Unidad Aritmética y Lógica (ALU).

Este bloque esta destinado a realizar las operaciones aritméticas y lógicas del microprocesador, es decir, es la unidad que hace todo el procesamiento. Esta unidad además de realizar las operaciones aritméticas y lógicas, también realiza el cálculo de las direcciones para el manejo de bloques de datos o arreglos en la memoria de datos.

La ALU es de 16 bits y esta implementada con un esquema de acarreo anticipado por generación y propagación para tener un tiempo de respuesta de 2 retardos de propagación de forma constante para la obtención de los acarreos. En la ilustración 1 se muestra el bloque de la ALU.

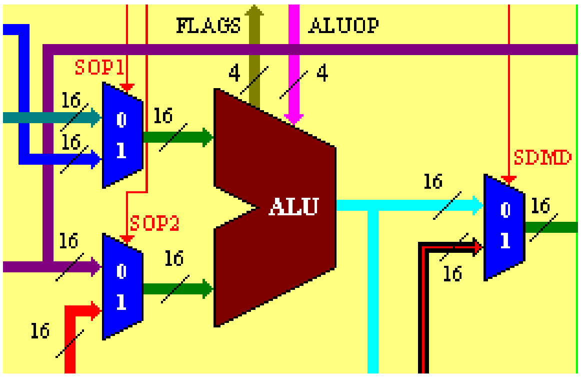

Ilustración 1 Unidad Aritmética y Lógica

Como se puede observar en la ilustración 1, la ALU maneja las siguientes señales:

- Dos **Buses de entrada de 16 bits**. Estos buses proporcionan los operandos a usar en las operaciones aritméticas y lógicas. Los operandos pueden provenir del archivo de registros, la pila o de la parte baja del formato de instrucción (I[11-0]).

- Un **Bus de salida de 16 bits**. En este bus se coloca el resultado de la operación aritmética o lógica.

- Un **Bus ALUOP de entrada de 4 bits**. Es un bus que permite seleccionar la operación aritmética y lógica a realizar por la ALU.

- Un **Bus de banderas de salida de 4 bits**. En este bus se mandan los valores de las banderas Z (zero), C (carry), N (negative) y OV (overflow) que genera cada operación en la ALU.

De cada operación se obtienen los valores de las banderas de acarreo (C), negativo (N), cero (Z) y desbordamiento (OV). Estas banderas son conocidas como **banderas de estado** puesto que proporcionan el estado de la ALU después de cada operación. Estas banderas son almacenadas en el registro de banderas o registro de estado para poder ser usadas con las instrucciones de comparación y brincos condicionales.

Cada una de las banderas de la ALU tiene las siguientes funciones:

- **Bandera Z (zero)**. Esta bandera se pone en 1 cuando los 16 bits del resultado de la ALU son cero, en caso contrario tiene 0. Esto se logra con una compuerta NOR que tiene como entradas todos los bits de resultado.

- **Bandera C (carry)**. Esta bandera muestra el valor que tiene el último acarreo de la ALU, en el caso de una ALU de 16 bits, el acarreo C16 es la bandera C.

- **Bandera N (negative)**. Esta bandera muestra el valor que tiene el bit más significativo (bit de signo) del bus del resultado, en el caso de una ALU de 16 bits, el bit 15 de resultado es la bandera N. Cuando N tiene 1 significa que el resultado es negativo, de lo contrario es positivo.

- **Bandera OV (overflow)**. Esta bandera es usada para operaciones aritméticas con signo. Cuando OV = 1 marca un desbordamiento en el resultado, lo que significa que el resultado no se puede representar con los bits que tenemos para el resultado. Esto se logra con una compuerta XOR entre los dos acarreos más significativos, en el caso de una ALU de 16 bits, la entrada de la compuerta XOR es C16 y C15.

Las operaciones aritméticas y lógicas que se pueden realizar dependen de la arquitectura diseñada de la ALU. En la ilustración 2, podemos observar la arquitectura para un bit del ALU del ESCOMIPS.

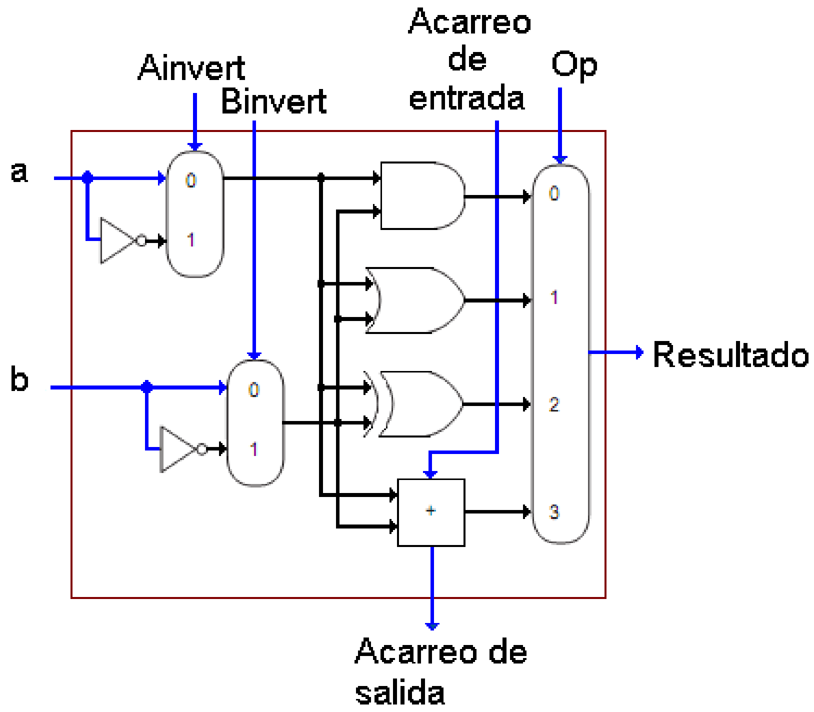

Ilustración 2 ALU de un bit

Las operaciones básicas que se pueden realizar con la arquitectura elegida son:

Ainvert ALUOP(3)	Binvert ALUOP(2)	Op(1) ALUOP(1)	Op(0) ALUOP(0)	Operación	Banderas que afecta la operación
0	0	0	0	Operación lógica AND $\mathrm{Re}\,sultado = a \cdot b$	N Z
0	0	0	1	Operación lógica OR $\mathrm{Re}\,sultado = a + b$	N Z
0	0	1	0	Operación lógica XOR $\mathrm{Re}\,sultado = a \oplus b$ $= a \cdot \bar{b} + \bar{a} \cdot b$	N Z
1	1	1	0	Operación lógica XOR $\mathrm{Re}\,sultado = \bar{a} \oplus \bar{b}$ $= \bar{a} \cdot \bar{\bar{b}} + \bar{\bar{a}} \cdot \bar{b} = \bar{a} \cdot b + a \cdot \bar{b}$	N Z
0	0	1	1	Operación aritmética $\mathrm{Re}\,sultado = a + b$	N Z C OV
0	1	1	1	Operación aritmética $\mathrm{Re}\,sultado = a - b$	N Z C OV
0	1	1	0	Operación lógica XNOR $\mathrm{Re}\,sultado = a \oplus \bar{b} = a \cdot \bar{\bar{b}} + \bar{a} \cdot \bar{b}$ $= a \cdot b + \bar{a} \cdot \bar{b} = \overline{a \oplus b}$	N Z
1	0	1	0	Operación lógica XNOR $\mathrm{Re}\,sultado = \bar{a} \oplus b = \bar{a} \cdot \bar{b} + \bar{\bar{a}} \cdot b$ $= \bar{a} \cdot \bar{b} + a \cdot b = \overline{a \oplus b}$	N Z
1	1	0	1	Operación lógica NAND $\mathrm{Re}\,sultado = \bar{a} + \bar{b} = \overline{a \cdot b}$ Teorema de DeMorgan	N Z
1	1	0	0	Operación lógica NOR $\mathrm{Re}\,sultado = \bar{a} \cdot \bar{b} = \overline{a + b}$ Teorema de DeMorgan	N Z
1	1	0	1	Operación lógica NOT usando la compuerta universal NAND. si $a = b$ $\mathrm{Re}\,sultado = \bar{a} + \bar{a} = \overline{a \cdot a} = \bar{a}$	N Z
1	1	0	0	Operación lógica NOT usando la compuerta universal NOR. si $a = b$ $\mathrm{Re}\,sultado = \bar{a} \cdot \bar{a} = \overline{a + a} = \bar{a}$	N Z

La ilustración 3 muestra una ALU de 4 bits con las banderas de estado.

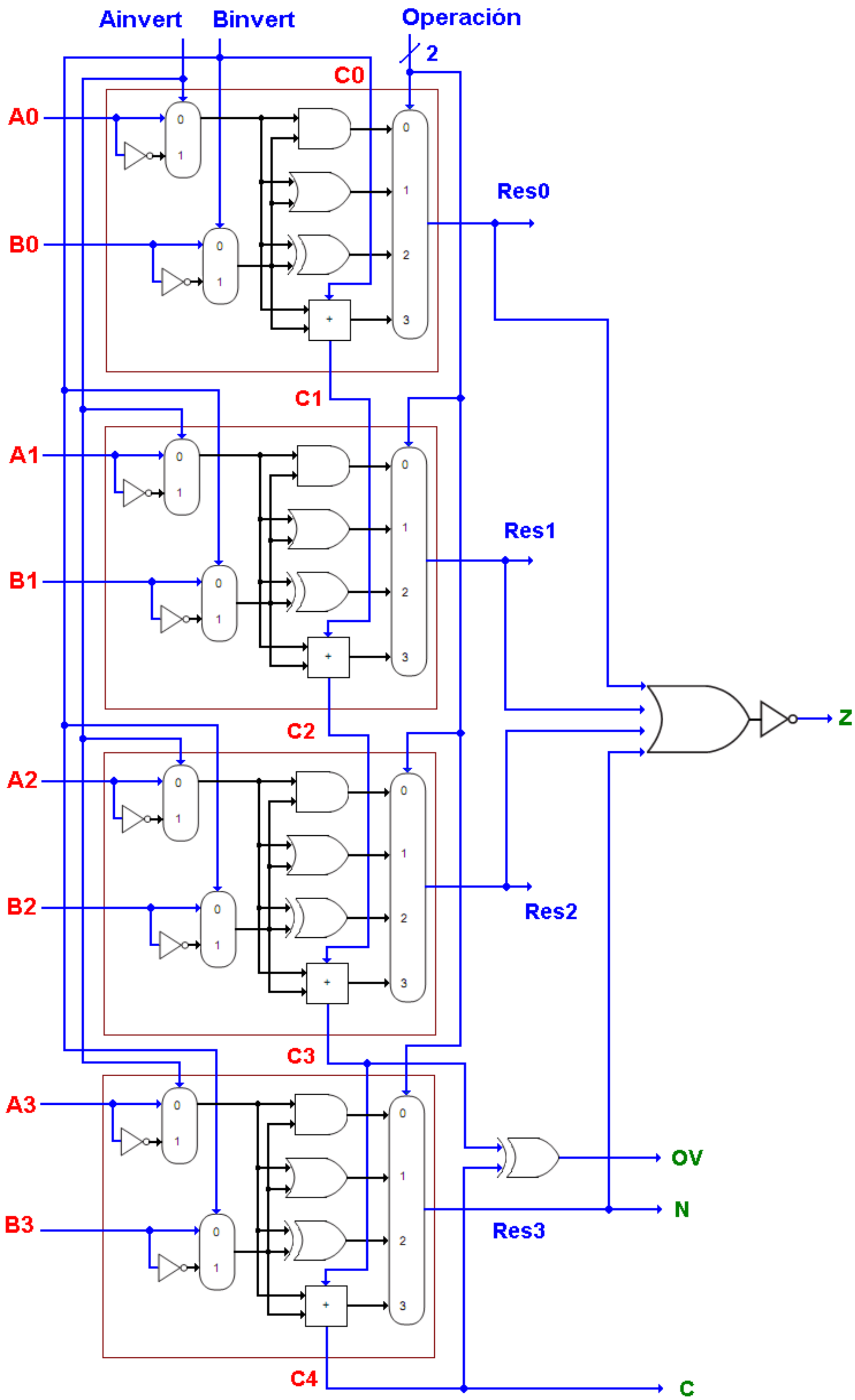

Ilustración 3 ALU de 4 bits.

Para verificar el correcto funcionamiento de la ALU vamos a usar los valores de prueba mostrados en la tabla 1.

Estado de Banderas				Operación				
				1	0	0	0	Cn
				0	1	0	1	A = 5
OV	N	Z	C	1	1	1	0	B = -2
0	0	0	1	0	0	1	1	A+B
0	0	0	0	0	1	1	1	A-B
0	0	0	0	0	1	0	0	AND
0	1	0	0	1	0	1	1	NAND
0	1	0	0	1	1	1	1	OR
0	0	1	0	0	0	0	0	NOR
0	1	0	0	1	0	1	1	XOR
0	0	0	0	0	1	0	0	XNOR
				1	1	1	0	Cn
OV	N	Z	C	0	1	0	1	A = 5
				0	1	1	1	B = 7
1	1	0	0	1	1	0	0	A+B
				1	1	1	0	Cn
OV	N	Z	C	0	1	0	1	A
				0	1	0	1	B
0	0	1	1	0	0	0	0	A-B
0	1	0	0	1	0	1	0	NAND (NOT)

Tabla 1 Valores de prueba de la ALU.

Los primeros valores de prueba son A = 5 y B = -2. En la tabla se muestra el resultado y el valor de cada bandera en cada una de las operaciones aritméticas y lógicas.

Los siguientes valores de prueba son A = 5 y B = 7. El objetivo de usar estos valores es verificar la activación de la bandera de desbordamiento (overflow), puesto que el resultado de la suma (A + B = 12) no se puede representar con un tipo de dato de 4 bits con signo.

Los últimos valores de prueba son A = 5 y B = 5. El objetivo de usar estos valores es verificar el resultado de la operación lógica NOT. Esto es posible a través de la operación lógica NAND cuando los dos operandos A y B son iguales.

Análisis de las banderas de estado en las instrucciones condicionales.

Para empezar a analizar los estados de las banderas de la ALU cuando ejecutamos instrucciones condicionales, vamos a considerar los valores representados con un número de 4 bits. Estos valores pueden representar cantidades diferentes dependiendo si se considera la cantidad con signo o sin signo. Esto se muestra en la tabla 2.

A	B	C	D	SIN SIGNO	CON SIGNO
0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1
0	0	1	0	2	2
0	0	1	1	3	3
0	1	0	0	4	4
0	1	0	1	5	5
0	1	1	0	6	6
0	1	1	1	7	7
1	0	0	0	8	-8
1	0	0	1	9	-7
1	0	1	0	10	-6
1	0	1	1	11	-5
1	1	0	0	12	-4
1	1	0	1	13	-3
1	1	1	0	14	-2
1	1	1	1	15	-1

Tabla 2 Representación de números con 4 bits.

Casos a analizar.

	Números sin signo.	Números con signo.
Condición $A = B$	Ejemplo1: $A = B = 4$ Ejemplo2: $A = B = 10$	Ejemplo1: $A = B = 4$ Ejemplo2: $A = B = -6$
Condición $A > B$	Ejemplo1: $A = 7, B = 3$ Ejemplo2: $A = 10, B = 9$	Ejemplo1: $A = 7, B = 3$ Ejemplo2: $A = -2, B = -5$ Ejemplo3: $A = 7, B = -5$

Estado de las banderas para números sin signo.

Vamos a analizar las 4 condiciones cuando las cantidades no tienen signo, es decir, son siempre positivos.

Condición $A = B$.

La primera condición a verificar es $A = B$. En este caso se tiene $A - B = 0$. En este caso nunca se producirá un desbordamiento (overflow), ni se toma en cuenta la bandera de signo (N), por ser números positivos. Analicemos esto con los siguientes ejemplos:

Si $A = B = 4$

Tenemos: $4 = 4 \Rightarrow 4 - 4 = 0 \Rightarrow 4 + (-4) = 0$

	C4	C3	C2	C1	C0
	1	1	0	0	0
4		0	1	0	0
-4		1	1	0	0
		0	0	0	0

Bandera	Valor
Z	1
C	1
N	0
OV	0

Si $A = B = 10$

Tenemos: $10 = 10 \Rightarrow 10 - 10 = 0 \Rightarrow 10 + (-10) = 0$

	C4	C3	C2	C1	C0
	1	1	1	0	0
10		1	0	1	0
-10		0	1	1	0
		0	0	0	0

Bandera	Valor
Z	1
C	1
N	0
OV	0

En ambos ejemplos las banderas $Z = C = 1$.

Condición $A > B$.

Para analizar esta condición observemos los siguientes ejemplos:

Si $A = 7, B = 3$

Tenemos: $7 > 3 \Rightarrow 7 - 3 > 0 \Rightarrow 7 + (-3) > 0$

	C4	C3	C2	C1	C0
	1	1	1	1	0
7		0	1	1	1
-3		1	1	0	1
		0	1	0	0

Bandera	Valor
Z	0
C	1
N	0
OV	0

Si $A = 10, B = 9$

Tenemos: $10 > 9 \Rightarrow 10 - 9 > 0 \Rightarrow 10 + (-9) > 0$

	C4	C3	C2	C1	C0
	1	1	1	0	0
10		1	0	1	0
-9		0	1	1	1
		0	0	0	1

Bandera	Valor
Z	0
C	1
N	0
OV	0

En este caso las banderas $Z = 0$ y $C = 1$.

En resumen las condiciones para números sin signo son las siguientes:

Condición	Banderas
$A = B$	$Z = 1, C = 1$ $EQ = Z \cdot C$ En la práctica: $EQ = Z$
$A \neq B$	$NE = \overline{Z \cdot C}$ En la práctica: $NE = \overline{Z}$
$A > B$	$Z = 0, C = 1$ $G = \overline{Z} \cdot C$
$A \geq B$	$GE = \overline{Z} \cdot C + Z \cdot C$ $GE = C \cdot (\overline{Z} + Z)$ $GE = C$
$A < B$	$L = \overline{C}$
$A \leq B$	$LE = \overline{C} + Z \cdot C$ $LE = \overline{C} \cdot 1 + Z \cdot C$ $LE = \overline{C} \cdot (Z + 1) + Z \cdot C$ $LE = \overline{C} \cdot Z + \overline{C} + Z \cdot C$ $LE = Z \cdot (\overline{C} + C) + \overline{C}$ $LE = Z + \overline{C}$

Estado de las banderas para números con signo.

Vamos a analizar las 4 condiciones cuando las cantidades tienen signo.

Condición $A > B$**.**

Vamos a analizar el caso de $A > B$ cuando las cantidades tienen signos iguales. Observemos el siguiente ejemplo donde los números son positivos.

Si $A = 7, B = 3$

Tenemos: $7 > 3 \Rightarrow 7 - 3 > 0 \Rightarrow 7 + (-3) > 0$

	C4	C3	C2	C1	C0
	1	1	1	1	0
7		0	1	1	1
-3		1	1	0	1
		0	1	0	0

Bandera	Valor
Z	0
C	1
N	0
OV	0

Observemos el siguiente ejemplo donde los números son negativos.

Si $A = -2, B = -5$

Tenemos: $-2 > -5 \Rightarrow -2 + 5 > 0$

	C4	C3	C2	C1	C0
	1	1	0	0	0
-2		1	1	1	0
5		0	1	0	1
		0	0	1	1

Bandera	Valor
Z	0
C	1
N	0
OV	0

Vamos a analizar el caso de $A > B$ cuando las cantidades tienen signos diferentes. Observemos el siguiente ejemplo:

Si $A = 7, B = -5$

Tenemos: $7 > -5 \Rightarrow 7 + 5 > 0$

	C4	C3	C2	C1	C0
	1	1	0	0	0
7		0	1	1	1
5		0	1	0	1
		1	1	0	0

Bandera	Valor
Z	0
C	0
N	1
OV	1

Podemos observar que las banderas de signo (N) y la de overflow (OV) son iguales. Además la bandera $Z = 0$.

En resumen las condiciones para números con signo son las siguientes:

Condición	Banderas
$A = B$	$Z = 1, C = 1$ $E = Z \cdot C$ En la práctica: $E = Z$
$A \neq B$	$NE = \overline{Z \cdot C}$ En la práctica: $NE = \overline{Z}$
$A > B$	$Z = 0, N = 0, OV = 0$ $Z = 0, N = 1, OV = 1$ $G = (\overline{N \oplus OV}) \cdot \overline{Z}$
$A \geq B$	$GE = \overline{Z} \cdot \overline{N \oplus OV} + Z$ $GE = \overline{Z} \cdot \overline{N \oplus OV} + Z \cdot 1$ $GE = \overline{Z} \cdot \overline{N \oplus OV} + Z \cdot (\overline{N \oplus OV} + 1)$ $GE = \overline{Z} \cdot \overline{N \oplus OV} + Z \cdot \overline{N \oplus OV} + Z$ $GE = \overline{N \oplus OV} \cdot (\overline{Z} + Z) + Z$ $GE = (\overline{N \oplus OV}) + Z$
$A < B$	$L = \overline{(\overline{N \oplus OV}) + Z}$ $L = (N \oplus OV) \cdot \overline{Z}$
$A \leq B$	$L = (N \oplus OV) \cdot \overline{Z} + Z$ $L = (N \oplus OV) \cdot \overline{Z} + Z \cdot 1$ $L = (N \oplus OV) \cdot \overline{Z} + Z \cdot (1 + (N \oplus OV))$ $L = (N \oplus OV) \cdot \overline{Z} + Z + Z \cdot (N \oplus OV)$ $L = (N \oplus OV) \cdot (\overline{Z} + Z) + Z$ $L = (N \oplus OV) + Z$