

Universidad Nacional de Córdoba



Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Cátedra de Arquitectura de Computadoras Trabajo Práctico 2: UART Full Duplex

Profesores: - Martín Pereyra, Santiago Rodríguez

Integrantes:

Pallardó Agustín - apallardo@mi.unc.edu.ar

Trachta Agustín - agutrachta@mi.unc.edu.ar

30 de septiembre de 2025

Índice

1. Introducción	3
2. Descripción general del sistema	4
2.1. Bloque <code>top</code>	4
2.2. Esquemático general	4
2.3. Flujo de datos	5
3. Generador de baudios (<code>baud_gen</code>)	6
3.1. Principio de funcionamiento	6
3.2. Oversampling en UART	6
3.3. Flujo interno	6
3.4. Importancia en el sistema	7
4. Receptor UART (<code>uart_rx</code>)	8
4.1. Trama y convenciones	8
4.2. Señales y contadores internos	8
4.3. Máquina de estados y flujo temporal	8
4.4. Cronometría: instantes de muestreo	10
4.5. Parámetros y salidas	11
4.6. Notas de diseño y posibles mejoras	11
5. Transmisor UART (<code>uart_tx</code>)	12
5.1. Principio de funcionamiento	12
5.2. Máquina de estados	12
5.3. Flujo interno	12
5.4. Comparación con el receptor	12
5.5. Señales principales	13
6. Memoria FIFO (<code>fifo</code>)	14
6.1. Estructura y señales	14
6.2. Punteros y contador	14
6.3. Escritura y lectura	15
6.4. Lectura y escritura simultáneas	15
6.5. Reset y mapeo en hardware	15
6.6. Manejo correcto del <i>handshake</i>	15
7. Unidad Aritmético-Lógica (ALU)	17
7.1. Operaciones soportadas	17
7.2. Rol en el sistema	17
8. Módulo de interfaz (<code>interface</code>)	18
8.1. Máquina de estados	18
8.2. Organización de datos	18
8.3. Integración en el sistema	18
8.4. Señales clave	19

8.5. Resumen	19
------------------------	----

1. Introducción

La comunicación serie es uno de los mecanismos más utilizados en sistemas digitales para transmitir información de manera simple y eficiente. Dentro de este esquema, el estándar **UART** (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) constituye una de las soluciones más difundidas debido a su simplicidad de implementación, bajo costo y compatibilidad con una amplia variedad de dispositivos.

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un sistema digital basado en **UART**, desarrollado en lenguaje *Verilog HDL*. El sistema no solo incluye los bloques clásicos de transmisión y recepción, sino que además incorpora:

- **Un generador de baudios** para sincronizar la comunicación.
- **Memorias FIFO** que permiten desacoplar los datos recibidos y transmitidos.
- **Una Unidad Aritmético-Lógica (ALU)** encargada de procesar los operandos recibidos.
- **Un bloque de interfaz** que organiza los datos provenientes del canal serie para dirigirlos a la ALU y reenviar los resultados.

El objetivo principal es demostrar cómo la arquitectura UART puede extenderse más allá de la simple comunicación, integrándose con módulos de procesamiento para construir sistemas digitales completos. En particular, se busca implementar un mecanismo mediante el cual se reciben instrucciones desde un puerto serie, se procesan mediante la ALU y los resultados se reenvían nuevamente al transmisor UART.

El trabajo se organiza de la siguiente manera: primero se describen los módulos fundamentales en orden de ejecución (generador de baudios, receptor, FIFO, transmisor, ALU e interfaz). Posteriormente, se analiza la integración en el módulo **top**, se presentan las simulaciones y pruebas realizadas, y finalmente se discuten los resultados obtenidos junto con posibles mejoras.

2. Descripción general del sistema

El diseño implementado corresponde a un sistema UART extendido con capacidades de procesamiento mediante una **Unidad Aritmético-Lógica (ALU)**. El bloque superior **top** integra todos los módulos que lo componen y define el flujo de datos completo desde la entrada serie (**rx**) hasta la salida (**tx**).

2.1. Bloque top

El módulo **top** actúa como entidad principal, interconectando:

- El generador de baudios, encargado de derivar la señal de muestreo **sample_tick**.
- El receptor UART (**uart_rx**), que reconstruye bytes a partir de la señal serie entrante.
- Dos memorias FIFO: una para los datos recibidos y otra para los datos a transmitir.
- El transmisor UART (**uart_tx**), que serializa los datos de salida.
- El módulo **interface**, encargado de interpretar los bytes recibidos como operación y operandos, y enviar los resultados a la FIFO de transmisión.
- La ALU, que realiza las operaciones aritméticas y lógicas definidas.

2.2. Esquemático general

La Figura 1 muestra un diagrama de bloques típico de un sistema UART completo, donde se observa la integración del generador de baudios, los bloques de transmisión y recepción, y las memorias FIFO.

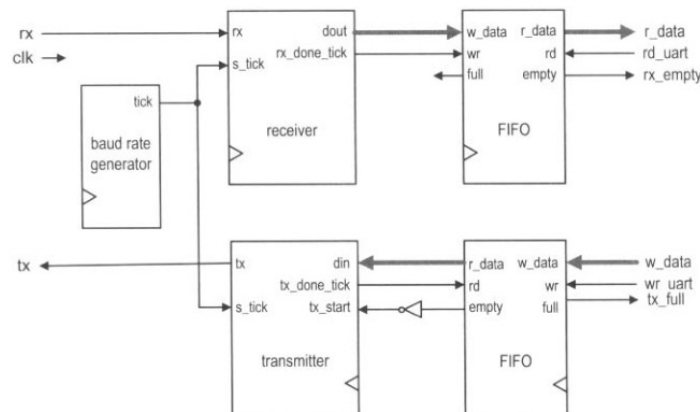


Figure 8.5 Block diagram of a complete UART.

Figura 1: Diagrama de bloques de un UART completo [?].

2.3. Flujo de datos

El flujo de información en el sistema sigue la siguiente secuencia:

1. Los datos ingresan por la línea **rx** y son muestreados por el **uart_rx**.
2. Los bytes reconstruidos se almacenan en la **FIFO RX**.
3. El módulo **interface** extrae los datos de la FIFO y organiza los tres bytes requeridos: código de operación, operando A y operando B.
4. La ALU procesa estos valores y genera un resultado.
5. El resultado se escribe en la **FIFO TX**.
6. Finalmente, el **uart_tx** serializa el dato y lo envía por la línea **tx**.

3. Generador de baudios (baud_gen)

El primer bloque del sistema es el generador de baudios, cuya función es producir la señal de muestreo necesaria para sincronizar tanto la recepción como la transmisión de datos.

3.1. Principio de funcionamiento

El módulo recibe como entradas el reloj principal de la FPGA (`clk`) y la señal de `reset`. A partir de un divisor interno, genera una señal periódica llamada `sample_tick`, que es utilizada por los módulos `uart_rx` y `uart_tx` para sincronizar sus máquinas de estados.

El cálculo del divisor se realiza en función de la frecuencia de reloj de la FPGA y de la tasa de baudios deseada:

$$DIVISOR = \frac{f_{clk}}{BAUD_RATE \times 16}$$

donde el factor 16 corresponde al *oversampling*, una técnica habitual en UART que permite mejorar la detección de bits y reducir errores por jitter o pequeñas diferencias de frecuencia.

3.2. Oversampling en UART

En UART asíncrono el emisor y el receptor no comparten reloj, por lo que el receptor debe *reconstruir* el instante de muestreo de cada bit a partir del flanco del *start bit*. Para mejorar la robustez frente a pequeñas desintonías de baudios, jitter y ruido, se utiliza **oversampling**: muestrear cada bit varias veces a una frecuencia M veces superior a la tasa de baudios.

En este diseño se emplea $M = 16$, por lo que el generador de baudios produce una señal de *tick* con:

$$f_{\text{tick}} = M \cdot BAUD_RATE \quad \Rightarrow \quad T_{\text{tick}} = \frac{T_{\text{bit}}}{M}$$

El receptor detecta el flanco descendente del start, espera $\frac{M}{2}$ ticks (centro del start) y a partir de allí toma una muestra cada M ticks, que caen en el **centro** de cada bit de datos. Muestrear en el centro maximiza el margen a distorsiones temporales.

3.3. Flujo interno

- Un contador se incrementa en cada flanco ascendente del reloj principal.
- Cuando el contador alcanza el valor del divisor, se reinicia y se genera un pulso en `sample_tick`.

- Este pulso marca los instantes exactos en que deben muestrearse o transmitirse los bits.

3.4. Importancia en el sistema

El `baud_gen` es esencial porque garantiza que tanto el transmisor como el receptor trabajen bajo la misma temporización. En caso contrario, existiría desalineación entre los bits enviados y los recibidos, ocasionando errores en la reconstrucción de los datos. Gracias a su parametrización, este módulo es flexible y puede adaptarse fácilmente a distintas frecuencias de reloj y diferentes tasas de transmisión.

4. Receptor UART (uart_rx)

El receptor es responsable de transformar la señal serie **rx** en un byte paralelo y anunciar cuándo el dato está listo. Emplea **oversampling** a $16\times$ y una máquina de estados finitos (FSM) con temporización por ticks.

4.1. Trama y convenciones

La línea **rx** permanece en nivel alto en reposo. Cada trama se compone de:

- **Start:** 1 bit en nivel bajo.
- **Datos:** DBIT = 8 bits, orden *LSB first*.
- **Stop:** 1, 1.5 o 2 bits en alto, parametrizados por $SB_TICK \in \{16, 24, 32\}$.

4.2. Señales y contadores internos

- **sample_tick:** pulso de temporización a $16\times$ la tasa de baudios.
- **tick_count:** cuenta los ticks dentro del bit (0..15 para datos).
- **bit_count:** cuenta cuántos bits de datos se han muestreado (0..DBIT-1).
- **rx_shift_reg:** registro de desplazamiento donde se van incorporando los bits recibidos.
- **rx_done_tick:** pulso de un ciclo de **clk** que indica “byte listo”.

4.3. Máquina de estados y flujo temporal

La FSM consta de cuatro estados: **IDLE**, **START**, **DATA** y **STOP**. El funcionamiento se describe paso a paso a continuación y se ilustra en la Figura 2.

1) IDLE (espera de start) La línea **rx** está alta. Al detectarse un nivel bajo (*start bit*), se pasa a **START** y se reinicia **tick_count**.

2) START (centrado de muestreo) Con cada **sample_tick** se incrementa **tick_count**. Al alcanzar **tick_count** = 7 (8 ticks desde el flanco), se considera que estamos en el **centro** del start. Entonces:

1. Se pone **tick_count** en 0 para comenzar a cronometrar el primer bit de datos.
2. Se pone **bit_count** en 0.
3. Se transita a **DATA**.

3) DATA (muestreo de 8 bits) Cada vez que `tick_count = 15` y llega `sample_tick`, se toma la muestra del bit (centro del bit) y se la introduce al MSB del `rx_shift_reg` desplazando a la derecha. Esto, repetido 8 veces con *LSB first*, deja el registro en orden natural $[b7 \dots b0]$. Tras cada muestreo:

- `tick_count` se reinicia a 0.
- `bit_count` se incrementa. Si `bit_count = DBIT - 1`, se pasa a **STOP**.

4) STOP (validación y fin de trama) Se esperan `SB_TICK` ticks (por defecto 16 para 1 bit de stop). Al cumplirse:

- Se genera un pulso `rx_done_tick` indicando que el byte en `dout` es válido.
- Se vuelve a **IDLE**.

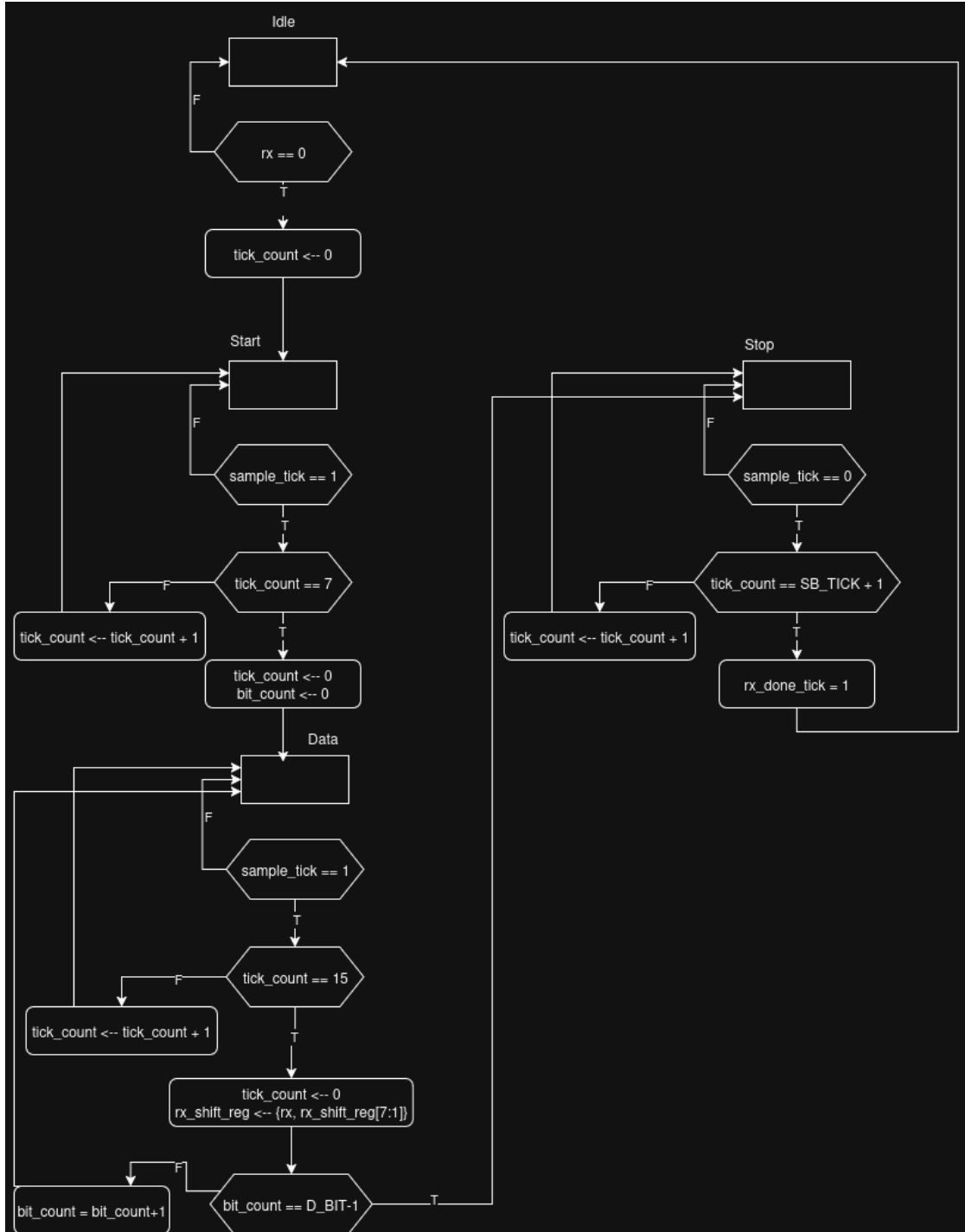


Figura 2: Diagrama de flujo de la FSM del receptor UART con oversampling a 16x.

4.4. Cronometría: instantes de muestreo

Tras detectar el start, el primer muestreo útil ocurre 8 ticks después (centro del start) y luego cada 16 ticks para cada bit de datos. El tiempo total entre el flanco de start y

el anuncio del byte listo es:

$$N_{\text{ticks}} = 8 + 16 \cdot \text{DBIT} + \text{SB_TICK}$$

Para $\text{DBIT} = 8$ y $\text{SB_TICK} = 16$: $N_{\text{ticks}} = 152$. Como $T_{\text{tick}} = \frac{1}{16 \cdot \text{BAUD_RATE}}$, el retardo es aproximadamente $152 \cdot T_{\text{tick}} \approx 0,99 \text{ ms}$ a 9600 bps, coherente con una trama de 10 bits ($\sim 1,04 \text{ ms}$), considerando que el muestreo se inicia en el centro del start.

4.5. Parámetros y salidas

- **DBIT**: número de bits de datos (8 en este diseño).
- **SB_TICK**: cantidad de ticks de stop (16, 24 o 32 \Rightarrow 1, 1.5 o 2 bits).
- **dout**: byte paralelo reconstruido a partir de **rx_shift_reg**.
- **rx_done_tick**: pulso de 1 ciclo de **clk** indicando dato válido.

4.6. Notas de diseño y posibles mejoras

- **Sincronización del pin rx**: al ser asíncrono respecto de **clk**, es recomendable anteponer un *doble flip-flop* de sincronización para mitigar metastabilidad.
- **Detección de error de trama**: durante **STOP** verificar que **rx** esté alto; si no, reportar *framing error*.

5. Transmisor UART (uart_tx)

El bloque `uart_tx` es el encargado de serializar un dato paralelo de 8 bits y enviarlo a través de la línea `tx`, siguiendo la convención de trama UART: un bit de inicio, 8 bits de datos y un bit de parada (o más, según configuración).

5.1. Principio de funcionamiento

El transmisor se activa cuando recibe la señal `tx_start`, lo que indica que existe un byte válido en su registro de entrada (`din`). A partir de ese momento, controla la línea `tx` mediante una máquina de estados finitos (FSM) que sigue la misma temporización definida por los pulsos de `sample_tick` generados por el módulo `baud_gen`.

5.2. Máquina de estados

El transmisor implementa los mismos cuatro estados que el receptor:

- **IDLE**: la línea `tx` permanece en nivel alto. Espera que la señal `tx_start` se active.
- **START**: coloca la línea en nivel bajo durante 16 ticks para indicar el comienzo de la trama.
- **DATA**: envía uno a uno los bits de datos, en orden *LSB first*. Cada bit permanece estable durante 16 ticks.
- **STOP**: fuerza la línea a nivel alto durante `SB_TICK` ticks. Una vez cumplido, emite el pulso `tx_done_tick` y vuelve a **IDLE**.

5.3. Flujo interno

El dato a transmitir se carga en un registro de desplazamiento (`tx_shift_reg`) cuando `tx_start` se activa. En cada ciclo de envío de bit:

- El bit menos significativo del registro se coloca en la línea `tx`.
- Al completarse los 16 ticks, el registro se desplaza a la derecha para preparar el siguiente bit.

5.4. Comparación con el receptor

El `uart_tx` utiliza la misma estructura general que el receptor:

- Ambos cuentan con una FSM con los estados **IDLE**, **START**, **DATA** y **STOP**.

- Ambos utilizan los pulsos de `sample_tick` para sincronizar los instantes de transmisión o muestreo.

Las diferencias clave son:

- El receptor `uart_rx` reconstruye bits desde la línea serie hacia un registro, mientras que el transmisor hace el proceso inverso: toma un byte paralelo y lo serializa.
- El transmisor siempre conoce los tiempos exactos en los que debe cambiar el valor de la línea, mientras que el receptor debe detectar el inicio de la trama y re-alinearse a partir de allí.

5.5. Señales principales

- `din`: dato paralelo de entrada (8 bits).
- `tx`: línea de transmisión serie.
- `tx_start`: pulso que indica al transmisor que debe enviar el byte cargado.
- `tx_done_tick`: pulso de un ciclo de `clk` que indica que la transmisión finalizó.

6. Memoria FIFO (fifo)

La FIFO (First-In, First-Out) es el bloque que **desacopla** temporalmente los productores y consumidores de datos. En este proyecto se utilizan dos, como vimos en la figura 1: una a la salida del receptor (**FIFO RX**) y otra a la entrada del transmisor (**FIFO TX**). Su función es absorber ráfagas y tolerar pequeñas desincronizaciones entre módulos.

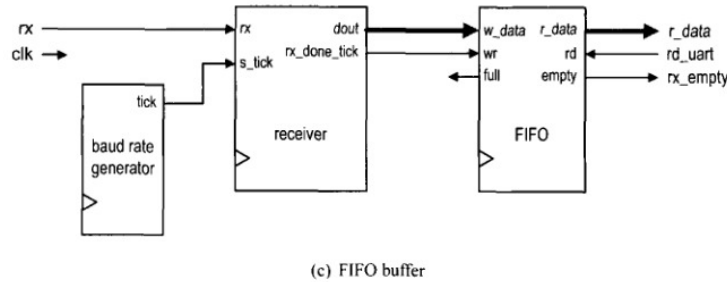


Figura 3: Inserción de una FIFO a la salida del receptor UART.

6.1. Estructura y señales

La FIFO es **sincronizada a un único reloj** (`clk`) y parametrizable:

- **Ancho de palabra** W (bits por elemento).
- **Profundidad** N (cantidad de elementos).

Interfaz:

- `w_data` (entrada de datos), `wr` (pedido de escritura) y `full` (FIFO llena).
- `r_data` (salida de datos), `rd` (pedido de lectura) y `empty` (FIFO vacía).

6.2. Punteros y contador

Internamente mantiene:

- **Puntero de escritura** w_ptr y **puntero de lectura** r_ptr , ambos de ancho $\lceil \log_2 N \rceil$. Al incrementarse, **envolvieron** (wrap-around) de manera circular.
- **Contador de ocupación** $count$ en el rango $0 \dots N$. De él se derivan las banderas:

$$\text{empty} \Leftrightarrow count = 0, \quad \text{full} \Leftrightarrow count = N.$$

Nota de diseño: si N no es potencia de 2, conviene implementar un *wrap* explícito ($w_ptr \leftarrow 0$ cuando $w_ptr = N - 1$, idem r_ptr) para garantizar que nunca se indexe fuera de $0 \dots N - 1$.

6.3. Escritura y lectura

Escritura (lado productor). En el flanco ascendente de `clk`, si `wr` está activo y la FIFO **no** está llena, se copia `w_data` en la posición indicada por `w_ptr` y luego:

$$w_ptr \leftarrow w_ptr + 1, \quad count \leftarrow count + 1.$$

Lectura (lado consumidor). La salida `r_data` refleja el contenido de la posición apuntada por `r_ptr` (*estilo FWFT, first-word fall-through*). Cuando el consumidor afirma `rd` y la FIFO **no** está vacía, en el próximo flanco:

$$r_ptr \leftarrow r_ptr + 1, \quad count \leftarrow count - 1.$$

Esto “avanza” la ventana y el siguiente dato queda disponible de inmediato en `r_data` tras ese flanco.

6.4. Lectura y escritura simultáneas

Si en un mismo ciclo se cumple `wr` \wedge \neg `full` y `rd` \wedge \neg `empty`:

$$w_ptr \leftarrow w_ptr + 1, \quad r_ptr \leftarrow r_ptr + 1, \quad count \text{ no cambia.}$$

La ocupación permanece constante, lo que permite **canalizar** (pipeline) productor y consumidor sin bloqueo.

6.5. Reset y mapeo en hardware

Cuando se activa la señal de **reset**, la FIFO vuelve a su estado inicial:

- Los punteros de lectura y escritura se ponen en cero.
- El contador de ocupación también se pone en cero.

Esto asegura que la memoria comience **vacía**.

6.6. Manejo correcto del *handshake*

- El **productor** debe escribir solo cuando \neg `full`.
- El **consumidor** debe leer solo cuando \neg `empty`.
- Las banderas `full/empty` evitan *overflow/underflow*.

Uso en el receptor (FIFO RX)

A la salida del `uart_rx`, cada vez que se completa una trama se genera `rx_done_tick`; ese pulso se utiliza como `wr` de la FIFO RX y el byte recibido ingresa como `w_data`. El bloque `interface` actúa como **consumidor**: monitorea `empty`; cuando hay datos, aserta `rd` (señal `rd_uart` en el diseño) para avanzar y tomar el próximo byte en `r_data`. Así, el receptor puede seguir capturando tramas aunque el procesamiento sea más lento.

Uso en el transmisor (FIFO TX)

La `interface` escribe en la FIFO TX el **resultado** de la ALU (`wr_uart` como `wr`), siempre que $\neg \text{full}$. El `uart_tx` es el **consumidor**: cuando termina de enviar un byte, aserta `tx_done_tick` que hace de `rd` para tomar automáticamente el siguiente. En el `top`, la señal `tx_start` se activa mientras la FIFO TX **no** esté vacía (`tx_start` $\leftarrow \neg \text{tx_empty}$), logrando una transmisión continua si hay datos en cola.

7. Unidad Aritmético-Lógica (ALU)

La ALU es el bloque encargado de realizar operaciones aritméticas y lógicas sobre dos operandos de 8 bits. Se controla mediante un código de operación de 6 bits que determina qué función ejecutar.

7.1. Operaciones soportadas

Código (binario)	Operación	Descripción
100000	ADD	Suma de $A + B$
100010	SUB	Resta $A - B$
100100	AND	AND bit a bit
100101	OR	OR bit a bit
100110	XOR	XOR bit a bit
000011	SRA	Desplazamiento aritmético a derecha
000010	SRL	Desplazamiento lógico a derecha
100111	NOR	NOR bit a bit

Cuadro 1: Operaciones soportadas por la ALU.

7.2. Rol en el sistema

La ALU recibe como entradas dos datos (`data_a`, `data_b`) y un código de operación (`op`), generando un resultado de 8 bits que se almacena en la FIFO de transmisión. Esto permite extender la comunicación UART más allá de la simple transferencia de bytes, agregando capacidad de procesamiento en hardware.

8. Módulo de interfaz (interface)

La interfaz es el bloque que conecta las FIFOs con la ALU. Su función es **interpretar los datos recibidos**, organizarlos en forma de instrucción (operación + operandos), y enviar el resultado hacia la FIFO de transmisión.

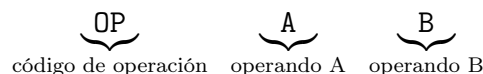
8.1. Máquina de estados

El comportamiento se basa en una máquina de estados sencilla. Cada transición depende de la disponibilidad de datos en la FIFO RX o de espacio libre en la FIFO TX.

- **S_IDLE**: espera a que la FIFO RX no esté vacía.
- **S_OP**: lee el primer byte recibido, que corresponde al código de operación de la ALU.
- **S_A**: lee el segundo byte, correspondiente al operando A.
- **S_B**: lee el tercer byte, correspondiente al operando B.
- **S_SEND**: cuando la FIFO TX no está llena, escribe el resultado proveniente de la ALU. Luego vuelve a **S_IDLE**.

8.2. Organización de datos

Cada operación enviada desde el PC o dispositivo maestro debe respetar el siguiente formato de 3 bytes consecutivos:



La interfaz se encarga de:

1. Leer secuencialmente estos tres bytes desde la FIFO RX.
2. Guardarlos en registros internos (`op`, `data_a`, `data_b`).
3. Enviar los valores a la ALU.
4. Escribir el resultado en la FIFO TX para su posterior transmisión.

8.3. Integración en el sistema

El módulo **interface** se encuentra entre la FIFO RX y la ALU, y entre la ALU y la FIFO TX. Su rol es esencial porque:

- Actúa como **consumidor** de la FIFO RX mediante la señal `rd_uart`.

- Actúa como **productor** de la FIFO TX mediante la señal `wr_uart`.
- Orquesta el flujo de instrucciones hacia la ALU y asegura que los resultados se almacenen correctamente para ser enviados.

8.4. Señales clave

- `rd_uart`: lectura de un byte desde la FIFO RX.
- `wr_uart`: escritura de un resultado en la FIFO TX.
- `tx_start`: señal que arranca la transmisión en el bloque `uart_tx` siempre que la FIFO TX no esté vacía.

8.5. Resumen

En conjunto, la interfaz convierte un flujo serie de bytes recibidos en una instrucción completa de la forma:

[operación, operando A, operando B] \Rightarrow resultado

y garantiza que este resultado se reenvíe a través del transmisor UART.