SISTEMAS DIGITALES

ESTRUCTURA: *Definiciones*

Un Sistema Digital es aquel que recibe información de tipo discreta, la procesa convenientemente y luego la transmite de acuerdo a lo establecido.

Antes de iniciar la etapa de diseño, realizaremos una serie de definiciones, con el objeto de uniformizar la nomenclatura a utilizar en tal proceso.

- **Variable Digital:** Es todo elemento, que toma solamente valores discretos bien especificados, para diferenciarlo de una variable continua.

- **Variable Binaria:** Es una variable digital que toma solamente 2 valores. Por lo general indicado en sistema de numeración binario, por lo tanto dichos valores son 0 y 1.
  Las indicaremos con letras minúsculas: a, b, x, y, etc.

- **Función Digital:** Es toda relación algebraica entre variables binarias a través de las operaciones especificadas por el Álgebra de Boole; es decir suma, producto e inversión lógica. La representación gráfica se realiza a través de un diagrama en blocks dónde ingresan por un extremo las variables y por otro se obtienen tales funciones.

Ejemplo: f(z,y,x) = Función del Álgebra de Boole.

$$\alpha\,(z,y,x) = x\,.\,y.[\overline{(}x.z + \overline{y.z) + x}.y.z]$$

$$\beta\,(z,y,x) = x\cdot z\,\overline{+}\,[x + \overline{y} + z\cdot x\cdot(\overline{x\cdot y} + z\,) + x\cdot z\,]$$

- **Diagrama en Bloks:** Representa al sistema digital por medio de un esquema, en el cual se colocan en el extremo izquierdo ***las entradas*** con flechas ingresando al block que representa al circuito propiamente dicho, y luego flechas que salen e indican ***las salidas***

- **Vector Digital:** Se denomina así a un conjunto de variables digitales que cumplen con el mismo propósito. *Por ejemplo* al conjunto de variables de entrada se lo llama *Vector de Entrada.* Las variables ó funciones que especifican un Vector determinado pueden ser acertadas ó negadas. Del mismo modo que lo enunciado por la Matemática Vectorial, estos vectores tendrán 3 propiedades:

MODULO - DIRECCION - SENTIDO

1. **MODULO:** Es la cantidad específica de variables ó funciones, que posee un vector determinado.
   Por ejemplo: α (z,y,x) es un vector formado por 3 variables digitales, entonces se dice que tiene módulo [3] y su notación es

   $$\alpha\,[3] = [z,y,x]$$

2. **DIRECCION:** Es el valor específico que toma el vector en un instante definido.
   Se conoce también con el nombre de nivel del vector.

   Por ejemplo:

   $$\underset{t_0}{\alpha\,[3]} = \underset{t_0}{[z,y,x]} = [\,001\,]_2$$

   Por ello se dice que en el instante t_0 la dirección del vector α(z,y,x) es $[001]_2$.
   En general esta notación se realiza en el sistema de numeración binario; pero en algunos ambientes de trabajo se suele usar octal ó hexadecimal. Por lo tanto debe aclararse que sistema numérico se está usando en cada caso.

3. **SENTIDO:** Todo vector digital puede tener dos sentidos, positivo ó negativo.
   Para la especificación del sentido existen dos convenios:

   a) Signo y Valor absoluto.
   b) Signo y Complemento.

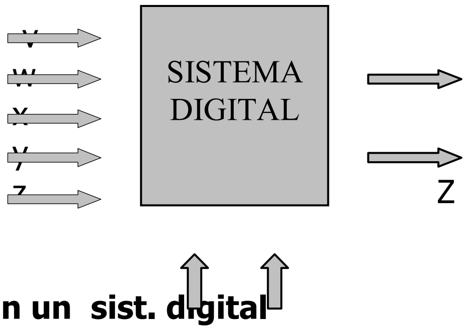
Nota: Este punto se desarrollará luego más extensamente.

- **Identificador Vectorial:** Se define como el conjunto de Vectores más importantes de un Sistema Digital, ó aquellos vectores que se usan para describir el funcionamiento del mismo. En otras palabras, son los vectores que identifican al mencionado sistema digital, P*or ejemplo*: Vector de entrada y vector de salida (ver figura 3).
  Existen por lo tanto dos tipos de vectores:

  1. **Vectores independientes:** Son aquellos conformados por variables del sistema, es decir, por elementos digitales que pueden tomar valores arbitrarios; por supuesto dentro de las especificaciones del mismo.
     Por ejemplo: el vector de entrada, es de éste tipo.

  2. **Vectores Funcionales:** Son aquellos formados por funciones digitales, es decir por relaciones algebraicas entre variables independientes, de tal manera que sus variaciones dependerán de ellas y del sistema digital.
     Por ejemplo el vector de Salida.

Ejemplo:



α(z, y, x,w,v)

β(z,y ,x,w,v)

Fig. Nº 3: Vectores que identifican un sist. digital

ϕ1 ϕ2

Tenemos entonces:	Vector de entrada	Ve (z,y,x,w,v)
	Vector de salida	Vs (α,β)
	Vector de temporización	Vϕ (ϕ1, ϕ2)

Identificador Vectorial: Ve / Vϕ / Vs ó [z,y,x,w,v]/[ϕ1,ϕ2]/[β,α]

Ve, Vϕ = Vectores independientes.
Vs = Vector dependiente ó funcional.

- **Estado de un sistema Digital:** Es el valor numérico que toma el Identificador Vectorial, en un instante t_i. En otras palabras, estado es el conjunto de direcciones que identifican un Sistema Digital en un instante determinado. Podemos considerar entonces, que si en un instante específico, extraemos una muestra de las direcciones de los principales vectores puestos en juego en un sistema digital, obtenemos el estado ó estatus del mismo.

A cada estado se lo identifica a través de una letra mayúscula con un subíndice, dentro de una circunferencia y externamente el valor específico del Identificador Vectorial; es decir del estado, con los valores numéricos de todos los vectores.

Por ejemplo

para Identificador Vectorial IV

$V\alpha$ / $V\beta$ / $V\delta$

podemos tener el siguiente estado E1

[00110] / [00] / [011]

<u>Un **estado**</u> cualquiera se produce través del siguiente mecanismo: Evidentemente, lo primero en establecerse será la dirección de los vectores independientes, y luego en función de las relaciones algebraicas establecidas, se obtendrán direcciones de los vectores funcionales.

Por ejemplo, si tenemos el siguiente diagrama:

Vector Entrada

a
b
c
d

α (d,c,b,a) Vector Salida

β (d,c,b,a)

Ve(d,c,b,a)
Vs(α,β)

Identificador Vectorial:

IV
Ve / Vs ó [d,c,b,a] / [β,α]

Con las siguientes relaciones algebraicas:

$$\alpha\,(d,c,b,a) = c\cdot b + d\cdot a\cdot(c\cdot a + d\cdot b)$$

$$\beta\,(d,c,b,a) = \bar{d}\cdot[a + (\overline{c\cdot d} + \bar{b}\cdot a)\cdot c\cdot b]$$

y se establece para un estado E_1 la sig. dirección del vector independiente Ve [0011], obteniéndose los vectores funcionales:

α (d,c,b,a) = 0
β (d,c,b,a) = 1

Entonces la representación de dicho estado E1 ser:

E_1 [0011] / [01]

- **Transición entre estados**: Por lo enunciado anteriormente, podemos decir que mientras se mantengan las características propias de un estado, en especial su dirección; el sistema digital permanecerá en el mismo. Pero cuando se produzca una modificación de la dirección ó sentido de algún vector (externo ó interno); el sistema evolucionará a un nuevo estado, al cual tendrá su propia identidad, así tenemos en el ejemplo anterior, que si varía el vector de entrada a un nuevo valor, las direcciones de los vectores α y β se modificarán para originar un nuevo estado E2.

Lo indicado respecto de la transición de estados, se puede apreciar en el siguiente gráfico, llamado también " grafo de transición":

[0011] / [01] [1011] / [11]

La transición entre estados puede llevarse a cabo a través de dos posibilidades concretas:

a) Por el establecimiento de una dirección determinada ó
b) Por el cambio de dirección en algún vector

Luego, cuando se analize el funcionamiento de un sistema en particular, se considerarán las transiciones necesarias y posibles para que sea factible el mismo; De tal manera que podrá graficarse a través de un diagrama de estados. Esto se analizará con más detalle en los próximos items.

Luego de esta serie de definiciones estamos preparados para el análisis y diseño de un sistema digital. Comenzaremos a continuación analizando los lineamientos generales, para luego desarrollar algunos ejemplos.

***** * *****

DISEÑO DE SISTEMAS DIGITALES

1 - CONOCIMIENTO DEL SISTEMA:

Esta etapa consiste en el análisis y determinación básica de los objetivos a cumplir por el mismo, ya sea requerido por un tercero ó por nuestra propia necesidad. Las necesidades pueden ser presentadas de 3 formas diferentes, a saber:

a) ***Requerimientos Verbales.***
b) ***Diagramas Temporales.***
c) ***Ecuaciones Lógicas ó Aritméticas***.

Comenzaremos a analizar cada una de ellas.

a) Requerimientos Verbales:

Es la forma más común de presentar las necesidades de diseño; en especial si se trata de la solicitud realizada por un tercero. Es decir que el solicitante de un sistema digital, por lo general, establece necesidades y pautas a través del conocimiento empírico del sistema a realizar. En este caso, es menester establecer fehacientemente el ***OBJETIVO*** del problema a resolver, y si se pretende ó sugiere algún camino de resolución.

Comúnmente, dicha información subjetiva, estará complementada por pautas bien definidas y objetivas, establecidas por requerimientos externos del sistema, como ser leyes físicas, químicas, mecánicas, etc., y el ambiente en el cual estará inmerso el mismo.

Para simplificar los pasos sucesivos, conviene realizar una tabla con las tareas a realizar. Esta tabla, llamada ***Tabla de Requerimientos y Objetivos (TRO)***, tendrá una fila para cada tarea a realizar, dónde se especificará claramente, Nombre Funcional de la Tarea, Requerimientos a cumplimentar en cada caso y Objetivos de la misma; ya sean parciales ó totales. Dicha tabla será realizada a gusto y proceder del diseñador, pero al menos debe cubrir lo mostrado en el diagrama precedente, de la siguiente forma:

TAREA		**OBJETIVO**	**DESCRIPCIÓN FUNCIONAMIENTO**
N°	**NOMBRE FUNCIONAL**		

1 2 - n	Tarea #1 Tarea #2 .... Tarea #n etc.	Objetivo #1 Objetivo #2 . ... Objetivo #n etc	Funcionamiento 1 .... Funcionamiento 2 .... Funcionamiento .... etc.

Ejemplo:

Supongamos que deseamos diseñar un " lavarropas automático", por lo cual la tabla antes citada contendrá aproximadamente:

TAREA			
N°	**NOMBRE FUNCIONAL**	**OBJETIVO**	**DESCRIPCIÓN FUNCIONAMIENTO**
1	Encendido	Inicio trabajo	Posibilitar funcionamiento de los elementos componentes del sistema: hidráulicos, electromecánicos, electrónicos, etc.
2	Estado de reposo	Espera función	Revisión del estado de reposo ó de inoperabilidad: • Válvulas cerradas. • Motores detenidos • ¿Nivel de agua en tambor? • ¿Puerta carga cerrada? • etc.,........ etc.
3	Determinación Programa	Forma Lavado	Programación especifica
4	Etc., etc.	....	....

Continúa con el análisis y descripción del sistema

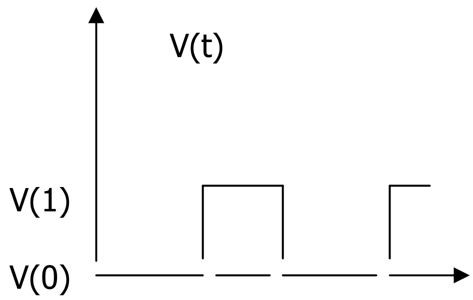
De esta manera se busca implementar las pautas básicas de funcionamiento, que originará un desarrollo claro y objetivo del sistema digital a diseñar. Mientras mejor definido sea realizado este proceso, más completo será el mismo. También es necesario recordar que en este análisis siempre faltarán algunas especificaciones, otras se fusionarán ó modificarán convenientemente y algunas deberán ser desechadas; pero lo importante es obtener un punto de partida lo más organizado y completo que sea posible. De lo mencionado, se debe sacar en claro que es necesario estar atentos y proclives a realizar las modificaciones adecuadas.

b) Diagramas Temporales:

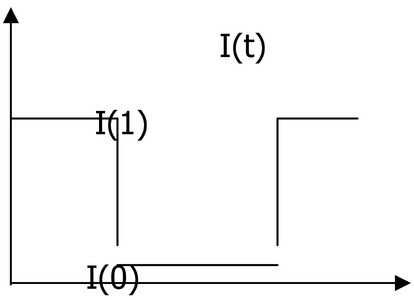
Un diagrama temporal, es la representación gráfica de una función respecto del tiempo. Por lo general se trata de la representación de algún parámetro físico. En nuestro caso, ese parámetro es por lo general de índole eléctrico, así por ejemplo:

Tensión $V = V_{(t)}$; Corriente $I = f_{(t)}$; Potencia $P = f_{(t)}$

que representado en un sistema de ejes coordenados, cuya ordenada sea dicha función y la absisa el eje temporal:



t



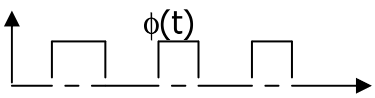
t

Por lo tanto, para el diseño de sistemas digitales, éste es un proceso dónde se conoce fehacientemente el diagrama de tiempo del sistema que se pretende diseñar. Es decir, la variación digital en el tiempo del identificador vectorial. Este es un caso común para el diseño de partes circuitales, dónde se tiene un acabado conocimiento de la forma de onda del sistema que se desea diseñar, y su relación con las de otros circuitos ó subsistemas asociados.

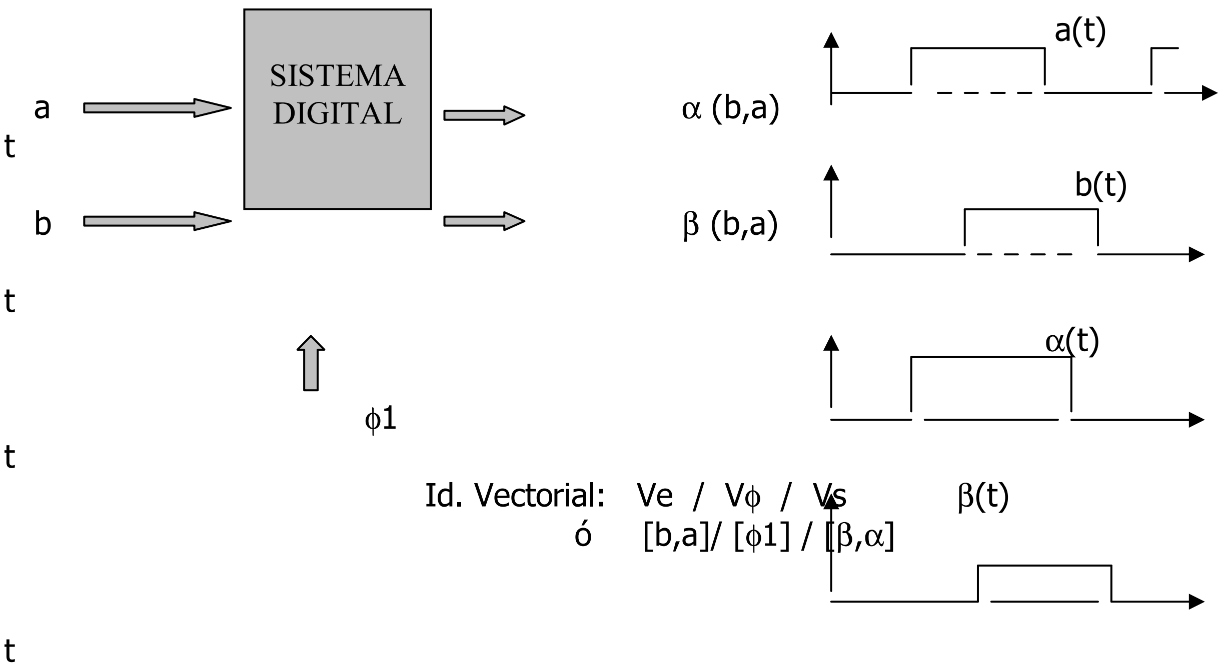
Como ocurre en la mayoría de los casos; cuando tales vectores son muchos, se agrupan los gráficos en forma vertical, haciendo coincidir el origen del sistema de coordenadas y tratando de usar en todos la misma escala. De tal manera que se pueda realizar una evaluación comparativa del Identificador Vectorial en su conjunto.

Ejemplo:

Si tenemos el siguiente Sistema Digital:
el cual posee 2 entradas y dos salidas



t



Id. Vectorial: Ve / Vϕ / Vs
ó [b,a]/ [ϕ1] / [β,α]

De esta forma tenemos representada toda la información que volcamos al sistema digital y la que deseamos obtener, con el objetivo de lograr un diseño acorde a las necesidades.

c) Ecuaciones Lógicas ó Aritméticas:

Se presentan para el comienzo del diseño las expresiones algebraicas con las que hay que cumplir. Estas pueden ser lógicas, aritméticas ó de cualquier otro tipo. Por ejemplo, podemos establecer el diseño de un sistema que cumpla con las siguientes funciones lógicas:

$$\alpha\,(x,y,z) = \overline{x.y + x} + z.y$$

$$\beta\,(x,y,z) = \overline{x.z} + [\bar{x}.y + \overline{z.x}.\overline{(x.y + x.z)} + x.y]$$

De esta manera partimos conociendo exactamente los vectores puestos en juego y el identificador vectorial, con lo cual el diseño ser muy sencillo. Evidentemente es la forma más sencilla y precisa de especificar las necesidades a cumplimentar por un sistema digital. Por supuesto que además de las ecuaciones, se pueden especificar algún tipo de restricciones o necesidades especiales para los vectores con los que se trabajará.

2-DETERMINACION DE VARIABLES Y VECTORES:

Podemos dividir este punto en dos tipos de determinaciones a realizar:

a) Definición de variables, Vectores e Identificador Vectorial.
b) Características lógicas, funcionales y tecnológicas de los vectores.

a) Definición*: - Variables, Vectores, Identificador Vectorial -*

Establecidas las necesidades de diseño de un sistema digital, pueden ocurrir con los datos dos cosas:

1) Datos perfectamente definidos: En este caso se cuenta para el diseño con el conocimiento lógico y tecnológico de las variables, vectores e identificador vectorial. Esto ocurre por lo general cuando los requerimientos de diseño se presentan en forma de diagramas temporales ó ecuaciones lógicas.

2) Datos parcialmente definidos ó indefinidos: Ocurre cuando los requerimientos son verbales, y por lo general no existe una definición explícita de las variables, y por ende de los vectores del sistema.
Por lo tanto es necesario analizar con detenimiento las pautas indicadas con el objeto de despejar las variables y funciones que se pondrán en juego en el proceso de diseño. En líneas generales, los requerimientos verbales piden el cumplimiento de ciertas pautas funcionales para obtener los resultados buscados (Funciones, Vector de Salida). Así el diseñador debe retrotraer su atención para determinar exactamente cuales son las variables, es decir el vector de entrada necesario para cumplir con tales objetivos.

El siguiente gráfico indica como es el procedimiento:

OBJETIVO → FUNCIONAMIENTO → VECTOR SALIDA

Y luego el proceso inverso:

VECTOR SALIDA → FUNCIONAMIENTO → VECTORENTRADA

A veces, es necesario realizar varios intentos hasta determinar claramente cuales son estos parámetros. Inclusive, en algunas oportunidades, es necesario analizar el proceso buscando nuevos detalles de funcionamiento del sistema. Así de este modo ampliar el conocimiento integral del problema y redefinir, si es necesario, los vectores del sistema. Inclusive hasta podemos encontrar la posibilidad de establecer algún nuevo vector, como: temporización, estado interno, señalización, etc. Una vez determinado los vectores, es decir el identificador vectorial del sistema, es conveniente trazar un diagrama en blocks con ellos:

<u>*Por ejemplo*</u>: A partir de un problema determinado identificamos los sig. vectores.

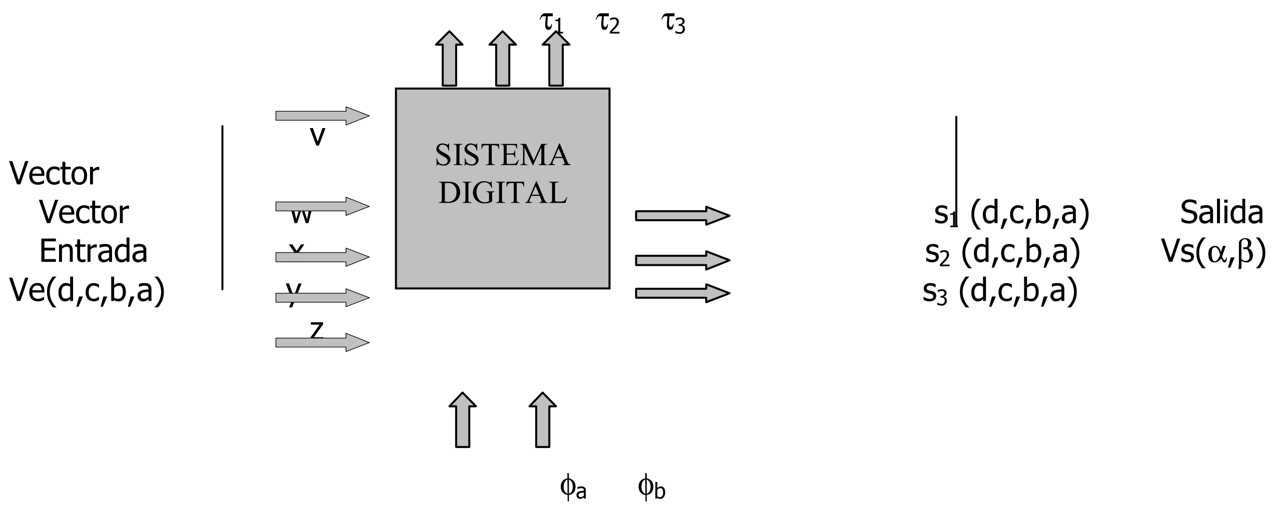
Ve: Vector de Entrada cuyas variables son d,c,b,a ε Ve (d,c,b,a)
Vϕ: Vector de Temporización cuyas variables son ϕa,ϕb ε Vϕ (ϕa, ϕb)
Vτ: Vector de Señalización cuyas variables son c_1, ς_2, ς_3 ε Vτ (τ_1, τ_2, τ_3)

Vs: Vector de Salida cuyas variables son s_1, s_2, s_3 ε Vs (s_1,s_2,s_3)

De lo enunciado tenemos:

Identificador Vectorial: Ve / Vϕ / Vτ / Vs

Vector de Señalización



Vector Temporización Vϕ (ϕa, ϕb)

De esta manera tenemos perfectamente definidos digitalmente los vectores que forman parte del sistema.

b) Característica de los vectores: - Lógica, Funcional, Tecnológica -

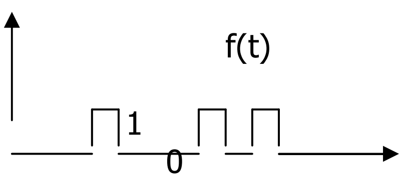
Una vez definidos los vectores, es necesario conocer el estado lógico, tecnológico y funcional de los mismos. Para realizar este análisis debemos indicar que toda variable digital tiene dos estados perfectamente diferenciados, de los cuales tenemos:

- **Estado de Reposo**: Es aquel en el que se encuentra la variable cuando el sistema está desactivado, ó en el cual permanece la mayor parte del tiempo.

- **Estado de excitación:** Es el estado al cual pasan las variables cuando se excita.

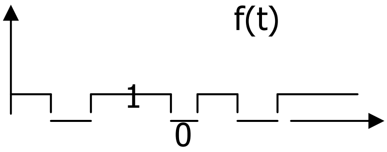
En ambos casos pueden ser cero (0) ó uno (1), por ejemplo:

1) Estado de reposo = 0
Estado de excitación = 1



t

2) Estado de reposo = 1
Estado de excitación = 0



t

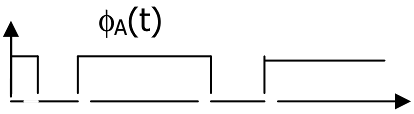
Por lo general, el tipo de excitación está determinado por parámetros externos.

Lo podemos verificar en el siguiente *ejemplo, de acuerdo al vector de que se trate.*

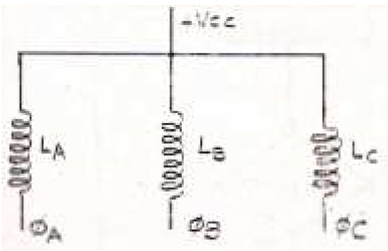
a) Vector de Salida: Depende del elemento a excitar, y en cada caso, de su estado de reposo natural; que por supuesto normalmente es función de algún otro parámetro, por ejemplo:

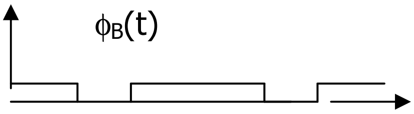
- **Elemento a Excitar:** Motor Paso a Paso.
- **Conexionado:** Tres bobinados con un punto común conectado a Vcc y el otro extremo de cada bobina es excitado adecuadamente.
- **Excitación:** Circulación de corriente, lo cual se logra colocando a masa, ó sea a 0 Volt el extremo de fase de cada bobina.

Es decir, que el estado de reposo corresponde a no circulación de corriente, para ello es necesario mantener en valor alto (1) el extremo de dicho bobinado y luego para excitarlo se debe bajar a cero (0) con el objeto de lograr circulación de corriente.



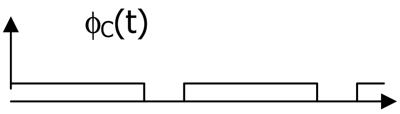
t





t

•

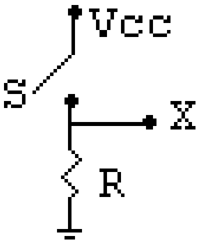


t

b) Vector de Entrada: Con la excitación externa de un sistema digital ocurre lo mismo que para el caso anterior, todo depende del dispositivo y conexionado a partir del cual se obtendrá la señal digital. Así tendremos casos en que el estado de reposo es cero y en aquellos que es uno.

Por ejemplo: supongamos un sensor determinado, que por detalles funcionales tenga el siguiente conexionado (en el gráfico se está simulando con una llave).

a)

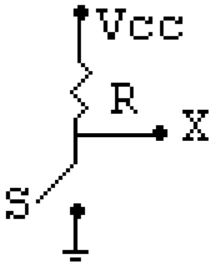


Evidentemente el valor de Xi será:

Reposo = 0
Excitado = 1

O el caso contrario:

b)



Acá el valor de Xi será:

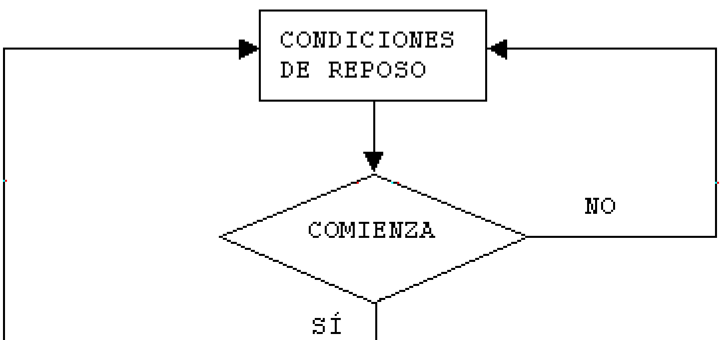
Reposo = 1
Excitado = 0

Conviene que todas las variables o funciones que conforman un vector estén definidas de igual forma.

3-ANALISIS DE FUNCIONAMIENTO:

Esta es la etapa más importante del desarrollo de nuestro proyecto, pues es aquí dónde se determina el funcionamiento lógico del futuro sistema digital. Cualquier error de conocimiento y/o análisis funcional cometido en este paso, será insalvable por etapas técnicas posteriores; y requerirá de un rediseño del mismo.

Se puede comenzar realizando un diagrama de flujo, dónde se muestren las necesidades funcionales normales del sistema. Llamamos normales a los detalles enunciados y analizados en las etapas anteriores. Existiendo, luego la posibilidad de realizar las innovaciones adecuadas. Se lo conoce como Diagrama de Flujo de Funcionamiento, en el cual además se deberán considerar los flujos anormales, señalización, errores, etc.; y cuyos lineamientos generales se establecen en el siguiente diagrama:



Una vez conocido el flujo funcional del sistema, que establece los lineamientos elementales y externos del mismo, se realizará un análisis más cercano al circuito digital propiamente dicho; lo cual se ejecuta a través de un diagrama que va analizando estado a estado que deberá cumplimentarse para lograr los objetivos buscados. Esto se realiza a través del llamado *Diagrama Funcional de Estados*, ó simplemente *Diagrama de estados,* cuya realización y características analizaremos a continuación.

Diagrama Funcional de Estados:

Este Diagrama se caracteriza por un análisis detallado de las variaciones numéricas del Identificador Vectorial; es decir de la consideración de los diferentes estados por los que transitará sucesivamente el sistema digital buscado.

Método para realizarlo:

Como primera medida se deben realizar y considerar:

- Diagrama de flujo de funcionamiento.
- Tabla de Requerimientos y Objetivos.
- Diagramas de Tiempo y/o ecuaciones lógico-aritméticas.
- Características lógicas y tecnológicas de los vectores establecidos.

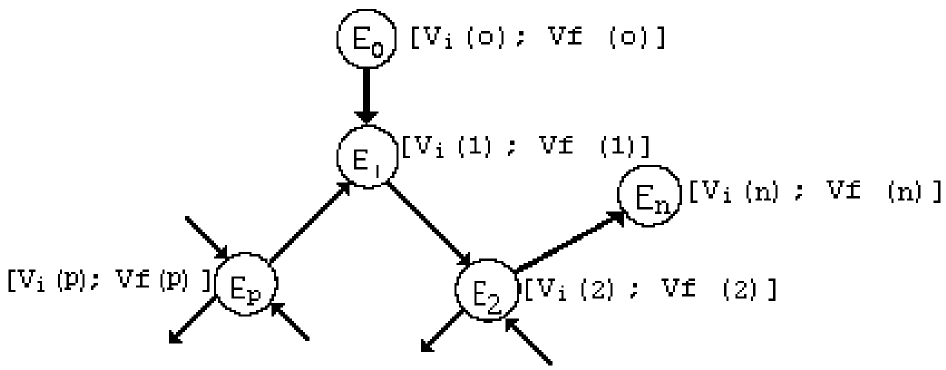
Luego:

1. Se traza un diagrama, dónde se van produciendo las variaciones adecuadas de los vectores independientes.
2. A partir del paso anterior se obtienen los resultados específicos en los vectores funcionales.

El procedimiento indicado se efectúa paso a paso, de acuerdo a los requerimientos funcionales del sistema en desarrollo. Se parte de un estado de reposo, lo cual fija valores para el identificador vectorial propios del mismo. A partir de allí, se realiza el diagrama para el flujo normal y requerido de nuestro sistema. Se establece en primer lugar las transiciones a nuevos estados por variación del ó los vectores independientes, y determinando lo que se espera ó necesita de los vectores funcionales, como se aprecia a continuación:

Supongamos tener un **I**dentificador **V**ectorial [V_i / V_f]. Con Vectores independientes $V_i(n)$ y vectores funcionales $V_f(n)$.

1. Al estado de reposo inicial le llamaremos E_0, con [Vi(0)/Vf(0)].
2. Si cambiamos el vector independiente a Vi(1), obtendremos Vf(1); de acuerdo a las pautas funcionales establecidas.
3. Así variando sucesivamente Vi obtendremos los correspondientes Vf, y de esta forma se logra establecer un diagrama que representa detalladamente el funcionamiento del Sistema Digital en proyecto; como puede observarse en la siguiente figura:



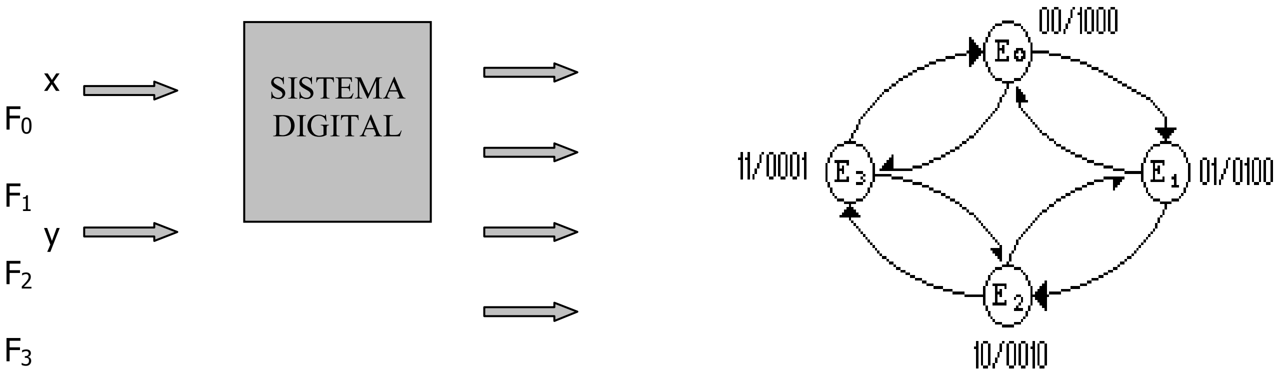
Observando la figura anterior, se puede inferir que habrá dos tipos de Diagramas de Funcionamiento, bien diferenciados:

1. ***Diagramas definidos:*** Son aquellos en los cuales cada estado queda unívocamente determinado por el valor de las direcciones de los vectores que componen el identificador vectorial, es decir que no se repiten estados para los vectores independientes.

2. ***Diagramas indefinidos:*** Son aquellos para los cuales cada estado no solo depende del valor de las direcciones específicas, sino también de los otros estados del mismo diagrama, es decir que debe recordar el camino transitado para saber lo que debe hacer.

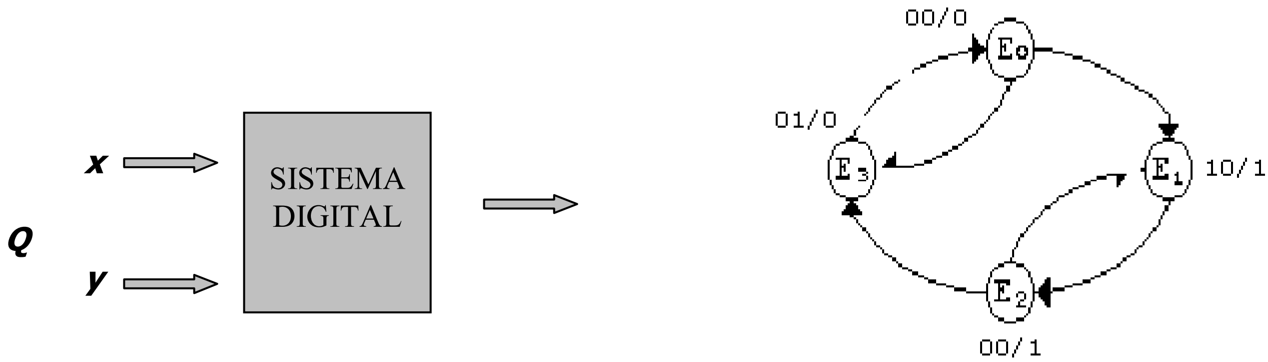
Veamos los siguientes ejemplos para aclarar el concepto:

A_1) Identificador Vectorial [Ve/Vs] Ve = Vector de Entrada [y,x]
Vs = Vector de Salida [F_0, F_1, F_2, F_3]



Vemos que para cada vector de entrada existe un único estado, por ello si especificamos una dirección para Ve, tal como [0,0], tenemos definido el estado E_0, con Vs [0001] y no existe posibilidad de discrepancia.

A_2) Identificador Vectorial [Ve/Vs] Ve = Vector de Entrada [y,x]
Vs = Vector de Salida [Q]



Sin embargo en este sistema, todos los vectores de entradas no definen un único estado, sino que existen casos como para Ve [0,0] en los cuales no se puede saber si nos encontramos en el estado E_0 [00 / 0] ó en E_2 [00/1], sino damos alguna información extra, como ser cual fue el estado anterior y cual puede ser el posterior; es decir, hablamos de la historia del sistema.

Por lo enunciado en los párrafos anteriores, estas diferencias fundamentales en el funcionamiento, origina dos grandes tipos de Sistemas Digitales:

1) **Sistemas Digitales Combinacionales:** Son aquellos sistemas digitales dónde las funciones de salida quedan perfectamente definidas por la combinación de las variables de entrada; ó dicho en forma más general, dada la dirección de los vectores independientes se explicita un único estado en el diagrama de funcionamiento. De esta manera la posible cantidad de estados es finita, pues tendremos como máximo 2^n, dónde n son las variables independientes. Mostrado en el primer ejemplo anterior.

2) **Sistemas Digitales Secuenciales:** Son aquellos sistemas dónde cada estado no queda definido solamente por el valor de los vectores, sino que además depende de la secuencia que ha seguido el funcionamiento del mismo; tal como lo muestra el segundo ejemplo mostrado anteriormente.

Es decir, teniendo un identificador vectorial determinado, habrá algunos casos en los cuales la definición de los vectores independientes no será condición suficiente para determinar específicamente en que estado se encuentra el sistema, sino que será necesario definir un nuevo vector para obtener esta posible identificación.

Por supuesto, que los dos tipos de sistemas indicados, tienen caminos de diseño totalmente diferentes; es por esto, que a partir de aquí el proceso técnico de desarrollo se divide en dos ramas.

Si a través del Diagrama de Estados no queda muy claro de que tipo de sistema estamos diseñando; se puede realizar una Tabla de Funcionamiento provisoria para esclarecer la identidad funcional del mismo, la cual se realiza de la siguiente forma:

Tabla de Funcionamiento: Se realiza una tabla con tres columnas:

1° Columna: Vectores Independientes.

2° Columna: Vectores Funcionales.

3° Columna: Estados de funcionamiento.

Por supuesto, que cada columna tendrá las subdivisiones necesarias para colocar los diferentes vectores, y dentro de ellos las variables que lo conforman.

Luego se van colocando las direcciones de los vectores independientes, con los valores de las funciones que le corresponden, y junto a ellos el estado al cual está asignado. Es decir, se transcribe en una tabla, el diagrama de estados realizado anteriormente, pero en sentido inverso; tal cual se observa en el siguiente esquema. Posteriormente lo aplicaremos a los ejemplos anteriores.

Construcción de la tabla de funcionamiento:

Vectores Independientes	Vectores Funcionales	Estados E_i
Dirección ------>	Dirección --->	En
Dirección ------>	Dirección --->	En + 1
Dirección ------>	Dirección --->	En
etc.	etc.	

Realizemos la tabla de funcionamiento de los ejemplos vistos:

Ejemplo A1

Vector Entrada	Vector Salida	Estados
y *x*	F_0 F_1 F_2 F_3	E_i
0 0	1 0 0 0	E_0
0 1	0 1 0 0	E_1
1 0	0 0 1 0	E_2
1 1	0 0 0 1	E_3

Como vemos en la tabla anterior, para el caso de Sistemas Digitales Combinacionales la tabla queda perfectamente explicitada; es decir, para cada Vector independiente existe un único vector de salida y por ende un solo estado.

Ejemplo A2

Vector Entrada	Vector Salida	Estados

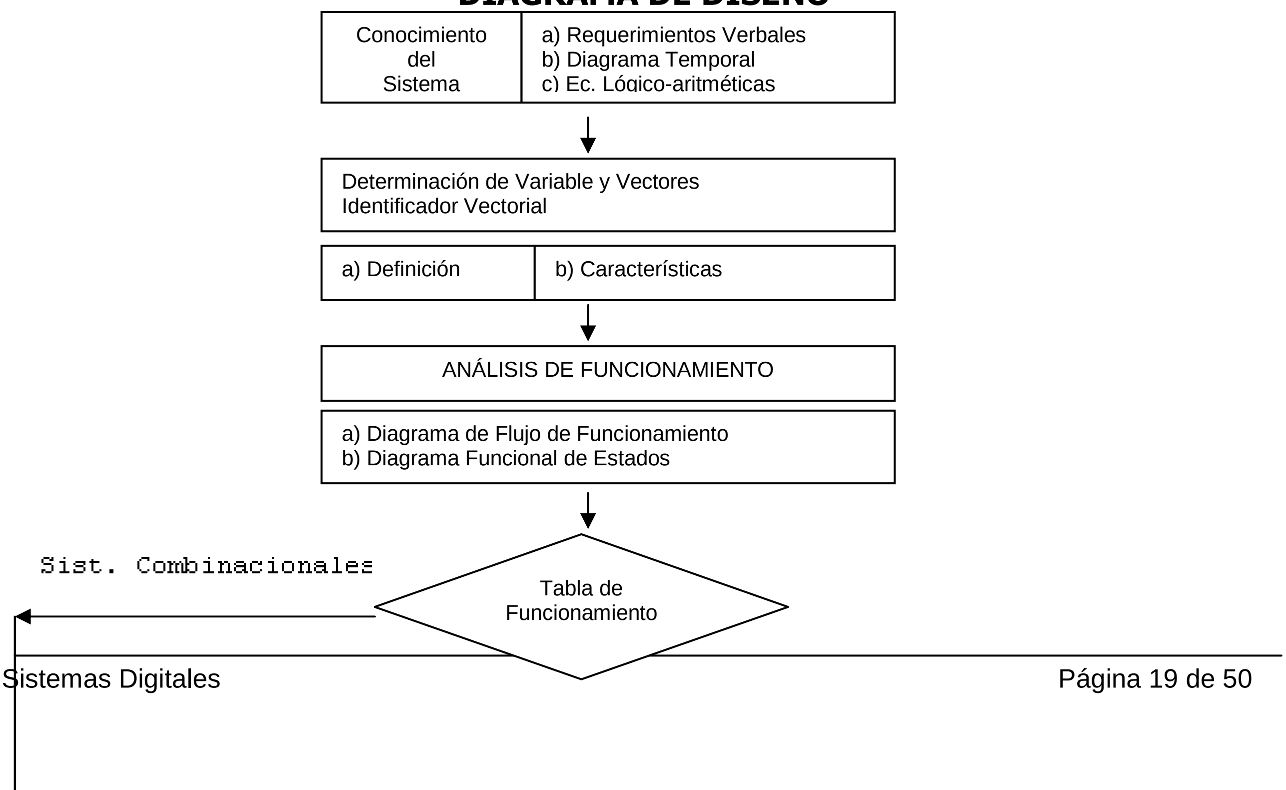
y *x*	Q	E_i
0 0	?	$?_0$
0 1	1	E_1
1 0	0	E_2
1 1	X	X

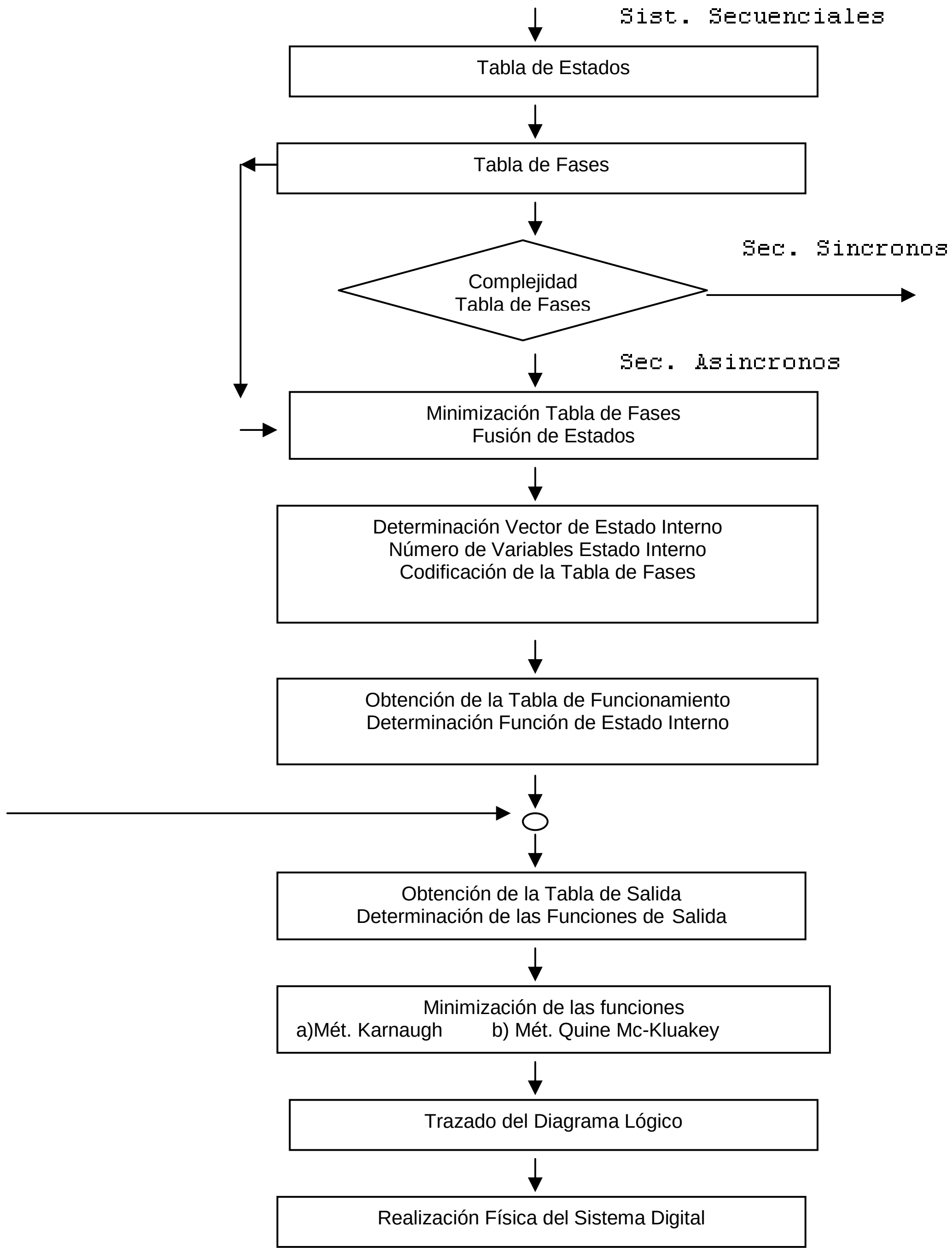
Vemos que la tabla de un Sistema Digital Secuencial no se puede completar como en el caso anterior, pues los estados no quedan perfectamente definidos en una línea. Es decir, la dirección de los vectores no identifican unívocamente cada estado y por lo tanto este tipo de construcción es irrealizable. Sin embargo nos sirve para tomar el camino apropiado de su diseño. De acuerdo a lo visto, ya tenemos perfectamente diferenciados los dos grandes tipos de sistemas digitales y por lo tanto analizaremos la forma de diseñar cada uno de ellos.

En primer lugar veremos el diseño de los sistemas combinacionales, hasta el punto que la realización se hace común a ambos desarrollos, para luego seguir con la descripción y análisis de las etapas de diseño de un sistema secuencial. Terminando, como se mencionó oportunamente, con la implementación lógico-circuital, que es idéntica para ambos tipos de sistemas.

Las etapas sucesivas a realizar en el diseño de un sistema digital; sea éste Combinacional ó Secuencial están indicadas en la hoja siguiente a través de un diagrama resumido, que muestra todos los pasos que estamos desarrollando.

DIAGRAMA DE DISEÑO





SISTEMAS COMBINACIONALES

Para realizar el diseño de este tipo de sistemas, los pasos a seguir son relativamente sencillos y en general bastante conocidos, de acuerdo a la siguiente descripción:

La tabla de funcionamiento realizada en la etapa anterior, conocida también como Tabla de la Verdad, es utilizable para continuar con el proceso de diseño; es decir que el proceso de desarrollo continúa a través de los siguientes pasos.

9-Obtención de los Vectores Funcionales: A partir de la tabla de funcionamiento se obtienen las correspondientes funciones algebraicas de los vectores independientes. Es decir se puede obtener la función sumatoria ó productoria, según la conveniencia y/o necesidad.

De acuerdo a la teoría básica del Álgebra de Boole, de esta tabla se obtiene directamente la función sumatoria, pues ella valdrá 1 cada vez que uno de los vectores independientes especificados sea válido. La función productoria puede desarrollarse por medio del uso de los ceros de la tabla de Verdad ó utilizando la ecuación que vincula ambos tipos de operatorias.

Vector Entrada **d c b a**	**Vector Salida** **... Fn ... F1**	**Estados** **E_i**
... 0 0 0 0	... 0 ... 1	E0
... 0 0 0 1	... 1 ... 1	E1
... 0 0 1 0	... 0 ... 0	E2
... 0 0 1 1	... 1 ... 1	E3
... .	... .	...
... x x x x	... x ... x	En
... .	... .	...
... .	... .	...
... .	... .	...

Obtendremos de acuerdo al Algebra de Boole: $F_1(...d,c,b,a) = \Sigma\ (0,1,3,\ ...)$

$$F_n\ (...d,c,b,a) = \Sigma\ (\ .....\ )$$

luego obtendremos la función productoria de acuerdo a la siguiente igualdad:

$$f\ (...\ d,c,b,a) = \Sigma\ i\ .\ f(i) = \Pi\ [\ i + f(2^n-1-i)\ ]$$

A partir de aquí los pasos a seguir son conocidos, se detallan a continuación y serán desarrollados convenientemente para el caso de Sistema Secuenciales:

10) Minimización de los Vectores Funcionales.

11) Realización física de las Funciones Digitales.

SISTEMAS SECUENCIALES

Los pasos de diseño ha seguir ahora, son un poco más complejos que lo señalado para los sistemas combinacionales, pero igualmente resolubles. El punto de ruptura es la tabla de funcionamiento, y esto ocurre porque en este caso no tenemos la mencionada tabla unívocamente definida, sino que existen estados en los cuales hay indefinición de algún vector del sistema.

Para resolver este problema, se debe seguir con la siguiente secuencia:

4 - Realización de la Tabla de Estados.
5 - Tabla de Fases.
6 - Fusión de Estados.
7 - Determinación de las variables y Vector de Estado Interno.
8 - Codificación de los Estados Internos.
9 - Determinación de los Vectores Independientes.

4 - Realización de la Tabla de Estados:

Este punto consiste en la transformación del diagrama de estados en una tabla, para darle una forma más resoluble y posible de analizar lógicamente. Para implementarla se realiza una tabla colocando una columna a la izquierda con los vectores independientes y que por lo general, es el vector de entrada. Es decir, detallamos las direcciones que consideramos en el análisis realizado en el diagrama de funcionamiento, formando así una entrada de la tabla. Luego, a partir del estado de reposo vamos incorporando el funcionamiento del sistema en la tabla, asignando a cada estado una columna de la misma, y describiendo las transiciones como se lo estipuló en el diagrama de estados.
Veremos su realización para el ejemplo -b- indicado anteriormente.

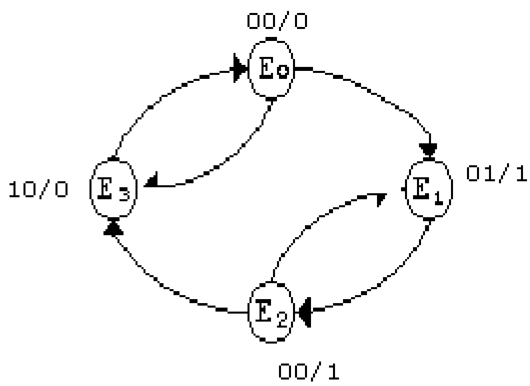


Diagrama de Funcionamiento:

Realización de la tabla de Estados

Vector Entrada y x	Funcionamiento
Primero → 0 0	E_0 / 0
0 1	
1 0	
1 1	

Se establece el estado de reposo, acompañado del vector de salida ó de cualquier otro que resulte conveniente.

Luego se analiza el funcionamiento del sistema y se indica en la tabla hacia que estado se mueve el sistema si se produce un cambio del vector de entrada.

Todo ello como se muestra a continuación:

Vector Entrada y x	Funcionamiento
Primero → 0 0	E_0 / 0
Luego → 0 1	E_1 / 1
1 0	
1 1	

Es decir, variando la dirección del vector de entrada desde
00 -------> 01
el sistema también produjo una variación desde
E_0 ------> E_1

Así sucesivamente se va trasladando el diagrama de funcionamiento a esta tabla, para llegar a completarla de la siguiente forma:

Vector Entrada y x	**Funcionamiento**
0 0	E_0 / 0 E_3 / 1
0 1	E_1 / 1
1 0	E_2 / 0
1 1	--- --- --- ---

Para el Vector de entrada 11 no existe definición funcional, por lo tanto no se coloca nada. Cuando se tiene más experiencia en el tema, solo se realiza la tabla mostrada en reemplazo de dos pasos repetitivos: Diagrama y tabla de estados.

5 - Tabla de Fases

Esta tabla es en concepto la misma desarrollada en el punto anterior, sólo que para seguir el proceso matemático, se reemplazan las transiciones indicadas gráficamente por números que las identifican de igual forma.

Para poder realizar esta breve transformación, es necesario hacer previamente algunas consideraciones. De lo realizado en el desarrollo del diagrama y la tabla de las etapas anteriores, podemos concluir, que existen tres tipos bien diferenciados de estados, a saber:

a) Estado Estable ó definido: Se define así a aquel estado en el cual permanece el sistema mientras no se verifique cambio en algún vector independiente. Es aquel que realmente nos interesa, pues a través de ellos se desarrolla el funcionamiento buscado del sistema digital. Aparece con la notación E_i.

b) Estado de Transición: Es aquella condición del sistema mientras pasa de un estado estable a otro. Esto ocurre durante un tiempo muy corto, que depende básicamente del tipo de tecnología con el que se realiza físicamente el sistema. Aparece en el diagrama de estados representado por una flecha $\longrightarrow$.

c) Estado indefinido ó imposible: Es aquel que no aparece en dicho diagrama, ya por que no interesa en el funcionamiento buscado (indefinido) ó porque es imposible que se produzca. Generalmente se coloca una línea ó un signo ***X***.

Una vez establecidas estas consideraciones analizaremos la transformación de la tabla de estados en tabla de fases. Esto se realiza teniendo en cuenta las siguientes reglas:

a) Se reemplaza la notación de los estados estables por el número subíndice correspondiente, encerrándolo en una circunferencia. Por ejemplo, si tenemos:

$\mathbf{E_1}$ reemplazamos por 1

b) Se reemplazan las flechas correspondientes a los estados de transición, por un número igual al estado estable al cual conduce la misma, es decir, si tenemos

$E_1 \longrightarrow E_5$ reemplazamos por 1 5 5

c) Se reemplaza los estados imposibles ó indefinidos por la notación X.

Veamos entonces como se transforma la tabla realizada antes y concluimos la tabla de fases.

Vector Entrada	
y x	**Funcionamiento**

0 0 0 1 1 0 1 1	0/0 3 3/1 0 1 1/1 1 X 2 X 2 2/0 X X X X

A los estados estables que tienen vectores independientes iguales, se los llama estados disyuntivos, por ejemplo el 0/0 y el 3/1; y al resto aglutinantes.

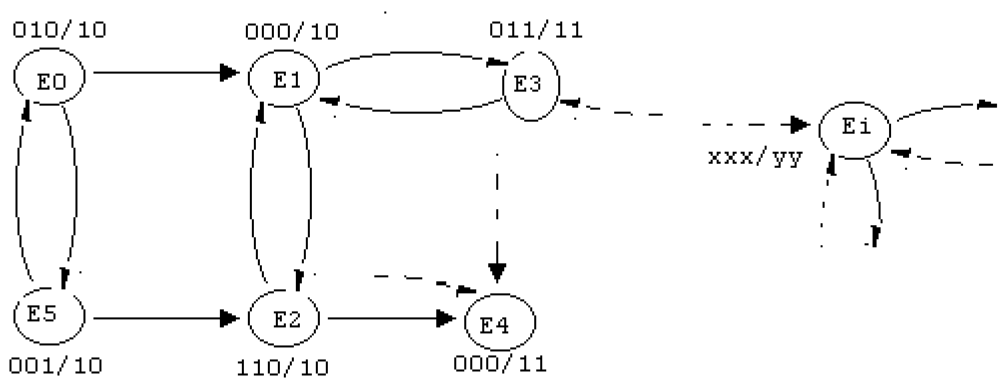
En este punto del desarrollo se pude continuar con dos caminos, por un lado codificar directamente la tabla de fases; ó por el otro, antes de hacer esto, minimizar la misma realizando la llamada Fusión de Estados. Si se codifica directamente la tabla de fases, evidentemente se obtendrá un circuito más complejo.

6- Minimización de la Tabla de Fases: Fusión de Estados

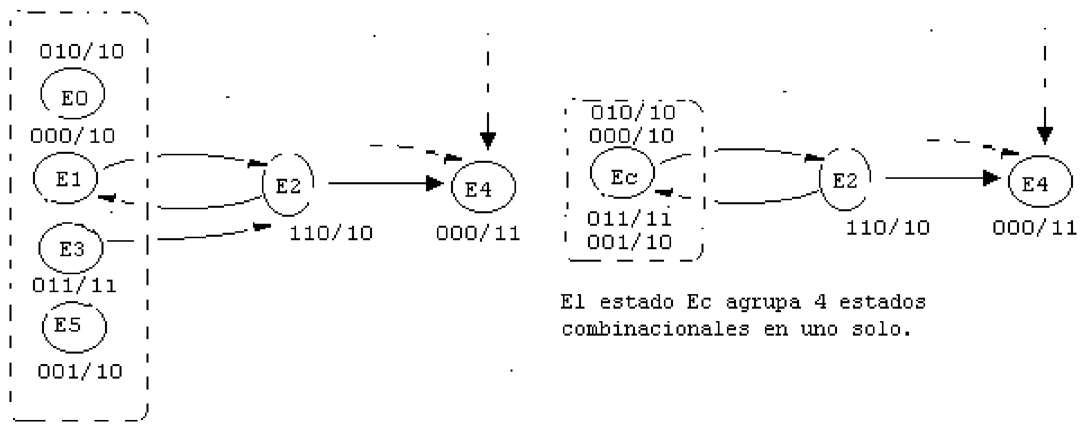
La Fusión de Estados consiste en agrupar todas las posibles realizaciones combinacionales presentes en un sistema secuencial, de forma que se reduzca la tabla de fases a codificar. Veremos primero brevemente en que consiste esto, y luego las reglas prácticas para realizarla.

Todo sistema digital, sindicado como secuencial, tendrá estados que podrán diferenciarse entre sí sólo por las direcciones de los vectores independientes (por lo general el vector de entrada) constituyendo de esta forma subsistemas combinacionales, los cuales podrán realizarse como tales, disminuyendo el proceso de codificación posterior.

Como vemos en el siguiente ejemplo, donde se presenta el caso parcial de un diagrama de funcionamiento; los estados E_0, E_1, E_2, E_3 y E_5 conforman un subsistema combinacional, pues es posible diferenciarlos entre sí funcionalmente sólo a través del valor del vector de entrada ó de la combinación de las variables de entrada.



Sin embargo, el estado E_2 no puede entrar en el análisis anterior, pues es el estado que fija la separación entre E_0 y E_4, que son dos estados disyuntivos. Y como el estado E_4 tiene el mismo vector de entrada que el estado E_0 estamos en presencia de un sistema secuencial. Así estos cuatro estados pueden fusionarse en uno nuevo, con características un poco diferentes a las consideradas con anterioridad; ya que se produce a partir de un sistema combinacional, y no de una etapa funcional, como se puede apreciar en el siguiente gráfico:



La fusión realizada sobre el diagrama de estados no siempre es sencilla, y a veces hasta podría incurrirse en errores. Por ello se hace necesario establecer una técnica apropiada para confeccionar eficientemente esta etapa del diseño. Así para enunciarla, primero
debemos saber porque y como se realiza la misma. Para ello podemos resumir el proceso de la siguiente forma:

1. Se pueden fusionar dos estados aglutinantes, es decir con vectores independientes discímiles, siempre y cuando no conduzcan a estados disyuntivos diferentes. En este último caso es imposible hacerlo. En el diagrama anterior tenemos los siguientes casos:
   - E_1 y E_3 son fusionables pues conducen solamente a estados aglutinantes.
   - E_2 y E_5 no lo son pues ambos conducen a estados disyuntivos diferentes E_2 ----> E_4 y E_5 ----> E_0.
   - E_2 y E_3 si lo son pues sólo uno de ellos conduce a estado disyuntivo y el otro no.
   - E_1 y E_2 son fusionables pues tenemos un caso parecido al anterior, esdecir E1 no conduce a E_0, aunque si puede venir del mismo.
   - E_1 y E_5 también son fusionables porque es el mismo caso anterior, y con más razón pues se relacionan con el mismo estado disyuntivo.
   - Etc., Etc.

2. Se pueden fusionar un estado disyuntivo y uno aglutinante, siempre que este último no conduzca a otro estado disyuntivo. En el caso anterior se puede fusionar E_0 con E_1, E_3 y/ó E_5; pero NO con E_2. Por otro lado E_4 puede hacerlo con E_1, E_2, y/ó E_3; pero NO con E_5.

3. Obviamente, NO se pueden fusionar dos estados que tengan los mismos vectores independientes; pues éste fue el punto de división entre los dos grandes tipos de sistemas digitales. Es decir es imposible fusionar estados disyuntivos. E_0 y E_4 del diagrama anterior.

Todas estas posibilidades pueden resumirse en varias reglas. En una tabla de fases se pueden fusionar dos columnas dónde todas las filas sean fusionables, según las siguientes consideraciones:

a) Se puede fusionar:

1. Un Estado estable y uno de transición con el mismo número, colocándose como nuevo estado fusionado el estable.
2. Dos estados de transición con el mismo número, colocando este número como nuevo estado fusionado.
3. Un Estado estable y uno indefinido, dejando como nuevo estado fusionado el estable.
4. Un Estado de transición y uno indefinido, quedando como nuevo estado fusionado el de transición.
5. Dos estados indefinidos, colocando éste como nuevo estado fusionado.

b) No es posible fusionar:

1 - Dos estados estables.
2 - Un estado estable y uno de transición de diferente numeración.
3. - Dos estados de transición con diferente número.

La fusión de estados no es transitiva, por lo tanto si se desea fusionar más de dos líneas es necesario que ellas sean fusionables de dos a dos entre sí. Como hemos visto en la justificación de la fusión, la misma puede realizarse entre estados que tengan diferentes vectores de salida. Realizado esto, hemos obtenido la tabla de estados fusionada ó simplificada; la cual hay que proceder ha codificar convenientemente.

Para el diagrama parcial presentado al comienzo del tema tenemos la siguiente tabla de fases, también parcial; colocando a cada columna una identificación:

Vector Entrada	**Funcionamiento**
Z y x	A B C D E F ...

0 0 0	0/10	-	4	-	0	4/11	...
0 0 1	5	-	-	-	5/10	...	
0 1 0							
0 1 1	1	1/10	1	1	-	...	
1 0 0	-	3	-	3/11	-	...	
1 0 1							
1 1 0							
1 1 1	-	2	2/10	-	2	...	...

En la tabla anterior podríamos fusionar A con B, y C con D, obteniendo por consiguiente:

Vector Entrada	**Funcionamiento**				
z y x	A - B	C - D	E	F	...
0 0 0	0/10	4	0	4/11	...
0 0 1	5	-	5/10	...	
0 1 0					
0 1 1	1/10	1	-	...	
1 0 0	3	3/11	-	...	
1 0 1					
1 1 0					
1 1 1	2	2/10	2	...	...

Luego podría fusionarse E con A-B, pues se cumple lo estipulado anteriormente, y así sucesivamente con otras columnas que lo permitieran de acuerdo a las reglas enunciadas. En este caso, por ejemplo E no podría fusionarse con C-D ya que existen dos estados de transición con diferente número. Cuando se completan todas las fusiones, obtenemos la tabla de Fases Fusionada.

7- Codificación de la Tabla de Fases Fusionada

Al completar la minimización indicada, aparecen algunos estados perfectamente definidos a través del vector de entrada, pero existen otros que son imposibles de identificar de acuerdo a este único parámetro, y para lo que se hace indispensable crear un nuevo vector. Por ejemplo; veamos la siguiente tabla de fases minimizada:

Vector Entrada	**Funcionamiento**	
y x	A	B
0 0	0/0	3/1
0 1	1	1/1
1 0	2/0	2
1 1	4/1	X

Los estados estables 1/1, 2/0 y 4/1 son identificables por su vector de entrada, sin embargo los estados 0/0 y 3/1 están indefinidos, pues tienen este vector idéntico. Es decir que frente a la aparición de la dirección 00 en la entrada del sistema digital, no se puede determinar fehacientemente en que estado se encuentra el mismo. Por ello se hace necesario definir un nuevo elemento que los diferencie claramente. Así se establece el concepto de *Estado Interno*, que es quien realiza la misma.

Analizando funcionalmente el sistema digital este vector es quién memoriza la secuencia cumplimentada por el sistema digital. Este vector identificar en que columna de la tabla de fase nos encontramos. Tenemos así:

Vei = Vector estado interno.

Por lo tanto, se modifica el identificador vectorial del sistema, siendo ahora

I.V.= Ventrada / Vestado-interno / Vsalida

Por lo tanto las direcciones de los estados indicados anteriormente, se diferencian muy claramente, y tenemos:

$E_0 \longrightarrow$ 00 / A / 0

$E_3 \longrightarrow$ 00 / B / 1

Sin embargo para obtener la función lógica debemos dar a ellos valores binarios y por ello se deben expresar en función de variables de estado interno, las que se obtienen de:

$E\,I \leq 2^n$ siendo E I = Estados Internos n = Variables de estado interno

Teniendo así la cantidad de variables, se asigna una combinación a cada columna de tal modo que la misma la identifique en su funcionamiento. En el ejemplo anterior, tenemos dos estados internos A y B, determinándose:

$$EI = 2 \leq 2^n \qquad \text{siendo} \qquad n = 1$$

es decir tenemos una variable de estado interno, que designaremos con z, la cual da dos posibilidades z = 0 = A ó z = 1 = B . Esta asignación es totalmente arbitraria, y podría ser a la inversa sin ningún tipo de problema. Por supuesto que para una asignación en particular obtenemos el circuito más simple; por lo tanto lo ideal sería realizar todas las posibilidades y verificar cual resulta la implementación más sencilla.

8- Determinación de Funciones

De acuerdo a lo indicado en párrafos anteriores, la tabla de fases minimizada y ahora codificada representa el funcionamiento del sistema digital a diseñar; es decir en dicha tabla tenemos expresada la función que representa al mismo. Sin embargo, no está totalmente claro todavía, ni en condiciones operativas de obtener dichas funciones.

Primero debemos indicar que la misma posee las direcciones de dos vectores diferentes; el vector que representa el funcionamiento, aún sin nombre preciso, y el vector de salida; por lo tanto dividiremos la tabla de fases minimizada en dos: Tabla de funcionamiento y tabla de Salida.

Para el ejemplo anterior tenemos:

Vector Entrada	***Funcionamiento***	
y x	z 0	1
0 0	0	3
0 1	1	1
1 0	2	2
1 1	4	X

Tabla de Funcionamiento

Vector Entrada	***Funcionamiento***	
y x	z 0	1
0 0	0	1
0 1	¿?	1
1 0	0	¿?
1 1	1	X

Tabla de Salida

Entonces vemos que la tabla de funcionamiento se forma con los valores superiores dados para los estados estables, y la de salida con los inferiores. Analizaremos cada una de ellas en particular, pues contienen conceptos y vectores diferentes.

a) Tabla de funcionamiento:

Como podemos ver, la misma contiene los estados por los cuales evoluciona el Sistema Digital en su funcionamiento; siendo los estables los únicos válidos para dicho análisis, pues los de transición sólo sirven para indicar la migración desde uno de ellos a otro. Cada estado estable indicado allí, representa la dirección que toma la función para la explicitada por los vectores independientes.

Para el ejemplo anterior tenemos:

Vector Entrada	**Funcionamiento**	
z y x	Estado	
0 0 0	0	0 → f(z,y,x) para f (0,0,0)
0 0 1	1	
0 1 0	2	2 → f(z,y,x) para f (0,1,0)
0 1 1	4	4 → f(z,y,x) para f (0,1,1)
1 0 0	3	3 → f(z,y,x) para f (1,0,0)
1 0 1	1	1 → f(z,y,x) para f (1,0,1)
1 1 0	2	
1 1 1	X	

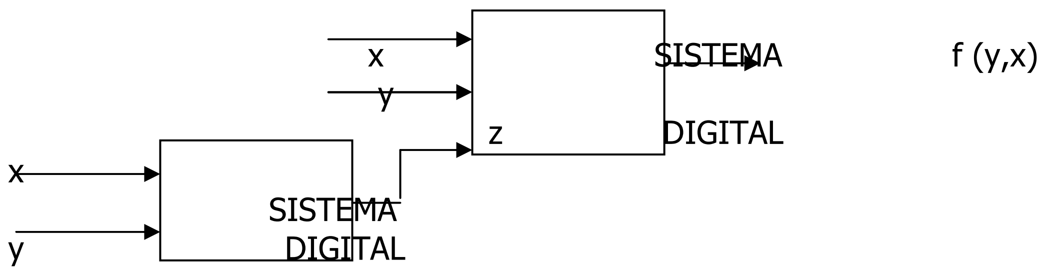
Por lo tanto es necesario determinar la expresión de esta función para obtener dichas direcciones, es decir:

Vector Entrada	
z y x	F (z,y,x)
0 0 0	f (0,0,0)
0 0 1	
0 1 0	f (0,1,0)
0 1 1	f (0,1,1)
1 0 0	f (1,0,0)
1 0 1	f (1,0,1)
1 1 0	
1 1 1	

---> ? Esta función es la que debemos determinar, sólo para estados estables. Podría ser totalmente arbitraria, es decir asignar a f (z,y,x) una expresión algebraica, y luego determinar las direcciones para cada uno de los estados estables. Sin embargo, debemos recordar que la variable z, no tiene valor real sino que es creada en virtud de una necesidad, y por lo tanto debemos también establecer dónde se originará . Es decir, que de alguna manera también resultará una función de ciertas variables.

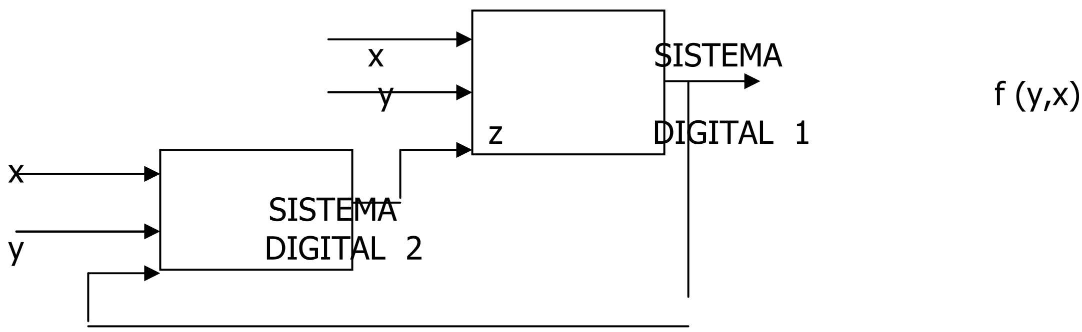
Por ejemplo si ellas son las variables x e y, obtendremos:

$$z = f(y,x) \longrightarrow f(z,y,x) = F[f(y,x), y, x]$$



Este es el caso más sencillo, pero bastante improbable, pues si tenemos dos incógnitas, debemos tener dos ecuaciones, de la siguiente manera:

$$f(z,y,x) = F(z,y,x)$$
$$z = F[f(z,y,x),y,x]$$



Por lo tanto obtener dichas direcciones resulta muy complicado; y por supuesto mucho más si la misma fuera de variables de otros vectores. No olvidemos además que por lo general se trabaja con vectores que tienen varias funciones, con un incremento aún mayor de complejidad en cuanto a la determinación de tales variables de estado interno y funciones.

Para simplificar este proceso se trabaja con el siguiente artificio:

Zi = Fi (z,y,x) → luego → Fi (z,y,x) = Zi

Pues de esta manera se fusionan dos sistemas digitales en uno, simplificándose notablemente el proceso de obtención de las direcciones de los estados estables, indicada con anterioridad. Como " z " toma el nombre Variable de Estado Interno, debido a la igualdad establecida, a ésta se la llama Función de Estado Interno.
Volviendo al ejemplo anterior tenemos:

Vector Entrada	**Funcionamiento**	
z y x	Estado	
		pues
0 0 0	0	0 → z = 0 para f (0,0,0)
0 0 1	- - -	
0 1 0	2	2 → z = 0 para f (0,1,0)
0 1 1	4	4 → z = 0 para f (0,1,1)
1 0 0	3	3 → z = 0 para f (1,0,0)
1 0 1	1	1 → z = 0 para f (1,0,1)
1 1 0	2	
1 1 1	X	

Los estados de transición se obtienen de acuerdo a lo indicado anteriormente cuando nos referimos a la construcción de la tabla de fases. Es decir, teniendo en cuenta la misma, se coloca el valor del estado estable al cual conduce. De esta manera nuestra tabla de fases queda finalmente así:

Vector Entrada	***Funcionamiento***	
y x	z 0	1
0 0	0	1
0 1	¿?	1
1 0	0	¿?
1 1	0	X

Tabla de Funcionamiento

Vector Entrada	***Funcionamiento***	
y x	z 0	1
0 0	0	1
0 1	1	1
1 0	0	0
1 1	1	X

Así esta última representa la Función de estado interno, y realizando una tabla de simple entrada podemos obtener la expresión algebraica de la misma:

Vector Entrada	**Funcionamiento**
z y x	Estado
0 0 0	0
0 0 1	1
0 1 0	0
0 1 1	0
1 0 0	1
1 0 1	1
1 1 0	0
1 1 1	X

De esta forma obtenemos:

$$f(z,y,x) = \Sigma_i (1,4,5) + \Sigma_X (7)$$

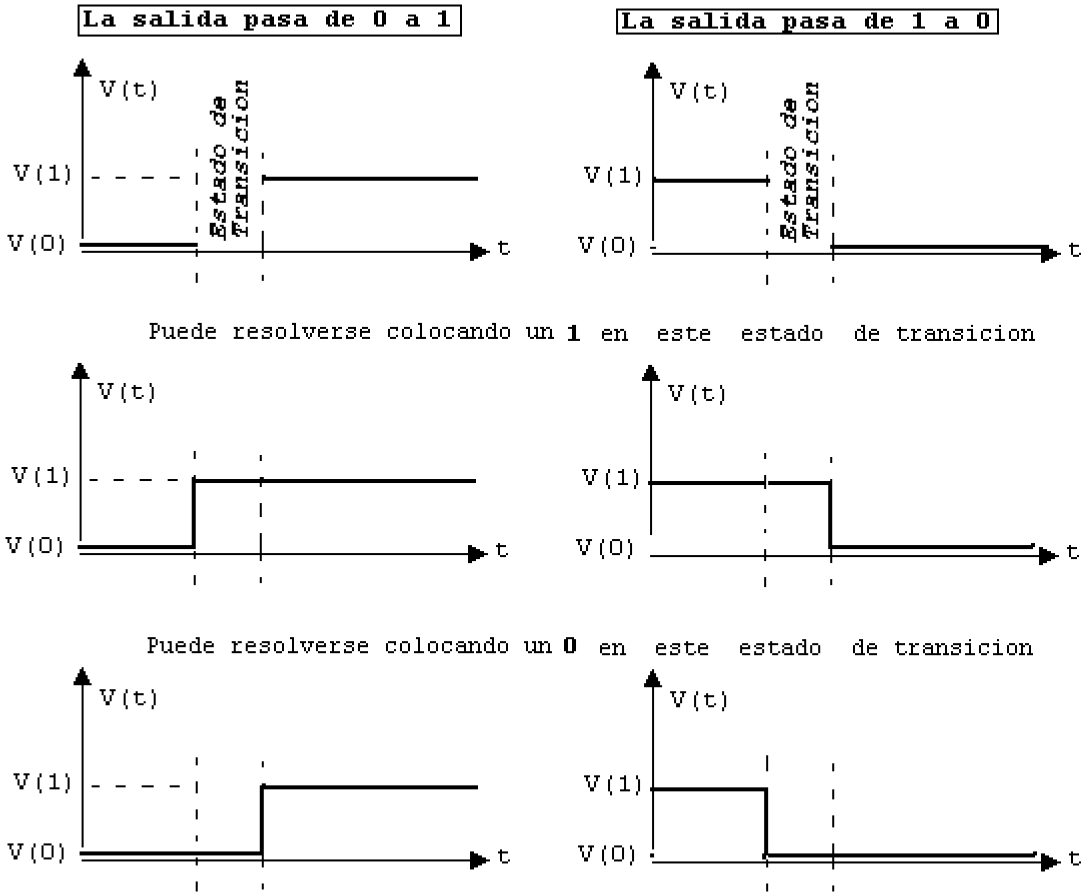
Considerando que se cumple:

$$z = f(z,y,x)$$

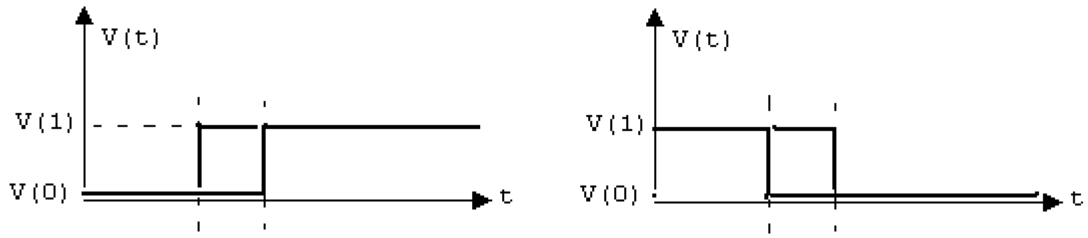
b) Tabla de Salida:

La tabla obtenida al comienzo de esta etapa de diseño representa el vector de salida del sistema. La misma se obtiene, como ya se mencionó, representando en una tabla los valores de salida que toma cada estado estable del funcionamiento del sistema. De esta manera, sin embargo, quedan los estados de transición sin definición, existiendo dos casos diferentes; y que analizaremos a continuación:

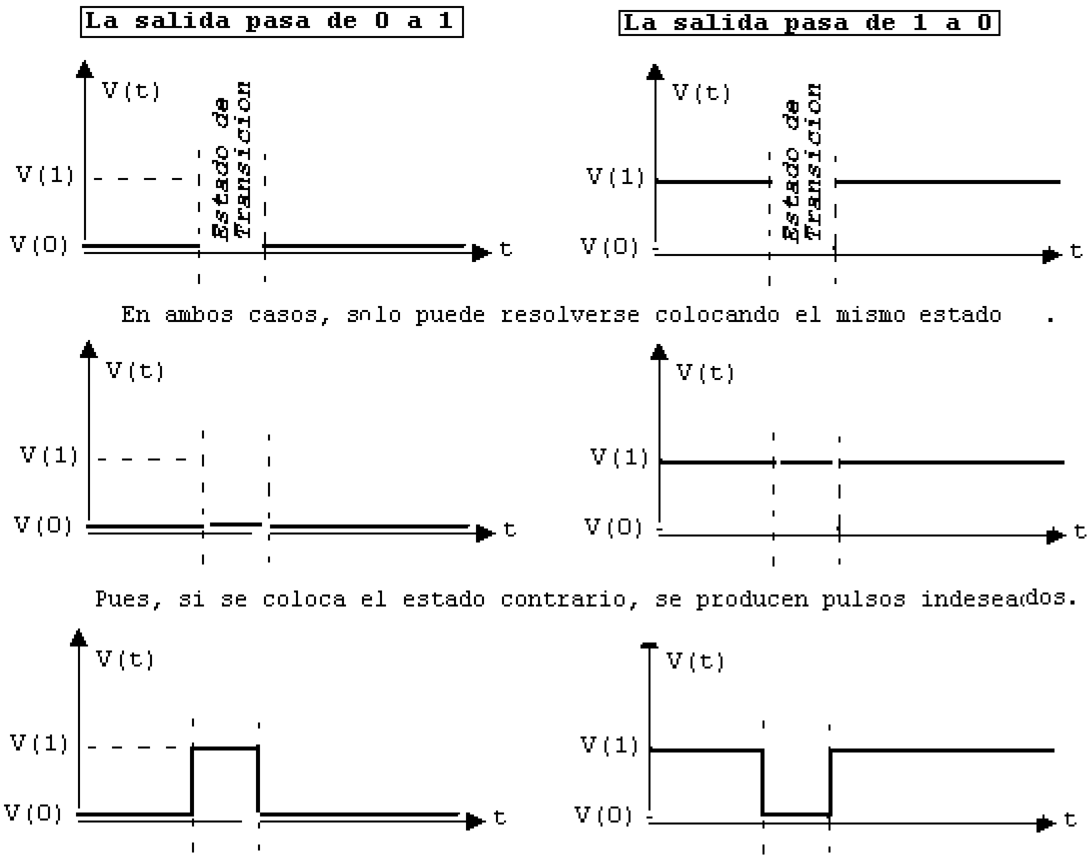
1) La salida pasa desde un valor lógico del estado estable, a otro diferente. Tenemos dos posibilidades, según se puede apreciar en la siguiente figura:



En ambos casos, se llega al mismo estado buscado, salvo una mínima diferencia de tiempo. Por lo tanto, se puede resolver, colocando cualquiera de las dos posibilidades presentadas. Y esto se ve reflejado en la tabla colocando 1 ó 0, ó simplemente un símbolo X (No importa).



II) La salida pasa desde un valor lógico del estado estable al mismo.
Tenemos dos posibilidades, según se puede apreciar en la siguiente figura:



Considerando lo enunciado, nuestra tabla de salida, aún inconclusa, tomará la siguiente configuración; considerando las transiciones planteadas en la tabla de funcionamiento correspondiente:

Vector Entrada	***Funcionamiento***	
y x	z 0	1
0 0	0	1
0 1		1
1 0	0	
1 1	1	X

Como puede observarse, en ambos casos de transición, se transita desde una salida de un valor lógico a otro, por lo tanto ambos estados de transición se completarán a través de símbolos ***X*** (No importa), como se aprecia en la tabla correspondiente y obteniéndose la función indicada.

Vector Entrada	***Funcionamiento***	
y x	z 0	1
0 0	0	1
0 1	**X**	1
1 0	0	**X**
1 1	1	X

Siendo S (z,y,x) la función que completa el vector de salida, tenemos:

$S(z,y,x) = \Sigma_i(3,4,5) + \Sigma_X(1,6,7)$

De esta forma hemos concluido con la obtención de las funciones de diseño. Para nuestro ejemplo son:

* 1) Función de estado interno **$F(z,y,x) = \Sigma_i(1,4,5) + \Sigma_X(7)$**

* 2) Función de Salida **$S(z,y,x) = \Sigma_i(3,4,5) + \Sigma_X(1,6,7)$**

Los pasos a seguir según lo establecido con anterioridad, siendo común para el desarrollo de Sistemas Combinacionales, como para Secuenciales son:

10 - Minimización de los Vectores Funcionales

Como ya sabemos toda función digital puede minimizarse, para ello hay dos tipo de métodos: Gráfico (Karnaugh) y Numérico (Quine McKluskey). Una vez minimizada, la función está lista para ser realizada físicamente.
En nuestro ejemplo anterior tenemos:

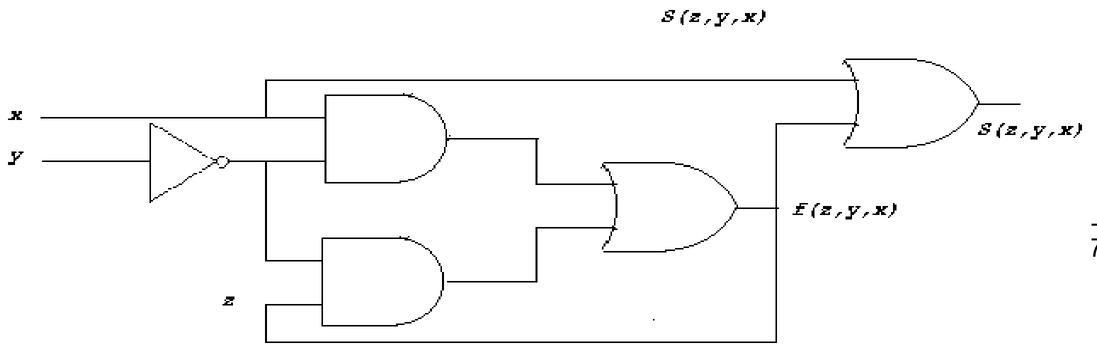
$F(z,y,x) = \Sigma_i(1,4,5) + \Sigma_X(7)$ **$S(z,y,x) = \Sigma_i(3,4,5) + \Sigma_X(1,6,7)$**

z \ yx	00	01	11	10
0		1		
1	1	1	X	

z \ yx	00	01	11	10
0		X	1	
1	1	1	X	X

Minimizando tenemos**:** **$f(z,y,x) = z\bar{y} + \bar{y}x$** **$S(z,y,x) = z + x$**

Y cuyo diagrama lógico es:



De esta forma se concluye con el diseño lógico propiamente dicho, y se pasa a faz estrictamente constructiva del mismo; tal como se indica en el punto siguiente.

11) Realización Física de las Funciones Digitales

Una vez que tenemos las ecuaciones lógicas minimizadas, del sistema a diseñar, la próxima fase implica su realización física. Para ello, es necesario cumplir con algunas etapas, a saber:

a) Determinación de la tecnología a utilizar.

b) Realización de los planos correspondientes.

c) Realización del diseño del circuito impreso: Esta es la placa sobre la cual se montarán y conexionarán los componentes electrónicos.

d) Diseño y realización del sistema sobre el cual se montará la placa indicada y/o del gabinete adecuado, según las condiciones de uso del mismo.

Finalizando el diseño con la puesta en funcionamiento y testeo del Sistema.

Todavía quedan muchos detalles y problemas a resolver, pero se completarán pausadamente en la medida que sea necesario. Por ahora se realizará un par de ejemplos, dónde aparezcan todos los pasos detallados con anterioridad, para condiciones de funcionamiento diferentes, de tal modo que se presenten los dos tipos de Sistemas Digitales desarrollados.

DISEÑO E IMPLEMENTACION DE SISTEMA DIGITALES : EJEMPLOS

Ejemplo Nº 1:

1) Conocimiento del Sistema:

a) Requerimiento Verbal: " Desarrollar un sistema de control autónomo para la etapa de movimiento de un carro de cabezal para una impresora de matriz de puntos. El mismo se mover de extremo a extremo de un espacio dedicado al mismo, sobre un eje específico, ante la orden de movimiento ó detención desde un procesador de mayor jerarquía."

b) De acuerdo a lo especificado al desarrollar el tema se realizar la Tabla de Requerimientos y Objetivos:

TAREA Nº	TAREA NOMBRE FUNCIONAL	OBJETIVO	DESCRIPCION FUNCIONAMIENTO
1	Estado de Reposo	Espera aviso	a) Carro portacabezal detenido a la izquierda, en su lugar de reposo ó home. b) Aviso desde el control de mantenerse detenido.
2	Funcionamiento	Inicio de movimiento	Comienzo del movimiento desde la izquierda hacia derecha. Señales adecuadas al motor para realizar el movimiento
3	Funcionamiento	Movimiento derecha-izquierdo	El carro realiza movimiento desde derecha a izquierda.
4	Funcionamiento	Detección Extremo izquierdo	El carro detecta por algún medio que ha llegado extremo izquierdo comienza nuevamente el ciclo realizado antes.
5	Orden Detención	Aviso de detenerse	Llega orden de detenerse. Dependerá en etapa de movimiento se encuentra para detenerse realmente, a saber:
5a	Extremo Izquierdo	Aviso de detenerse	Se detiene en este momento.
5b	En Tránsito Der/Izq.	Aviso de detenerse	Según tipo de motor seguirá en movimiento ó decide regresar a su posición de reposo.
5c	Extremo Derecho	Aviso de detenerse	Se detiene en este momento ó decide regresar a lugar de reposo.
5d	En Tránsito Izq./Der	Aviso de detenerse	Sigue movimiento hasta llegar a extremo izquierdo dónde deberá detenerse.
....	....	....	....

Se han considerado las etapas elementales para el funcionamiento básico.

Podrán modificarse las condiciones de diseño ó agregarse nuevas consideraciones según se desee mejorar ó cambiar la estructura elemental del diseño encarado.

Realizaremos este ejemplo desdoblado en dos, según dos tipos de salidas ó excitaciones diferentes, de acuerdo a los siguientes requerimientos:

Ejemplo 1A) El motor sólo recibirá orden de funcionar, es decir será ó no excitado. La dirección del movimiento la establecerá un sistema mecánico de engranajes adecuadamente preparados para tal fin.

Ejemplo 1B) El motor recibirá orden de funcionar, con la posibilidad de seleccionar el sentido de movimiento del mismo, con lo cual se puede manejar el móvil que transporta el cabezal impresor.

Continuaremos con el desarrollo de ambas posibilidades, pues los objetivos y requerimientos son los mismos, realizándolas una a continuación de la otra, de modo que se puedan comparar las diferencias de planteo, y por ende de resolución. Luego de completado el diseño se agregarán algunas necesidades que lo tornarán más complejo aún, de tal manera que se pueda apreciar claramente como va aumentando la complejidad de un sistema digital bajo nuevos requerimientos, y como resolver los problemas que se presentan.

Inclusive luego se realizarán varios ejemplos, con el objeto de establecer claramente los lineamientos a seguir en el diseño y desarrollo de un Sistema Digital cualquiera.

EJEMPLO E1A

2) Determinación de Variables y Vectores:

a) Determinación de Variables, Vectores e Identificador Vectorial.

Por lo analizado, de manera objetiva en la Tabla de Requerimientos y Objetivos, y como no tenemos ninguna variable, ni función explicitamente definida, y por lo tanto tampoco vectores; advertimos las siguientes necesidades:

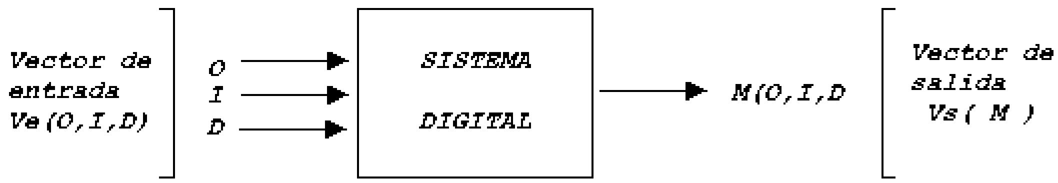
a1) Vector de Entrada con los siguientes requerimientos:

1º) Orden inicio y fin de movimiento. Se establece variable ***"O"****rden*
2º) Indicación de extremo Izquierdo. Se establece variable ***"I"****zquierda*
3º) Indicación de extremo Derecho. Se establece variable ***"D"****erecha*

Así obtenemos Vector de entrada Ve conformado por tres (3) variables: Ve [3] = [O,I,D]

a2) Vector de Salida: Formado por una sola función; Excitación Motor de movimiento de cabezal impresor. Tenemos entonces función *"M"otor*. Vs [1] = [M]

Por lo tanto podemos graficar el diagrama en blocks inicial de diseño y su correspondiente Identificador Vectorial.



Cuyo Identificador Vectorial es: Ve / Vs ó [O,I,D] / [M]

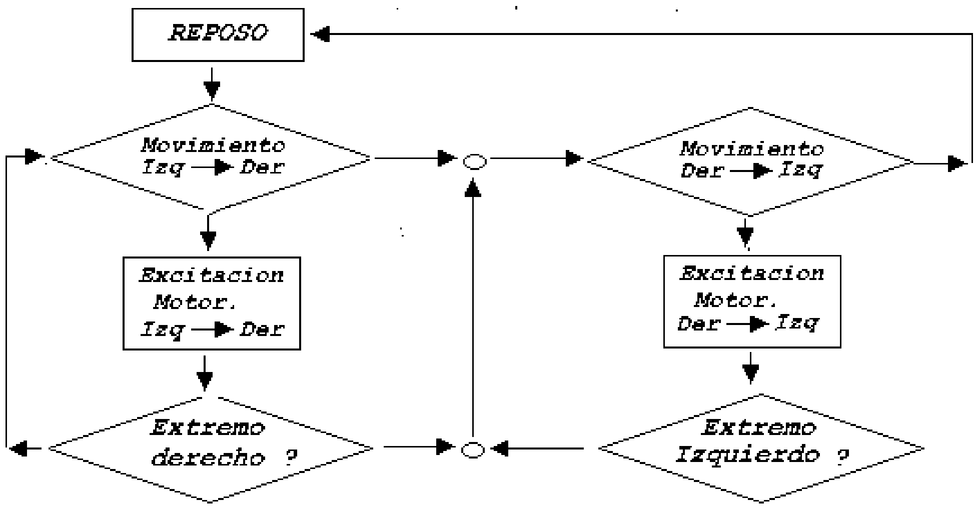
b) Determinación de la estructura funcional de los Vectores.

Vector de Entrada: Variable O : Señal desde el procesador Impresora.
Reposo = 0
Activa = 1
Variables I y D : Indican detección de extremo.
Reposo = 1
Activa = 0

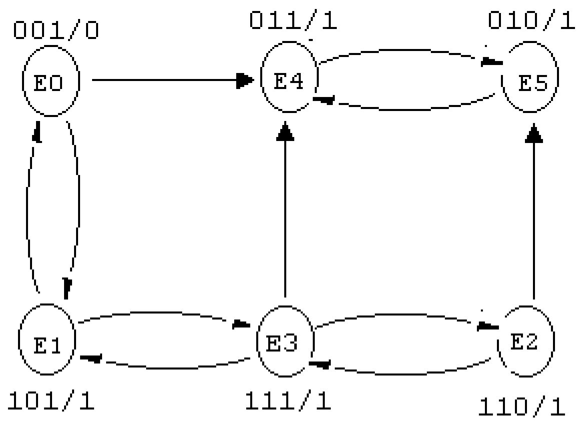
Vector de Salida: Función M : Señal de excitación de motor.
Reposo = 0
Activa = 1

3) Análisis de Funcionamiento:

a) Diagrama de flujo de funcionamiento.



b) Diagrama de Estados.



3) Tabla de Funcionamiento

Vector Entrada	***Vector Salida***	***Estados***
A I D	M	E
0 0 1	0	E0
1 0 1	1	E1
1 1 1	1	E3
1 1 0	1	E2
0 1 1	1	E4
0 1 0	1	E5

Para el resto de direcciones de los vectores independientes no considerados (en este caso vector de entrada), se tomará el valor 0. Podría tomarse otro valor, considerando adecuadamente el verdadero significado de dichas direcciones, inclusive considerarse como " No Importa " (X). De esta tabla se deduce que el sistema es del tipo Combinacional, pues cada Estado queda perfectamente definido con un vector independiente; en este caso sólo el de Entrada.

4) Obtención de los Vectores Funcionales.

De la tabla anterior obtenemos:

$M_{(A,I,D)} = \Sigma_i (2,3,5,6,7)$ ó $M_{(A,I,D)} = \Pi_i (3,6,7)$

Evidentemente en la realización completa, la función expresada como productoria es la más sencilla, y por ello lo correcto es implementarla físicamente con compuertas reales. Sin embargo es necesario minimizar para mejorar los resultados.

9) Minimización de los Vectores Funcionales.

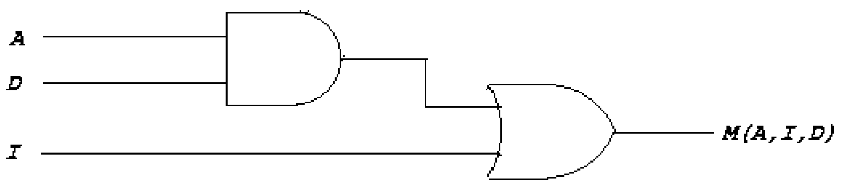
Aplicando Karnaugh a la función sumatoria tenemos: $M_{(A,I,D)} = \Sigma_i (2,3,5,6,7)$

A \ ID	00	01	11	10
0			1	1
1		1	1	1

De la minimización resulta:

$M_{(A,I,D)} = I + A\ D =$

Y su diagrama lógico ó circuital es:



EJEMPLO E2A

Los aprestamientos para el desarrollo son iguales al ejemplo anterior, por lo tanto no se analizarán con detalle:

2) Determinación de Variables y Vectores:

a) Determinación de Variables, Vectores e Identificador Vectorial

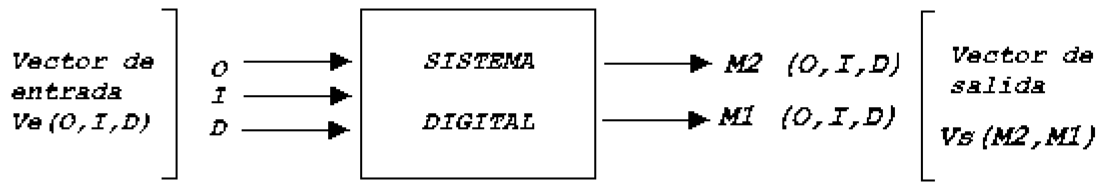
- ***Vector de Entrada***: Igual al ejemplo anterior, por lo tanto tenemos Ve [3] = [O,I,D]

- ***Vector de Salida***: Formado por dos funciones: Excitación Motor de movimiento de cabezal impresor, codificada según la característica del mismo como se ver luego. Tenemos entonces función M_2 y M_1.

M_2 M_1 = 00 Motor detenido.
01 Movimiento de Izquierda a derecha.
10 Movimiento de Derecha a Izquierda.

Luego: Vs [2] = [M2,M1]

El diagrama en blocks del sistema es:



Y su correspondiente Identificador Vectorial es:

Identificador Vectorial: Ve / Vs ó [O,I,D] / [M_2,M_1]

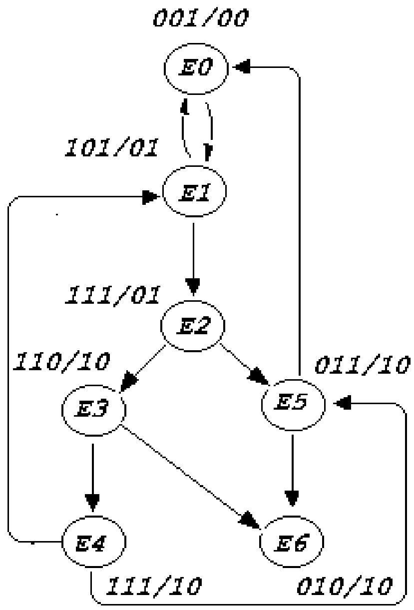
b) Determinación de la estructura funcional de los Vectores: Idem al ejemplo anterior.

Vector de Salida: Función M_2,M_1 : Señal de excitación de motor.
Reposo = 0
Activa = 1

3) Análisis de Funcionamiento:

a) Diagrama de flujo de funcionamiento: Es igual al ejemplo anterior, pues el requerimiento básico del sistema es el mismo, sólo varía la excitación del movimiento.

b) Diagrama de Estados:



4) Tabla de Funcionamiento

Vector Entrada	Vector Salida	Estados
A I D	M_2 M_1	E
0 0 1	0 0	E0
1 0 1	0 1	E1
* 1 1 1	0 1	E2
1 1 0	1 0	E3
* 1 1 1	1 0	E4
0 1 1	1 0	E5
0 1 0	1 0	E6

Evidentemente, de esta tabla se deduce que el sistema es del tipo Secuencial pues cada Estado no queda perfectamente definido con la dirección de los vectores independientes (en este ejemplo sólo tenemos el de entrada) , sino que existen casos para los cuales es imposible determinar en que estado se encuentra el mismo, pues para la misma dirección del vector de entrada tenemos dos estados diferentes (como las indicadas con asterisco). Para el resto de direcciones de los vectores independientes (en este caso sólo vector de entrada), el sistema se comporta como combinacional.

4) Tabla de Estados:

Vector Entrada	F U N C I O N A M I E N T O						Estados
A I D	A	B	C	D	E	F	

	G	
0 0 1	E0/00	E0
1 0 1	E1/01	E1
1 1 1	E2/01 E4/10	E2-E4
1 1 0	E3/10	E3
0 1 1	E5/10	E5
0 1 0	E6/10	E6

5) Tabla de Fases:

Vector Entrada	***F U N C I O N A M I E N T O***							***Estados***
A I D	A	B	C	D	E	F	G	
1 0 1	0	0	-	-	-	0	-	E0
1 0 1	1	1	-	-	1	-	-	E1
1 1 1	-	2	2	4	4	-	-	E2-E4
1 1 0	-	-	3	3	-	-	-	E3
0 1 1	-	-	5	-	5	5	5	E5
0 1 0	-	-	-	6	-	-	6	E6

6) Minimización de la Tabla de Fases: Fusión de Estados: Vemos en la tabla anterior, que se pueden fusionar, en una primera etapa, las siguientes columnas:

A-B ; D-E (Pues C no se puede fusionar con D) y F-G

Vector Entrada	***F U N C I O N A M I E N T O***				***Estados***
A I D	A - B	C	D - E	F - G	
0 0 1	0	-	-	0	E0

1 0 1	1	-	1	-	E1
1 1 1	2	2	4	-	E2-E4
1 1 0	-	3	3	-	E3
0 1 1	-	5	-	5	E5
0 1 0	-	-	6	6	E6

Puede fusionarse aún más: realizando ahora AB-C y DE-FG, de la siguiente forma:

Vector Entrada	***F U N C I O N A M I E N T O***		***Estados***
A I D	A - B - C	D – E - F – G	
0 0 1	0	0	E0
1 0 1	1	1	E1
1 1 1	2	4	E2-E4
1 1 0	3	3	E3
0 1 1	5	5	E5
0 1 0	-	6	E6

Tabla de fases Fusionada

7) Determinación de las variables de Estado interno

Nº de Estados Internos EI = 2 → I A-B-C
→ II D-E-F-G

por lo tanto tenemos $EI = 2^z$ → $z = 1$ una variable de estado interno

8) Codificación de los Estados Internos:

En este caso, por ser sólo dos estados internos, y por ende una variable que también tiene dos posibilidades, resulta sencilla tal codificación; pues se asigna indistintamente cada uno de los dígitos binarios a dichos estados internos y se resuelve el problema. Asignemos por ejemplo,

EI = z = A-B-C = 0

EI = z = D-E-F-G = 1

y realizando la condición prevista $f_{(EI)} = z$ y/o $z = f_{(EI)}$ tenemos:

Vector Entrada	***Estado Interno***		***Estados***
A I D	*z* 0	1	E
0 0 1	0 /00	0	E0
1 0 1	0 /01	0	E1
1 1 1	0 /01	1 /10	E2-E4
1 1 0	1	1 /10	E3
0 1 1	1	1 /10	E5
0 1 0	-	1 /10	E6

Tabla de Fases Codificada ó Tabla de Excitación

Considerando la variable de estado interno tenemos entonces la siguiente tabla de funcionamiento para la Función de Estado Interno. * t : Indica un estado de transición

Vector Entrada	***Estado Interno***	***Estados***
z A I D	$f_{(z,A,I,D)}$	E
0 0 0 1	0	E0
0 1 0 1	0	E1
0 1 1 1	0	E2
0 1 1 0	1	t
0 0 1 1	1	t
0 0 1 0	X	-
1 0 0 1	0	t
1 1 0 1	0	t
1 1 1 1	1	E4
1 1 1 0	1	E3
1 0 1 1	1	E5
1 0 1 0	1	E6

.

Así obtenemos la función de estado interno:

$f_{(z,A,I,D)} = \Sigma_i (6,3,15,14,11,10) + \Sigma_X (2)$

* **Función de Salida:**

A partir de la Tabla de Fases Codificada debemos obtener la tabla de salida para determinar la función de Salida del sistema.

Vector Entrada	**Vector de Salida**			**Estados**
A I D	z	0	1	E
0 0 1		00	?	E0
1 0 1		01	?	E1
0 1 1		01	10	E2-E4
1 1 0		?	10	E3
0 1 1		?	10	E5
0 1 0		x	10	E6

Para obtener las condiciones de la salida indeterminadas para los estados de transición (?), es necesario analizar la transición que se produce en la tabla de excitación y luego colocar un estado de acuerdo a lo indicado teóricamente. Es decir, cuando desde un estado estable se necesita transitar hacia otro de igual condición, se debe colocar allí el mismo valor lógico (para evitar impulsos erróneos), pero cuando ellos son diferentes, se puede colocar una condición de indiferencia (x). Entonces la Tabla de Salida queda conformada de la siguiente forma:

Vector Entrada	**Vector de Salida**			**Estados**
A I D	z	0	1	E
0 0 1		00	X0	E0
1 0 1		01	XX	E1
0 1 1		01	10	E2-E4
1 1 0		XX	10	E3
0 1 1		XX	10	E5
0 1 0		XX	10	E6

Tabla de Salida

Esta incluye por lo tanto las funciones M_1 (z,A,I,D) y M_2 (z,A,I,D).
que son:

$$M_1 (z,A,I,D) = \sum_i (5,7) + \sum_X (6,3,2,13)$$

$$M_2 (z,A,I,D) = \sum_i (15,14,11,10) + \sum_X (6,3,2,9,13)$$

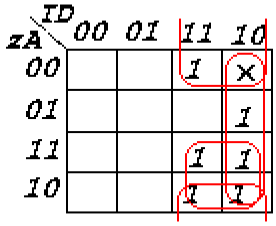
Que corresponden a los valores adecuados de la tabla de salida.

9) Minimización de las funciones determinadas:

Aplicando le método de Karnaugh para minimizar tenemos:

a) Para la función de estado Interno:

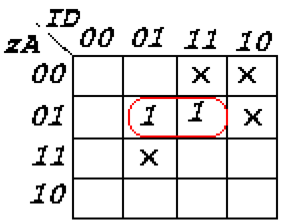
$f_{(z,A,I,D)} = \Sigma_i\ (6,3,15,14,11,10) + \Sigma_X$

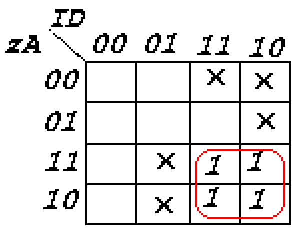


(2)

$f_{(z,A,I,D)} = A\,I + I\,D + z\,I$

y para las funciones de salida indicadas anteriormente:





$M_1 = \bar{z}\,A\,D$ $M_2 = z\,I$

10) Diagrama lógico

El circuito lógico del sistema realizado con compuertas; de acuerdo a las funciones minimizadas, obtenidas en la resolución implementada en la página anterior, para cada una de las funciones es:

$f_{(z,A,I,D)} = A\,I + I\,D + z\,I$

$M_1 = z\,A\,D$

$M_2 = z\,I$