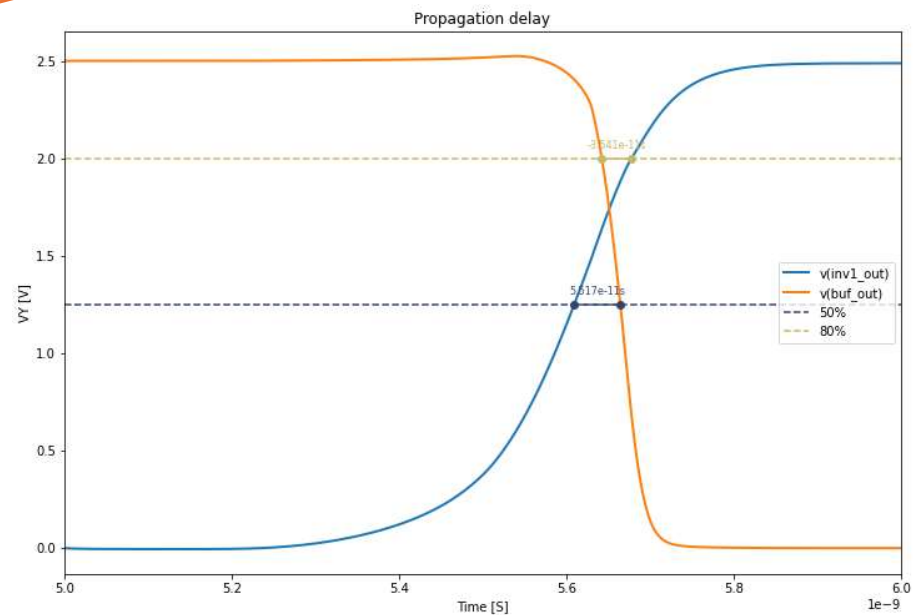
# Propagation Delay

```
input_threshold_pct_fall : 50.0;  
input_threshold_pct_rise  : 50.0;  
output_threshold_pct_fall : 50.0;  
output_threshold_pct_rise : 50.0;
```

$Time(out\_threshold\_pct\_*) - Time(in\_threshold\_pct\_*)$



- Al definir el umbral en 50% , obtenemos un propagation delay = 55ps
- Si utilizáramos 80% como umbral, tendríamos -35ps, Tiene sentido esto?





# Defaults

---

## ***Default Cell Attributes:***

- `default_leakage_power_density`: Especifica leakage power por unidad de área en una tecnología.
- `default_cell_leakage_power`: Especifica el valor por defecto para celdas sin el atributo `cell_leakage_power`.

## ***Default Pin Attributes:***

- `default_output_pin_cap`: Establece un valor por defecto para la capacitancia de todos los pines de salida.
- `default_inout_pin_cap`: Establece un valor por defecto para la capacitancia de todos los pines de E/S.
- `default_input_pin_cap`: Establece un valor por defecto para la capacitancia de todos los pines de entrada.
- `default_fanout_load`: Establece un valor por defecto para la carga de fanout de todos los pines de entrada.
- `default_max_transition`: Establece un valor por defecto para la transición máxima en los pines de salida.
- `default_max_fanout`: Establece un valor por defecto para el fanout máximo en los pines de salida.

# Timing and Power

---

El archivo Liberty generado por Liberate incluye modelos en tablas para especificar información de timing (como delay) de las celdas.

Modelos comunes:

- Non-Linear Delay Model (NLDM)
- Non-Linear Power Model (NLPM)

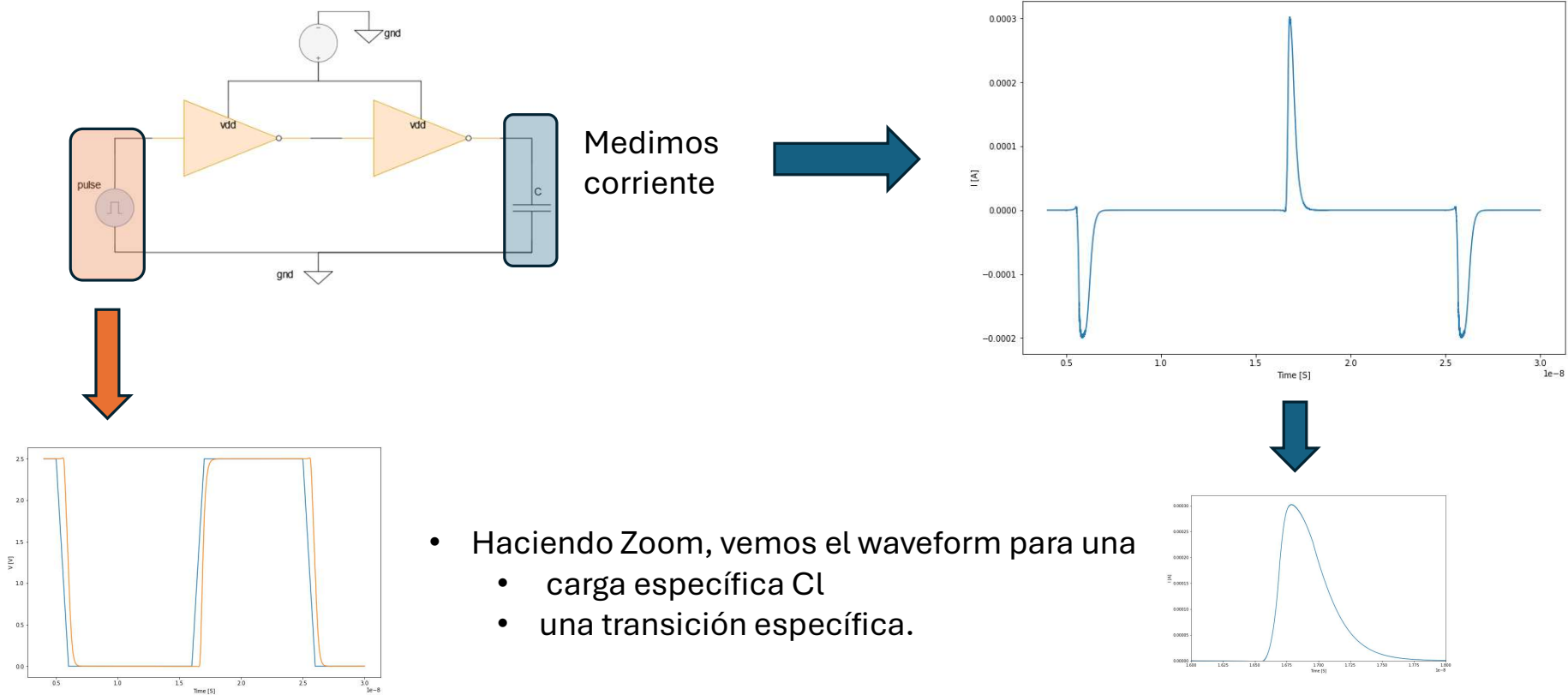
Modelos avanzados:

- Composite Current Source (CCS) y Effective Current Source Model (ECSM) para timing.
- CCSN y ECSMN para ruido.
- CCSP y ECSMP para potencia.

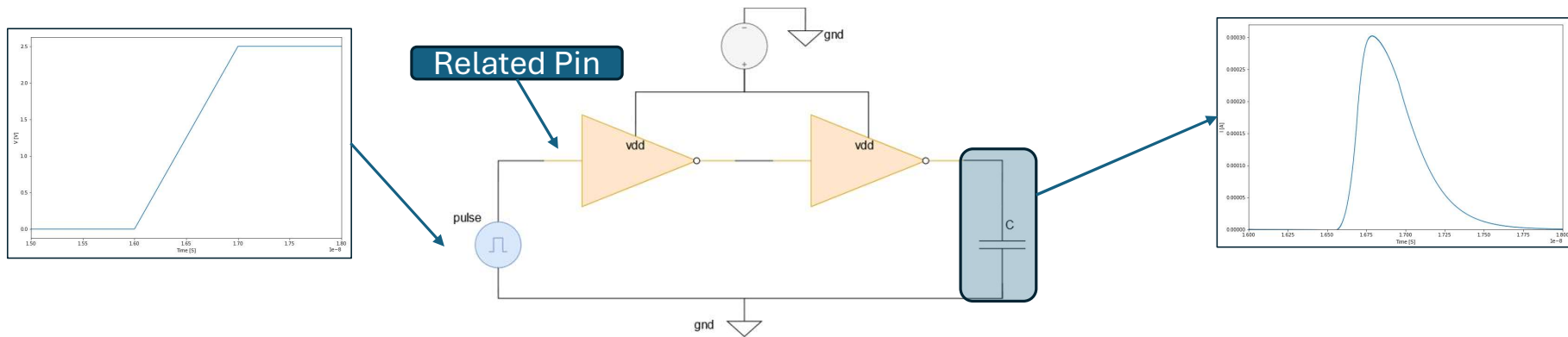
El modelo NLDM representa la información de timing (como delay) en una tabla bidimensional con index\_1 y index\_2, donde las variables independientes son:

- Input transition time (slew rate).
- Output load capacitance.

# Modelos: Output current waveform



# Modelos: Output current waveform 2



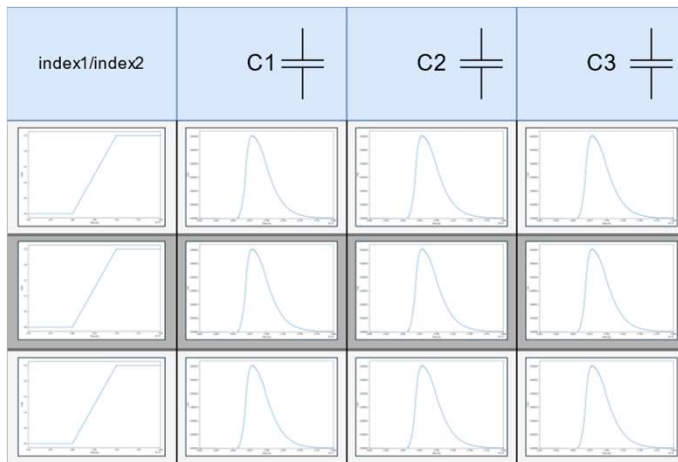
Esto nos permite  
construir una Tabla:

index1/index2	C1	C2	C3




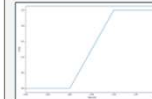
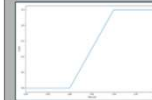

- Composite Current Source (CCS) Format
- De similar manera se realizan output\_current\_fall

# Modelos: Comparativa

- Diferencia entre Non-Linear delay model (NLDM) y Composite Current Source (CCS)



CCS

index1/index2	C1 	C2 	C3 
	Valor Único	Valor Único	Valor Único
	Valor Único	Valor Único	Valor Único
	Valor Único	Valor Único	Valor Único

NLDM

# Templates, Lookup Table (LUT)

---

- Delay LUT Template:
  - En la tabla de delay, variable\_1 es la transición de la net de entrada (input net transition, index\_1) y variable\_2 es la capacitancia de la red de salida (output net capacitance, index\_2).
  - Resultado: Una tabla 3x2 con tres transiciones de entrada y dos valores de carga de salida, lo que da seis valores medidos (3\*2).

```
lu_table_template (delay_3x2) {  
    variable_1 : input_net_transition;  
    variable_2 : total_output_net_capacitance;  
    index_1 ("0.01, 0.02, 0.03");  
    index_2 ("0.004, 0.005");  
}
```

# Power LUT Template

---

- Similar a la tabla de delay, también es una matriz de 3x2, resultando en seis mediciones de potencia.

```
power_lut_template (power_3x2) {  
    variable_1 : input_transition_time;  
    variable_2 : total_output_net_capacitance;  
    index_1 ("0.01, 0.02, 0.03");  
    index_2 ("0.004, 0.005");  
}
```

# Constraints LUT Template

---

- Las tablas bidimensionales de restricciones (setup, hold) están basadas en los tiempos de transición en el pin restringido (data) y el pin relacionado (clock).
- **Ejemplo:** Un template 2x2 donde el pin restringido y el pin relacionado pueden ser variable\_1 o variable\_2. Una vez definidos, estas designaciones son consistentes en todas los templates de la biblioteca.

```
lu_table_template (constraint_2x2) {  
    variable_1 : constrained_pin_transition;  
    variable_2 : related_pin_transition;  
    index_1 ("0.01, 0.02");  
    index_2 ("0.01, 0.02");  
}
```



# Cell Model Group

---

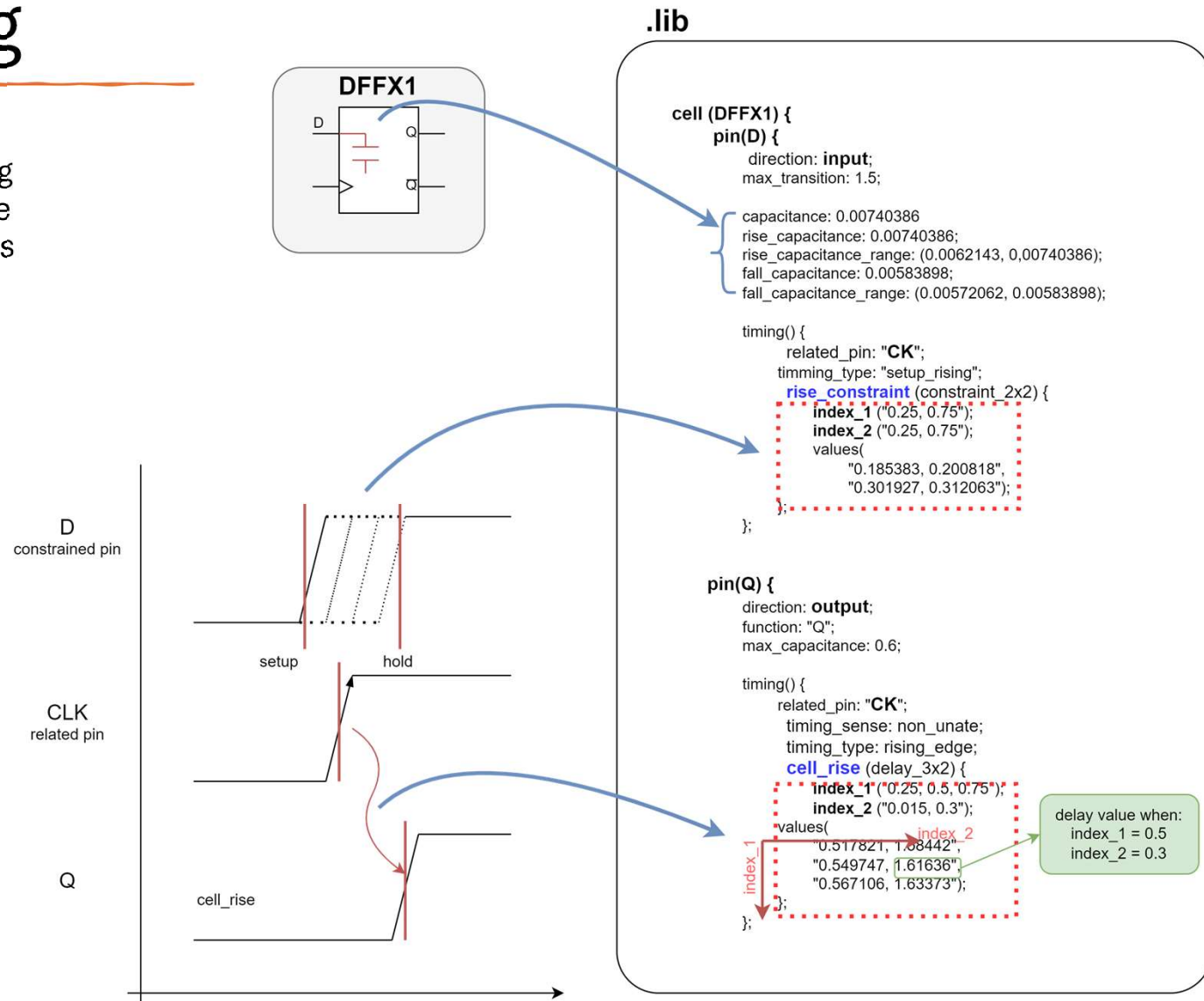
## Pin Capacitance

- Normalmente, la capacitancia solo se especifica para los pines de entrada de la celda.
- La capacitancia básica se expresa como un valor único.
- También puede contener valores separados de capacitancia para las transiciones ascendentes y descendentes del pin de entrada.
- Los valores de capacitancia pueden refinarse aún más usando un rango con límites superior e inferior especificados.

```
pin (A) {  
    direction : input;  
    max_transition      : 0.6;  
    capacitance         : 0.00053;  
    rise_capacitance    : 0.00053;  
    rise_capacitance_range : (0.00043, 0.00053);  
    fall_capacitance     : 0.00042;  
    fall_capacitance_range : (0.00041, 0.00042);  
}
```

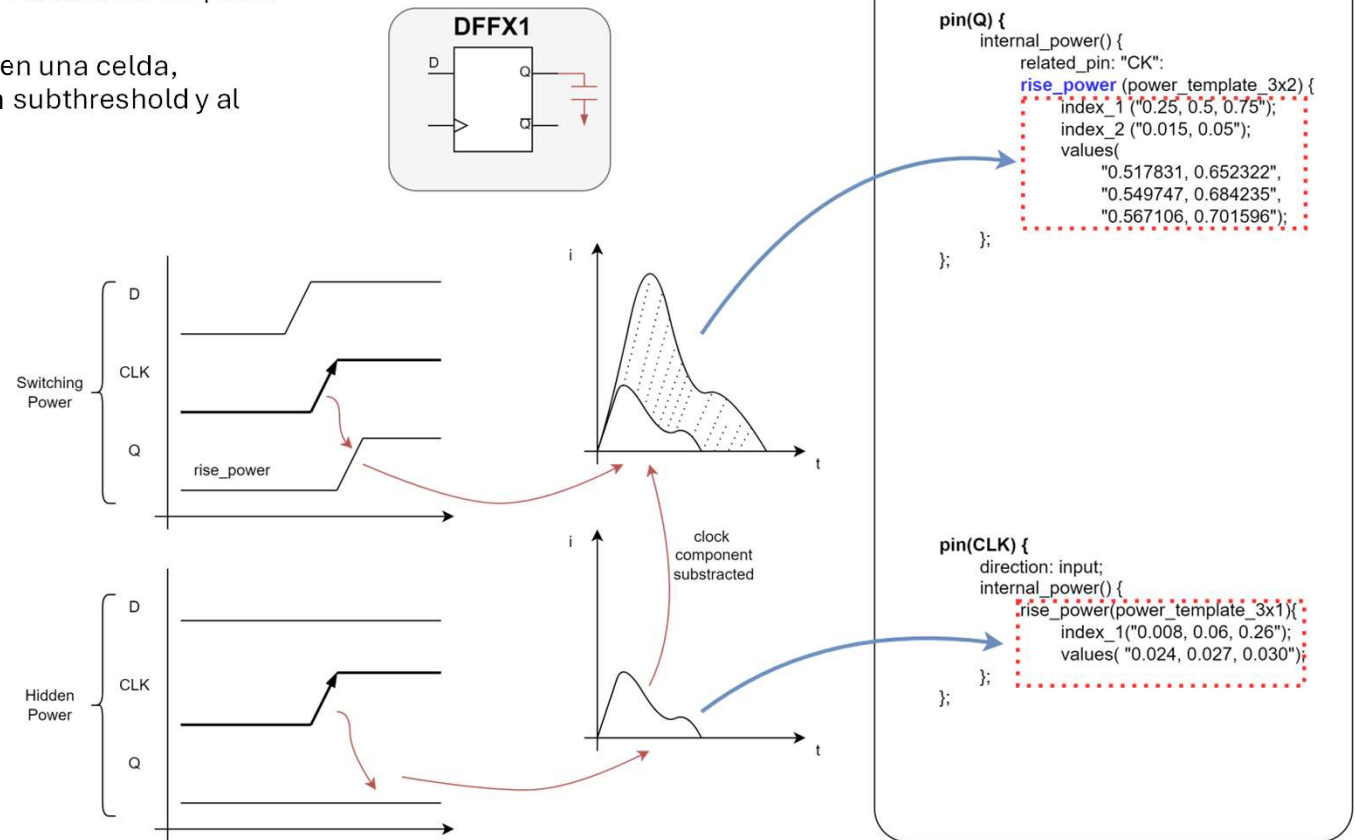
# Cell Timing

- La sección de timing para un pin contiene todos los timing arcs asociados con él.



# Cell Power

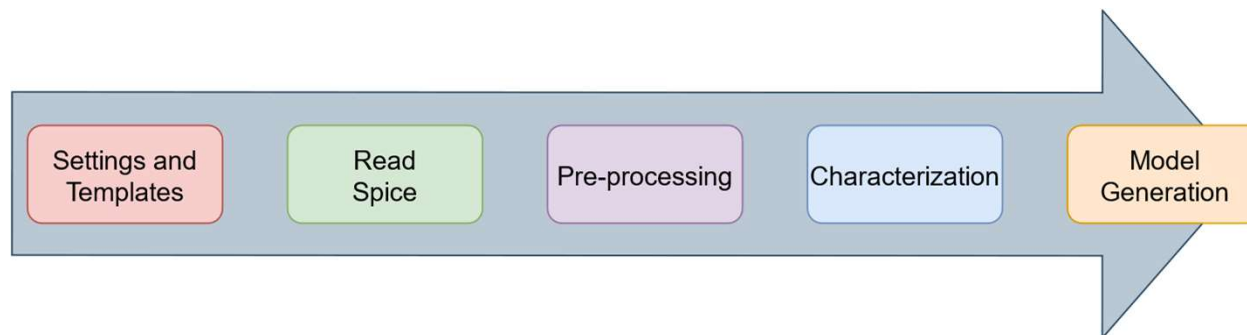
- La información de potencia se especifica en:
  - Active power** está relacionado con la actividad en los pines de entrada y salida de la celda.
  - Leakage power** es la corriente de fuga en una celda, principalmente debido a la conducción subthreshold y al gate-oxide.
- Active power incluye:
  - Output switching power:** Depende de la carga capacitiva y la frecuencia de conmutación.
  - Internal switching power:** Consumo de potencia dentro de la celda cuando hay actividad en la entrada/salida.



# Liberate: Flujo de Caracterización

---

- **Settings and Templates:**
  - Se definen celdas, modelos y condiciones PVT para la sesión de caracterización.
- **Read Spice:**
  - El comando read\_spice prepara a Liberate para procesar la celda, reconocer su funcionalidad y generar vectores.
- **Pre-processing:**
  - Se procesa el netlist de la celda leído durante read\_spice. Se identifican caminos donde los pines y related pins interactúan estáticamente y se asocian con la capacitancia de los pines de entrada. Estos caminos se guardan para simulación posterior.
- **Caracterización:**
  - Se realiza una caracterización precisa usando un simulador SPICE (como Spectre APS) en todos los arcs para todos los slews y cargas.
- **Model Generation:**
  - Después de caracterizar todos los arcs, los resultados se combinan y se escribe un archivo Liberty (.lib) final.



# Conclusiones



# Titulo

- texto