

TEMA 3: Componentes, estructura y funcionamiento de la Unidad Central de Proceso (UCP).**Autor:** Enrique Lalinde**Esquema:**

- 1.- Introducción
- 2.- Conceptos básicos
 - 2.1 Metodología de diseño
 - 2.2 Componentes combinacionales y secuenciales
 - 2.3 Estructura y funcionamiento
- 3.- Componentes, estructura y funcionamiento de la UCP
 - 3.1 Unidad Aritmético-Lógica (UAL)
 - 3.1.1 Componentes
 - 3.1.2 Estructura
 - 3.1.3 Funcionamiento
 - 3.2 Unidad de Control (UC)
 - 3.2.1 Componentes
 - 3.2.2 Estructura
 - 3.2.3 Funcionamiento
- 4.- Conclusiones
- 5.- Bibliografía

1. INTRODUCCIÓN.

Un *sistema digital* se puede definir de manera informal como una colección de objetos, denominados *componentes*, que se conectan de forma coherente con un objetivo bien definido.

En este tema nos introducimos en el estudio de la Unidad Central de Proceso (UCP) especificando para ello los siguientes elementos:

- El conjunto de componentes que la forman y la función de cada uno de ellos
- La estructura de interconexiones entre los componentes
- La función realizada por los componentes interconectados

La importancia de este tema se basa en que para el estudio de la conducta funcional de un ordenador (que consiste en el intercambio de datos y señales de control entre sus diversos componentes) es fundamental conocer la estructura y el funcionamiento de la Unidad Central de Proceso que es quien controla el sistema.

El tema comienza con una serie de conceptos básicos sobre el diseño de sistemas digitales y sobre los componentes combinacionales y secuenciales. A continuación nos centramos en el elemento que es objetivo del tema, la Unidad Central de Proceso, estudiando la estructura y el funcionamiento de sus dos bloques fundamentales (la Unidad Aritmético Lógica, UAL, y la Unidad de Control UC).

2. CONCEPTOS BÁSICOS.

La *Unidad Central de Proceso* (UCP) es la encargada de ejecutar las instrucciones especificadas en un programa almacenado en la memoria del ordenador.

En su modo de funcionamiento normal es la UCP quien tiene el control de ordenador y opera intercambiando datos con la Memoria utilizando para ello dos registros internos (el *Registro de Direcciones de memoria*, RD, que contiene la próxima dirección de memoria a leer, y el *Registro de datos de Memoria*, RM, que contiene el dato a escribir en la memoria o recibe el dato leído de la memoria).

La UCP intercambia, también, datos con las unidades de entrada / salida (E/S), recibe señales de interrupción de otros módulos (E/S, Memoria) y utiliza señales de control para dirigir el funcionamiento global del sistema.

La UCP se compone de dos bloques principales:

- La *Unidad de Control de programa* (UC) tiene como misión principal buscar, interpretar y secuenciar las instrucciones almacenadas en Memoria, generando, en los instantes adecuados, las señales de control necesarias.
- La *Unidad Aritmético Lógica* (UAL) se encarga de ejecutar las instrucciones. Es capaz de realizar operaciones aritméticas y lógicas (incluidos saltos condicionales en el programa).

2.1 METODOLOGIA DE DISEÑO

El problema principal con el que se plantea el diseñador de un sistema digital es el de concebir estructuras que utilicen los componentes que hay disponibles y que realicen el conjunto de operaciones especificadas a un coste mínimo.

El diseño de un sistema digital puede considerarse a diferentes niveles de detalle de complejidad:

- Nivel de puertas lógicas: Corresponde al estudio de la conmutación. Su componente primario es el bit (puertas lógicas AND, OR, NOT,...). Es el nivel de diseño lógico clásico, y su particularidad es poseer una teoría bien desarrollada (la teoría de conmutación) basada en el álgebra booleana.
- Nivel de transferencia de registros: No se tratan ya las puertas lógicas de forma individual, sino los registros de la máquina y sus interconexiones. Su componente primario es la palabra (grupos de bits).
- Nivel de procesador: Los elementos básicos que se consideran en este nivel son elementos como UCP, procesadores de E/S, Memorias, etc. La característica fundamental de estos módulos es su elevada complejidad. Su componente primario sería el bloque de palabras que puede representar un programa o una zona de datos.

La arquitectura de un ordenador se describe a nivel de transferencia de registro o a nivel de procesador. En este tema estudiaremos la UCP, principalmente, a nivel de transferencia de registros y, en algún caso, a nivel de procesador.

2.2 COMPONENTES COMBINACIONALES Y SECUENCIALES.

Los componentes del nivel de registro incluyen:

- Módulos *combinacionales* (*circuitos combinacionales*) tales como puertas de palabras (son como las puertas lógicas pero con n entradas y m salidas), multiplexores, codificadores, decodificadores, sumadores, Memorias de Sólo Lectura (ROM's), Arrays Lógicos Programables (PLA's), etc. Existen circuitos combinacionales como son los sumadores binarios, sumadores de alta velocidad, sumadores en código BCD, multiplicadores binarios, multiplicadores de alta velocidad, divisores binarios, entre otros, que suelen emplearse en la construcción de la Unidad Aritmético Lógica (UAL).

- Módulos *secuenciales* (*circuitos secuenciales*) como registros de almacenamiento, registros de desplazamiento, contadores, etc. Todos estos componentes cumplen la propiedad de ser fácilmente ampliables para permitir un mayor número de entradas. La Unidad de Control es un ejemplo de un circuito secuencial sofisticado.

Ambos circuitos, combinacionales y secuenciales, operando conjuntamente proporcionan todas las funciones de almacenamiento, transferencia, procesamiento y control necesarias en un sistema digital como es un ordenador.

A continuación, veremos algunas características de estos circuitos secuenciales y combinacionales, comentando algunos de los circuitos utilizados en la UCP.

COMBINACIONALES

Un circuito combinacional es un circuito lógico cuyos valores de salida están completamente determinados en cualquier instante de tiempo por los valores aplicados a sus entradas, y por tanto son independientes de los estados anteriores de las mismas. Los circuitos combinacionales no nos permiten pues almacenar el estado de las entradas y utilizarlas posteriormente para tomar decisiones, es decir son circuitos que no tienen memoria.

La característica principal de un circuito combinacional es la función lógica que realiza. Esta función lógica describe el comportamiento del circuito pero no tiene por qué describir su estructura interna, por lo que es posible que existan diferentes circuitos lógicos que realizan la misma función. Los circuitos combinacionales tienen dos usos principales:

- Transferencia de datos. Controlan el flujo de señales lógicas de una parte del sistema con otra.
- Procesamiento de datos. Procesan o transforman los datos realizando los cálculos necesarios.

Vamos a comentar, muy brevemente, algunos circuitos combinacionales utilizados en la UCP:

- *Puertas de palabras*: Se utilizan para representar la realización de una función lógica, bit a bit, entre dos palabras (por ejemplo una puerta AND de palabras de n bits).

- *Multiplexores (circuito selector de datos)*: Permite que palabras con orígenes diferentes se puedan transferir a un mismo destino. Las señales de control o selección determinan que palabra, de las diferentes que hay como entradas (fuentes), se conectan en cada instante al único bus de salida (o destino).

- *Decodificadores*: Transforman los datos de un código numérico (código de n bits al código con un formato conocido como 1 entre 2^n . Estos módulos se utilizan fundamentalmente en el direccionamiento de los circuitos de memorias y de dispositivos de E/S. (por ejemplo para seleccionar una palabra entre 2^n palabras de memoria o un dispositivo entre 2^n dispositivos de E/S)

- *Codificadores binarios*: Son circuitos que poseen 2^n entradas y n salidas. Realizan la función inversa de los decodificadores y se puede considerar como un conversor de código que transforma un código de tipo "1 entre 2^n " a un código binario.

- *Demultiplexores*: Tiene n entradas de selección o control, una de datos y 2^n salidas de datos. Se emplean para transferir datos desde una fuente común a uno de entre varios posibles destinos bajo el control de las entradas de selección.

- *Arrays Lógicos Programables (PLA's)*: Existen elementos lógicos de propósito general que han sido desarrollados para realizar cualquier función combinatorial, como por ejemplo determinadas partes de la Unidad de Control de un ordenador no microprogramable.

Un PLA es un conjunto de puertas lógicas sin un propósito definido a priori, que se puede configurar para la realización de una determinada función. Esta particularización se lleva a cabo mediante la fusión de determinados fusibles que interconectan las puertas lógicas del PLA.

CIRCUITOS SECUENCIALES

Los circuitos secuenciales son capaces de recordar cierta información pasada de sus entradas. Esta propiedad da una gran generalidad a este tipo de circuitos y permite generar respuestas más interesantes y complejas que las que produce un circuito combinatorial.

El elemento de memoria básico de los circuitos secuenciales es el *biestable* (permite mantener la unidad mínima de almacenamiento, sólo un bit)

Los circuitos secuenciales tienen dos usos principales en los ordenadores:

- Como memorias. Almacenan la información mientras está siendo procesada.
- Como circuitos de control. Generan las señales de control necesarias para seleccionar y habilitar una secuencia de pasos en la transferencia o el procesamiento de datos.

2.3 ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO

La estructura de un sistema digital está constituida por dos clases de elementos:

- Una colección de componentes C , para el procesamiento de la información.
- Una colección de señales S , que transmiten la información entre los componentes

El comportamiento de un sistema digital a nivel de transferencia de registros se define por un conjunto de funciones u operaciones O_1, O_2, \dots, O_n ejecutadas sobre diferentes palabras (conjuntos de bits).

Cada una de estas funciones O_i se realizan mediante una serie de primitivas u operaciones elementales de transferencia de registros llamadas *microoperaciones*.

La operación O_i a realizar por un sistema digital puede ser seleccionada por una señal de control externa.

En un sistema digital a nivel de registro tenemos:

- Un conjunto de *registros* que almacenan los datos procesados (datos iniciales, cálculos intermedios, y resultados finales).
- Un conjunto de *primitivas* o *recursos de cálculo* que realizan el tratamiento de los datos.
- Una *red de interconexión* capaz de conectar los registros con los recursos de cálculo.

- Un conjunto de entradas de control denominadas *puntos de control* que reciben señales de la Unidad de Control para realizar determinadas operaciones como la selección de operaciones, carga de registros, etc.
- Un conjunto de salidas que constituyen las *señales de condición o selección*.

La función que realiza un componente (recurso de cálculo, registro o red de interconexión) se determina por las señales de control generadas en la Unidad de Control que, como comentamos, están presentes en todos los *puntos de control*.

Así pues, los recursos de cálculo, los registros de almacenamiento y la red de interconexiones se controlan externamente a través de la Unidad de Control que es un *sistema secuencial*. Su función de transición especifica el secuenciamiento de las *microoperaciones* que constituyen el algoritmo de una operación O_i en particular. Su función de salida determina las señales de control que activan las *microoperaciones* ejecutadas por el sistema.

Las entradas del sistema (provenientes de las UC vienen codificadas por medio de m variables de control c_1, c_2, \dots, c_m , cada una de las cuales define el estado de una línea de control. Ejemplo de líneas de control son: activar la carga de un determinado registro, programar la función que realiza un recurso de cálculo y las líneas de control de la red de interconexión.

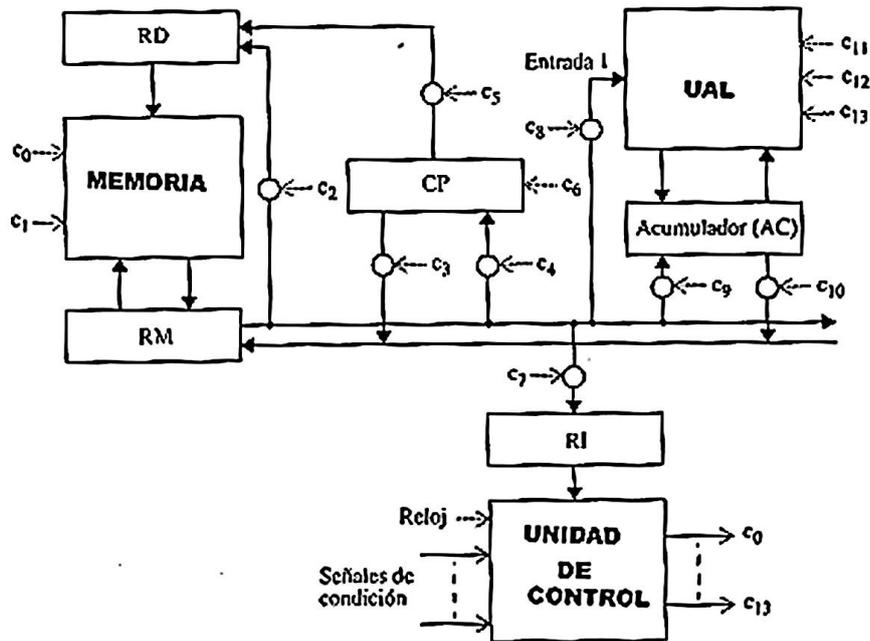
Las salidas del sistema (que las recibe como entradas la Unidad de Control) se codifican como q variables de condición o selección s_1, s_2, \dots, s_q . Estas variables proporcionen información a la Unidad de Control acerca del estado actual del sistema.

La especificación de la Unidad de control consiste en definir sus dos funciones básicas:

- Generación de las señales de control
- Secuenciamiento de las señales de control

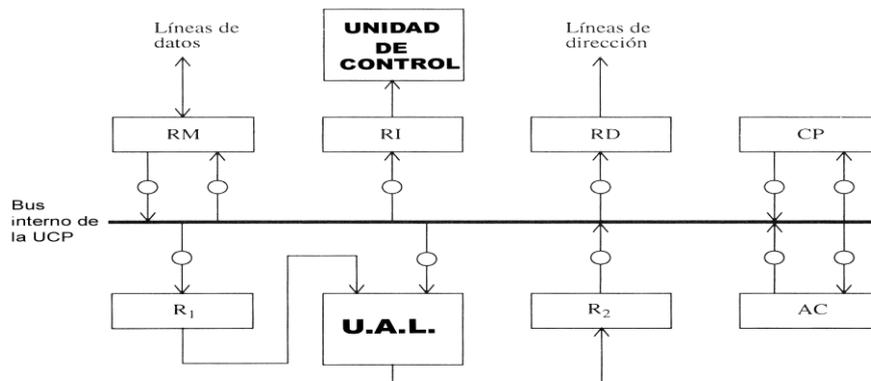
Existen varios métodos de realizar una Unidad de Control que van desde estructuras fijas denominadas de lógica cableada, sintetizadas con elementos de memorias y puertas lógicas, a estructuras muy flexibles y fácilmente modificables de tipo programable.

3. COMPONENTES ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DE LA UCP



Incluso en una UCP sencilla se observa una gran cantidad de caminos de datos, lo que hace complicada su organización. Una manera de simplificar el diseño de la UCP es organizar todos sus elementos alrededor de un bus interno.

La UAL y todos los registros internos de la UCP están conectados al bus interno de la UCP. Con esta disposición hay que proporcionar los puntos de control imprescindibles (pintados en la figura con un pequeño círculo) para permitir el movimiento de entrada y salida del bus de todos los registros. Se necesitan también puntos de control adicionales para transferir datos a y desde el bus externo del ordenador y para gobernar el funcionamiento de la UAL.



En la figura anterior observamos dos nuevos registros R_1 y R_2 que son necesarios para que la UAL pueda funcionar adecuadamente. Si hay que ejecutar en la UAL una operación que requiere dos operandos, uno de ellos se puede obtener del bus interno, pero el otro hay que conseguirlo de algún registro. Para esta finalidad se podría utilizar el registro acumulador (AC), pero se limita la flexibilidad del sistema. El registro R_1 proporciona un almacenamiento temporal para la segunda entrada.

La UAL es un circuito combinacional que no tiene ninguna capacidad de memoria, de manera que cuando las señales de control activan una función específica de la UAL, las entradas a la misma se transforman en sus correspondientes salidas. Por este motivo la salida de la UAL no puede conectarse directamente al bus ya que esta salida se realimentaría a la entrada. El registro R_2 permite el almacenamiento temporal de la salida.

Es importante comentar los siguientes elementos:

- Puntos de control: Son entradas que reciben señales de control y se emplean para controlar la selección de operaciones, los caminos de datos y la carga de los registros. Los puntos de control pueden considerarse como una especie de conmutadores generalizados que están activados por las señales de control c_i y que permiten controlar el flujo de información a través de la estructura de todo el sistema digital. El conjunto de señales de control pueden clasificarse en tres categorías:

- Relojes. Su activación permite cargar el registro correspondiente con el contenido presente en ese instante en el camino de datos que le llegue. Por ejemplo: cargar la salida del sumador A, cargar m (el multiplicador) desde el Bus de Entrada o cargar M (el multiplicando) desde el Bus de Entrada.
- Conmutadores. Son dispositivos que controlan y/o seleccionan el paso de información de un camino de datos a otro. Por ejemplo: Transferir A al Bus de Salida o transferir m al Bus de Salida.
- De transformación. Controlan las distintas funciones de transformación que pueden efectuar las unidades funcionales del sistema. Por ejemplo: Desplazar a la derecha A-m, Poner a cero A, Poner a cero el contador o incrementar el contador.

Los puntos de control se realizan mediante circuitos cuya naturaleza depende de las características de los dispositivos conectados a los caminos de datos sobre los que actúa

- Señales de condición o selección. Las señales de condición son salidas que se utilizan por la Unidad de Control para determinar señales de control condicionales o secuencias alternativas. Las señales de condición pueden corresponderse con el valor de un bit individual de un determinado registro necesitar de un circuito combinacional para su determinación.

A continuación pasamos a examinar más detenidamente los dos bloques principales de la UCP que, como sabemos, son la Unidad Aritmético-Lógica y Unidad de Control.

3.1 UNIDAD ARITMÉTICO LÓGICA (UAL).

La Unidad aritmético lógica es la unidad del ordenador donde se efectúan las operaciones aritméticas y lógicas sobre los datos. Las otras unidades del ordenador (UC, memoria y E/S) son las encargadas de suministrar datos a la entrada de la UAL y recibirlos nuevamente una vez procesados.

Las unidades de procesamiento pueden clasificarse en:

- De propósito específico. Adaptadas para ejecutar un algoritmo particular
- De propósito general. Permiten realizar una clase general de algoritmos (la UAL de los ordenadores digitales sería un ejemplo)

3.1.1 COMPONENTES DE LA UAL.

Como hemos visto, la UAL es aquella parte del sistema en la que se transforman los datos suministrados por UC, Memoria y E/S. Los datos le llegan por los registros y los resultados de la transformación también se almacenan en registros. La Unidad de Control, por medio de señales, se encarga de controlar las operaciones y el movimiento de datos de entrada y salida de la UAL

Utiliza registros de almacenamiento, operadores (recursos de cálculo), red de interconexión (caminos de datos), puntos de control y señales de condición.

Estos componentes se organizan de forma que permiten la ejecución de las operaciones o algoritmos que se necesitan y satisfacen ciertos requisitos de compromiso coste / prestaciones.

Algunos circuitos asociados (componentes contruidos con puertas lógicas y algunos otros circuitos) que realizan diversas operaciones y, por supuesto, las cuatro operaciones aritméticas básicas, tanto en coma fija como en flotante son los siguientes:

- Sumadores binarios. Se puede considerar como un conversor de código que recibe a la entrada dos números binarios x e y de n bits cada uno (los operandos) y produce una salida s de $n + 1$ bits que es la suma de los operandos.

La estrategia básica que se emplea para sumar dos números de n bits es dividir el problema en un conjunto de tareas más sencillas. Es decir, para la suma de dos números de n bits se utilizan n sumas de dos números de 1 bit. Cada una de estas n sumas más sencillas necesitan información de los sumadores de las etapas previas (arrastres o acarreo).

Dentro de los sumadores binarios tenemos: Semisumador binario, sumador binario completo, sumador binario serie, sumador binario paralelo, sumador-restador binario paralelo, entre otros.

- Sumadores de alta velocidad. La naturaleza secuencial de la propagación del arrastre es el problema más difícil que hay que resolver cuando se desea acelerar la suma. Se utilizan diferentes estrategias para solucionarlo que dan lugar a los siguientes circuitos: Sumadores con anticipación del arrastre, Sumadores de suma condicional, sumadores con detección de fin de arrastre, sumadores con arrastre almacenado, entre otros.

- Sumadores en código BCD. Los sumadores que operan sobre números decimales codificados en binario, como el código BCD, son más complejos que los sumadores binarios. Los sumadores en código BCD se pueden diseñar como si fueran sumadores binarios, añadiéndoles unos circuitos de corrección que garanticen la correcta codificación de los resultados.

- Multiplicadores binarios. La multiplicación es una operación compleja en comparación con la suma y la resta. Utilizan diferentes algoritmos para conseguir sus objetivos (Uno de ellos es el denominado algoritmo de Booth).

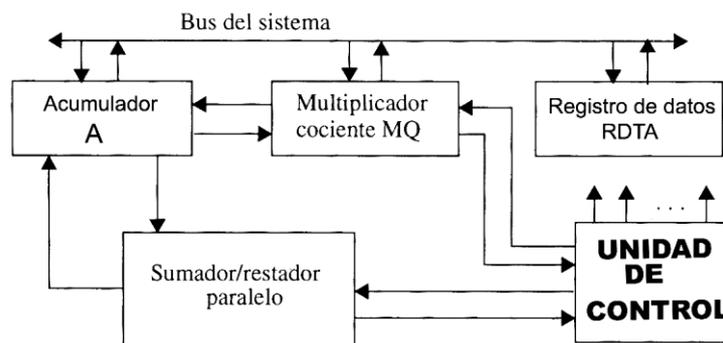
- Multiplicadores de alta velocidad. Dos métodos básicos para acelerar la multiplicación son: la suma rápida de los productos parciales y utilizar el algoritmo de Booth modificado.
- Divisores binarios. Se utilizan dos métodos que son: División por el método de restauración y división por el método de no restauración.

3.1.2 ESTRUCTURA DE LA UAL.

Los circuitos que emplea un procesador para ejecutar un programa se combinan en la UAL. La complejidad de la UAL viene impuesta por una parte, por los tipos de operaciones que puede ejecutar y, de otra, por la forma en que las efectúa.

En el caso de que se empleen algoritmos análogos para la realización de las diferentes operaciones de la UAL se puede simplificar su diseño. Por ejemplo para la multiplicación y la división es posible compartir los mismos recursos de cálculo (las operaciones de multiplicar y dividir se pueden realizar usando diferentes algoritmos a base de operaciones elementales de suma y resta).

Además de las entradas para los operadores, la UAL posee diversas señales de control (sumar, restar...), que se utilizan para seleccionar las diferentes funciones aritmético-lógicas que se desean ejecutar.



Por claridad, en el dibujo anterior no hemos incluido los circuitos que hacen las distintas funciones lógicas (AND, OR, NOT,...).

Para el almacenamiento de los operandos y del resultado se usan 3 registros:

- El registro acumulador (A)
- El registro multiplicador/cociente (MQ)
- El registro de datos (RDAT)

Los registros A y MQ pueden desplazarse de forma conjunta a derecha e izquierda como si fueran un único registro. RDAT es un registro auxiliar empleado por la UAL.

Es factible empaquetar una UAL completa, del tipo que se acaba de describir, dentro de un único circuito integrado. El número de conexiones externas necesarias para controlar la UAL y poder acceder así a sus registros internos, limita la longitud de sus datos que pueden tratarse por una UAL de este tipo. La longitud de los datos es normalmente de 2 o 4 bits. Estas unidades se diseñan de manera que se puedan conectar fácilmente en cascada para formar una UAL capaz de procesar en paralelo un número arbitrario de bits.

El objetivo de construir este tipo de módulos es doble:

- Si se disponen de módulos aritméticos generales se consigue reducir el número de módulos distintos que se construyen, y aumentar así su volumen de producción con la consiguiente reducción de costes.
- Los módulos se pueden utilizar en procesadores, en los que la operación específica que va a ejecutar la unidad se selecciona dinámicamente por la Unidad de Control del procesador.



Una de las UAL's integradas que más se emplea es el circuito integrado SN74181 que contiene las siguientes entradas:

- 2 vectores de datos A y B de 4 bits cada uno
- 4 señales de control (c_3, c_2, c_1, c_0) que permiten elegir una determinada función
- 1 señal de control M para seleccionar entre funciones aritméticas y lógicas
- 1 arrastre de entrada c_e

y como salidas:

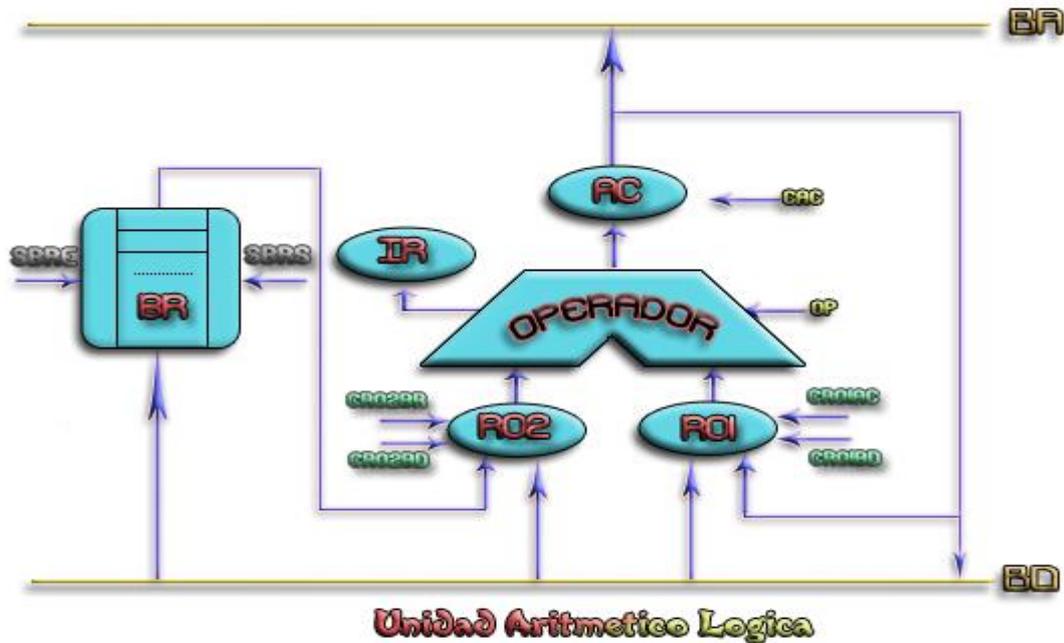
- 1 vector de resultado de la operación R de 4 bits
- 1 arrastre de salida c_s
- 2 señales P y G de propagación y generación de arrastre, que permiten construir circuitos más grandes con aceleración de arrastres.
- 1 señal EQ que indica la igualdad entre los operandos de entrada A y B

El objetivo del diseño se plantea con frecuencia como un compromiso entre la velocidad del circuito y el coste asociado. Cuando se necesitan circuitos aritméticos de muy alta velocidad es necesario emplear circuitos combinatoriales, aunque es preciso considerar el problema de los arrastres que surgen en todas las operaciones aritméticas. Por este motivo se analizan diversas estrategias para acelerar la suma y la multiplicación. En todas ellas la finalidad es acelerar la generación de los arrastres para garantizar el resultado correcto en el menor tiempo posible.

3.1.3 FUNCIONAMIENTO DE LA UAL.

El elemento primordial de la unidad aritmético lógica es un operador (OPER) que suele contar con algunos elementos auxiliares.

El funcionamiento simplificado de la UAL se basaría en lo siguiente:



El operador es el encargado de realizar operaciones aritméticas (suma, resta, etc.), lógicas (AND, OR, etc.) o de otro tipo (rotaciones, operaciones de bit, etc.), programables mediante el conjunto de señales OP. Sus dos entradas reciben los datos desde dos registros (RO1 y RO2) y su salida se conecta a otro registro (AC). Además, cuenta con una serie de biestables (IR, Indicadores de Resultado) que, aunque son independientes, suelen estar agrupados con otros biestables de estado general del ordenador y conforman un *registro de estado* que se considera asociado a la unidad de control. Cada uno de estos biestables IR señala una determinada condición sobre el dato obtenido en la última operación. Son de máxima importancia puesto que permiten realizar saltos condicionados de programa, es decir, modificar la secuencia natural de ejecución de un programa en función de que el resultado de una operación sea uno u otro. Por ejemplo, el biestable Z (indicador de cero), se pone a 1 cuando el resultado de la operación anterior fue cero, mientras que se pone a 0 si el resultado fue cualquier otro valor.

En la mayoría de las UAL existe una batería de registros de uso general (BR) donde su entrada aparece conectada sólo al bus de datos y su salida sólo a un registro auxiliar RO2. Por lo tanto, precisa de dos grupos de señales de selección, uno para la entrada SBRE y otro para la salida SBRS, que gobiernan qué registro concreto se conecta en cada caso a la entrada y la salida general respectivamente. Los registros de BR son normalmente accesibles por el usuario, es decir, el programador puede usarlos explícitamente en sus programas.

RO1 y RO2 son dos registros auxiliares que contienen los dos operandos con los que trabaja el operador. Ambos pueden almacenar información procedente de dos fuentes distintas, por lo que cuentan con dos señales de carga selectiva cada uno. Así, mediante las señales CRO1AC y CRO1BD se gobierna la carga del registro RO1 desde el registro AC y el bus de datos respectivamente, y mediante CRO2BR y CRO2BD la carga del registro RO2 desde de la batería de registros y el bus de datos.

El registro AC se conoce como registro acumulador y sirve para almacenar los resultados de las operaciones efectuadas por la UAL. Puesto que su entrada se encuentra conectada únicamente con la salida del operador se utiliza una sola señal de carga (CAC). Su salida, en cambio, está conectada a tres destinos diferentes y son los destinatarios los encargados de seleccionar a quien va destinado. La conexión al bus de datos es la forma más habitual de comunicar los resultados obtenidos por la UAL con el resto del ordenador, incluidos algunos elementos de la propia UAL como es la BR. La conexión al bus de direcciones es más específica y se utiliza para transferir una dirección que ha sido calculada por la UAL. Por último, a través de la conexión al registro intermedio RO1, se posibilita la utilización del resultado de la última operación como uno de los operandos de la siguiente.

3.2 UNIDAD DE CONTROL

Un ordenador es una máquina programable de propósito general. El programador ve al ordenador como una máquina que comprende y ejecuta instrucciones de un lenguaje de alto nivel. Sin embargo, en último término, sólo es un conjunto de circuitos electrónicos.

Para entender mejor la estructura de un ordenador, se puede suponer que existe una jerarquía de niveles de abstracción:

- a. Nivel lógico
- b. Nivel de microprogramación
- c. Nivel de lenguaje máquina
- d. Nivel de ensamblador
- e. Nivel de lenguaje de alto nivel

Un *intérprete* es un sistema que analiza y ejecuta instrucciones de lenguaje que describe un determinado nivel. Cada nivel de abstracción de un ordenador es idealmente ejecutado por un intérprete realizado en el nivel inmediatamente superior de la jerarquía.

Así el nivel de microprogramación es interpretado por un intérprete realizado en el nivel lógico (es decir con circuitos lógicos). Análogamente el nivel de lenguaje máquina lo interpreta el nivel de microprogramación y así sucesivamente hasta llegar a los lenguajes de alto nivel.

La Unidad de Control de un ordenador se encarga de extraer de la memoria cada instrucción, decodificarla y generar la secuencia correcta de señales de control para que pueda ejecutarse. En otras palabras, la Unidad de control interpreta el lenguaje máquina del ordenador y por lo tanto, está constituida por los niveles lógicos y de microprogramación.

Un intérprete del nivel de microprogramación interpreta las instrucciones de un lenguaje de microprogramación, llamadas microinstrucciones, directamente sobre los circuitos del nivel lógico.

Un intérprete del nivel máquina interpreta las instrucciones del lenguaje máquina del ordenador con la ayuda de una Unidad de Control Microprogramada. Este esquema no siempre se respeta, sino que en algunos ordenadores se suprime el nivel de microprogramación, interpretándose directamente el lenguaje máquina directamente sobre el nivel lógico. En este caso, se habla de una Unidad de Control con *lógica cableada*, mientras que en el anterior se dispone de un Unidad de Control con *lógica microprogramada*.

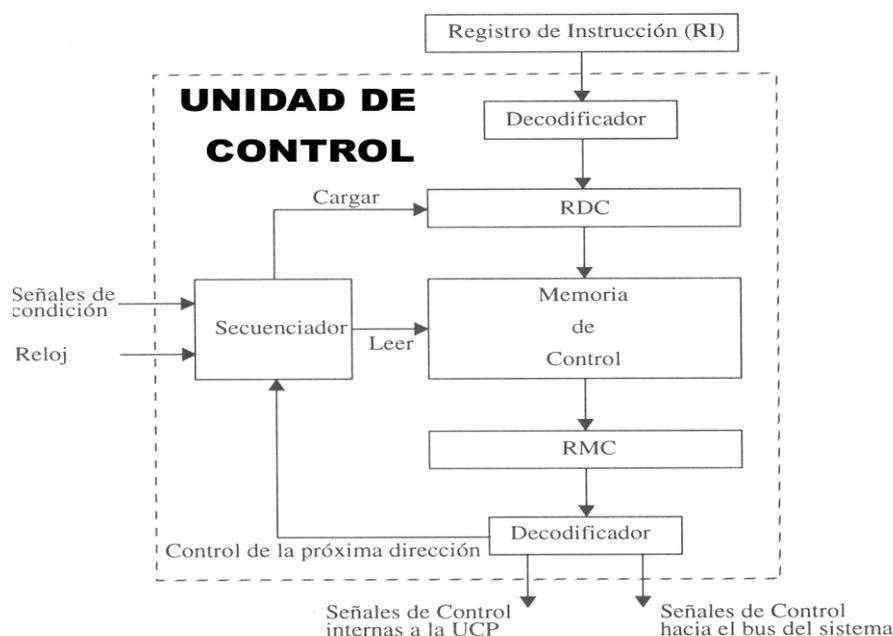
3.2.1 COMPONENTES UC

Internamente una Unidad de control microprogramada contiene los componentes lógicos necesarios para hacer sus funciones de secuenciamiento y ejecución:

- El registro de dirección de la memoria de control (RDC). Mantiene la dirección de la próxima microinstrucción a ejecutar.
- Registro de datos de la memoria de control (RMC). Cuando se lee una microinstrucción de la memoria de control, se transfiere al registro de datos de la memoria de control (RMC).
- Secuenciador de carga. Su funcionamiento es el siguiente: Para ejecutar una microinstrucción el secuenciador emite una orden de lectura a la memoria de control y la palabra cuya dirección se especifica en el registro RDC se lee en el registro RMC que genera las señales de control e información sobre la dirección de la próxima microinstrucción que le envía al secuenciador.

El secuenciador finalmente carga una nueva dirección en RDC. Esta dirección se basa en la información transmitida desde RMC sobre la próxima microinstrucción y en las señales de condición que la Unidad de Control recibe de la ALU.

- Memoria de control. Almacena las microinstrucciones.
- Decodificadores. Uno de ellos recibe la instrucción del registro de instrucción (RI) y el otro decodifica los campos de la microinstrucción que le llegan de la memoria de control.



3.2.2 ESTRUCTURA UC

Las microoperaciones representan las operaciones atómicas de la UCP. La noción de microoperación es fundamental para comprender el diseño de la unidad de control.

ESPECIFICACIONES EXTERNAS EN EL DISEÑO DE LA UC

Para que la unidad de control realice su tarea debe poseer entradas que le permitan determinar el estado del sistema y salidas que puedan controlar su funcionamiento. Estas son las especificaciones externas de una Unidad de Control.

Las entradas son:

- Reloj. Permite a la UCP mantener la temporalización básica de todo el sistema. La Unidad de Control realiza una microoperación (o un conjunto de microoperaciones simultáneas) durante cada pulso de reloj. Esto se denomina, normalmente, ciclo de reloj o ciclo de procesador.
- Registro de Instrucción (RI). El código de operación de la instrucción actual se utiliza para determinar que microoperaciones hay que realizar.
- Señales de condición (del registro de estado). Las necesita la Unidad de Control para conocer el estado en que se encuentra la CPU y el resultado de las operaciones anteriores en la UAL. Por ejemplo en una instrucción JMPZ X, la Unidad de Control cargará la dirección X en CP si el contenido del registro acumulador es 0 (uno de los bits de el registro de estado indica esa situación)
- Señales de control del bus del sistema. El bus del sistema proporciona determinadas señales a la Unidad de Control que son necesarias para su funcionamiento. Por ejemplo, las señales de interrupción.

Las salidas son:

- Señales de control internas a la UCP. Existen dos tipos de estas señales. Las que originan que los datos se muevan entre los diferentes registros y las que activan funciones específicas de la UAL.
- Señales de control hacia el bus del sistema. Hay también dos clases: señales de control a memoria y señales de control a módulos de E/S.

ESPECIFICACIONES INTERNAS EN EL DISEÑO DE LA UC

Internamente tenemos que dividir la estructura de la UC según una sea Unidad de Control con *lógica cableada* o una Unidad de Control con *lógica programada*.

Estas dos concepciones son las que se han empleado normalmente para el diseño de la Unidad de Control de un ordenador.

- Unidad de Control con *lógica cableada*. Se concibe la UC como un circuito secuencial que genera ciertas secuencias fijas de señales de control. Es decir, sus entradas se transforman en un conjunto de salidas que son sus señales de control. Los objetivos de diseño son reducir la circuitería que se necesita y aumentar la velocidad de trabajo del sistema.

Esta formada por estructuras fijas sintetizadas con elementos de memorias y puertas lógicas. Es decir, en las unidades de control con *lógica cableada* las funciones de transición de datos y de salida se realizan con lógica combinatorial y no son modificables sin tener que volver a sintetizar de nuevo el circuito secuencial.

El elemento que identifica la instrucción para que la UC genere exclusivamente la secuencia de microoperaciones que realiza la instrucción es el denominado decodificador de instrucciones, que es un circuito combinatorial que tiene como entrada el código de instrucción almacenado en el registro de instrucción (RI).

Otro elemento es el generador de subciclos de la UC que produce una secuencia de pulsos repetitivos que se utilizan para medir la duración de las microoperaciones.

- Unidad de control con *lógica microprogramada*. Se trata a una sentencia de la forma “activar las señales de control $\{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ ” como una instrucción almacenada en una memoria especial denominada memoria de control. Estas instrucciones que se guardan en la memoria de control son las microinstrucciones y el conjunto de ellas, que realiza una instrucción máquina del ordenador, es el microprograma asociado a dicha instrucción.

En una Unidad de Control microprogramada las señales de control se generan por programa y resulta sencillo introducir modificaciones en el diseño, ya que sólo se necesita alterar el contenido de la memoria de control.

La microprogramación es un método para el diseño de la Unidad de Control que se basa en el hecho de que una instrucción se puede especificar mediante una secuencia de operaciones primitivas denominadas microinstrucciones.

La ejecución de una microinstrucción requiere una secuencia de búsqueda – decodificación – ejecución. Esta secuencia, análoga pero más simple que la que se da en las instrucciones, debe ser controlada por una nueva Unidad de Control. De esta forma recursiva se podría ahora considerar que esta nueva y más sencilla Unidad de Control se realiza también con técnicas de microprogramación. La solución de este problema recursivo obliga a que la Unidad de control final se realice mediante lógica de tipo cableado.

Cada instrucción máquina del repertorio de un ordenador se puede considerar como una secuencia de operaciones más elementales (microoperaciones) que especifican las transferencias de información entre los diferentes componentes de parte operacional. Activando los puntos de control necesarios en estos módulos funcionales se controla el flujo de datos entre ellos.

La microprogramación permite generalizar el diseño de la Unidad de Control basado en la utilización de memorias ROM. Las funciones de transición de estado y de salida se sintetizan mediante tablas de consulta que están en una memoria ROM o RAM. Cada sentencia del algoritmo de transferencia de registros que se almacena en una palabra de la memoria constituye lo que se denomina una microinstrucción

Para cada microinstrucción, además de las señales de control que hay que activar, se describe la acción que realiza en una notación simbólica que se asemeja mucho a un lenguaje de programación (lenguaje de microprogramación).

Por tanto, una microinstrucción es una o más microoperaciones que se pueden ejecutar de forma simultánea y que está contenida en una palabra de la memoria ROM o RAM (palabra de control). Cada microinstrucción estaría representada por un conjunto de 1's y 0's contenidos en las palabras de control. Los elementos que definen una microinstrucción son:

- Las señales de control que están activas durante la ejecución de la microinstrucción.
- El secuenciamiento de la información que determina la próxima microinstrucción que hay que ejecutar.

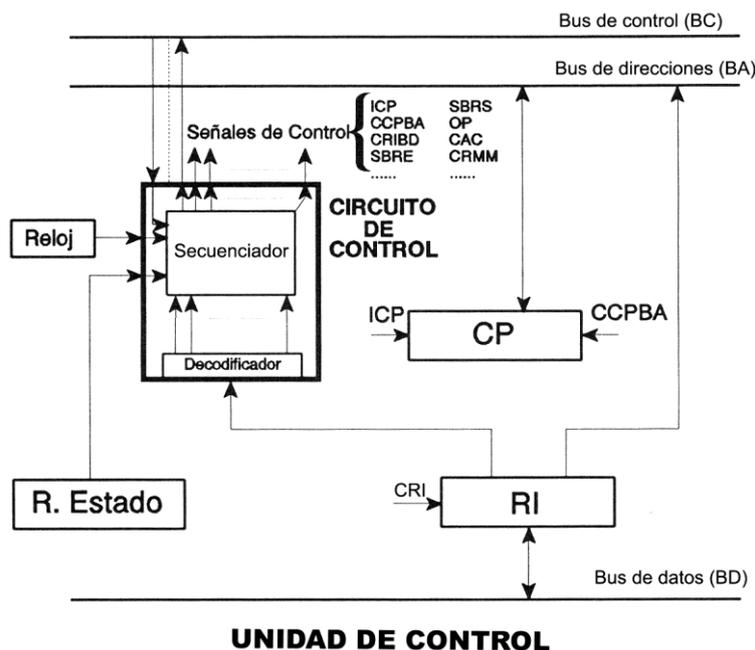
Así pues, una microinstrucción está compuesta de algunos campos que definen las señales de control, la dirección de la próxima microinstrucción y su temporización.

El campo de control especifica los valores de las señales de control durante la ejecución de la microinstrucción y está dividido en subcampos, cada uno de los cuales gobierna una microoperación cuando se ejecuta la microinstrucción. Por tanto, el número de microoperaciones concurrentes no puede ser mayor que el número de subcampos de control.

3.2.3 FUNCIONAMIENTO UC

La función de la Unidad de Control de un ordenador es la búsqueda de las instrucciones en memoria, su interpretación y la generación, en los instantes adecuados, de las señales de control necesarias para ejecutar la operación especificada por cada instrucción.

Más concretamente la ejecución de un programa consiste en la ejecución secuencial de sus instrucciones. Cada instrucción se ejecuta durante un ciclo de instrucción que está compuesto de subciclos más pequeños (búsqueda, direccionamiento indirecto, ejecución e interrupción). La realización de cada uno de estos subciclos implica una o más operaciones más pequeñas que son las microoperaciones.



A continuación, veremos de manera simplificada el funcionamiento de la UC:

El registro de instrucciones (RI) se encarga de almacenar la instrucción en curso, procedente de la unidad de memoria. Su entrada está conectada al Bus de Datos (BD) por el que recibe la instrucción correspondiente desde la memoria. La carga de este registro se gobierna mediante la señal CRI. Su salida, en cambio, se encuentra conectada a tres posibles destinos. Por un lado al circuito de control y por otro, al mismo BD al que se encuentra unido de forma bidireccional. Este enlace es necesario puesto que la instrucción en curso puede contener en el propio código el dato con el que ha de trabajar y, por

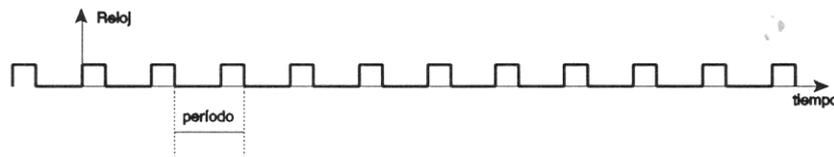
tanto, deberá encaminarse hacia los elementos adecuados a través del bus de datos.

Por último y dado que ciertas instrucciones pueden contener en su código no ya el dato sino la dirección en memoria del mismo, se precisa de un enlace del RI con el Bus de direcciones (BA) para encaminarla debidamente.

El registro contador de programa (CP) contiene en todo momento la dirección de memoria de la siguiente instrucción a ejecutar. Como sabemos, la ejecución de los programas almacenados en memoria se realiza fundamentalmente de forma secuencial. Esto significa que las instrucciones se ejecutan una detrás de otra, coincidiendo con el orden en que se encuentran almacenadas en la memoria. Para ejecutar la instrucción en curso, el CP ha de facilitar primero la dirección de memoria en que se encuentra, y por ello su salida se encuentra conectada al BA. Una vez que la memoria ha aceptado la dirección actual, el contenido del CP se incrementa por medio de la señal ICP, de modo que apunte a la siguiente instrucción. El CP se encuentra unido bidireccionalmente al citado bus de direcciones y esto es porque en ocasiones el CP recibe una nueva dirección a través del bus, utilizando para cargarla la señal CCPBA. Esto último ocurre, por ejemplo, cuando el programa sufre una bifurcación, o cuando se inicializa el valor del CP para ejecutar un nuevo programa que comienza en una dirección dada.

El Registro de Estado ya fue comentado al estudiar la UAL. Contiene información sobre el resultado de la operación anterior y de posibles situaciones anómalas o especiales tales como desbordamientos, interrupciones, errores de paridad, etc. En general, la información sobre el estado del ordenador se usa para hacer rupturas condicionadas de la secuencia normal del programa.

El *Reloj* aparece en todas las unidades de control de los ordenadores y es el encargado de que funcionen de forma síncrona. El Reloj es un circuito oscilador que genera autónomamente (es decir sin necesidad de ninguna entrada) una señal en forma de pulsos. La señal de reloj representa la temporización básica del sistema global, ya que determina el menor tiempo que puede durar una operación elemental. Se llama período a la duración del tiempo elemental entre dos pulsos consecutivos del reloj. Si en un ordenador el reloj tiene un periodo de 100 ns (nanosegundos) se dice que trabaja a 10 MHz (Megahertzios).



SEÑAL DE RELOJ

El elemento primordial de la unidad de control es un circuito específico denominado Circuito de Control (CC), verdadero artífice del funcionamiento global, ya que es el encargado de generar todas las señales de control que gobiernan el ordenador. La mayoría de estas señales se conectan directamente a las correspondientes señales de carga de registros, programación de la UAL, o selección de batería de registros (BR). También son responsabilidad del CC las señales de selección de los buses, así como ciertas señales destinadas a puntos fuera del entorno de la UCP, que se han de transferir a través del bus de control.

Las señales de control generadas constituyen las salidas del Circuito de Control, que son función exclusiva de sus entradas. La información de entrada con la que cuenta el CC para realizar su función es la siguiente:

- La instrucción en curso almacenada en el RI.
- El contenido del Registro de Estado.
- El reloj del sistema.
- Señales de control externas, normalmente de E/S, recibidas por el BC.

Internamente el CC contiene dos bloques que contribuyen especialmente a su funcionamiento:

- El *decodificador*. Realiza una decodificación o identificación de la instrucción codificada que se encuentra almacenada en el RI. Esto permite determinar de forma eficiente el conjunto de pasos elementales en que se descompone esa instrucción concreta. Cada salida del decodificador está asociada directamente con una instrucción y un modo de direccionamiento determinados, mientras que a su entrada esa misma información está codificada para ahorrar bits de memoria.
- El *secuenciador*. Se encarga de sacar y distribuir ordenadamente a los elementos del sistema las correspondientes señales de control. Una instrucción se ejecuta en general a lo largo de varios periodos de reloj, en cada uno de los cuales han de permanecer activas diferentes señales. Aún para una misma instrucción, la secuencia de activación puede ser ligeramente diferente si se verifica alguna condición reflejada en el estado del ordenador.

El *secuenciador* utiliza para cumplir sus objetivos la información del conjunto de pasos elementales suministrada por el decodificador y la relativa al estado, recogida en el Registro de Estado, además de la señal de temporización generada por el reloj.

4. CONCLUSIONES

La UCP es la encargada de ejecutar los programas almacenados en la memoria del ordenador además de controlar todo el funcionamiento del sistema. La ejecución de un programa consiste en la repetición cíclica de las fases de búsqueda (de instrucciones y datos) y ejecución de las instrucciones de los programas. La instrucción, que está codificada en binario, especifica el tipo de acción que tiene que llevar a cabo la UCP. La UCP interpreta la instrucción y ejecuta la acción indicada. Las funciones que realiza una UCP están definidas por su repertorio de instrucciones, que dan una medida de la potencialidad del procesador.

Los programas cada vez más grandes y complejos demandan mayor velocidad en el procesamiento de información, lo que implica la búsqueda de procesadores más rápidos y eficientes.

Esta búsqueda ha presentado preocupaciones sobre los límites de la tecnología de transistor del circuito integrado. La miniaturización extrema de puertas electrónicas está causando los efectos de fenómenos que se vuelven mucho más significativos, como la electromigración y el subumbral de pérdida. Estas nuevas preocupaciones están entre los muchos factores que hacen a los investigadores estudiar nuevos métodos de computación, como la computación cuántica, y ampliar el uso del paralelismo y de otros métodos que extienden la utilidad del modelo clásico de von Neumann.

En el tema nos hemos basado en el estudio de una UCP basada en la arquitectura de von Neumann, introduciéndonos en los componentes, la estructura y el funcionamiento de una UCP basada en esta arquitectura y que es la utilizada en la mayoría de los ordenadores digitales. Sin embargo, los avances y progresos en la tecnología de semiconductores, han reducido las diferencias entre las velocidades de procesamiento de los procesadores con las velocidades de las memorias, entre otros avances, lo que ha repercutido en nuevas tecnologías en el desarrollo de procesadores, y que en un futuro podrían cambiar la forma y el diseño de los mismos. Existen, además, otras arquitecturas utilizadas en sistemas digitales específicos y que no han sido tratadas en este tema.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Fundamentos de los Ordenadores. Miguel, P. de. Ed. Paraninfo
- Arquitectura de Ordenadores. Rafiquzzaman, M. Ed. Anaya
- Estructura y Tecnología de Computadores II. Sebastián Dormido
- Circuitos y Sistemas Digitales. García Sánchez, J.E. Ed. Tebar Flores
- Estructura y Tecnología de Computadores I. Carlos Cerrada Ed. UNED

NOTAS