



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN
UPM MADRID**

TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS
ELECTROTÉCNICOS Y HOMBRE –ORDENADOR**

Febrero 1973

Manuel Rincón Arche

La presente memoria fue aceptada como Tesis Doctoral el 26 de febrero de 1973, por el tribunal compuesto por los catedráticos:

D. Narciso García Redondo.

D. José Luis Arriaga.

D. Guillermo Herranz Acero.

D. J. Gil Santiago.

D. Swolof Warzanskuj Poliskuf

OBJETO DE LA PRESENTE TESIS DOCTORAL.

La idea del presente trabajo, surgió al realizar un estudio simultáneo de la simulación mediante programas de ordenador de máquinas eléctricas y su estabilidad y por otro lado el desarrollo de procedimientos para aplicar la computación a la enseñanza.

En principio pueden parecer temas dispares, sin ninguna relación, pero en este trabajo se demostrará que no es así, al completar los teoremas de Lyapounov dentro del espacio de estado, para poner de manifiesto la identidad forman de ambos planteamientos.

Este trabajo se ha dividido, para su mejor comprensión, en cuatro partes, unas conclusiones y un apéndice.

La primera parte es una introducción a la problemática de este tipo y las diferentes soluciones que se han ido implementando. De manera esquemática se presentan los planteamientos y soluciones proporcionados por la teoría "clásica", en contraposición con la teoría que podemos denominar "moderna", haciendo una exposición de las ventajas e inconvenientes de cada uno de los planteamientos señalados.

Se tomarán las conclusiones que se adaptan al propósito que se pretende, presentando las lagunas que aparecen en el desarrollo de ambas teorías y que se quieren solventar dentro de este trabajo.

La segunda parte se centra en el estudio electrotécnico de máquinas, en particular de las máquinas síncronas, que son de las que se ha dispuesto dentro del Laboratorio de Electrotecnia.

En el plano teórico se comienza por realizar el estudio de la máquina de Kron, completándola y adaptándola al propósito que se persigue de tener conclusiones claras para obtener el circuito equivalente de la máquina que será váli-

do para los estudios posteriores. Una vez obtenido este, se ve cual es la ecuación que rige el funcionamiento de la máquina síncrona. Se observa que es del tipo vectorial $\dot{\bar{X}} = A\bar{X} + B\bar{U}$, denominada ecuación de estado, y que es justamente la ecuación que aparece en los procesos que se estudian en el espacio de estado. \bar{X} es el llamado vector de estado, \bar{U} es el vector de control del proceso, y A y B son matrices de números reales cuadradas. Se hace después el estudio de la resolución de esta ecuación.

Para plantear la ecuación de estado de la máquina síncrona, es necesario conocer los parámetros que la rigen, por lo cual el apartado práctico de esta parte comienza por el estudio de los montajes de laboratorio necesarios para tal fin. Para este propósito se utilizó el Laboratorio de Electrotecnia de la E.T.S.I. de Telecomunicación y el material de medida que en él existe, así como sus máquinas eléctricas. Una vez obtenida la ecuación de estado de la máquina síncrona, se resuelve mediante el uso de ordenador, obteniendo una tabla, que permite el estudio del transitorio de principio de funcionamiento y el régimen permanente. Para pasar este programa así como los restantes, se empleó el Centro de Cálculo de la Universidad de Madrid. El lenguaje de programación es el Fortran, por ser el más adecuado, para este tipo de trabajos. Todos los programas compilados aparecen al final del trabajo en forma de apéndice.

Después se estudia la simulación, mediante ordenador de la máquina síncrona, tomando como base las medidas de parámetros realizadas. Se realizan dos programas que permiten prever su funcionamiento en cualquier régimen de trabajo. Por último se estudia la estabilidad de la máquina con los medios del espacio de estado, utilizando la función de Lyapounov, V , obtenida por el método del gradiente. De esta

forma es posible también, hacer un estudio de la observabilidad y controlabilidad del sistema electrotécnico.

Para completar este estudio, se termina planteando el esquema de una central hidroeléctrica, controlada por medio de un ordenador analógico-digital.

En la tercera parte, se plantea el problema de la enseñanza con auxilio de ordenador digital. Es un método totalmente nuevo de enseñar, que está aun en fase de experimentación en varios países. Se compara este sistema, con el clásico, haciendo resaltar sus ventajas e inconvenientes.

A continuación se exponen los resultados de la aplicación de este método de enseñanza en un conjunto de alumnos.

De la estabilidad del sistema- formado por el alumno y el ordenador, nada se sabe. Este tema se estudia haciendo uso de las técnicas del espacio de estado, como en el caso electrotécnico. Se estudian así mismo la controlabilidad y observabilidad del sistema. Por último se obtienen gráficas y baremos del rendimiento del sistema.

En la cuarta parte, se trata de poner de manifiesto, que es posible relacionar ambos problemas, para lo cual se demuestra que ambos problemas, tienen la estructura de espacios vectoriales. Después se establece una aplicación lineal entre ambos espacios, resultando de ello un homomorfismo. Esto justifica que la identidad de métodos empleados en ambos casos, que no solo es lícita, si no obligada.

En la quinta y última parte, se exponen las perspectivas futuras de los trabajos aquí iniciados, con indicación de los campos en los cuales pueden tener aplicación. Se incluye también un cuadro sinóptico que resume el trabajo.

Se termina presentando la bibliografía consultada, los equipos empleados y los programas de ordenador compilados.

La aportación original, que realiza este trabajo al conocimiento actual, que se tiene sobre estos temas, consiste por una parte en los programas de simulación de la máquina síncrona, mediante los cuales es posible un mejor conocimiento de la misma, sin necesidad de obligarla a trabajar de formas distintas. Por otra parte el estudio de la enseñanza con ayuda de ordenador, su aplicación a un colectivo, y la comparación con el método de enseñanza clásico, así como la agrupación de programas de enseñanza por materias, es nuevo.

Otra aportación interesante, es el establecimiento del homomorfismo entre ambos espacios.

El empleo del método del gradiente, para el estudio de la estabilidad en ambos casos, es un método que resulta matemáticamente más cómodo que el clásico, por no tener que calcular raíces de polinomios de grados elevados.

En el futuro es posible llegar en un plano teórico, a establecer una teoría de tipo matemático, que unifique todos los problemas de control y regulación de sistemas, haciendo uso de los procedimientos de Lyapounov, Popov y otros nuevos que vayan apareciendo.

En el plano práctico, se pueden diseñar programas que calculen la estabilidad óptima de los sistemas, aplicando los métodos iniciados por Poyntriaguine, programas para la conexión y desconexión de máquinas síncronas mediante ordenador, teniendo en cuenta la fase de ambos, etc.

En el plano de la enseñanza, es importante el diseño futuro de un nuevo lenguaje apto para la enseñanza en lengua española, así como del compilador correspondiente. Este problema cae dentro del estudio de los lenguajes formales.

Otros problemas afines que tiene planteados la Técnica, y que estudian investigadores con los que estoy en contacto, son, la regulación por medios electrónicos de máquinas síncronas actuando como generadores, y la teoría de autómatas aplicada a la industria, de los cuales es posible obtener muchos resulta-

dos en el futuro.

Todo esto hace que los estudios aquí expuestos, sean del máximo interés dentro del conocimiento de la Teoría del Control.

Mi intención es que algún lector de este trabajo, que este interesado en estos temas, pueda sacar alguna idea útil para desarrollar alguna de las ideas que aquí quedan expuestas como caminos futuros.

Madrid, febrero de 1.973

I

INTRODUCCION

1.1.- INTRODUCCION HISTORICA.-

En este apartado se pretende hacer una introducción de tipo histórico a los problemas que el control ha ido planteando, y a las soluciones que se adoptaron en su momento.

El control biológico se viene realizando desde tiempos inmemoriales por la naturaleza, y pese a ser tan familiar, resulta tan sumamente complicado, que es muy difícil de estudiar.

El control mecánico, es el primero que interesa desde el punto de vista de la Ingeniería, y la primera reseña histórica, que se tiene de su aparición, se remonta a Caldea y Mesopotamia, donde era necesario regular el agua de los riegos. Esto se logró mediante un ingenioso sistema de compuertas de manejo manual.

Este sistema adoptado también por otros pueblos de la Antigüedad fué durante muchos siglos el único aspecto del control.

En el Renacimiento una vez superada la etapa medieval, surgen numerosos artificios, de tipo mecánico, destinados al control.

A partir de entonces aparecen muchos artefactos, algunos que demuestran notable ingenio, para solucionar problemas de control. En este momento es cuando se da un gran impulso a esta ciencia, pudiéndose hablar del nacimiento del control mecánico propiamente dicho.

En el siglo pasado, la aparición de la Electricidad en el plano práctico, así como su mejor conocimiento, hicieron posible que el control dejase de ser simplemente

mecánico, para transformarse en electromecánico. La aparición de estos primeros sistemas de tipo electromecánico, hizo que la Teoría del Control, perdiese en parte su aspecto únicamente mecánico, y fuese tomando una forma nueva en sus enunciados.

El primero en hacer uso de sistemas de este tipo, fue Watt, al cual se le puede considerar como precursor de la Servotecnica.

Maxwell, en 1.868, basándose en los resultados prácticos de Watt, puso los cimientos teóricos y matemáticos, para el estudio sistemático del control.

La teoría clásica del control, tal como se conoce actualmente, se forma entre fines de siglo, y la primera Guerra Europea. A este hecho contribuyen fundamentalmente dos factores, por una parte la aplicación del análisis matemático al estudio de este tipo de problemas, y por otro lado el nacimiento de la Electrónica como ciencia independiente de la Física. La aplicación de la Electrónica a los problemas de control, empezó a mostrar gran número de soluciones a problemas pendientes de resolución. Por otra parte los sistemas electrónicos, han de ser estables, y el estudio de esta estabilidad, es el que dio a la teoría clásica la forma que hoy conocemos.

La figura fundamental en la teoría clásica de control, es Nyquist, quien la da de un modo definitivo, el contenido matemático, que necesitaba.

En este momento, de la asociación de la Electrónica, que controla sistemas mecánicos, es cuando surge la Servotecnica como ciencia, como unión entre Electrónica y Mecánica.

En esta época, comienza a plantearse, al diseñar un sistema, el estudio de sus zonas de funcionamiento estable. La misma teoría clásica, proporciona estos criterios de tipo matemático.

Las primeras aplicaciones de los estudios de estabilidad a sistemas mecánicos, como aviones, motores, etc, así como sistemas electrónicos, como cadenas de amplificación, no se hicieron esperar.

Entre las dos Guerras mundiales, las aplicaciones militares de los elementos de control, contribuyeron en gran manera al impulso que se da a esta ciencia.

Son fundamentales en esta época los trabajos de Stein, Hazen, Maran, etc.

Durante la segunda Guerra mundial, el nacimiento de sistemas tales como el Radar, y la aplicación masiva de la Electrónica en todos los campos, hacen que los métodos del control sean indispensables en gran número de ramas de la Técnica.

En esta época queda enunciada de una forma rotunda la teoría clásica, tal como la conocemos hoy.

A partir de 1-945, dos hechos fundamentales, permiten que este tipo de problemas, se puedan tratar de una forma distinta y más sencilla que la anterior.

- Por una parte, los estudios que Lyapounov, en su Tesis doctoral, había aportado, para el estudio de la estabilidad de sistema, son puestos de manifiesto por la escuela Rusa, indicando su sencillez y elegancia.

- Por otro lado, la aparición de los ordenadores electrónicos, con el gran cúmulo de posibilidades, que traen consigo, en especial en el estudio de cualquier tipo de control de una forma sistemática.

Por ambos motivos, el control comienza a modificarse, apareciendo lo que se denomina teoría moderna.

Actualmente nos encontramos con la teoría del control en múltiples ramas:

- En la Industria, el control de calidad, producción, etc, es fundamental hoy día.

- En aviación y comunicaciones con satélites, y en general en astronáutica, es fundamental un control eficiente.

La aparición de los circuitos integrados, que permiten una multiplicidad de funciones en una sola pastilla, hacen que el control pase a tener un aspecto electrónico casi exclusivamente.

De esta forma surge el control integrado, dirigido por ordenador, que permite una gran seguridad funcional, frente a una miniaturización total.

1.2.- TEORIA CLASICA.-

Tal como se ha dicho antes, fué expuesta por Nyquist, y perfeccionada por los estudios de Hurwicz y Routh.

Con ella es posible el estudio de cadenas de amplificación estabilidad de servosistemas, etc.

A la hora de tratar de aplicar el cálculo numérico a esta teoría, se ve que esto resulta difícil, por tener que operar con polinomios, y sus raíces, que en general no son reales.

Por tanto sus métodos no son muy aptos para un tratamiento numérico sistemático.

Por lo cual en los estudios que siguen, se emplearan otros caminos más adecuados, para los propósitos del análisis numérico.

1.3.- TEORIA MODERNA.-

Al igual que en otra ramas de la Técnica, la aplicación de las matemáticas modernas a la teoría del control, han hecho que los mismos problemas que trataba la teoría clásica, como la estabilidad, pueden ser vistos desde otros puntos, y solucionados más eficazmente.

En este trabajo se amplía esta teoría, aplicándola a investigaciones concretas.

En general, se puede decir, que un sistema de control, tiene el aspecto de la figura nº 1.

En definitiva, se pretende obtener unas salidas reguladas tomando unas muestras de las mismas, que permitan influir en la entrada.

El control puede ser de tipo manual o automático, y este es el caso que interesa, de tipo automático. El control de tipo automático, puede ser mecánico, electromecánico, o electrónico. Un ordenador también puede ser un elemento de control, pues puede tomar una serie de muestras a una gran velocidad, analizarlas y tomar la decisión oportuna.

El modo de operar es el siguiente:

Se toman muestras de la salida, y se comparan con la señal prevista, actuando el controlador, para no sobrepasar nunca la tolerancia permitida, el controlador actúa en forma contraria al efecto que origina la perturbación.

La teoría moderna, parte de los métodos enunciados por Lyapounov, en especial el directo, para el estudio del control óptimo y de la estabilidad. La gran importancia de este método, es que permite por métodos físicos, plasmados en ecuaciones matemáticas, el estudio completo del sistema, lo cual es una notable ventaja frente al método clásico, en el cual se perdía la noción física del problema.

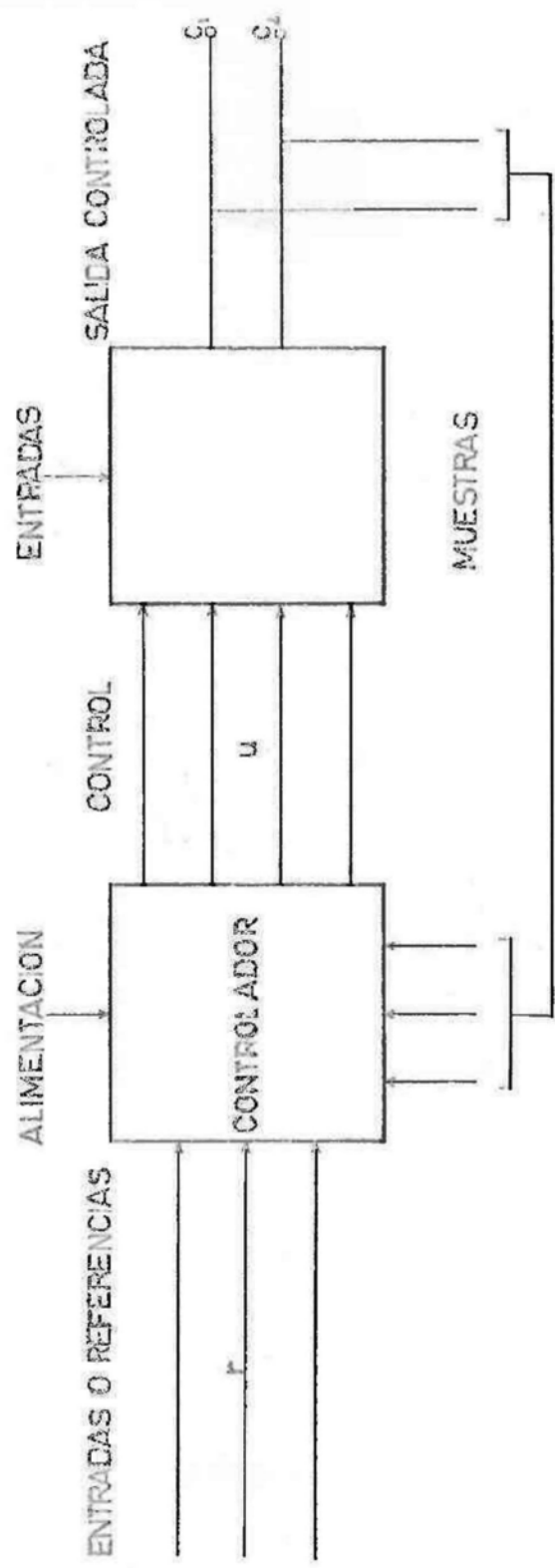


FIGURA N.º 1

Además el método es altamente compacto, y aplicable a multitud de campos.

La ventaja fundamental sobre la teoría clásica, consiste en evitar el cálculo de raíces de polinomios de grados elevados.

Por otra parte la introducción del cálculo automático es mucho más fácil en este caso.

1.4.- PRESENTE DE LA TEORÍA DE CONTROL.-

En la actualidad hay pocos campos de la ciencia y la técnica en los cuales no este presente de algún modo la teoría del control.

De una forma esquemática, se pueden citar:

- Servotecnica, donde juega un papel fundamental.
- Gobierno de procesos industriales y económicas.
- Problemas de staff, donde la introducción de los métodos del control ha sido realizada brillantemente por Bellman.
- Control de sistemas especiales.
- Control de ordenadores electrónicos.

De esta forma una ciencia que en principio, había nacido para la electromecánica, se ha extendido a una multitud de campos.

En este trabajo, se pretendió adaptarla al estudio de un problema de tipo electrotécnico, y otro de relación hombre-ordenador.

1.6.- FUTURO DE LA TEORÍA DEL CONTROL.-

Los campos en los cuales la teoría del control, es fundamental en la actualidad, y en el futuro aun necesitaran más de ella, son los siguientes:

- Servotecnica, con las aplicaciones de uso militar, y control de sistemas especiales.
- Control de sistemas de telecomunicación.

- En Electrotecnia se empieza a abordar el control numérico de máquinas herramientas, y el control por ordenador de sistemas complejos de máquinas, lo cual hace pensar que en el futuro este campo necesitará mucho del control, adaptado a sus problemas.

- En Electrónica es cada vez más amplio el estudio de los reguladores electrónicos, que substituyen a los mecánicos.

- En Economía el control económico, iniciado por Bellman es cada vez más importante. Es aplicable tanto en macroeconomía, como en microeconomía.

La teoría de juegos, participa cada vez más de la teoría del control.

- En Sociología, el control de masas y la reorientación del poder son cada vez más estudiadas.

Todos estos problemas, que en apariencia son tan dispares han sido aglutinados por la teoría del control.

Se llega así a la esencia de toda ciencia, que trata partiendo de una teoría general llegar a todos los casos particulares. En teoría del control se ha logrado prácticamente este objetivo, como se demuestra en la cuarta parte de este trabajo.

Las páginas siguientes pretenden modificar esta teoría para la resolución de dos problemas, al mismo tiempo que se plantean ambos, y los métodos de solución.

I I

REGULACION Y ESTABILIDAD DE MAQUINAS SINCRONAS

EN EL ESPACIO DE ESTADO

2.1.- INTRODUCCION.-

Uno de los problemas reales más interesantes, que tiene planteado actualmente la técnica, es el de regulación de máquinas sincrónicas, que es fundamental en Electrotecnia.

En la central, ya sea hidroeléctrica, térmica o nuclear, se pretende mantener estable la tensión frente a las variaciones de carga.

El consumo eléctrico varía mucho de acuerdo con la estación del año, y con la hora del día. Por ello es necesario un buen sistema de control, con amplio margen de posibilidades, que permita efectuar la regulación.

En la figura nº 2 se ve una curva típica correspondiente a un día cualquiera del año, donde se aprecia el consumo en Kw. de una central cualquiera.

Las variaciones son de un 300 % entre las horas punta baja y alta, lo que obliga a una regulación muy buena.

El método de regulación ha sido desde hace muchos años el colocar un motor en paralelo en las horas de consumo bajo, y varias turbinas en serie en las horas de alto consumo.

Estos métodos, pueden ser ventajosamente sustituidos por una regulación electrónica, y un control por ordenador.

Aquí se va a tratar precisamente de este tema.

La respuesta del generador es continua, por lo cual se procede a digitalizarla. De esta manera es posible el tratamiento digital.

En el presente trabajo se invirtió un año, y sus partes son:

- Obtención del modelo matemático de la máquina sincrónica, y estudio de su validez.

- Métodos de medidas.

- Simulación.

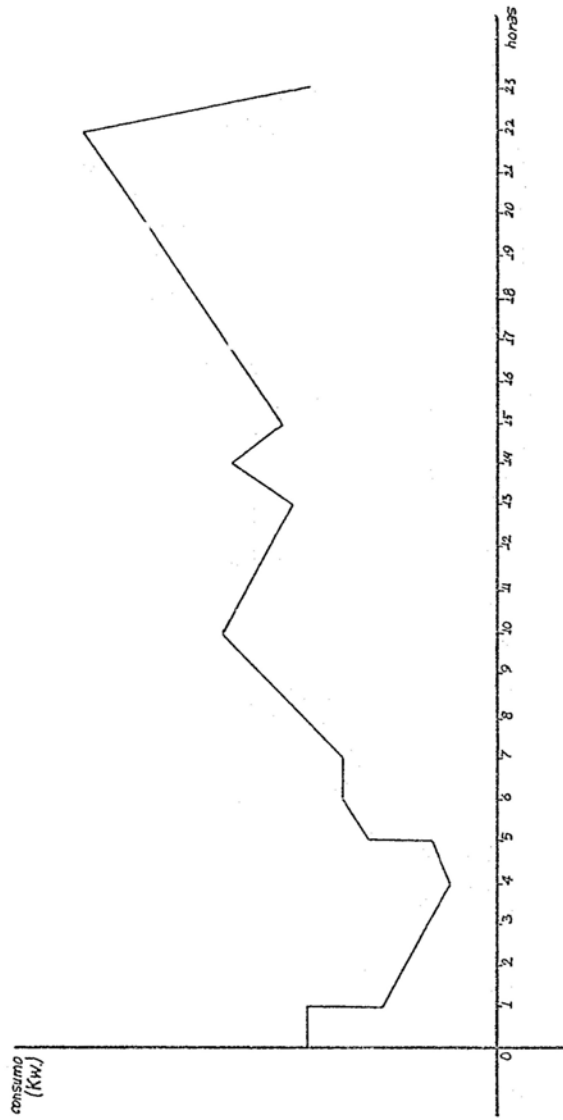


FIGURA Nº2

- Estudio de la estabilidad, controlabilidad y observabilidad.

- Estudio de un sistema hidroeléctrico controlado por ordenador analógico-digital (ordenador híbrido).

2.2.- MODELO MATEMÁTICO.-

2.2.1.- Teoría de Kron.-

El estudio de las máquinas eléctricas, se ha hecho siempre de una forma poco sistemática, estudiando cada caso en particular, y sin obtener un modelo de la máquina, únicamente las ecuaciones que la rigen.

Fueron Park y luego Kron, los que hicieron posible la obtención de un modelo eléctrico de la máquina. Este modelo se obtiene aplicando la teoría de circuitos y es válido para cualquier tipo de máquina eléctrica. Así es posible realizar un estudio unificado, para todo tipo de máquinas, lo cual no era posible antes.

El tema fue enunciado por Kron, en el libro que se cita en la bibliografía. Esta teoría ha sufrido modificaciones y mejoras. Aquí se adaptan y mejoran estos métodos, para lograr los propósitos enunciados y los objetivos de este trabajo. Otra ventaja de esta teoría es que permite estudiar con facilidad los fenómenos transitorios.

La máquina sincrónica es giratoria, por lo cual lo primero que hay que plantear es la ecuación del sistema formado por un conjunto de espiras que gira alrededor de un eje. La representación gráfica aparece en la figura nº 3. En ella se observan n espiras cerradas, girando alrededor de un eje a velocidades ω . El voltaje que existe en bornas de la espira i , viene dado por la conocida fórmula:

$$v_i = R_i i + \frac{d\phi_i}{dt}$$

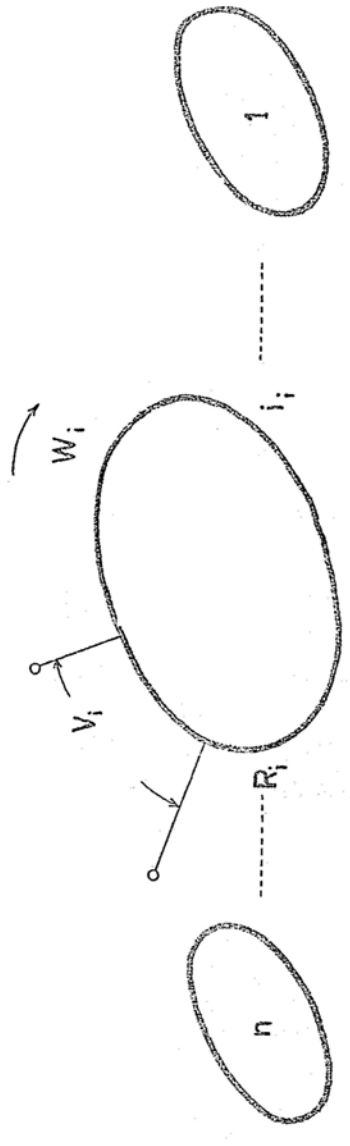


FIGURA №3

donde R_i es la resistencia propia de la espira, i_i la intensidad que circula por la misma, y ϕ_i el flujo que atraviesa a la espira.

El flujo que atraviesa la espira, será la suma de los flujos parciales que cada espira produce en el i . Llamando a estos flujos ϕ_{ij} , se puede poner:

$$\phi_i = \phi_{i1} + \dots + \phi_{in} = \sum_{j=1}^n \phi_{ij}$$

Por tanto el voltaje en la espira i , substituyendo el valor del flujo que se ha obtenido, es:

$$v_i = R_i i_i + \sum_{j=1}^n \frac{d\phi_{ij}}{dt}$$

Por otra parte la definición de inducción mutua entre la espira i y la j es:

$$L_{ij} = \frac{\phi_{ij}}{i_j}$$

Por tanto:

$$v_i = R_i i_i + \sum_{j=1}^n L_{ij} \frac{di_j}{dt} + \frac{d\phi_{ij}}{dt} i_j$$

Esta última expresión es fundamental.

Para representar una máquina giratoria, el modelo consiste en una serie de circuitos eléctricos, cada uno con su auto-inducción y resistencia, que además están acoplados inductivamente.

Estator y rotor, tienen dos devanados, que están separados 90° geométricos, tal como se ve en la figura nº 4. En ella se aprecian el estator y el rotor de la máquina, y los devanados. El eje x se llama directo, y se representa por la letra d . El eje y se llama cuadratura, y se representa con la letra q .

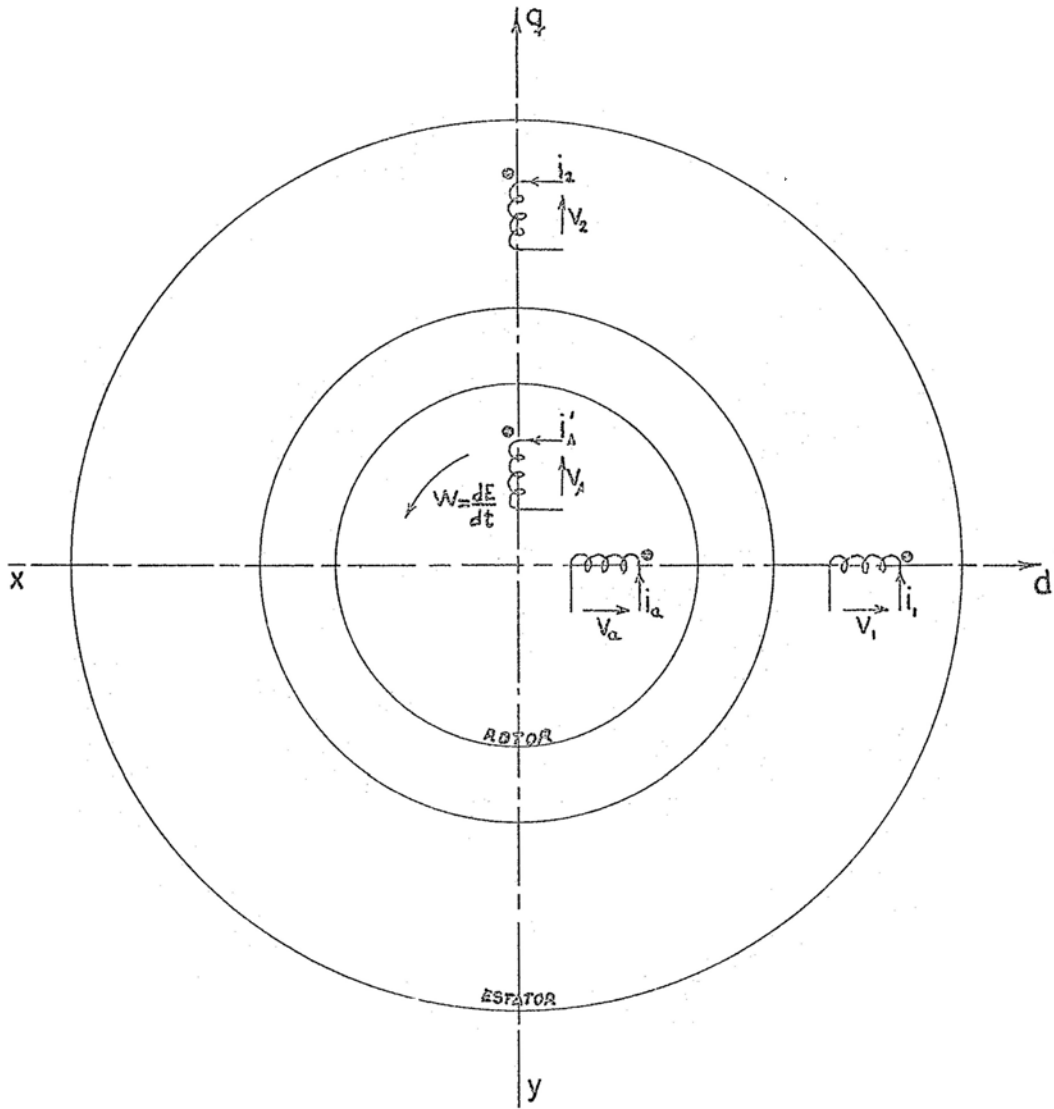


FIGURA N°6

El rotor gira con respecto al estator a una velocidad w , en sentido contrario a las agujas del reloj. En un momento dado ambos ejes forman un ángulo θ .

Se observa en la figura, que existen cuatro voltajes y cuatro corrientes. Todo ello se puede poner en forma matricial.

Lo normal es utilizar el coeficiente de inducción mutua M , que viene definido de la siguiente forma:

$$M_{ij} = \frac{d\lambda_{ij}}{di_j}$$

Por tanto se tiene:

$$\frac{d\lambda_{ij}}{dt} = M_{ij} \frac{di_j}{dt} + i_j \frac{dM_{ij}}{dt} = M_{ij} w$$

siendo w la velocidad angular de giro del rotor.

La ecuación matricial de las cuatro bobinas es:

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_a \\ v_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_a \\ i_A \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{1a} & L_{1A} \\ L_{21} & L_{22} & L_{2a} & L_{2A} \\ M_{a1} & M_{a2} & M_{aa} & M_{aA} \\ M_{A1} & M_{A2} & M_{Aa} & M_{AA} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_a \\ i_A \end{pmatrix}$$

$$+ \frac{d\theta}{dt} \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{1a} & M_{1A} \\ M_{21} & M_{22} & M_{2a} & M_{2A} \\ M_{a1} & M_{a2} & M_{aa} & M_{aA} \\ M_{A1} & M_{A2} & M_{Aa} & M_{AA} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_a \\ i_A \end{pmatrix}$$

Ha y que tener en cuenta, que los coeficientes de inducción mutua son nulos, cuando los dos ejes, directo y cuadratura son perpendiculares. Con esto se logra simplificar algo la ecuación que define la máquina síncrona.

Las ecuaciones que proporciona la teoría de Kron, permiten el estudio de cualquier máquina eléctrica, de una forma general y considerándola como un circuito eléctrico.

La parte que puede ofrecer un poco de dificultad, es la obtención de los parámetros, que definen las ecuaciones de la máquina.

Estos parámetros han de ser obtenidos para cada máquina en particular, mediante medidas en el laboratorio. En el correspondiente apartado de medidas, se verá como se han realizado estas para la máquina síncrona.

Ahora hay que adaptar esta teoría al caso de la máquina síncrona. Esto se hace en el apartado siguiente.

2.2.2.- Aplicación de la teoría de Kron a la máquina síncrona de polos salientes.-

La nomenclatura de parámetros, que se van a emplear en este estudio, aparece en la figura nº 5.

De esta forma se hace una referencia más clara a los ejes, y lugares a los que corresponde cada parámetro.

Esta nomenclatura es la que emplea toda la literatura especializada.

Teniendo en cuenta los parámetros que eran nulos, las ecuaciones que definen el funcionamiento de la máquina síncrona, quedan de la forma:

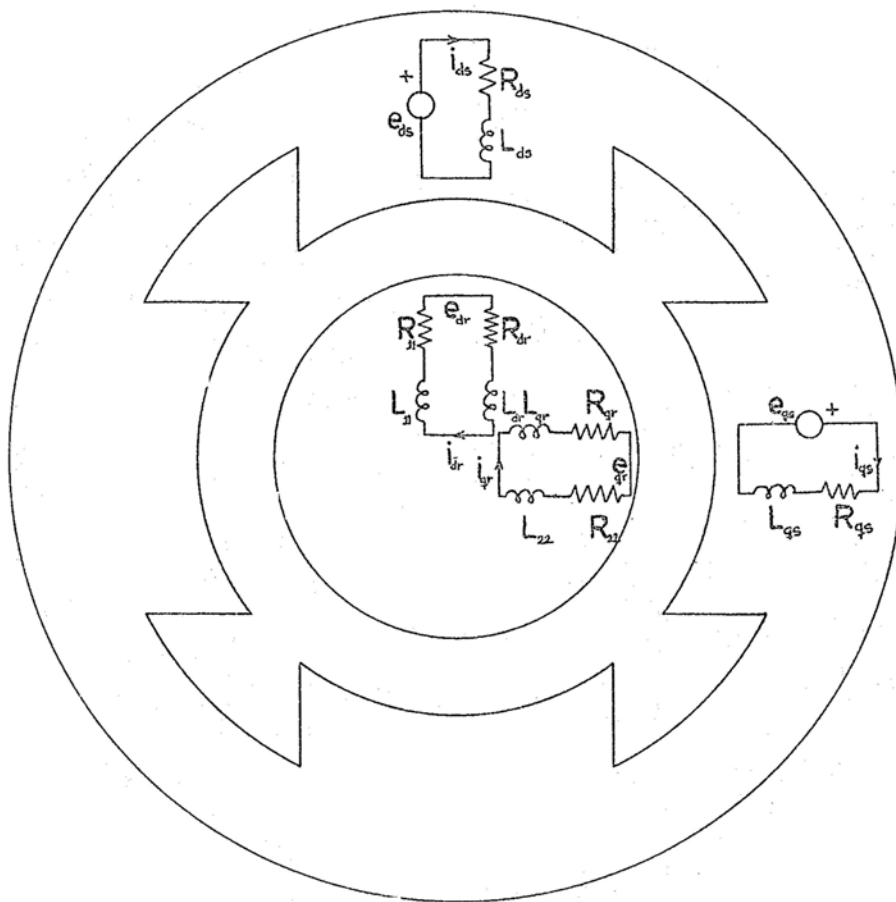


FIGURA Nº5

$$\begin{pmatrix} e \\ ds \\ dr \\ qr \\ qs \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 & 0 \\ ds ds & (R + 4R) & -M & -M \\ 0 & ds dr & dr dr & dr qs \\ M & M & M & (R + 4R) \\ ds ds & ds dr & dr dr & dr qs \\ 0 & 0 & 0 & R \\ & & & qs qs \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} ds \\ dr \\ qr \\ qs \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L & M & 0 & 0 \\ ds ds & ds dr & & \\ M & L & -M & 0 \\ ds ds & ds dr & ds dr & ds dr \\ 0 & 0 & L & -M \\ & & dr dr & dr qs \\ 0 & 0 & M & L \\ & & qs qs & qs qs \end{pmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} ds \\ dr \\ qr \\ qs \end{pmatrix}$$

De esta ecuación matricial, interesa despejar la matriz de intensidades. Para operar más cómodamente representaremos a cada vector por una letra, de la forma:

$$e = R \frac{d}{dt} i + L \frac{d}{dt} i$$

Tomando los subíndices los valores: $ds, dr, qr, qs = 1, 2, 3, 4$.

Despejando se obtiene la ecuación:

$$\frac{d}{dt} i^k = (L_{ik})^{-1} \cdot ((-R_{jk}) \cdot i^j + e^k$$

Considerando \bar{i} , \bar{i} y e como vectores, la ecuación queda en la forma simbólica:

$$\dot{\bar{i}} = A\bar{i} + B\bar{e}$$

La forma de interpretar esta ecuación es vectorial, con vectores de cuatro dimensiones.

2.3.- TECNICAS DEL ESPACIO DE ESTADO.-

2.3.1.- Introducción.-

El estudio de la dinámica de sistemas, ya sean de tipo eléctrico o mecánico, se puede hacer en el dominio del tiempo, haciendo uso de las técnicas clásicas. Estas consisten en plantearse las ecuaciones diferenciales, que definen el funcionamiento del sistema, e integrarlas.

Si se supone que se tiene una variable $x(t)$, que actúa sobre otra $v(t)$, y que ambas están relacionadas por una ecuación del tipo $v(t) = g(x, \dot{v}, t)$, integrando esta ecuación, se obtiene la respuesta del sistema en el dominio del tiempo.

Si se representan en coordenadas cartesianas v y \dot{v} , el plano en el cual están representadas ambas variables, se denomina plano de las fases. La variable v se designa como variable de estado. La curva que define \dot{v} en función de v , se denomina trayectoria de estado.

En la figura nº 6 se pueden apreciar estos parámetros.

En un caso general se tendrán n variables de estado, para definir un sistema. El espacio en el que se encuentran se denomina en este caso, espacio de estado.

2.3.2.- Espacio de estado.-

Cuando se tienen n variables, la ecuación que define el sistema, será una ecuación diferencial de orden n , que tendrá la forma:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = r(t)$$

Las variables y_1, y_2, \dots, y_n se denominan variables de estado, y el espacio en que están definidas espacio de estado. La ecuación que las liga a todas se llama ecuación de estado.

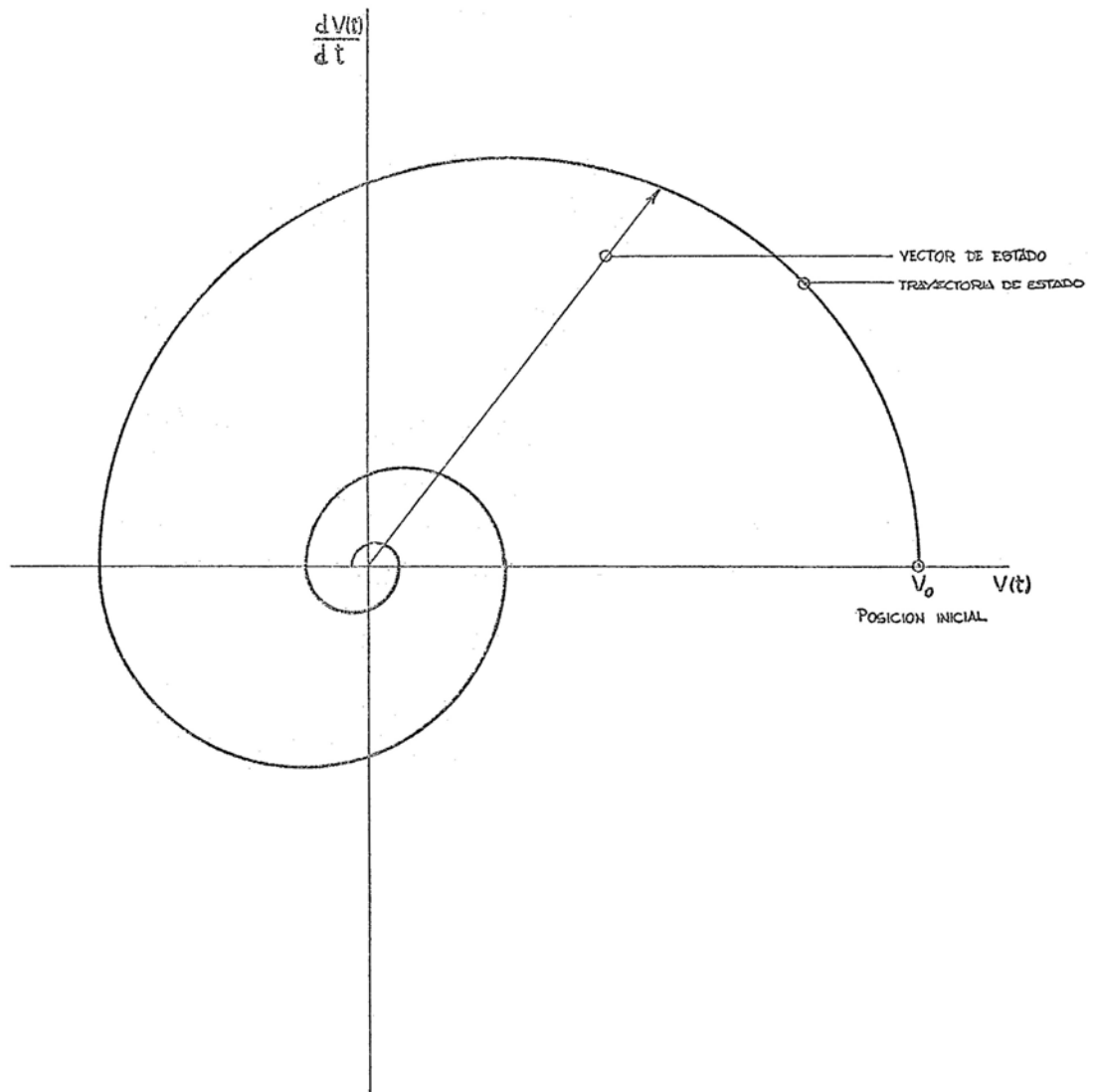


FIGURA N°6

El conjunto de todas estas variables de estado, se agrupa comúnmente en forma de vector, que se denomina vector de estado.

De esta forma, ya ven resultando claras las analogías de estos métodos con la ecuación 1.

2.3.3.- Ecuación diferencial de un vector de estado.-

Partiendo de una forma explícita la derivada temporal del vector de estado, se puede escribir:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + B\bar{r}$$

\bar{r} es un vector de la misma dimensión de x , y que se denomina vector de control del sistema.

A y B son dos matrices, cuyos elementos pueden ser únicamente función del tiempo.

Por tanto si en la ecuación 1, se considera el vector de intensidades, como vector de estado, y el vector de tensiones como vector de control, se tiene la ecuación de estado de la máquina síncrona.

2.4.- RESOLUCION DE LA ECUACION DE ESTADO.-

2.4.1.- Método analítico.-

Se procede a resolver la ecuación de estado de una forma general, para luego particularizar para el caso de la máquina síncrona.

Para obtener la solución se empieza por tomar la ecuación lineal:

$$\frac{dx}{dt} = ax + br$$

siendo a y b constantes cualesquiera.

Este es el caso de una sola variable de estado, y por tanto el vector de estado es unidimensional.

Si se toman transformadas de Laplace, en esta ecuación, su poniendo que se cumplen las condiciones necesarias para que esto sea posible, lo cual es frecuente, denominando las transformadas con letras mayúsculas, queda:

$$s X(s) - x(0) = a X(s) + b R(s)$$

Despejando:

$$X(s) = \frac{x(0)}{s-a} + \frac{br(s)}{s-a}$$

Tomando transformadas inversas en esta ecuación queda:

$$x(t) = e^{at} + \int_0^t e^{a(t-\tau)} br(\tau) d\tau \quad (3)$$

La integral que aparece es la de convolución.

Si se trata de solucionar la ecuación anterior mediante el uso de un factor integrante, llamado p , se tiene:

$$p \frac{dx}{dt} - apx = bpr$$

O bien:

$$\frac{d}{dt} (px) - \left(\frac{dp}{dt} + ap \right) x = pbr$$

Igualando a cero el coeficiente del término en x , queda:

$$\frac{dp}{dt} + ap = 0$$

Esta última ecuación da por solución:

$$p(t) = p(0)e^{-at}$$

La otra ecuación que queda, es:

$$\frac{d}{dt} (px) = pbr$$

Sustituyendo el valor que se ha obtenido para p , se tiene:

$$\frac{d}{dt} (e^{-at} x) = e^{-at} br$$

Integrando los dos miembros de la ecuación, en el intervalo t_0, t , siendo t_0 el momento inicial, se tiene:

$$\int_{t_0}^t \frac{d}{dt} (e^{-at} x) dt = \int_{t_0}^t e^{-az} br(z) dz$$

Si se integran los dos miembros de esta última expresión, se obtiene:

$$x(t) = e^{a(t-t_0)} x(t_0) + \int_{t_0}^t e^{-(t-\tau)a} br(\tau) d\tau$$

Esta es la solución general en el caso unidimensional. Se puede generalizar para el caso de un espacio de n dimensiones, apreciándose la analogía formal, que existe entre ambas soluciones.

La ecuación de estado, vectorial, es:

$$\dot{\bar{x}} = A\bar{x} + B\bar{r}$$

Si, como se ha supuesto anteriormente, las funciones \bar{x} y \bar{r} , admiten transformada de Laplace, la ecuación anterior, en el dominio transformado, resulta ser:

$$s X(s) = A X(s) + B R(s) + X(0)$$

Designando la matriz unidad por I , se tiene:

$$X(s) = (sI - A)^{-1} X(0) + (sI - A)^{-1} BR(s)$$

El diagrama funcional de esta última expresión, viene representado en la figura nº 7.

La ecuación homogénea, es en este caso:

$$s X(s) = A X(s)$$

Se trata de un conjunto de ecuaciones homogéneas, y la única posibilidad que existe, para que tengan solución, es que se anule el determinante :

$$|sI - A| = 0$$

Se busca a continuación una solución particular a la ecuación completa. Para ello se ensaya la serie:

$$\bar{x}(t) = E_0 + E_1 t + \dots$$

El valor inicial es $x(0) = E_0$

Por otra parte se tiene:

$$\frac{d \bar{x}(0)}{dt} = E_1 = A \bar{x}(0)$$

Por tanto $E_1 = A \bar{x}(0)$

Seguendo este método de recurrencia, se llega a:

$$\bar{x}(t) = \left(I + At + \frac{A^2 t^2}{2!} + \dots \right) x(0)$$

El paréntesis es el desarrollo en serie de la función e^{At} , pero de una manera simbólica, pues A es una matriz.

e^{At} , determina la respuesta en régimen libre del sistema y se denomina matriz de transición o matriz fundamental, y se suele representar con la notación $\phi(t)$.

Esta matriz posee las mismas propiedades que una función normal, en el sentido de derivarla e integrarla.

Para la ecuación diferencial completa se expresa la solución particular:

$$\dot{x}_p(t) = \phi(t) q(t)$$

Esta nos da:

$$\frac{d\phi}{dt} q + \phi \frac{dq}{dt} = A\phi q + Br$$

O bien:

$$A\phi q + \phi \frac{dq}{dt} = A\phi q + Br$$

$$\phi \frac{dq}{dt} = Br, \text{ tiene por solución:}$$

$$q = \int_0^t \phi^{-1}(\tau) B(\tau) r(\tau) d\tau$$

La solución particular, es por tanto:

$$x_p(t) = \phi(t) \int_0^t \phi^{-1}(\tau) B(\tau) r(\tau) d\tau$$

Uniendo la solución particular y la de la homogénea, se obtiene por solución general de la ecuación:

$$x(t) = e^{A(t-t_0)} x(t_0) + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)} B(\tau) r(\tau) d\tau \quad (5)$$

Esta solución coincide con la del caso unidimensional.

Se tiene pues solucionada la ecuación de estado, que define el funcionamiento del sistema formado por la máquina síncrona.

Esta solución es totalmente general, y se puede aplicar a cualquier sistema, del que se conozca la matriz de transición.

2.4.2.- Método numérico.-

La ecuación anterior, puede ser resuelta también por la aplicación de métodos numéricos, dividiendo el intervalo de trabajo en partes tan pequeñas como se quiera, y aplicando en ellas el método anterior. De esta forma iterativamente es posible encontrar la solución. Este método es apto para el empleo de ordenador digital, y se hará uso de él en el programa correspondiente a la resolución de la ecuación de estado.

2.4.3.- Método analógico.-

Observando la figura nº 7 se ve un sistema realimentado, que representa la ecuación de estado. Por tanto es posible utilizar métodos electrónicos de tipo analógico, para la resolución de la ecuación.

Este método es mucho menos interesante que el digital, por ser empleable solo en el caso particular, para el cual se ha construido la solución electrónica, habiéndose de hacer para cada caso particular un montaje.

Por tanto esta solución no va a ser tenida en cuenta en el resto del trabajo.

Para un caso concreto, puede ser interesante la construcción del modelo electrónico, en especial por las facilidades que ofrece la moderna microelectrónica.

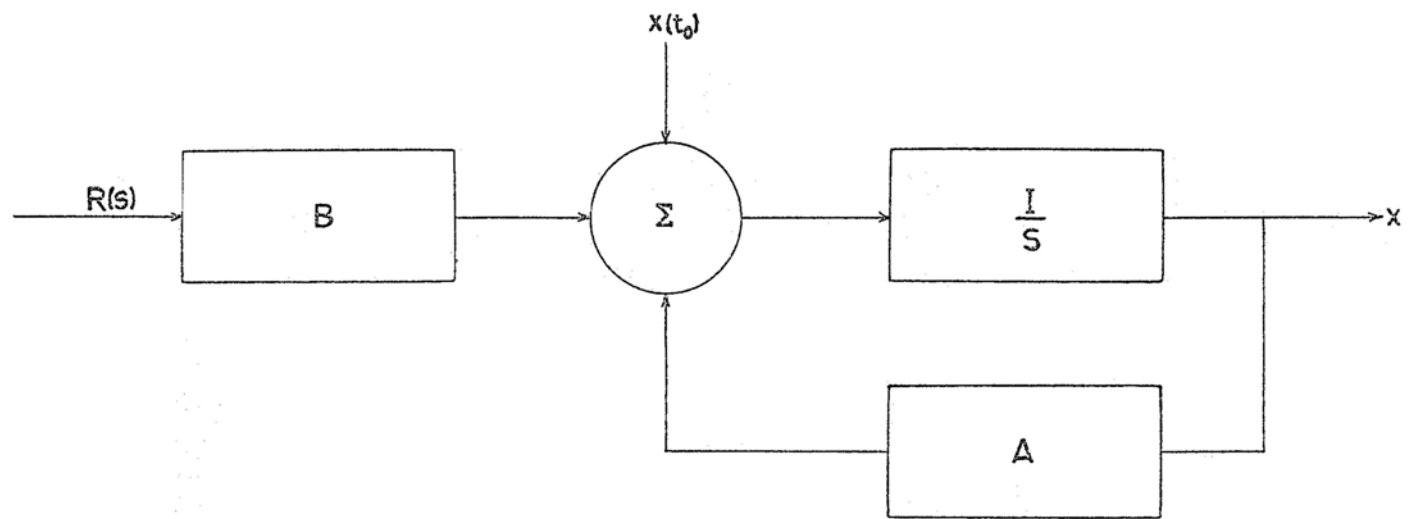


FIGURA N°7

2.5.- TIPOS DE SISTEMAS.-

2.5.1.- Sistemas lineales.-

La ecuación de estado, que se viene empleando hasta ahora, es una ecuación lineal. Un sistema definido mediante una ecuación lineal, se denomina también lineal. Cuando en la ecuación de estado intervienen derivadas de orden superior al primero, del vector de estado, el sistema se denomina no lineal. Con ciertas restricciones, todo sistema no lineal, puede ser linealizabile.

El método de linealización, es de suma importancia, pues permite aplicar todo lo expuesto anteriormente, al sistema linealizado.

2.5.2.- Sistemas no lineales.-

Al considerar sistemas no lineales, tal como se han definido en el apartado anterior, surge el problema de determinar el mejor método de linealización.

En general la matriz A será de la forma $A(x,t)$, y la ecuación de estado $F(x,r,t) = 0$, puesto que las derivadas superiores de x , siempre serán función de t .

Si se toma un estado de referencia, que se hace coincidir con el estado de reposo $\bar{x} = \bar{x}_0$, en dicho estado el vector de control, será nulo.

Por tanto $F(x,t,0) = 0$. Como la ecuación general de estado también está igualada a cero, se puede poner:

$$F(x,t,r) = F(x,t,0) = 0$$

Por tanto las variaciones en torno del punto de reposo, se pueden definir de la forma:

$$\bar{x}' = \bar{x} - \bar{x}_0 \quad \bar{r}' = \bar{r} - \bar{r}_0$$

En general si el punto de reposo no coincide con el estado inicial, se tiene:

$$\bar{x}' = \bar{x} - \bar{x}_0 \quad \bar{r}' = \bar{r} - \bar{r}_0$$

Por tanto la ecuación de estado, toma la forma:

$$\dot{\bar{x}}' = A\bar{x}' + B\bar{r}' + g(x,r)$$

El término g , incluye las partes no lineales, es decir las derivadas superiores. A y B son ahora jacobianos de F .

Si las variaciones de \bar{x} y \bar{r} , entorno al punto de reposo, son pequeñas, se desprecia sin mucho error el término $\bar{g}(x,r)$, quedando el sistema linealizado de la forma:

$$\dot{\bar{x}} = A\bar{x} + B\bar{r}$$

Así pues cualquier sistema no lineal puede ser linealizado de esta forma.

2.5.3.- Aplicación a la máquina síncrona.-

El resultado que se obtuvo en el apartado 2.2.2, para la máquina síncrona, permite aplicar todas las técnicas del espacio de estado a la resolución de su ecuación.

El resultado tiene gran importancia pues permite el estudio de la máquina síncrona desde un punto de vista nuevo.

En los apartados siguientes, se va a resolver de una forma práctica el problema.

Será necesario medir los parámetros de la máquina, para poder plantear su ecuación de estado.

2.6.- RESOLUCION DE LA ECUACION DE ESTADO DE UNA MAQUINA SINCRONA.-

2.6.1.- Introducci3n.-

Al establecer el modelo matemático de la máquina síncrona, se llegó a la ecuación de estado que se ha resuelto en el apartado anterior.

Queda únicamente plantear de una forma real las matrices A y B, para poder obtener el vector de intensidades i , que corresponde al vector de estado, que de forma general se ha designado por \bar{x} en la resolución de la ecuación de estado.

Por tanto la primera operaci3n, consistirá en la medici3n de los parámetros físicos de la máquina síncrona.

Después se preparará la ecuación para su resolución por ordenador, haciendo uso del método numérico.

2.6.2.- Medida de los parámetros físicos de una máquina síncrona.-

Para esta investigaci3n, se ha empleado una máquina KKB, especial para la ensñanza, trabajando como máquina síncrona.

El primer problema que se presenta, es que la respuesta de este sistema no es lineal. En efecto, poniendo en el eje de las x la corriente de excitaci3n de la máquina, y en el eje de las y la tensi3n de salida, en amperios y voltios, respectivamente, se obtiene la curva de la figura n.º 8.

En ella se observan claramente 3 zonas.

La primera va desde el origen de coordenadas, hasta el punto 1, 180.

La segunda va desde el punto 1, 180, hasta el punto 2, 240.

La tercera zona va desde el punto 2, 240, hasta el punto final del diagrama.

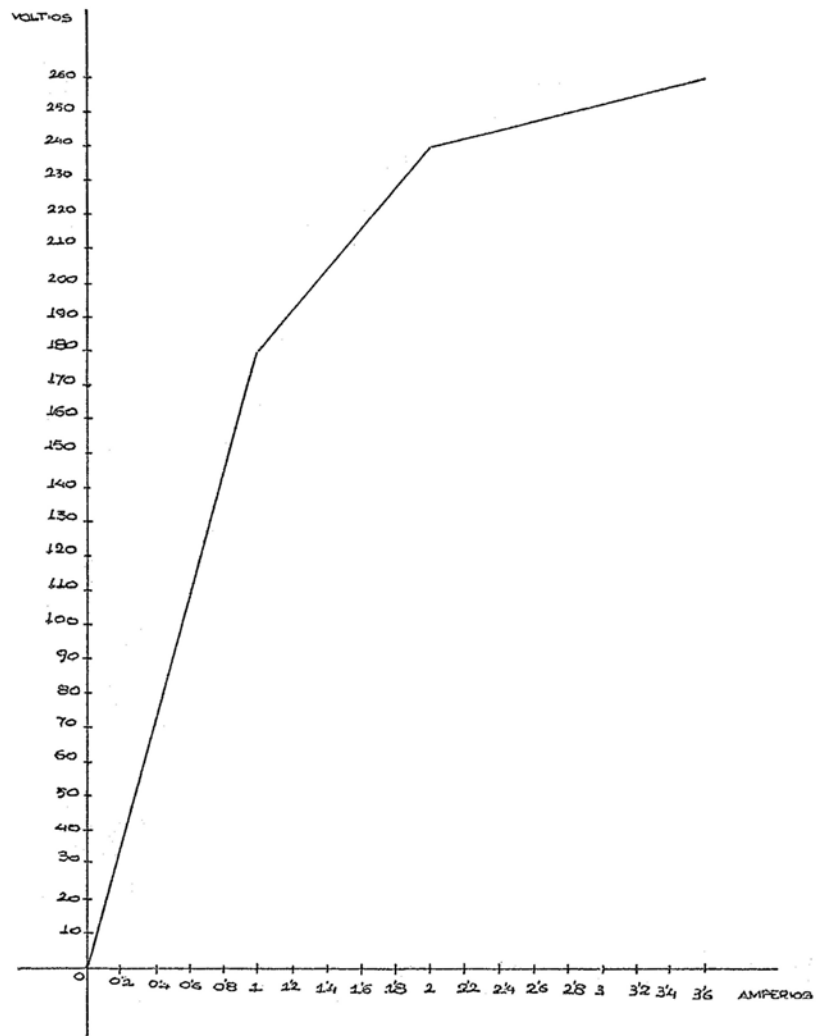


FIGURA N°8

Esta particularidad, impone una complicación del problema, al hacer que se necesiten tres series de medidas distintas, una para cada zona.

Los arrollamientos de estator y rotor, son trifásicos, por lo cual son necesarias medidas en cada devanado. Hay que tener en cuenta las pérdidas en el hierro y en el cobre.

Los arrollamientos están conectados en estrella, por lo que basta medir entre fase y neutro. Por lo demás, el modo de operar es siempre el mismo.

Corriente continua.- En estas medidas, se obtienen las correspondientes resistencias, con las pérdidas incluidas.

Corriente alterna.- De estas medidas se sacan las impedancias, que proporcionan los coeficientes de inducción.

Las medidas se realizan tanto en estator, como en rotor, situándose en un punto de la zona correspondiente, en el caso de medidas con excitación.

El modo de operar es el siguiente:

- Se toma la fase a medir y las otras dos se dejan en circuito abierto. Se coloca una pila de f.e.m. E , tal como representa la figura nº 9.

- Por medio de un voltímetro y un amperímetro, se tienen la tensión y la corriente, por división se obtiene la resistencia en cc.

- Se hace esto mismo para cada fase, y como la conexión es en estrella, se calcula la resistencia total.

En la tabla nº 1, se encuentra el cuadro, que resume estas medidas.

En corriente alterna, se han de considerar las inductancias propias, y las mutuas. Estas últimas son siempre del orden del 5% como máximo, de la primarias, por lo cual en una primera aproximación se pueden despreciar.

Hay que tener en cuenta, que estas inductancias, varían con el ángulo de giro del rotor, en la forma que se puede apreciar

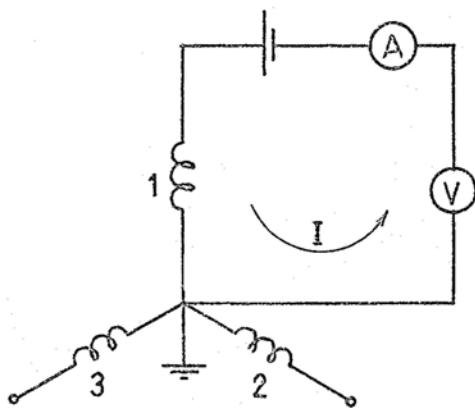


FIGURA Nº9

en la figura nº 10.

Por tanto los valores que se midieran serán los máximos, poniéndose luego el valor correspondiente, según el ángulo de giro.

L_{dsda} y L_{qsqs} , varían según el ángulo de giro θ , de la forma:

ma: $L_{cos \theta}$.

L_{drdr} y L_{qrqr} , varían de la forma $L \cos 2\theta$

Las medidas se hacen en corriente alterna de 50 c/s.

de esta forma, mediante el esquema de la figura nº 9 se obtiene la impedancia, teniendo en cuenta que se ha colocado ahora una fuente de alterna.

Los resultados, se resumen también en la tabla nº 1, poniendo de manifiesto la zona correspondiente.

El margen de error, con el cual se han hecho estas medidas es de un 5%, que es suficiente para los propósitos que se pretenden.

Mediante el empleo de un fluxímetro, se podría mejorar la precisión, pero no se ha podido disponer de este instrumento.

Con esto se tiene definida la matriz A y la B.

Queda por fijar la matriz e de control.

Teniendo en cuenta que la única tensión que se introduce es la de entrada, denominada E. Los restantes valores se hacen cero. Por tanto no es que la tensión de entrada va a determinar la zona de trabajo. Es pues un modo de controlar el sistema.

Con tales estos datos y la expresión 5, se puede obtener la matriz de intencionalidades, que corresponde a una tensión de excitación dada.

TABLA I

Primera zona: $0 < I_{ex} \leq 1$

Segunda zona: $1 < I_{ex} \leq 2$

Tercera zona: $2 < I_{ex}$
 ROTOR

EJE DIRECTO		EJE CUADRATURA		ZONA
R	L	R	L	
drdr	drdr	qrqr	qrqr	
0 Ω	0.10 H.	5 Ω	0.35 H.	1º
0 Ω	0.10 H.	0 Ω	0.19 H.	2º
3 Ω	0.10 H.	5 Ω	0.08 H.	3º

ESTATOR

R	L	R	L	ZONA
dsds	dsds	qsqs	qsqs	
10 Ω	0.19 H.	0 Ω	0.15 H.	1º
10.5 Ω	0.19 H.	0 Ω	0.19 H.	2º
10.4 Ω	0.19 H.	0 Ω	0.20 H.	3º

Nota.- I_{ex} , representa la corriente de excitación o de entrada.

2.6.3.- Resolución de la ecuación de estado mediante ordenador.-

Con los datos que se han obtenido en las medidas, y la solución analítica de la ecuación de estado, se está en condiciones de preparar un programa para calcular la matriz de intensidades de la máquina síncrona.

Observando la solución de la ecuación de estado, plasmada en la fórmula 5, se ve la complejidad de su solución de una forma iterativa, sobre todo en un caso como este, en el cual varían algunos parámetros con el ángulo de giro de la máquina.

El vector de estado es en este caso el de intensidades.

Condiciones iniciales.- Para aplicar la fórmula nº 5, es necesario conocer el vector de intensidades en el momento inicial. Como en $t=0$, no se tiene aplicada ninguna excitación exterior, no circulará ninguna corriente por la máquina. Por tanto el vector $x(t_0) = 0$.

En el instante $t=0$, se aplica la tensión de alimentación que es sinusoidal, y corresponde a e . De esta forma el vector de control, con el cual se gobierna el sistema, tiene todas sus componentes nulas, salvo e , con la cual además nos situaremos en la zona de trabajo adecuada.

La tensión sinusoidal de pulsación w , en este caso nos sirve de alimentación. En el caso de una central hidroeléctrica, no se aplica ninguna tensión, pero el rotor se hace girar al caer agua sobre los diábolos de la máquina, produciéndose entonces las tensiones y corrientes. En este caso también el vector de control es la matriz de tensiones que se producen, pero en amplitud y frecuencia están ligadas a la influencia del agua que mueve el sistema. Por tanto el estudio que se hace aquí, también es válido para un caso de este tipo.

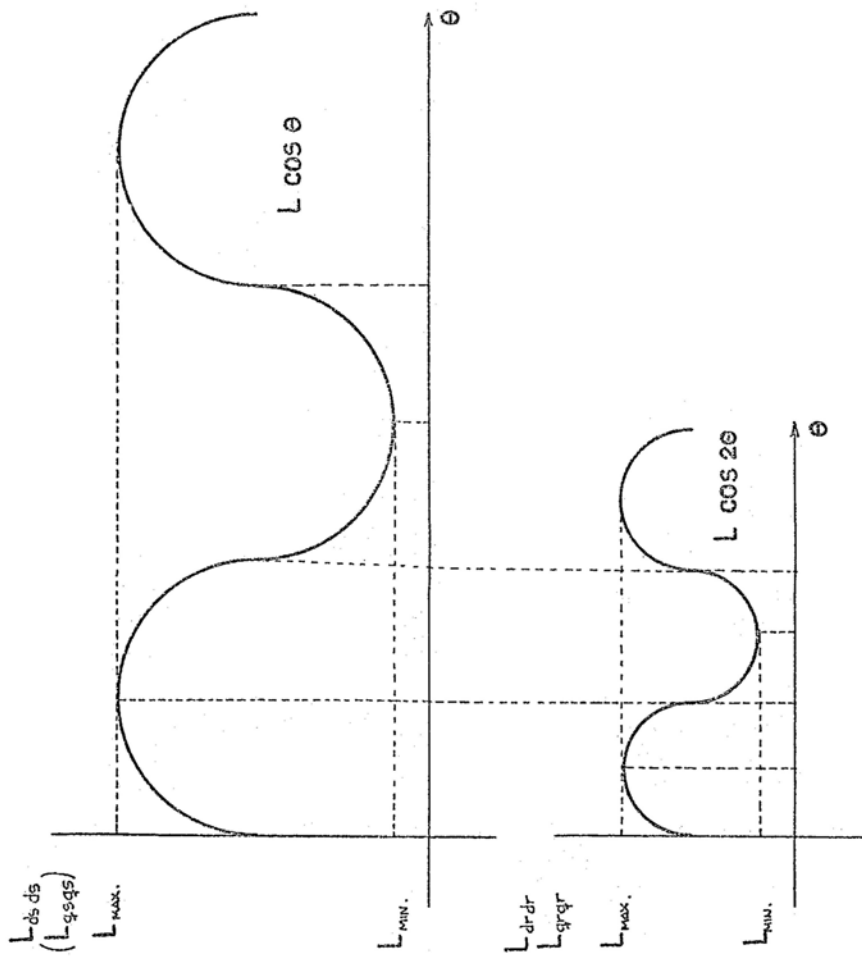


FIGURA N.º 10

2.6.3.1.- Descripción del programa MR1.-

En la figura nº 11 aparece el organigrama general del programa.

Lo primero que se hace es situarse en el punto de trabajo, al fijar la tensión de entrada. De esta forma se sabe con que parámetros hay que trabajar. Normalmente esta tensión se fija de tal forma que a la salida la tensión sea un valor estándar como 220 V.

En el caso de central hidroeléctrica, también estandarizada la tensión de salida.

Fijada la zona de trabajo el programa lee los parámetros correspondientes.

Después calcula las matrices A y B, tal como se indicó en el apartado correspondiente.

Después se calcula la matriz de intensidades aplicando la fórmula nº 5, y dividiendo el intervalo de integración en 100 partes. El tiempo inicial t_0 , que se toma como origen es 0.

La frecuencia de la tensión aplicada es de 50 Hz., con lo cual para el estudio de las corrientes, bastará ver como son en un ciclo, por lo que el límite superior de integración se pone en 0.02 segundos.

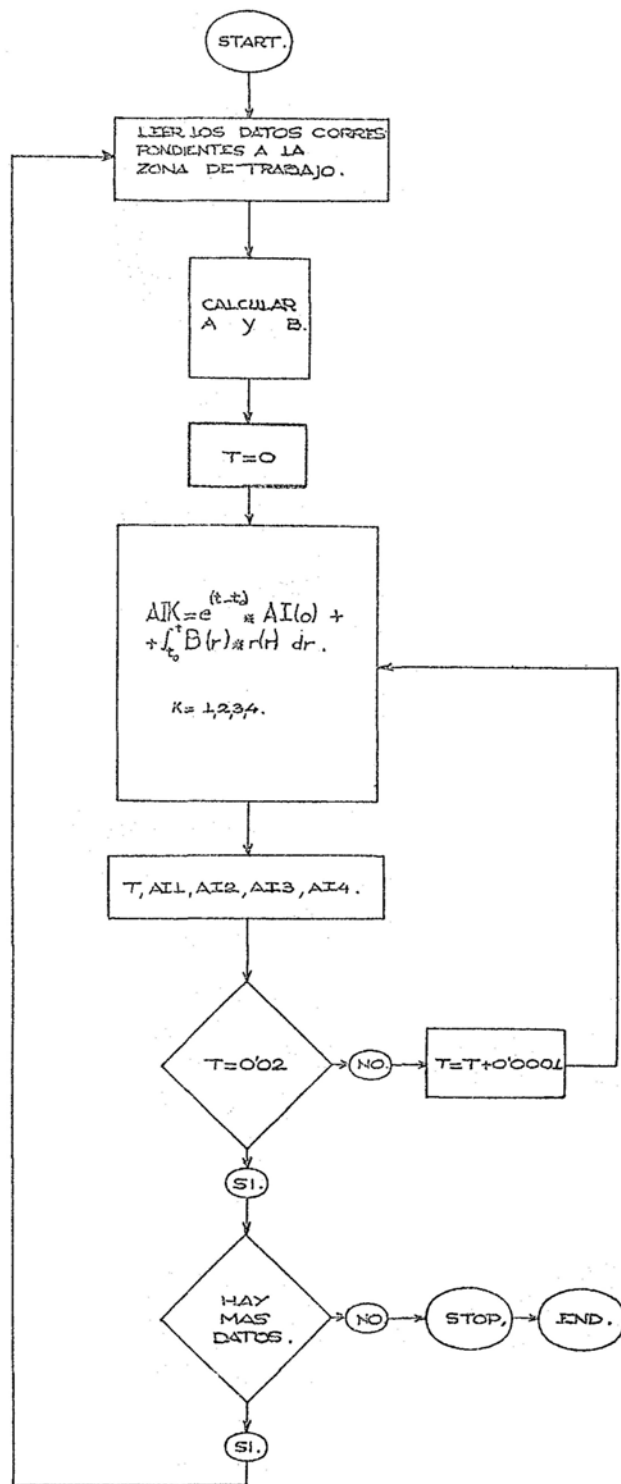
La razón de estudiar únicamente un ciclo de las corrientes es debido a que estudiando más no se aportaría nada nuevo, pues alcanzado el régimen permanente, los valores de las corrientes siguen fijos, mientras no se varíe la tensión de gobierno.

En caso de estudiar el transitorio que se produce al comenzar el funcionamiento, este es muy pequeño en duración con respecto a los 0.02 segundos, por lo que queda también incluido en el estudio del primer ciclo.

Después de calcular el valor de la matriz de intensidades, se imprime esta con el tiempo a que corresponde. El tiempo se varía de mili segundo en milisegundo.

Este tiempo es el que va siendo extremo superior de la in-

FIGURA N°11



ción. Si no se ha llegado a los 0.02 segundos, se continúa el proceso hasta alcanzarlos, terminando en este momento.

Si se quiere estudiar otro punto de trabajo, se puede comenzar un nuevo ciclo, leyendo otra zona de trabajo.

De esta forma es posible tener descrito con mucho detalle el funcionamiento de la máquina síncrona.

El programa, está escrito en Fortran, que es el lenguaje que más se adapta al propósito, y tal como se obtiene compilado, puede verse en el apéndice de este trabajo.

Datos.- Son los que se han obtenido en el apartado de medidas.

En el programa se han empleado otros símbolos. Su equivalencia con los aquí utilizados se da en la tabla II, así como los valores de las variables no incluidas en la tabla I.

Con estos nuevos símbolos, la ecuación que ha resuelto el programa, queda de la forma:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} AI \\ 1 \\ AI \\ 2 \\ AI \\ 3 \\ AI \\ 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} HL & HM & 0 & 0 \\ 1 & 1 & & \\ HM & HI + HL & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 5 & \\ 0 & 0 & HL + HI & HM \\ & & 3 & 6 & 3 \\ 0 & 0 & HM & HL \\ & & 3 & 4 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -R & 0 & 0 & 0 \\ 1 & & & \\ 0 & R & -R & w HM & w HM \\ & 11 & 2 & 0 & 6 & 0 & 7 \\ -w HM & -w HM & R & -R & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 5 & 22 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & -R & 4 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} AI \\ 1 \\ AI \\ 2 \\ AI \\ 3 \\ AI \\ 4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E \\ 1 \\ E \\ 2 \\ E \\ 3 \\ E \\ 4 \end{pmatrix}$$

TABLE II

TABLE DE DATOS

L = HL dsds 1	w = 314. 0
LL = HL drdr 2	i = AI dsds 1
L = HL qrqr 3	ii = AI drdr 2
L = HL qsqs 4	i = AI qrqr 3
L = HL = 0.4 H. 1 5	i = AI qsqs 4
L = HL = 0.4 H. 22 6	e = EDS dsds
M = HM = 0 dsdr 1	e = EDR qrqr
M = HM = 0 drds 2	e = EQS qsqs
M = HM = 0 qrqs 3	e = EDR drdr
M = HM = 0 qrds 4	
M = HM = 0 qrdr 5	
M = HM = 0 drqr 6	
M = HM = 0 drqs 7	
R = 10. 11	
R = 110. 12	
R = R dsds 1	
R = R drdr 2	
R = R qrqr 3	
R = R qsqs 4	

Resultados.- En el apéndice, aparecen los resultados que proporciona el ordenador. Con ellos se ha elaborado las formas de onda que aparecen en la Figura nº 12.

En dicha figura, se observa lo siguiente:

La intensidad directa del estator, representada por I_1 , comienza en el instante inicial, con un valor de 1.96 Amperios, debido a que se inserta bruscamente a la entrada de la máquina síncrona, una tensión de 220 Voltios, (éste es el valor que se ha utilizado en la realización del programa). Rápidamente este transitorio inicial tiende a desaparecer, y en $t = 0.0055$ segundos, se tiene ya la onda en régimen permanente, que es el que se repetirá a lo largo de todo el proceso. En él, el valor máximo de la intensidad, es de 1.8 Amperios, y la frecuencia de 50 Hercios.

Los valores de esta onda, cambian según los parámetros de la máquina, y el vector de control, formado por la tensión de entrada.

En caso necesario, es posible hacer que el transitorio desaparezca más rápidamente, utilizando elementos externos que modifiquen los parámetros físicos de la máquina síncrona.

En la corriente cuadratura del estator, el valor inicial es de 1.9 Amperios, estabilizándose en $t = 0.01$ segundos, en una onda sinusoidal de frecuencia 50 Hercios, y amplitud 1.51 Amperios, es decir, presenta un transitorio igual que el anterior, y en régimen permanente, está desfasada 90 grados, con respecto a la intensidad directa, lo cual es lógico, puesto que ambos ejes están desfasados 90 grados geométricos. Todo ello se puede apreciar en la Figura nº 12.

La intensidad directa del rotor, comienza en 1.96

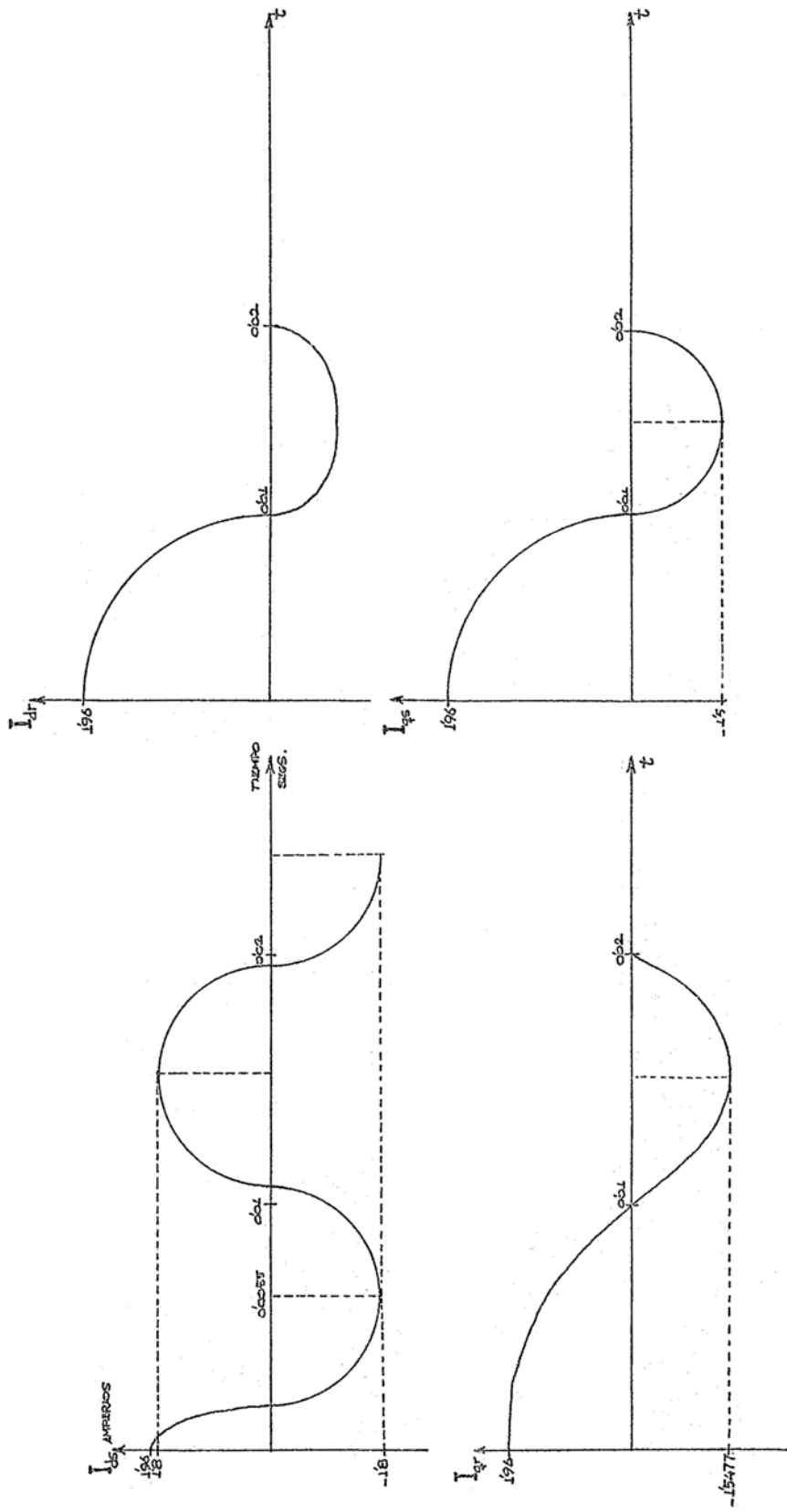


FIGURA Nº12

Amperios, y luego sale una sinusoidal amortiguada que pasa por 3 o 4 ciclos, tiene ya una amplitud despreciable.

Esto es lógico, puesto que en el rotor las corrientes deben ser milas, por invertirse toda la energía en hacerle girar.

La intensidad en cuadratura, tiene un valor inicial de 1.96 Amperios, y luego tiende de una forma sinusoidal amortiguada, a 0, pero de una forma bastante más lenta que la intensidad directa. En realidad siempre queda un pequeño residuo de intensidad en cuadratura del rotor, lo que hace que los devanados de éste se calienten.

Por tanto ya se tiene el estudio completo de la distribución de corrientes, dentro de la máquina síncrona. Hay que tener en cuenta que estos valores corresponden a los parámetros obtenidos en el apartado de medidas.

Con estos resultados es posible estudiar todas las formas de corrientes, en la máquina síncrona, y de esta forma saber de antemano, cual es su respuesta.

Además variando los parámetros, que se introduzcan en el programa, es posible ver como influyen estos en la distribución de corrientes.

Otro punto importante es el poder conocer los picos de los transitorios, lo cual es necesario a la hora de hacer las conexiones de la máquina síncrona al circuito exterior.

2.7.- CONTROLABILIDAD, OBSERVABILIDAD Y ESTABILIDAD DE LA MÁQUINA SINCRONA.-

2.7.1.- Introducción.- Dentro del espacio de estado, estos tres conceptos pueden ser estudiados de una manera afín.

Son temas muy importantes, pues hasta ahora se ha visto la forma de encontrar la respuesta de una máquina sincrónica, pero sin asegurar nada de si su funcionamiento es estable o no en la zona de trabajo. Si se encuentra un criterio que utilizando los mismos datos, que se han empleado para la obtención de las intensidades, pueda proporcionar también la estabilidad, controlabilidad y observabilidad del sistema, nos encontraremos ante un método muy útil y compacto.

El primero en estudiar estos temas, aplicados a sistemas mecánicos, a fines del siglo pasado, fue Lyapounov, que en su tesis doctoral dió criterios que permitían este análisis.

Estos métodos estuvieron olvidados hasta hace pocos años que se empezaron a aplicar de nuevo.

Aquí se va a hacer uso de estos métodos, adaptados al sistema de potencia que constituye la máquina sincrónica.

Las ventajas con respecto a los sistemas clásicos, se ponen de manifiesto, mediante comparación, a lo largo de la exposición.

Se empieza por el estudio de la estabilidad, comparando con el método de Nyquist, y resultando las ventajas prácticas y conceptuales que tiene el método de Lyapounov.

Después se introducen los conceptos de observabilidad y controlabilidad y el modo de estudiarlos, aplicándolos a la máquina sincrónica.

De esta forma se obtiene un estudio sintético de la máquina sincrónica dentro del espacio de estado.

2.7.2.- Estudio de la estabilidad de la máquina síncrona.-

De acuerdo con los métodos de Lyapounov, basta con estudiar la energía del sistema, para ver si este es estable.

Un sistema será estable si su energía disminuye o a lo sumo se mantiene constante con el tiempo. En caso de que la energía del sistema aumente con el paso del tiempo, el sistema será inestable.

Esta técnica se utilizó en la teoría clásica, únicamente aplicada a la ganancia de un sistema realimentado. En el caso de que la energía del sistema fuese en aumento, y por tanto la ganancia, el sistema era inestable y oscilaba.

Aquí se aplica la teoría de Lyapounov, ampliándola y completándola en varios aspectos.

El sistema que constituye la máquina síncrona, viene definido por sus variables de estado o características por lo que es evidente que la estabilidad se ha de estudiar en función de las mismas.

2.7.2.1.- Criterio de estabilidad.-

La determinación de la estabilidad, constituye el aspecto fundamental del estudio de los sistemas dinámicos. Los métodos clásicos para su determinación, han sido siempre el de Nyquist y el de Routh. Ambos utilizan funciones de variable compleja, y por tanto son poco aptos para el cálculo numérico.

Un método más sencillo de estudiar la estabilidad de un sistema, se puede tener sin más que pensar en el concepto físico de estabilidad.

Intuitivamente, se ve que un sistema será estable, si es posible, de algún modo, gobernar la amplitud de su respuesta.

Si se produce un desplazamiento de la posición de equilibrio del sistema, y este regresa asintóticamente a dicha posición

se puede decir que el sistema es asintóticamente estable.

Si se supone que el sistema tiene el punto de equilibrio en el origen del espacio de estado, y este tiene n dimensiones la distancia de un punto cualquiera al origen está dada por la expresión:

$$x = (\mathbf{x} \cdot \mathbf{x})^{1/2} = \left(x_1^2 + \dots + x_n^2 \right)^{1/2}$$

Esta distancia así definida, tiene las propiedades de métrica, considerando al espacio de estado, como un espacio vectorial.

Si se considera el conjunto de los puntos situados a una distancia R del origen de coordenadas, se tiene una bola de n dimensiones. Dicha hipersuperficie, se representa por $S(R)$.

Si en esta región del espacio de estado, existe una trayectoria de orden n , definida por un vector de estado de n variables, y un fenómeno transitorio es incapaz de sacar a la trayectoria de la superficie $S(R)$, se dice que el estado es estable.

Si además la trayectoria después del transitorio, tiende asintóticamente al origen, el sistema es asintóticamente estable.

Todas las situaciones aparecen representadas en la figura nº 13.

De esta forma se tiene la idea física de estabilidad.

Para el fin que se pretende es necesario matematizar estas ideas.

Función de Lyapounov.-

Si se tiene la expresión de la energía del sistema, esta siempre es una función definida positiva, que se representa por V . Si su derivada temporal es negativa, quiere decir que la energía decae con el tiempo, lo cual indica que el sistema es asintóticamente estable. En el caso de que se mantenga nula el sistema es estable simplemente.

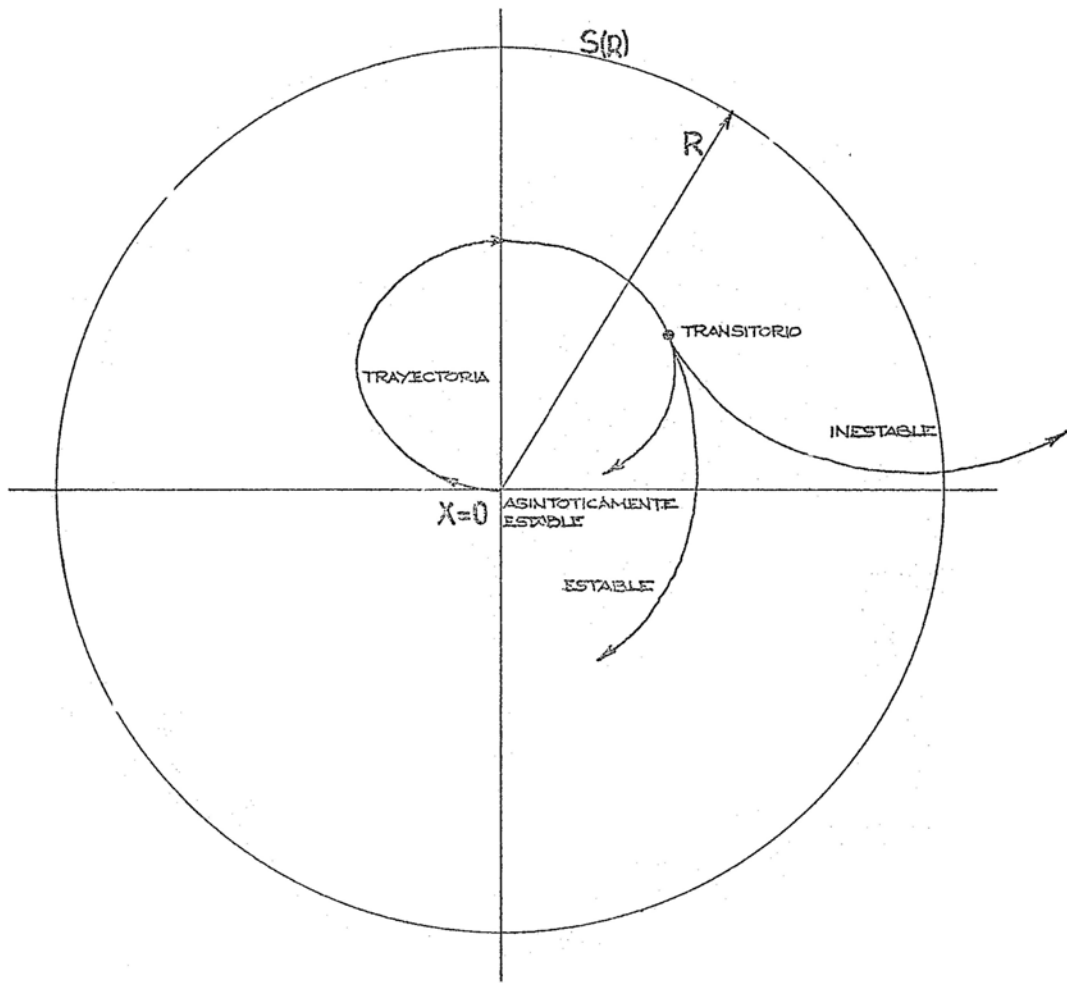


FIGURA N°13

A continuación se describe el método empleado por Lyapunov.

Este consiste en construir una función $V(x)$, denominada función de Lyapunov.

Esta función ha de ser definida positiva en todo el espacio de estado. La representación física de esta función es la energía del sistema.

Por tanto la variación temporal de V , ha de ser una función semi definida negativa, para que la trayectoria sea estable.

El sistema será estable en el caso en el que la función \dot{V} , sea definida negativa en todo el recinto en el cual se está estudiando la estabilidad.

Se define el factor de estabilidad del sistema como:

$$-\frac{\dot{V}}{V} = \frac{1}{\tau}$$

Si la función \dot{V} , resulta ser definida positiva en el recinto que se está estudiando, el sistema es inestable.

Cálculo de la función de Lyapunov.-

El método que se va a emplear se denomina método directo de Lyapunov. Para el cálculo de la función de Lyapunov, se utiliza el método del gradiente, que se expone a continuación.

En un espacio de n dimensiones, el vector x tiene n componentes, por lo cual:

$$V(x) = V(x_1 \dots x_n)$$

Si se deriva esta expresión respecto al tiempo, teniendo en cuenta que $x = x(t)$, queda:

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial x_1} \frac{dx_1}{dt} + \dots + \frac{\partial V}{\partial x_n} \frac{dx_n}{dt}$$

A esta última expresión se le puede dar la forma matricial siguiente:

La expresión anterior, se puede poner en forma matricial

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial V}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial V}{\partial x_n} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{pmatrix} = \delta_V^T \dot{\mathbf{x}}$$

O bien expresado de otro modo:

$$\dot{\mathbf{V}} = (\text{grad } V)^T \cdot \dot{\mathbf{x}}$$

Si se integra esta última expresión, resulta:

$$V = \int_0^{\mathbf{x}} \delta dx = \int_0^{x_1} \delta_1(x_1, \dots, x_n) dx_1 + \dots + \int_0^{x_n} \delta_n(x_1, \dots, x_n) dx_n$$

$x_2 = \dots = x_n = 0$

V es una función potencial, pues $\dot{\mathbf{V}}$ representa un gradiente. Por tanto:

$$\nabla \cdot \delta = \nabla \cdot (\nabla V) = 0$$

Al cumplirse esta última expresión, y anularse el rotacional del gradiente, las derivadas cruzadas de las componentes del gradiente, han de ser nulas o iguales., es decir:

$$\frac{\partial \delta_2}{\partial x_1} = \frac{\partial \delta_1}{\partial x_2} \dots \dots \dots \frac{\partial \delta_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \delta_j}{\partial x_i}$$

Para estudiar la estabilidad del sistema, es necesario el estudio de la función V, y por tanto el gradiente de V. En esta idea, se basa el método del gradiente para el estudio de la estabilidad del sistema.

Método del gradiente.- Cada una de las componentes del gradiente, será una función de las variables de estado.

La ecuación de estado del sistema, sea lineal o linealizado, es:

$$\dot{\mathbf{x}} = A\mathbf{x} + B\mathbf{r}$$

$$\dot{V} = \frac{d}{dt} V = \left(\begin{array}{c} a_{11} x_1 + \dots + a_{1n} x_n \\ \dots \\ a_{n1} x_1 + \dots + a_{nn} x_n \end{array} \right) \cdot \frac{dx}{dt}$$

A esta función se le impone la condición de que sea definida negativa, y en las zonas en que esto ocurre la ecuación indica que el sistema es estable. Por tanto es posible estudiar la estabilidad de un sistema por zonas del espacio de estado.

Se ha de imponer también la condición de la igualdad de derivadas cruzadas, que ayuda al cálculo de los coeficientes a_{ij} . Estos coeficientes se suelen fijar en función de la energía del sistema.

El teorema demostrado por Lyapounov, en su método directo, dice, que al encontrar una función V , con derivada temporal nula en el recinto que se está tratando, el sistema es estable. Si la derivada es negativa en el recinto en que se trate, el sistema es asintóticamente estable.

Se va a hacer a aplicación de esta teoría a la máquina síncrona.

En régimen permanente, las únicas componentes no nulas del vector de intensidades, son las corrientes que circulan por el estator, ya que como se ha visto, por los cálculos del programa M_1 , las corrientes del rotor, se anulaban, transcurrido el transitorio inicial.

Estas corrientes, están aplicadas sobre impedancias k_1 y k_2 que son siempre números positivos.

Por tanto el valor de la energía del sistema se puede pensar de la forma:

$$V = \frac{1}{2} (k_1 i_1^2 + k_2 i_2^2)$$

La expresión que se ha obtenido, es siempre definida positiva, con lo que se cumple la primera condición de estabilidad.

V_s se calcula derivando respecto al tiempo la función V , resultando el mismo valor, que si se hubiese aplicado directamente el método del gradiente.

Como la variación de las corrientes es sinusoidal, se puede poner:

$$V = 1/2(k_1 I_{ds}^2 \cos^2 wt + k_2 I_{qs}^2 \cos^2 wt)$$

Derivando respecto al tiempo, se tiene:

$$V = -\cos wt \cdot \sin wt (I_{ds}^2 k_1 + I_{qs}^2 k_2)$$

Esta función es siempre definida negativa, para cualquier valor de las variables de estado:

$$V(0,0,0,0) = 0.$$

Por tanto, la función V , es de Lyapounov, en todo el espacio de estado, por lo cual, el sistema es asintóticamente estable.

Queda de manifiesto, la sencillez que proporciona este método, para el estudio de la estabilidad.

El método del gradiente, es también aplicable en este caso, como se verá más adelante.

2.7.3.- Estudio de la controlabilidad y observabilidad del sistema.-

Estos dos conceptos, aplicados, los sistemas, dentro del espacio de estado, fueron introducidos por Kalman.

Son muy útiles, para darnos una idea del funcionamiento del sistema, con vistas a su optimización.

De una manera intuitiva, es posible definir un proceso, como completamente controlable, solamente si

toda transición deseada de un estado del proceso, a otro, puede realizarse en un tiempo finito, por intervención del vector de control.

Un proceso se denomina observable, si toda transición, que se verifique dentro de él, afecta antes o después, a las variables de salida. Si no ocurriese esto, es decir, que la salida permaneciese invariante a los cambios de las variables de estado, existiría dentro del propio sistema un lazo, que absorbería la variación, haciendo que el sistema fuese inestable.

La noción complementaria a estos dos conceptos es la de oscilación. En el caso de oscilar, la variación de las variables de estado, engendran siempre la misma salida.

Para un sistema lineal, o que previamente se haya linealizado, tal como ocurre en el caso de la máquina síncrona, la respuesta se obtiene por superposición de todos los modos posibles de trabajo. Esto es lógico, pues al ser el sistema lineal, es aplicable el teorema de superposición.

La controlabilidad de un modo de trabajo del sistema, está ligada a la existencia de una relación entre este modo, y la señal de excitación, al igual que la observabilidad liga la salida con las variables de estado.

Estos conceptos, aunque sea de una forma intuitiva, se comprenden, pues si en un tiempo finito, la señal de control, representada por el vector r , no afecta al modo de trabajo, ni a la salida, no juega ningún papel, y el sistema funcionaría por su cuenta.

La salida del sistema, será en general una función del tipo $\bar{y} = C\bar{x} + D\bar{r}$, donde C y D son las matrices que ligan la salida con los vectores de estado y de control.

El proceso será controlable, expresado de una forma matemática, si conocidas A y B y el valor del vector de estado en el instante inicial, se puede construir un vector de control, tal que en un tiempo finito t_f , lleve al sistema al estado definido por el vector $x(t_f)$.

Esto quiere decir, que la transición entre el estado inicial, y el definido por t_f , se realiza en un tiempo finito.

Si se supone que la matriz A, del sistema es diagonalizable, entonces cualquier variación del vector de control, afecta a las componentes de \dot{x} , por lo que el vector de control, puede actuar sobre la salida del sistema, con lo que el sistema es controlable.

Por tanto el criterio práctico para saber si un sistema es controlable, en el caso en que la matriz A sea diagonalizable, cosa que no siempre es posible, y además posea algún elemento no nulo.

En el caso en que la matriz A no sea diagonalizable, se emplea el cambio de variable:

$$\bar{x} = T y$$

Por tanto la ecuación de estado, queda en la forma:

$$\dot{\bar{y}} = T^{-1} A T \bar{y} + T^{-1} B r$$

La matriz $T^{-1} A T$, es una matriz diagonal. Por tanto la ecuación que define el sistema, queda como:

$$\dot{\bar{y}} = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \bar{y} + \begin{pmatrix} g_{11} & \dots & g_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ g_{n1} & \dots & g_{nn} \end{pmatrix} r$$

De esta forma resulta evidente, que al ser no nulo alguno de los g_{ij} , las variaciones de r. afectan al vector de estado, y por tanto a la salida del sistema.

Si el vector de control tiene todas sus componentes nulas, es decir el sistema es libre, de la forma $\dot{\bar{x}} = A \bar{x}$, se tiene definido el estado inicial del sistema.

Si este estado inicial, puede ser definido sin ninguna ambigüedad, el sistema es observable.

Por tanto, ya se tienen los criterios prácticos, para poder determinar, en un sistema lineal, o linealizado, la controlabilidad y la observabilidad.

Aplicación a la máquina síncrona.- Lo primero que hay que definir es su ecuación.

En partes anteriores, se ha indicado, cual es la ecuación de estado de la máquina síncrona.

Como existen tres zonas posibles de funcionamiento, existirán tres ecuaciones de estado distintas, una para cada zona.

Los valores de sus elementos, distintos de cero, son diferentes, según la zona, pero no así los elementos nulos, que lo son en las tres zonas.

Por tanto, como en los criterios, antes expuestos, no interesa el valor de los elementos, si no si son nulos o no, basta con estudiar la ecuación de estado en una de las zonas, para sacar conclusiones de tipo general.

Con los valores expresados en la tabla 1, la ecuación de estado en la zona segunda, es:

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} -1.71 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 9.5 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} 0.19 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.19 \end{pmatrix} u$$

En este caso la matriz A, es diagonal, por lo que no es necesario proceder a su diagonalización.

Controlabilidad.- La condición para que el sistema sea controlable, es que la matriz A sea diagonal, y los elementos de la matriz que multiplica al vector de control, sean no nulos, al menos uno de ellos.

En este caso se cumplen ambas condiciones, por lo que el sistema es controlable.

Observabilidad.- Si se anula el vector de control, ha de quedar una ecuación que defina completamente el estado inicial, para que el sistema sea observable.

En este caso al anular el vector e, queda una ecuación que define sin ambigüedad ninguna, el estado inicial, por un vector de intensidades, que tiene todas sus componentes nulas.

Por tanto el sistema es observable.

2.7.4.- Aplicación del método del gradiente, al estudio de la estabilidad de la máquina sincrosa.-

Además de poderse definir la función V, de una forma física, se puede hacer uso del método del gradiente, para definirla.

La función V, viene definida por la ecuación:

$$V = \begin{pmatrix} a_{11} i_{ds} + a_{12} i_{dr} + a_{13} i_{qr} + a_{14} i_{qs} \\ a_{21} i_{ds} + a_{22} i_{dr} + a_{23} i_{qr} + a_{24} i_{qs} \\ a_{31} i_{ds} + a_{32} i_{dr} + a_{33} i_{qr} + a_{34} i_{qs} \\ a_{41} i_{ds} + a_{42} i_{dr} + a_{43} i_{qr} + a_{44} i_{qs} \end{pmatrix} \cdot i$$

Como antes se indicó, se ha de verificar la igualdad de derivadas cruzadas, por lo cual $a_{ij} = a_{ji}$. Los coeficientes de las corrientes del rotor, se pueden tomar nulos, pues se ha visto que estas corrientes se anulan, pasado el transitorio inicial.

Por tanto, $a_{12} = 0$, $a_{13} = 0$, $a_{22} = 0$, $a_{23} = 0$, $a_{32} = 0$,

$a_{33} = 0$, $a_{42} = 0$, $a_{43} = 0$.

Por la propiedad de las derivadas cruzadas: a_{24} , a_{34} , a_{41} ,

y a_{31} , resultan nulos también.

Por tanto la ecuación que resulta es:

$$\dot{V} = \left(-1.71 \frac{i}{ds} + 0.19 \frac{e}{ds} \right) \cdot (a_{11} i_{ds} + a_{41} i_{dr}) + 9.5 \frac{i}{qs} \cdot (a_{14} i_{ds} + a_{44} i_{qs})$$

Para los coeficientes que quedan sin determinar, se toman los valores:

$a_{11} = a_{44} = a_{14} = a_{41} = -1$

Con lo cual la derivada de la función de Lyapounov, es la siguiente:

$$\dot{V} = 1.71 \frac{i^2}{ds} + 1.71 \frac{i}{ds} \frac{i}{qs} - 0.19 \frac{e}{ds} \frac{i}{qs} - 0.19 \frac{e}{ds} \frac{i}{ds} - 9.5 \frac{i}{qs} - 9.5 \frac{i}{qs} \frac{i}{ds}$$

Esta función, para cualquiera de los valores que proporciona el programa MR1, tiene un valor negativo, luego es definida negativa en todo el recinto que se está estudiando.

El siguiente paso es integrarla, para obtener V.

Hay que tener en cuenta, que:

$$\frac{di}{ds} = I \cdot \frac{d(\cos wt)}{ds} = -I \frac{\sin wt}{ds} dt$$

Análogamente: $\frac{di}{ds} = I \cdot \frac{d(\cos wt)}{ds} = -I \frac{\sin wt}{ds} dt.$

Con estas consideraciones, resulta:

$$V = \left(-1.71 \frac{i^2}{ds} + 0.19 \frac{i}{ds} e^{-1.71 \frac{i}{ds}} + 0.19 e^{-1.71 \frac{i}{ds}} + 9.51 \frac{i^2}{qs} + 9.5 \frac{i}{ds} \right)$$

Esta función resulta positiva para cualquier valor del recinto, y se anula en el punto 0, por lo cual el sistema que define es asintóticamente estable.

Las dimensiones de V, son las de una energía, tal como había de salir.

De esta forma se ha comprobado la estabilidad del sistema, calculando la función de Lyapounov, por medios físicos, y analíticos, y viendo que los resultados en ambos casos coinciden.

2.8.- SIMULACION DE LA MAQUINA SINCRONA POR MEDIO DE ORDENADOR DIGITAL.-

2.8.1.- Introducción.- Todo proceso de simulación, pretende, a partir de un modelo matemático, mas o menos perfecto, según las necesidades del caso, obtener el comportamiento del sistema simulado, con un margen de error tolerable, para el trabajo que se esté realizando.

Este es un tema de gran importancia, pues hace posible tener de antemano resultados, que sirven para la explotación optima de un sistema.

Aquí se pretende, partiendo del modelo matemático, basado en la teoría anterior, y que se ha utilizado en el espacio de estado, estudiar el comportamiento de la máquina síncrona en diferentes regímenes de trabajo, con el fin de que en un momento dado, se pueda tener el punto de funcionamiento optimo, al caso de que se trate.

Esto es fundamental, para el análisis posterior, que se hará, de la regulación de una central hidroeléctrica, mediante ordenador híbrido.

Existen lenguajes especiales de simulación, que poseen las diferentes casas de ordenadores, pero en el centro de cálculo que se ha utilizado, no hay ningún compilador de los mismos, por lo cual se ha realizado en Fortran, que también se adapta bastante bien el propósito, pudiéndose preveer, que en un futuro, estas investigaciones continuen en alguno de estos lenguajes.

2.8.2.- Modelo matemático.-

Las zonas posibles de trabajo de la máquina síncrona, siguen siendo, las que aparecian en la figura nº 3.

Sin más que medir la pendiente, de cada uno de los tramos, se tiene la respuesta tensión-corriente.

Después, hay que poner las expresiones de las inductancias directa y cuadratura del estator, por ser el lugar en el que se

introduce la corriente de excitación.

Estas inductancias, han sido medidas también de un modo experimental, y resulta que no son constantes, si no que varían con la intensidad de excitación. Aquí se toma esa variación lineal, y al estudiar la validez del modelo, se verá que esta aproximación es suficientemente buena.

Para seguir la misma notación que en los programas, que aparecen a continuación, se denominan las variables de la forma siguiente:

E_q = Tensión que se obtiene a la salida de la máquina

AIE = Corriente de excitación a la entrada de la máquina

X_d = Valor de la inductancia o reactancia en el eje directo

X_q = Valor de la inductancia o reactancia en el eje cuadratura

Los valores de las ecuaciones que representan la respuesta de la máquina en las tres zonas, son:

1ª Zona $\sqrt{AIE} < 1$ Amperios

$$E_q = 5 + 155 \cdot AIE$$

$$X_q = 126 - 21 \cdot AIE$$

$$X_d = 132 - 12 \cdot AIE$$

2ª Zona $1 < AIE \leq 2$

$$E_q = 116 + 61 \cdot AIE$$

$$X_q = 139 - 28 \cdot AIE$$

$$X_d = 170 - 42 \cdot AIE$$

3ª Zona $2 < AIE$

$$E_q = 190 + 23 \cdot AIE$$

$$X_q = 118 - 19 \cdot AIE$$

$$X_d = 135 - 24 \cdot AIE$$

Con estas ecuaciones es posible simular el funcionamiento de la máquina síncrona.

Lo que se va a pretender en las próximas páginas, es obtener mediante ordenador la respuesta de la máquina, y ver su variación con distintos programas, como programas de trabajo, variando la impedancia de carga y otros factores.

2.8.3.- Estudio de la validez del modelo.-

En la figura nº 14, se tiene la comparación entre las respuestas real y simulada.

Se observa que en los puntos en que la diferencia es máxima, esta no alcanza un 5% del valor total, lo que quiere decir, que se trabaja con un 5% de margen de error.

Este error en técnicas digitales se denomina sombra de discretización.

2.8.4.- Programa MR2, para el cálculo de la tabla tensión de salida/corriente de excitación, en una máquina síncrona.-

Este programa calcula la corriente de salida de la máquina síncrona, viendo su variación con la impedancia, y la corriente de excitación.

El organigrama general, aparece en la figura nº 15.

Explicación.- Se introduce una corriente inicial, que es el valor más bajo, que se desea estudiar. Aquí se ha fijado en 0.7 Amperios.

Este valor se va incrementando a lo largo del programa, de 0.2 en 0.2 amperios.

Según el valor que tenga la corriente de excitación en cada momento, se toma la zona correspondiente de trabajo.

En dicha zona, se calculan E_d , E_q y $E_{q'}$, así como el valor de la tensión correspondiente.

Para un mismo valor de la intensidad de excitación, se va

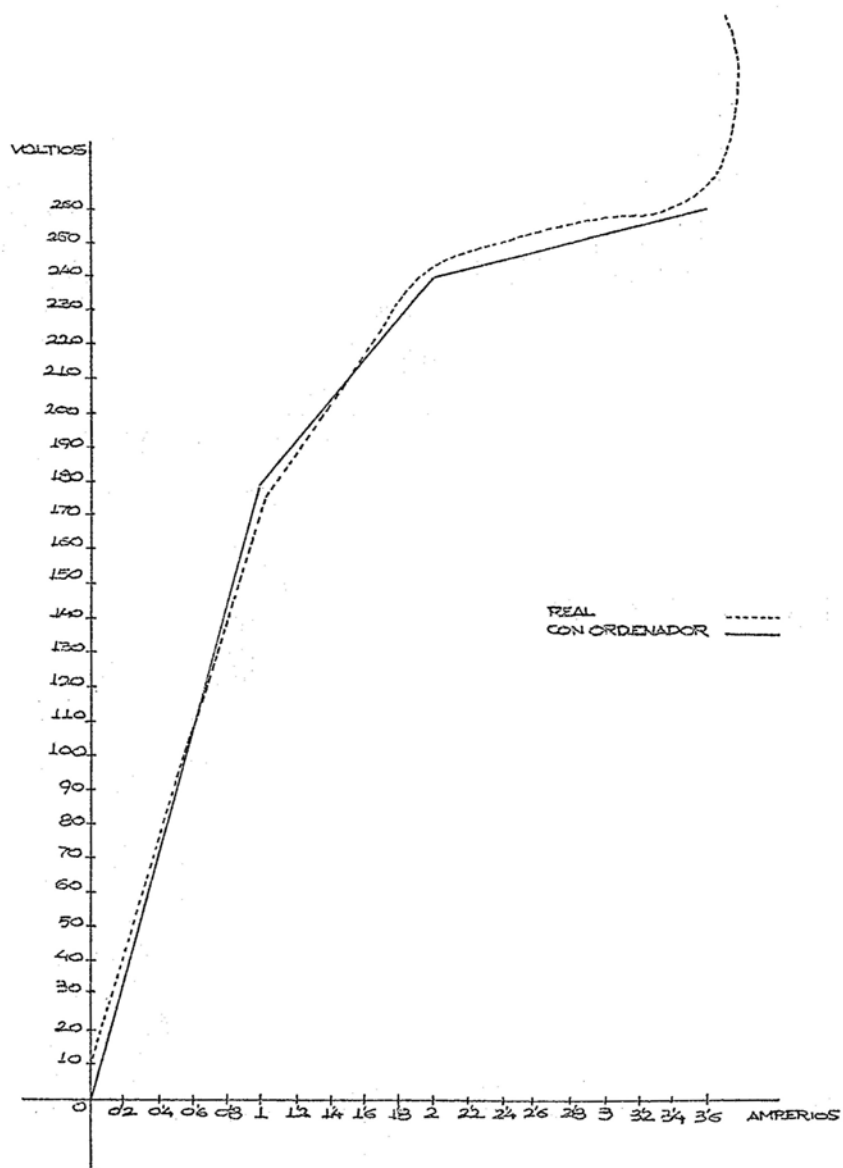


FIGURA Nº14

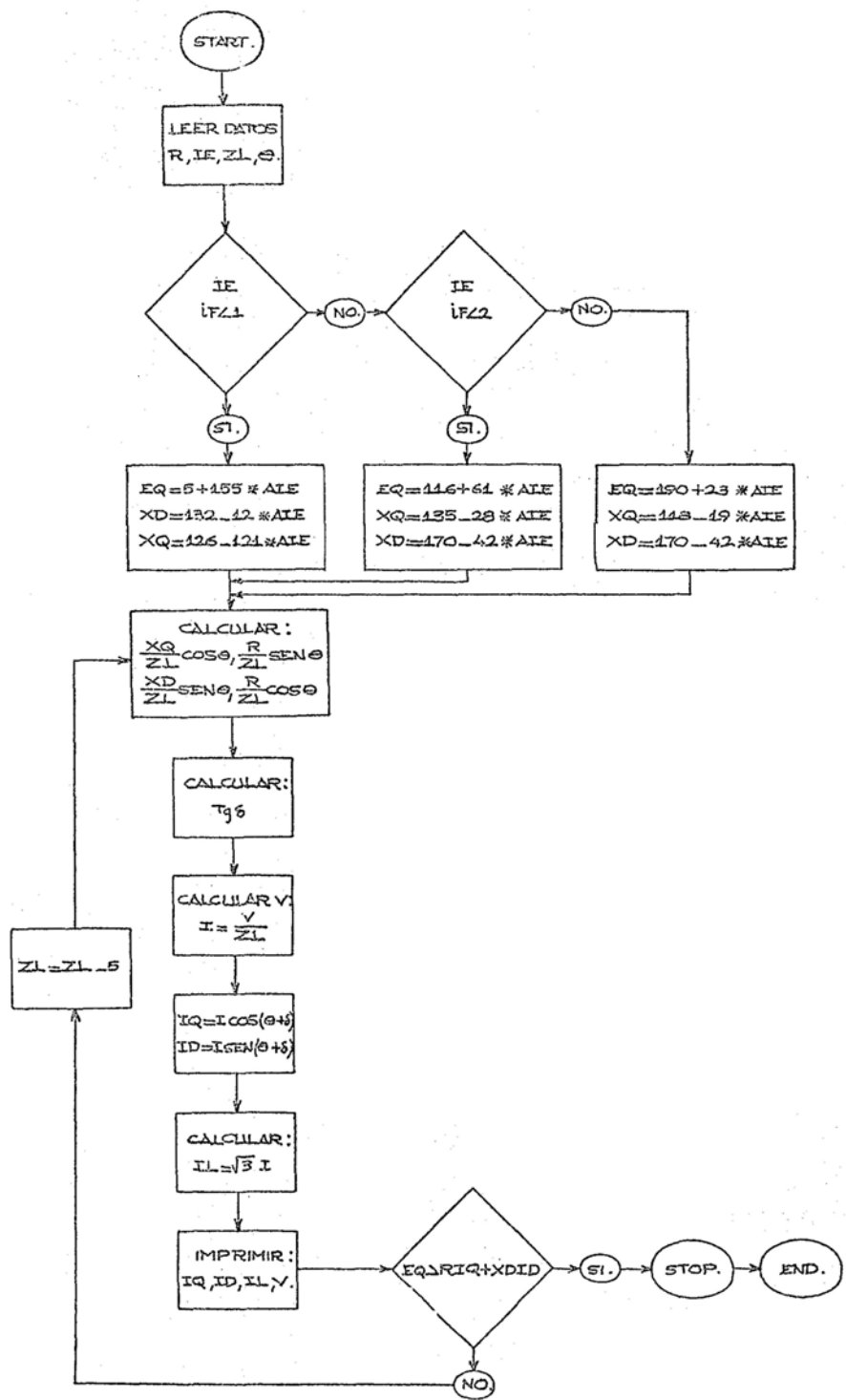


FIGURA Nº15

haciendo variar la impedancia de carga, desde un valor de 5 hasta 1.500, que son los márgenes de trabajo. De esta forma se ve la respuesta a la variación de carga, lo cual es necesario conocer a la hora de regular.

Después se incrementa de nuevo la corriente de excitación, y se continúa el proceso.

Se detiene el proceso al llegar la corriente de excitación al valor de 3.5 Amperios.

Resultados del programa.- Este programa se puede ver compilado en el apéndice.

De las corrientes directa y cuadratura correspondientes, la intensidad total en la carga, la impedancia de carga, la tensión en la carga, el ángulo de desfase entre las corrientes directa y cuadratura, expresado en grados, así como la intensidad de excitación correspondiente.

Con el presente programa, es pues posible poder estudiar la respuesta en régimen permanente de la máquina síncrona, de una manera muy completa.

THE es el ángulo que forman el estator y el rotor, que se ha supuesto nulo, pero en caso necesario, se puede tomar en cuenta, esto tiene importancia a la hora de conectar varios grupos generadores, en cuyo caso han de tener la misma fase todos, y se consigue por la variación del ángulo instantáneo de ambas partes. Este ángulo es geométrico.

El ángulo DEL, antes mencionado se calcula por medio de la expresión:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\frac{X_d}{Z_L} \cos \theta - \frac{R}{Z_L} \sin \theta}{1 + \frac{R}{Z_L} \cos \theta + \frac{X_d}{Z_L} \sin \theta}$$

El valor de la tensión de salida, viene dado por la siguiente expresión, también experimental:

$$V = \frac{E_g}{\cos \left(1 + \frac{R}{Z_L} \cos \theta + \frac{X_d}{Z_L} \sin \theta \right) + \operatorname{sen}^2 \left(\frac{X_d}{Z_L} \cos \theta - \frac{R}{Z_L} \operatorname{sen} \theta \right)}$$

Llamando $G = \frac{V}{Z_L}$, la expresión de las corrientes en los

ejes directo y cuadratura, es:

$$AIG = G \cdot \cos (\text{THE} + \delta)$$

$$AID = G \cdot \operatorname{sen} (\text{THE} + \delta)$$

La corriente de salida es:

$$AIL = G \cdot \sqrt{3}$$

Estos son los valores, que imprime el programa.

Con esto queda completo el estudio.

La aplicación de estos programas es general, y permite una simulación bastante amplia de la máquina síncrona, que se puede extender a cualquier tipo, sin más que cambiar la ecuaciones pertinentes.

Datos.- Los datos empleados, para la resolución de este programa, han sido:

R.- resistencia del devanado, 10%,

Los demás parámetros, ya estaban calculados en el apartado de medidas.

2.8.5.- Programa MR3, para el cálculo de la tabla corriente de excitación/corriente en la carga, de una máquina síncrona.

Este programa, considerando las mismas zonas posibles de trabajo, que en el caso anterior, calcula la respuesta en corriente de la máquina, para una de entrada fijada de antemano.

El organigrama aparece en la figura 16.

Explicación.- Este programa sirve para ver la respuesta en corriente de la máquina síncrona, fijando de antemano la tensión y la carga en la salida. De esta forma se ve la corriente, que hay que suministrar a la entrada, así como la tensión (fija), y corriente que existen en la carga.

Por tanto como datos, que leerá el programa, hay que suministrar la tensión V de salida, la resistencia R del devanado, el ángulo de desfase θ y la impedancia de carga Z_L .

La variación de intensidad de excitación, permita ver cualquier caso posible. Se hace de 0.05 en 0.05 amperios.

Resultados.- En el apéndice, se puede ver el programa compilado, observándose que da la corriente de excitación y la de salida.

Estos programas dan unos valores muy parecidos, a la matriz de intensidades, que proporcionaba el estudio de la ecuación de estado.

Con estos programas, ya es posible tener prevista cualquier situación o punto de trabajo. Esto tiene gran importancia, a la hora de construir un regulador.

En la figura nº 1, se veía el porque era necesario encontrar un método de regulación de la máquina síncrona.

Con el material que se ha preparado hasta aquí, es posible construir ya un regulador con ordenador de una central hidroeléctrica, que utilice máquinas síncronas.

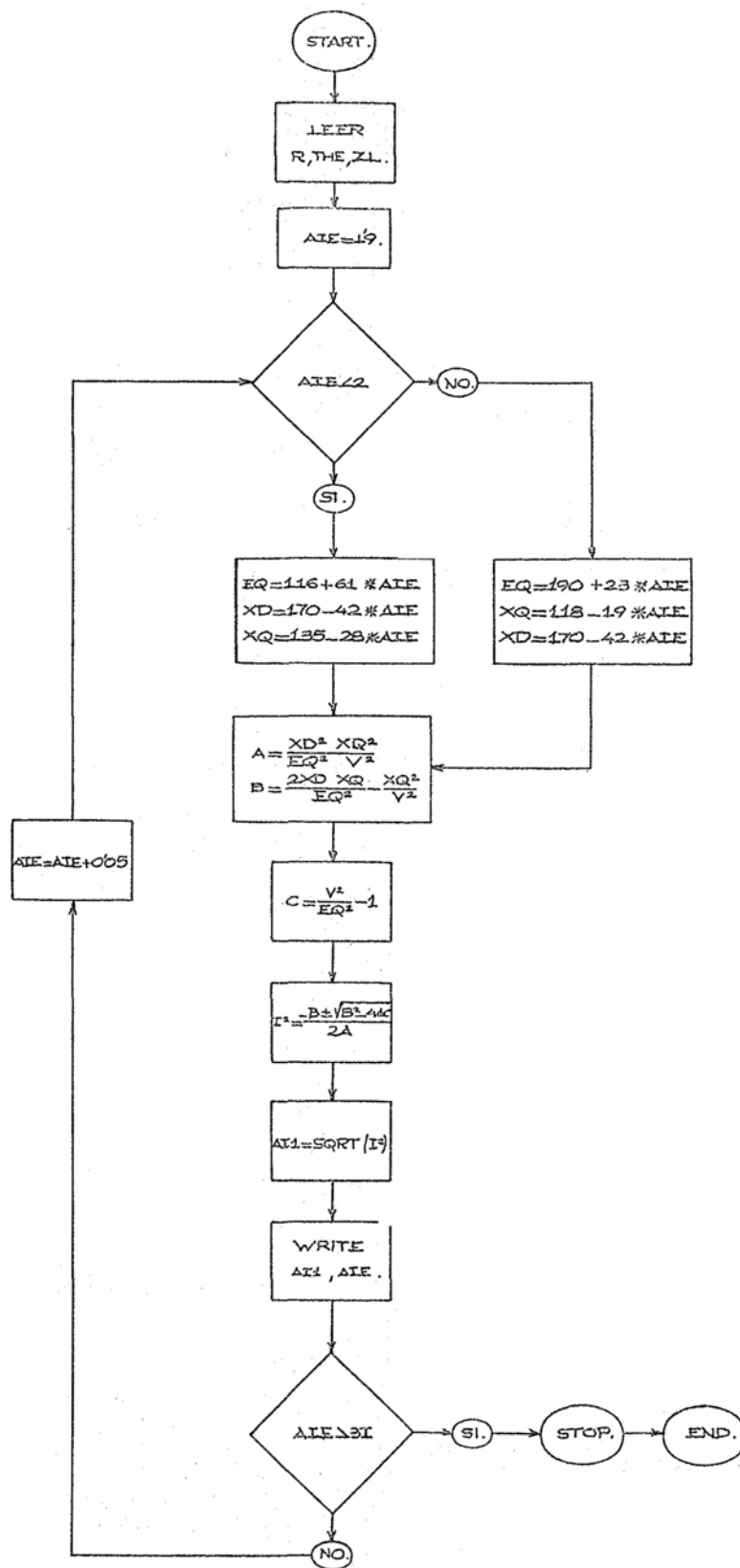


FIGURA Nº16

2.9.- DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL INTEGRADO PARA UNA CENTRAL HIDROELECTRICA.-

2.9.1.- Introducción.-

Hasta aquí se ha estudiado con detenimiento, el sistema constituido por una máquina síncrona.

Es posible la ampliación de este estudio si se considera la posibilidad del control real de este sistema.

Desde el punto de vista de la ingeniería, este problema resulta del máximo interés, pues hace posible que todos los trabajos anteriores, tengan una aplicación práctica inmediata.

El método que se propone a continuación, puede ser de utilidad en un futuro próximo, en el momento en que se automatizan de una forma total los sistemas de control de centrales hidroeléctricas.

Hasta el momento la regulación se hace de una forma semi-automática, pues al comenzar a bajar la tensión por aumento de la carga, se pone en funcionamiento un comparador de fase, que introduce un nuevo generador a la red.

La supervisión personal, es necesaria.

En este apartado se trata de eliminar toda intervención de tipo humano, en la conexión y desconexión de grupos generadores.

El elemento de control, va a ser en este caso el ordenador, que tendrá en su memoria todos los datos que se le hayan suministrado para una mejor marcha del proceso.

Será necesaria también la presencia de un ordenador analógico para la toma de muestras, y la traducción de órdenes digitales, emanadas del ordenador digital.

Este tipo de asociación de ordenadores, es muy corriente en procesos industriales, y se conoce por el nombre de computación híbrida.

En la figura nº 17, se representa el esquema total del proceso.

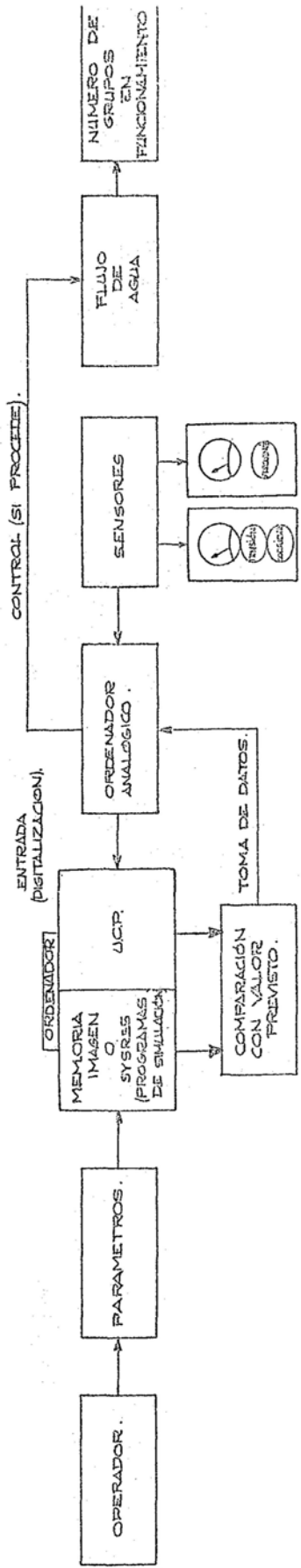


FIGURA N°17

2.9.2.- Descripción del sistema.-

Para poner en funcionamiento el sistema, son necesarios dos ordenadores.

- El ordenador digital, ha de tener un mínimo de 32 K. en su memoria central, al objeto de poder almacenar los programas de control. Así mismo ha de poder trabajar en tiempo real.

- El ordenador analógico, ha de ir provisto de los correspondientes sensores, que permiten la toma de muestras, de tensión, corriente y frecuencia. Actúa como traductor de estos datos al ordenador digital, conectado al canal selector del mismo, por el que circulan los datos de entrada/salida del proceso.

El ordenador digital, tiene en la memoria imagen, creada en el sistema residente, que puede ser disco magnético o banda, según el ordenador trabaje en DOS o TOS, los programas de simulación.

Estos programas, los va resolviendo, de acuerdo con los datos que el ordenador analógico, le va suministrando, todo ello en tiempo real.

Los valores que resultan de la resolución de los programas de control, son comparados con los valores reales de las mismas magnitudes, que están proporcionando los sensores.

En el caso en el cual la desviación supere a una tolerancia prefijada de antemano, se da una orden del ordenador digital, que el analógico transmite al órgano de control correspondiente con el fin de modificar el factor que ha variado de forma no regular.

Las órdenes de control, se agrupan así:

- Si sube la tensión de salida, actúa el regulador de bajada de tensión, pudiendo llegarse a la desconexión de un grupo en caso necesario.

- Si baja la corriente de salida, y por tanto la tensión, actúa el regulador de subida, pudiendo entrar otro generador en servicio, previa comparación de su fase.

- Si varía la frecuencia, se modifica el ángulo de incidencia del agua sobre el álabe de la turbina.

- Caso el programa MR2, calcula el desfase existente en cada momento, entre la tensión y la corriente de salida, puede este también ser corregido, mediante la introducción de la oportunas redes desfasadoras.

Estos son los posibles tipos de ordenes.

Para la conexión de varios grupos, se puede ver el esquema en la figura nº 18. Como el programa MR3, calcula la fase, esta conexión se puede hacer también sin ningún elemento exterior.

Este sistema funciona en tiempo real, por lo cual va dando las ordenes en el mismo momento en que son necesarias.

Se ve que este sistema permite el control de un modo total.

En el futuro se le pueden añadir al sistema módulos de programas y de sensores, que permitan la detección y reparación de averías, componer variaciones de otros tipos, etc.

Con este panorama, se da por terminado, el estudio de la máquina sincrons, en el presente trabajo.

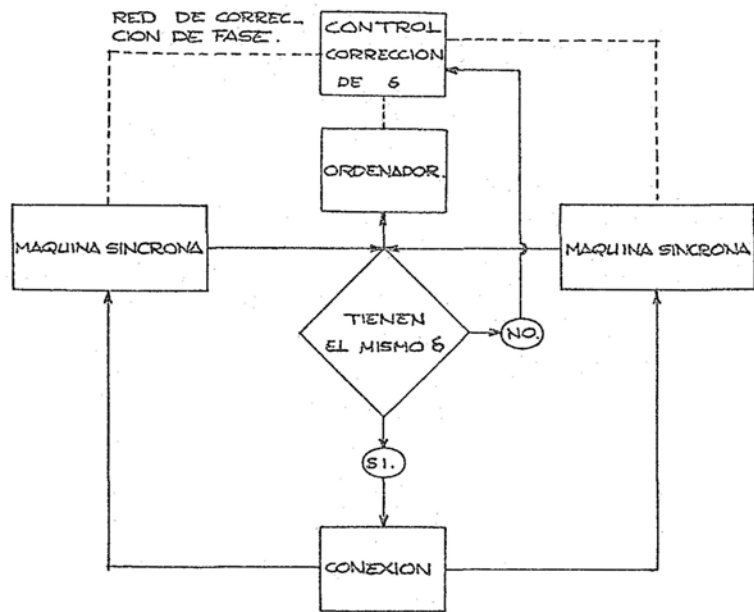


FIGURA N°18

I I I

RELACIONES HOMBRE-ORDENADOR Y APRENDIZAJE AUTOMÁTICO

3.1.- OBJETIVOS QUE SE PERSIGUEN.-

Aquí se describe un experimento de enseñanza, a través de ordenador. Se ha realizado con una población de 100 alumnos de 9 a 10 años de edad. Este sistema de enseñanza, se compara también con el clásico, a lo largo de esta parte.

Se tienen también en cuenta los grupos de materias, objeto de la enseñanza, ya que los resultados varían, según sea el tipo de materia que se trate.

Después se procede a plantear las ecuaciones que rigen el sistema alumno-ordenador, estudiando la estabilidad, controlabilidad y observabilidad, lo cual es de interés para la aplicación futura de este método de enseñanza.

3.2.- APRENDIZAJE AUTOMÁTICO.-

3.2.1.- Objeto del mismo.-

El aprendizaje automático, siempre ha preocupado al hombre.

Aprender lo más rápidamente posible, y sin intervención del profesor, se viene intentando desde hace tiempo. Se han propuesto varias soluciones, de las cuales la más brillante es la de la enseñanza programada.

Los primeros ordenadores, eran únicamente elementos de cálculo. La aparición de la tercera generación y el teleproceso, han ensanchado notablemente sus posibilidades, pasando a cubrir campos de índole muy variada.

En el presente trabajo, se presenta un campo de aplicación del ordenador, nuevo, y con un gran porvenir.

Lo primero que es necesario, es un soporte de software adecuado, así como un ordenador que admita el poder trabajar en multiprogramación. Las unidades de teleproceso, así como la red de conexión al ordenador, también son de suma importancia.

Todos estos elementos, combinados adecuadamente, permiten realizar el experimento de una forma satisfactoria.

El esquema general del proceso, es el representado en la figura nº 19. Los elementos necesarios, para la buena marcha de este sistema, son los siguientes:

-Sistema operativo, que regula el proceso.

En este caso el sistema operativo, es DOS, estando constituidos los equipos de acceso aleatorio, por dos unidades de discos magnéticos, una de las cuales, se toma por sistema residente. Por lo demás el sistema operativo, ejecuta las instrucciones necesarias para que el proceso marche correctamente. Los programas, necesitan también para su compilación, del programa monitor, y el ejecutivo, que se encontraran en el sistema residente, hasta el momento de su carga. La biblioteca de programas, se mantiene en la segunda unidad de disco. En este disco, se reserva también el área de trabajo.

-Memoria central. Ha de ser de capacidad suficiente. Para los propósitos de paso de programas, ha de ser de 20 K. más 8 K. para el ejecutivo.

-Unidades de teleproceso. Es necesario disponer de ellas, para que el alumno, se pueda comunicar con el ordenador. Pueden ser de presentación visual o de impresión. Las más prácticas, son las primeras. Cada una estará provista de la correspondiente memoria tampon, que hace posible la conexión a un canal de transmisión a baja velocidad, que comunica con el ordenador.

-Lenguaje de programación. Ha de ser de tipo conversacional para que permita el diálogo del alumno con el ordenador. Al mismo tiempo ha de ser de alto nivel. Por otra parte poseerá muy pocas instrucciones, para que su aprendizaje sea rápido y sencillo.

-Profesor. Ha de conocer el lenguaje de programación, para poder programar sus lecciones, de una forma parecida a la actual enseñanza programada.

Todos estos elementos integran el sistema.

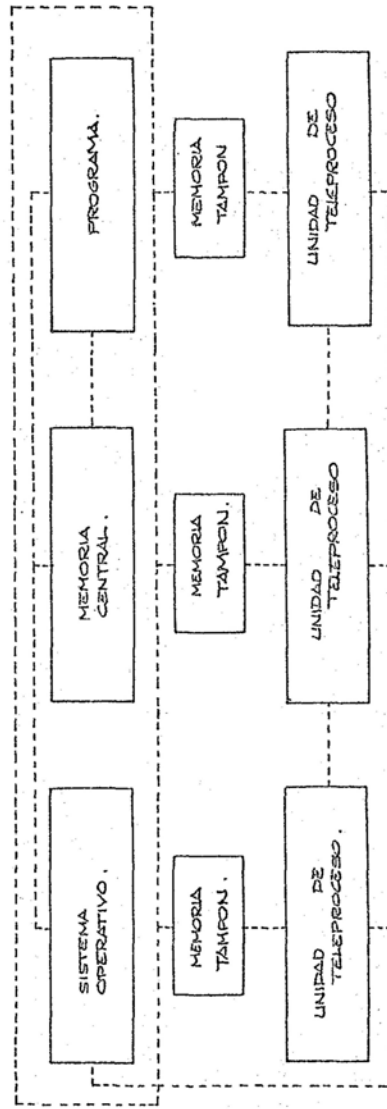


FIGURA Nº19

A continuación, se describe el funcionamiento del sistema.

Cada alumno posee un terminal, con su correspondiente teclado. El ordenador, trabaja en multiprogramación, lo que hace posible que todos los alumnos ejecuten un programa.

Cuando el alumno recibe en su terminal, la señal de comienzo, mandada por el ordenador, se identifica por medio de la clave que tiene asignada. De esta forma el ordenador puede guardar los resultados correspondientes a cada alumno.

Inmediatamente el alumno comienza a recibir en su terminal, una serie de preguntas, que va respondiendo, haciendo uso del teclado de su terminal.

Como el terminal es lento, posee una memoria tampón, por la cual fluye la información al ordenador, a ráfagas.

Los programas que se van ejecutando, son los diseñados por el grupo de profesores, que únicamente necesitan conocer el sistema de programación.

De esta forma, se logra atender de una forma simultánea a gran cantidad de alumnos.

Por el momento el sistema no resulta rentable económicamente, dado su elevado coste. En el futuro, al establecerse las redes nacionales de teleproceso, el sistema resultará rentable, y sobre todo podrá llevar la enseñanza de cualquier tipo a lugares muy apartados.

A continuación, se describen en detalle, la forma del experimento, y el lenguaje aplicado.

También es posible el estudio del sistema alumno-ordenador, que permite introducir un nuevo campo en el control.

3.3.- PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA DE ENSEÑANZA POR ORDENADOR.

3.3.1.- Introducción.

Los primeros ordenadores estaban contruidos para realizar operaciones matemáticas, más o menos complicadas, de una manera analógica.

La aparición de los ordenadores digitales se hizo también con el mismo fin, pero a medida que fué creciendo su capacidad de memoria, y se fueron perfeccionando los periféricos, aparecieron nuevas aplicaciones. Una de ellas, aun en fase experimental, es la de la enseñanza asistida por ordenador.

Para que esta sea posible, es necesario disponer de varios factores:

A) Sistema operativo.

Es necesario para poder controlar el proceso. Segun la capacidad del ordenador empleado y su construcción es variable. Aquí se emplea el sistema DOS, con discos magnéticos.

B) Lenguaje adecuado.

Los lenguajes ordinarios como el COBOL, FORTRAN, etc no son adaptables al propósito que se persigue, por varias razones:

- Un lenguaje de enseñanza ha de ser muy sencillo, pues en su utilización van a intervenir, por una parte maestros y profesores, y por otra alumnos, que muy bien pueden ser niños. Tanto unos como otros no son especialistas en Informática, por lo que es primordial la sencillez. Por tanto los lenguajes comerciales no son aptos.

- Ha de ser conversacional, esto es, que permita el diálogo hombre-máquina.

- Será muy potente, (de alto nivel), con el fin de que pueda tener muy pocas instrucciones, que realicen muchas cosas a la vez.

C) Unidad de presentación al alumno.

Hay dos posibles:

-Impresora y pantalla de video.

Aquí se ha empleado un terminal de video, con su correspondiente teclado, para cada alumno.

3.3.2.- Elección del lenguaje.-

Los lenguajes de estas características no son muy abundantes. Hacer uno especial sería laborioso, pues al ser de alto nivel, no basta con un traductor, como con los ensambladores, si no que es necesario un compilador.

Por tanto de entre los comerciales es necesario seleccionar uno.

Aquí, para realizar el trabajo que aparece a continuación, se empleó el lenguaje LIDA, que posee la casa SIEMENS.

Este lenguaje, reúne todas las características antes indicadas.

Dada su gran sencillez, los niños con los que se empleó tardaron muy poco en dominarlo.

Este tipo de lenguajes, reciben el nombre de lenguajes de autores.

Normalmente se trabaja en multiprogramación, para que un mismo ordenador pueda atender a gran número de terminales.

El autor del programa, una vez visto que no contiene errores, lo introduce en la biblioteca de programas, desde donde es llamado por el usuario, (alumno), a la hora de su utilización.

A continuación se describe el lenguaje, mostrando un trozo de un programa utilizado, para que se vea el funciona-

Descripción del lenguaje LIDIA.-

Este lenguaje de programación consta de una serie de instrucciones en formato fijo, que para su uso han de ser perforadas en fichas, y usadas así, o bien guardar su imagen en un disco magnético para su utilización.

El programa compilado por el compilador correspondiente se almacena en el disco magnético correspondiente a la biblioteca de programas.

Todos los programas corren bajo monitor, y el sistema operativo es DOS.

Las funciones principales que se realizan son:

a) Recepción de las respuestas que proporcionan los alumnos por medio de su terminal.

b) Comparación con las respuestas previstas, que han sido introducidas por el autor del programa.

c) Ramificaciones por medio de saltos condicionados o incondicionados.

Tipos de datos.-

Los datos que se introducen en los programas pueden ser de cuatro tipos:

Aritméticos, lógicos, textos y marcas.

1) Aritméticos.

Pueden ser constantes, (un número de hasta 9 cifras sin signo) o variables, llamados contadores y que pueden tomar un valor numérico de hasta 9 cifras con signo. Estos contadores son como máximo 16, y se representan con la letra Z, y el subíndice correspondiente.

2) Lógicos.

Las constantes lógicas solo toman los valores si o no. Las variables se almacenan en contadores lógicos, que son un máximo de 32 y solo puede contener una constante lógica. Se

representan por la letra S, y el subíndice correspondiente.

3) Textos.

Son cadenas de signos alfanuméricos de hasta 54 caracteres, (por ser el máximo de presentación en un renglón de un terminal de vídeo). Como variables pueden ser almacenadas en registros, disponiéndose de un máximo de 6, que se representan con la letra T, y el subíndice correspondiente.

4) Marcas.

Para señalar la posición de las instrucciones en los saltos previstos en el programa se utilizan marcas de hasta 8 signos alfanuméricos. Como variables se introducen en marcadores hasta un máximo de 6, que se representan por la letra S, seguida del subíndice correspondiente.

Expresiones.-

Al igual que en los datos, existen cuatro tipos de expresiones:

1) Expresiones aritméticas.

Se componen de números ligados por los signos:

+ Adición

- Resta

* Producto

/ División

** Potenciación

Para agrupar expresiones se permite el empleo de parentesis. En las expresiones pueden entrar contadores, sustituyéndose por el valor que tenga la variable en ese momento.

2) Expresiones lógicas.

Se forman uniendo constantes o variables lógicas, mediante el empleo de los operadores siguientes:

KL Menor que

KG Menor o igual que

= Igual que

GG Mayor o igual que

GR Mayor que
UG Distinto de
EQ Equivalente lógico
IM Impli
- No
& y
| ó

La expresión total toma el valor si e no según se cumpla o no la relación que se indica.

3) Expresiones textuales.

Tienen las siguientes funciones:

Llevar la información de enseñanza al lugar direccionable.

Palabras clave para comparar respuestas del alumno.

4) Expresiones de marcas.

Señalan el lugar de una instrucción en el programa.

Formato de las instrucciones.-

En la ficha perforada se sitúan las instrucciones de la forma siguiente:

Columnas de la 1 a la 8 marca de instrucción. Si no es necesaria se deja en blanco.

Columna 9 en blanco

Columnas 10 a la 14, código de operación

Columna 15 en blanco

Columnas 16 a 69 operandos

Columnas 70 y 71 en blanco

Columnas 72 y 73 signo de continuación si toda la expresión no cupo en una tarjeta y sigue en la inmediata.

Columnas hasta la 80, número de orden de la tarjeta.

Instrucciones para programar.-

Las instrucciones se insertan a continuación, indicando la función que realizan.

BIDL Sirve para enviar información al terminal que se desee. Puede ser un texto en el que se haga una pregunta por ejemplo, o bien otro tipo de información.

LIES Esta instrucción carga el contenido del operando en el registro que el programador ha reservado para ello.

ANTW Esta instrucción sirve para introducir una respuesta por el alumno.

TEST Con esta instrucción se compara la respuesta dada con la prevista .

WENN Comprueba si se cumple la expresión lógica que se inserta a continuación.

NACH Realiza el salto hacia donde se indique.

LADE Cambia el valor de las variables aritméticas, lógicas o textuales, por el valor que introduzca el alumno por su terminal.

ZEIT Con esta instrucción se limita el tiempo de respuesta del alumno al número de segundos que se indique a continuación. Si no ha respondido en ellos se salta a la siguiente instrucción.

UFRO Sirve para saltar a subprogramas

UEND Con ella se regresa de un subprograma al programa principal.

ENDE Es la última instrucción del programa, dándose con ella, este por finalizado.

Como se ve el juego de instrucciones es muy pequeño con lo cual el aprendizaje del mismo se realiza en un tiempo muy corto.

El lenguaje pese a su sencillez tiene bastantes posibilidades.

Con él fueron programados los programas que han permitido realizar las estimaciones que se han realizado sobre la enseñanza asistida por ordenador.

A continuación se indica un programa de los que se han utilizado para la experimentación del método de enseñanza por ordenador.

Los demás programas no se incluyen, por ser muy numerosos.

El organigrama aparece en la Figura nº 20.

Programa muestra.-

Se trata de una serie de preguntas de Aritmética para niños de 6 a 7 años, cada una de las cuales vale un punto, y se les concede el tiempo de un minuto para contestar.

```
LADE Z1 = 0
PPI BILD ESTE PROGRAMA ES DE CALCULO
      UN GRANJERO TIENE 80 OVEJAS Y VENDE 40 A 2000
      PTS. ¿CUANTAS LE QUEDAN? ¿CUANTO DINERO TIENE?
      ZERT 60, LENTO
      LIES IN T1
      LADE A1 = 40
      A2 = 80000
      TEST KONS, STW
      WENN A1&A2
      NACH BIEN
      WENN A1&-A2
      -A1&A2
      NACH MEDIO
      BILD ESTA MAL . LLEVAS 'Z1' PUNTOS
      NACH PP2
LENTO BILD SE MAS RAPIDO EN CONTESTAR
      NACH PPI
MEDIO BILD PIENSA MEJOR LA RESPUESTA PUES TIENES UNA
      PARTE MAL
      NACH PPI
BIEN LADE Z1 = Z1 + 1
```

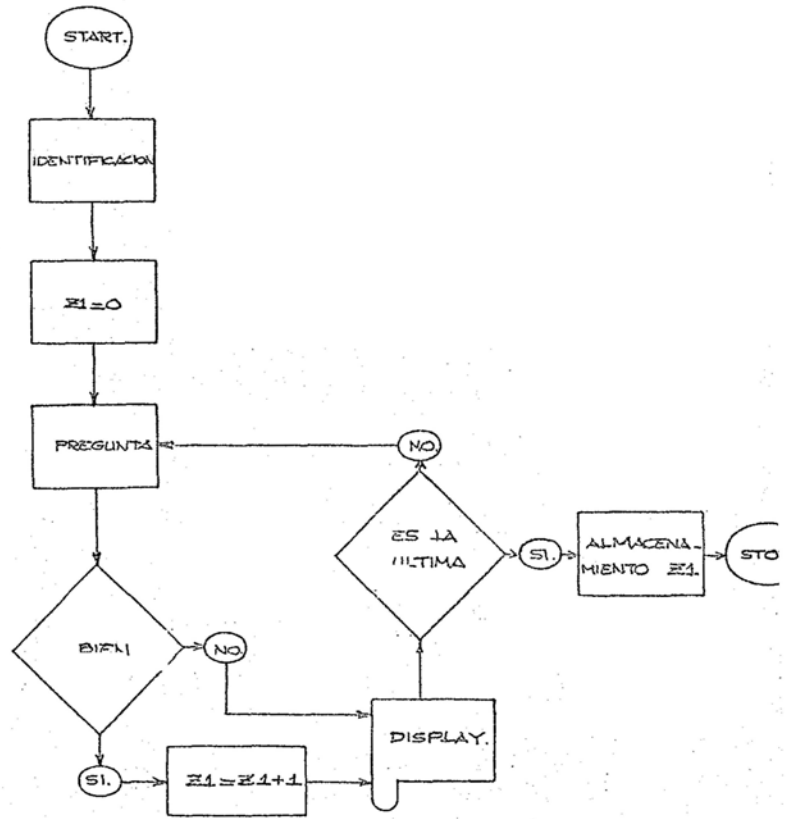


FIGURA Nº20

BIEN MUY BIEN. LLEVAS '21' PUNTOS

NACH PP2

PP2 BIEN CALCULA AHORA CUANTOS KG. DE TOMATE PUEDE COMPRAR
CON EL DINERO QUE TIENE SABRIENDO QUE LOS 10 KG.
VALEN 20 PTS

.

.

.

.

.

.

ETC

Comentario.-

El marcador Z1, el cual va a contener los puntos que el alumno vaya contabilizando a lo largo del programa, se inicializa en cero en la primera instrucción del programa.

Después se le hace la primera pregunta.

Como hay dos posibles respuestas, los resultados correctos se almacenan en A1 y A2.

El resultado suministrado por el alumno se compara con los previstos. Si ambos resultados coinciden, se salta a BIEN, donde se pone el marcador Z1 en 1 y se contesta al alumno que ha respondido bien y los puntos que lleva.

Si solo estaba bien una de las respuestas se le contesta que tenía una parte mal y se le da opción a responder otra vez.

Si está mal se le dice y se salta a la pregunta siguiente.

El proceso se repite con 10 preguntas diferentes, de

la misma forma indicada, dando al final la puntuación del alumno en el ejercicio.

Como al comienzo del programa el alumno se ha identificado, por medio de la clave correspondiente, la nota que ha obtenido se puede guardar y unirla a la de otras materias.

De esta forma se tiene automáticamente el expediente del alumno, que dado por impresora, con un formato adecuado, soluciona todos los problemas de calificación.

3. 4.- RESULTADOS DEL EXPERIMENTO.-

3.1.- Introducción.- Los programas de aplicación, se dividieron en tres grupos:

- Grupo 1.- Letras.- Bajo este epigrafe, se agrupan los programas, que se refieren a disciplinas, que necesitan más de la memoria, que del razonamiento. Comprende las materias de:

Geografía e Historia

Gramática y Lenguaje

Idioma Moderno (inglés)

- Grupo 2.- Física.- Comprende las disciplinas, que necesitan más del razonamiento, que de la memoria.

Comprende:

Física

Química

- Grupo 3.- Comprende las Matemáticas, por ser una disciplina que necesita del razonamiento unicamente.

Con estas pruebas, se pretende ver el valor real de este método, comparado con el de enseñanza tradicional.

3.4.2.- Modo de operar.-

En el presente ensayo, se operó sobre una muestra de cien alumnos, trabajando con ordenador, y 30 en clase normal.

De cada grupo de materias, se encargó un profesor, que compuso los programas, y dió las enseñanzas al grupo normal, con lo cual se evitan los errores, que se podrían producir, al introducir un profesor distinto al que confecciono los programas.

En la figura nº 21, se puede ver el histograma correspondiente, a las medias totales de todos los grupos, expresado en tantos por ciento.

Nº DE ALIADOS 95

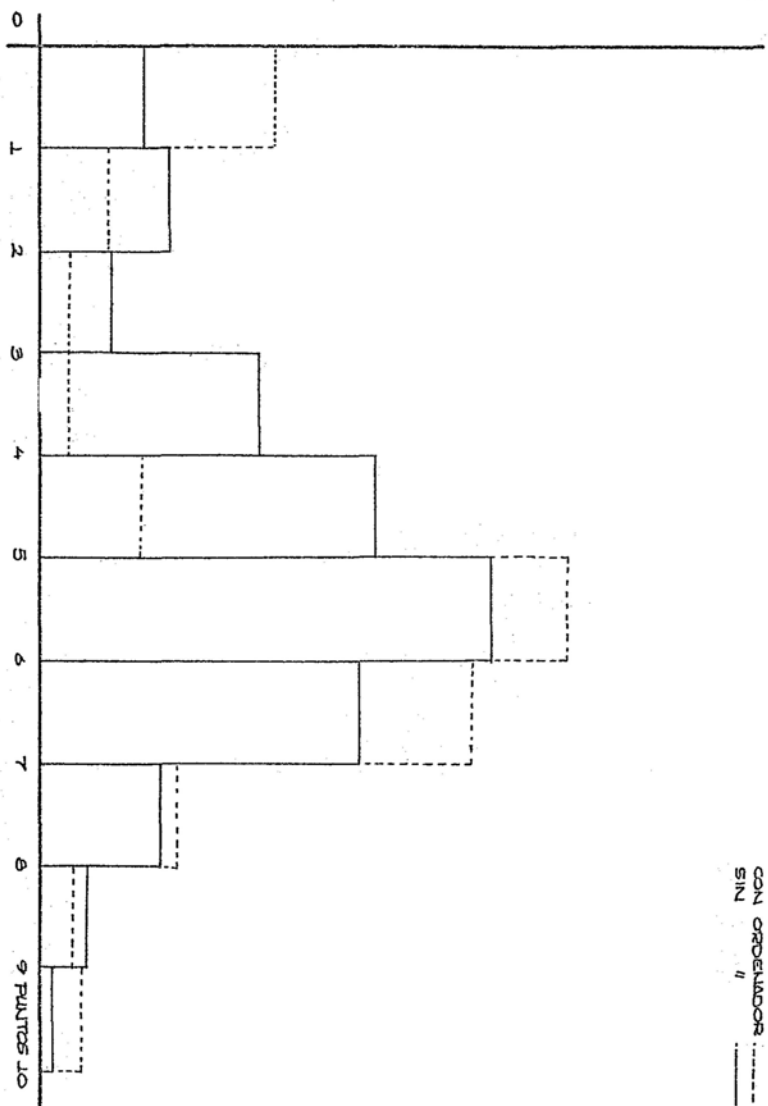


FIGURA Nº21

CON ORDENADOR
SIN ORDENADOR

Formas de interpretar los resultados.-

En el eje de las x, aparecen los grupos de puntuación, de punto en punto.

En el eje de las y, aparecen los tantos por ciento de alumnos, comprendidos en cada grupo.

En trazo continuo, aparecen los resultados obtenidos, por el método habitual.

En trazo discontinuo, aparecen los resultados logrados mediante ordenador.

Se aprecia lo siguiente:

El grupo de 0 a 1, es muy alto en el sistema con ordenador, debido a que los alumnos que no se familiarizan rápidamente con el sistema, responden mal. En este grupo hay alumnos, que saben lo que se les pregunta, pero fallan en el proceso de comunicación con el ordenador. Este caso no puede reflejarse de ningún modo en la enseñanza por ordenador, mientras que en la normal no se da, por lo cual el grupo de 0 a 1 es mucho más bajo en esta forma de enseñanza.

En notas medianas de 1 a 4, se ve que el porcentaje es mayor en el método sin ordenador, que en el de con ordenador.

El grupo de aprobados aumenta con este método, el de notables disminuye, y el sobresalientes aumenta.

En resumen, el sistema de ordenador, es malo para alumnos torpes, pero va siendo tanto mejor, mientras mayor es el coeficiente intelectual del alumno.

En la figura nº 22, se representa la variación del rendimiento del sistema, con el coeficiente intelectual.

Se ve que es una curva de crecimiento muy lento al principio, pero luego crece exponencialmente.

A continuación, se hace el estudio por grupos del sistema, de la misma forma que se ha hecho el general.

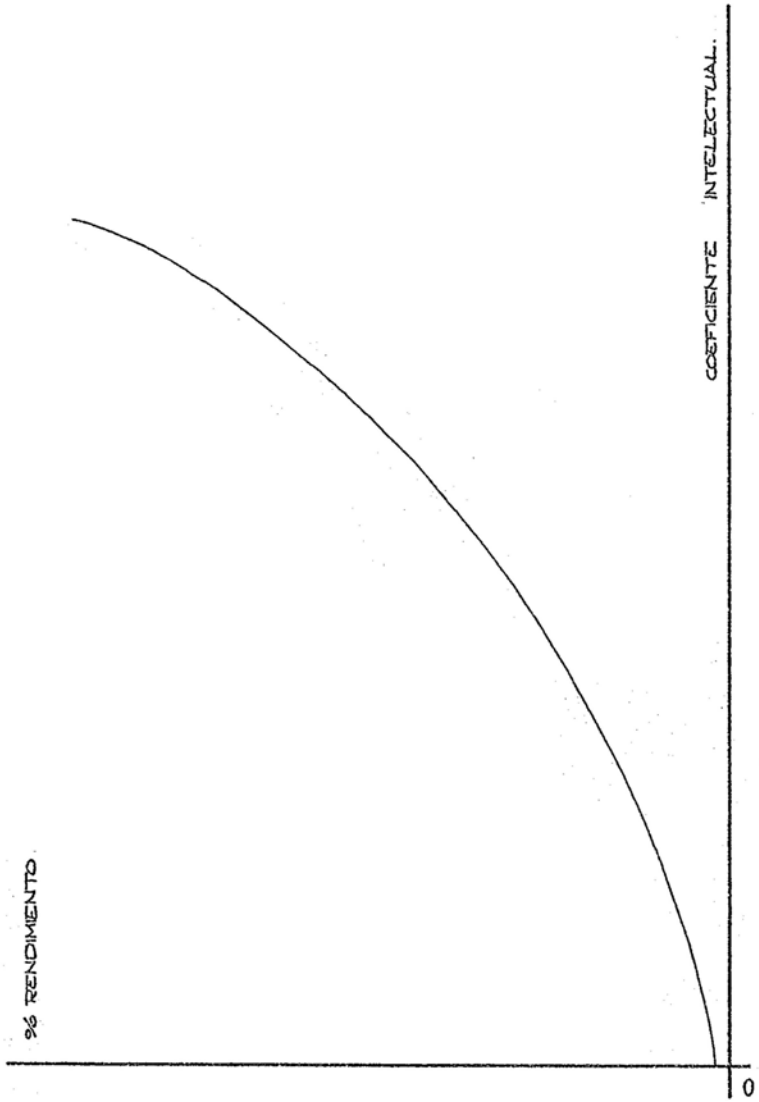


FIGURA Nº22

a) Letras o Ciencias Humanísticas.-

En la figura nº 23, se puede apreciar el resultado.

En este campo, se ve una disminución de suspensos en el método con ordenador, respecto al método normal.

En cambio el número de notables y sobresalientes, aumenta mucho con respecto al método tradicional.

b) Física.-

El resultado aparece en la figura nº 24, de la misma forma que en el caso anterior.

El número de suspensos aumenta bastante en el sistema con ordenador, en relación con el método normal. Esto es debido a que hay bastantes alumnos, que no han comprendido el proceso, y al no poder preguntar, sacan una nota muy baja.

El número de aprobados, y de sobresalientes aumenta en el método de ordenador.

c) Matemáticas.-

Los resultados son semejantes a los del apartado anterior y aparecen en la figura nº 25.

Por tanto, se puede concluir, que el método es aplicable a todas las disciplinas, presentando el inconveniente de que a un alumno que se le presenten problemas durante el proceso no se le pueden explicar.

3.4.3.- Estudio de la confiabilidad del sistema.-

Para que el sistema sea totalmente válido, es necesario compararlo matemáticamente, con el sistema normal.

Esta comparación se lleva a cabo, mediante una correlación.

El coeficiente de correlación entre ambos problemas, es del orden de 0.9, lo cual quiere decir que casi coinciden ambos métodos, lo que hace que el uso del sistema sea bueno.

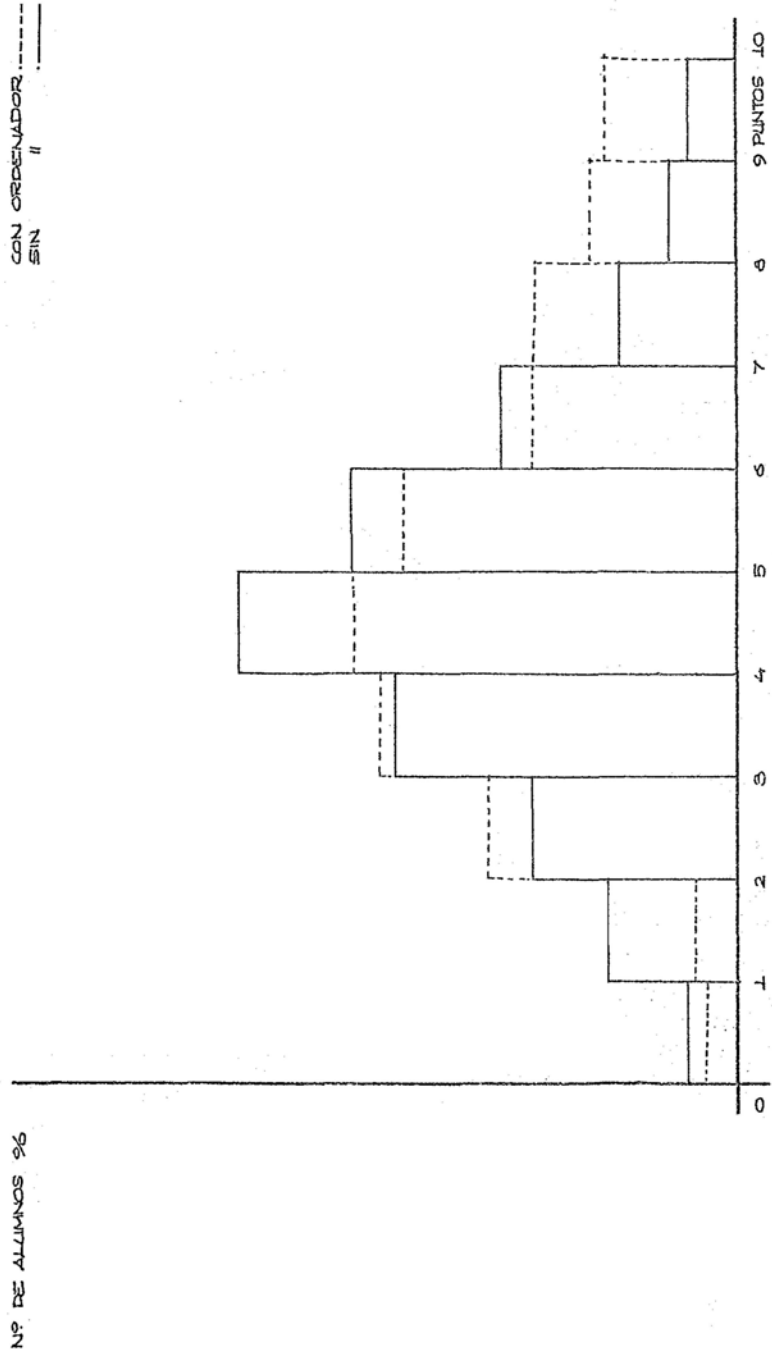


FIGURA Nº23

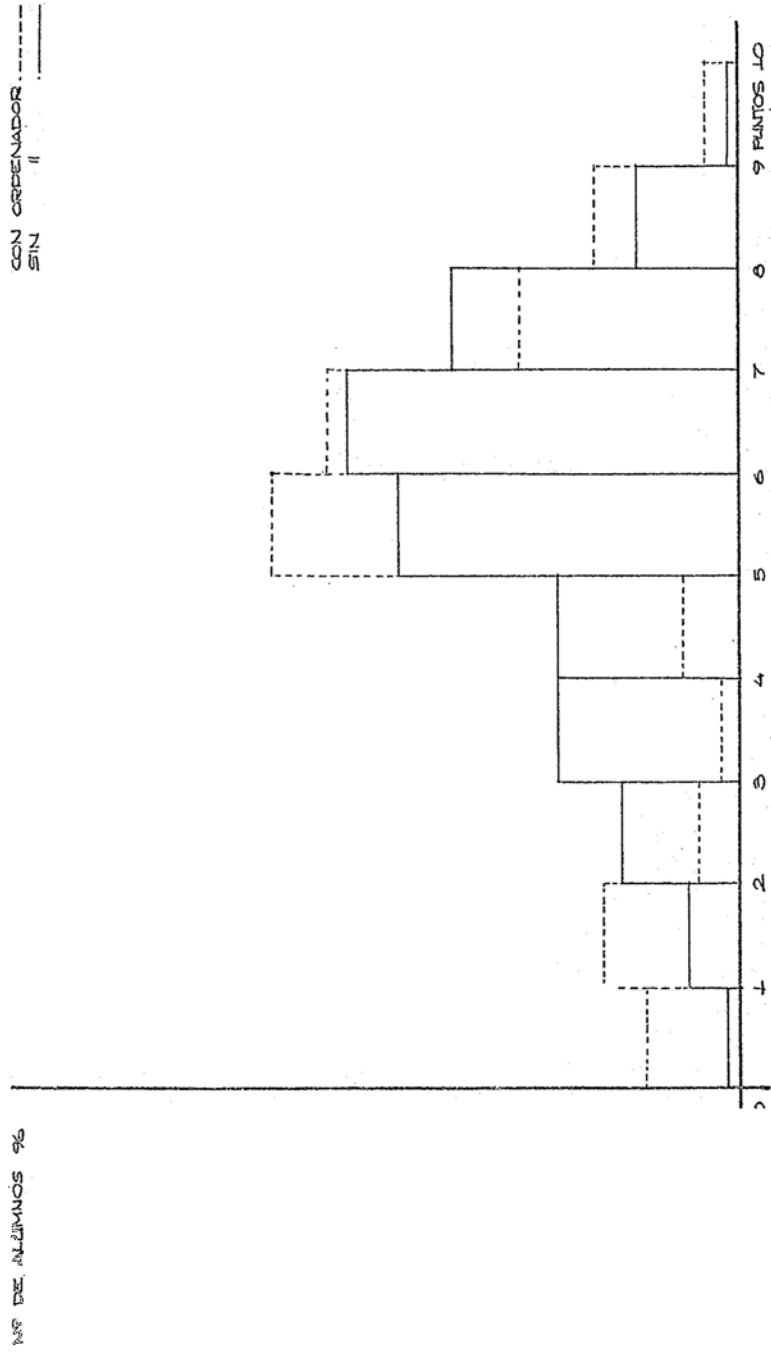


FIGURA Nº 24

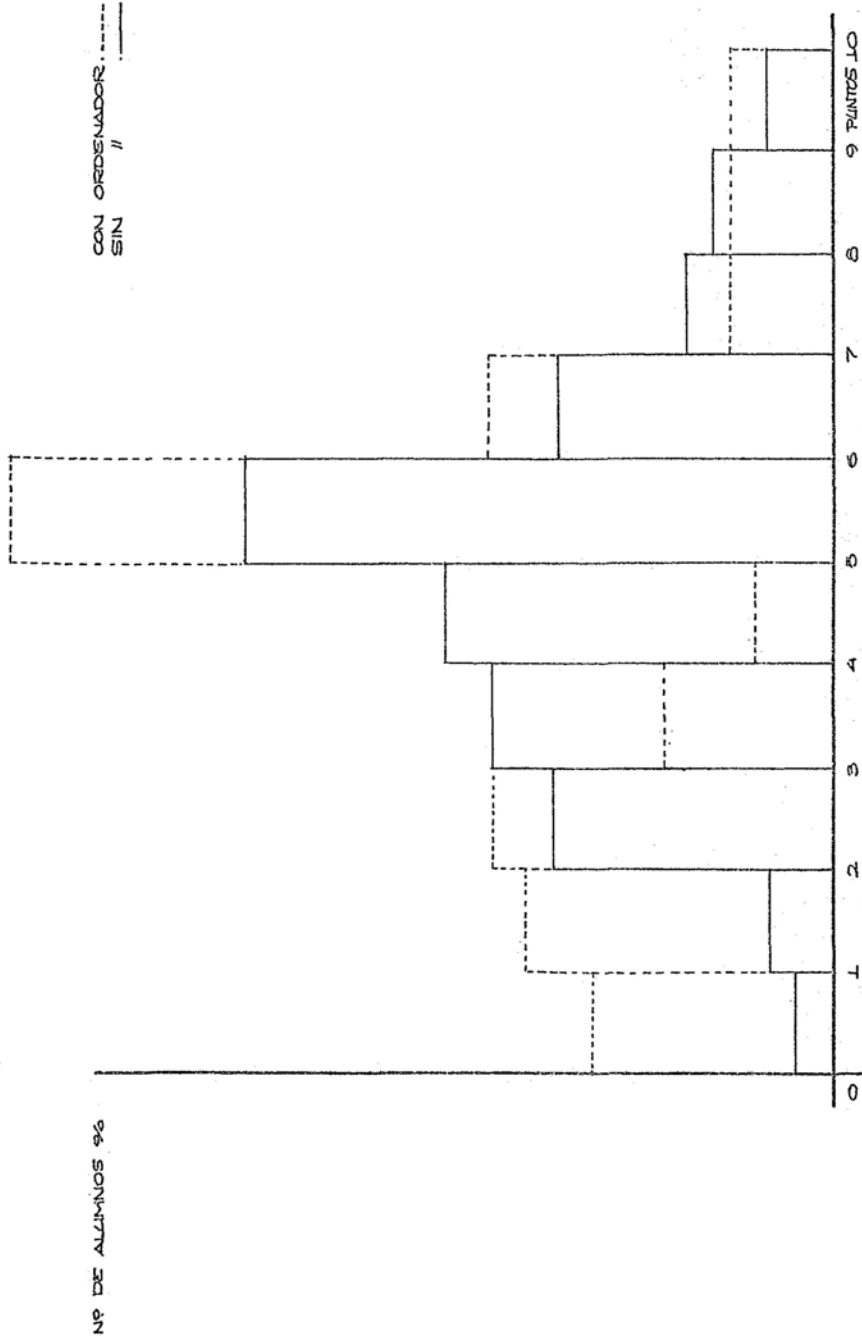


FIGURA Nº25

Hasta aquí el sistema tal como se ha ensayado, y con los resultados, que ha proporcionado.

El paso siguiente, es el estudio de este sistema dentro del espacio de estado.

El sistema alumno-ordenador, es un conjunto, del que se pueden obtener unas ecuaciones, que permitan al igual que en el caso de la máquina síncrona estudiar la estabilidad, la controlabilidad, y la observabilidad del sistema.

Este sistema tiene la diferencia con el de la máquina síncrona, en que el alumno si comete un error, y se le corrige, lo aprende, y ya no lo comete de nuevo. Esto en el caso de la máquina no sucede.

Este tipo de sistemas, reciben el nombre de adaptativos, pues se van adaptando a las modificaciones que surjan.

3.5.- SISTEMAS ADAPTATIVO Y AUTODIDACTICOS.-

Estos sistemas se van adaptando al medio ambiente, y por tanto su respuesta no puede ser prevista de un modo determinista, si no únicamente probabilístico.

Los modelos de memorias, ya sean de ferritas o dinámicas o asociativas, no son adaptativas, puesto que la información no cambia en ellas, más que por ordenes externas, y el mismo proceso se repite ininterrumpidamente, miles de veces, sin variar, cosa que no sucede en un ser humano.

En el caso de un ser humano, en sus decisiones influye la experiencia anterior, por lo que se puede decir, que es un sistema auto-adaptativo.

Estos conceptos que se han visto de una forma cualitativa, se van a matematizar, para poder estudiarlos dentro del espacio de estado.

Se supone que el sistema también viene representado por

la ecuación de estado $\dot{\bar{x}} = A\bar{x} + B\bar{r}$. Mas adelante se verá que es así, y cuales son los significados de los vectores.

Se dirá que el sistema es adaptativo, si es capaz de cambiar la ley de gobierno r , según las variaciones del medio ambiente, y tendiendo a funcionar en todo momento como sistema óptimo o casi óptimo. El proceso de determinar las matrices A y B , se llama identificación.

En la figura nº 26, se puede ver el esquema de un sistema adaptativo.

En la práctica, la utilidad de este sistema, depende de la facilidad que exista, para determinar el vector de estado.

Los sistemas autodidácticos, son superiores a los anteriores. Estos sistemas captan los estados por los que se ha pasado, y son capaces de reconocer experiencias pasadas, comportándose por lo demás como sistemas adaptativos. El sistema hombre-ordenador es de este tipo.

El tema que se está estudiando, tiene entronque con la teoría de autómatas, por lo que a continuación se dan los conceptos principales.

3.6.- Teoría de autómatas.-

Un ordenador digital, es capaz de realizar cálculos, tomar decisiones lógicas, etc., siempre que haya sido programado adecuadamente. Pero es totalmente imposible que seque consecuencias de sus "experiencias". El que las saca es el programador, y le sirven para no caer en los mismos errores, o para mejorar el sistema.

El hombre da sus órdenes al ordenador, en elegajes, de tanto más nivel, cuanto mayor es la memoria de la UCP.

Este toma las órdenes y mediante el traductor, genera un

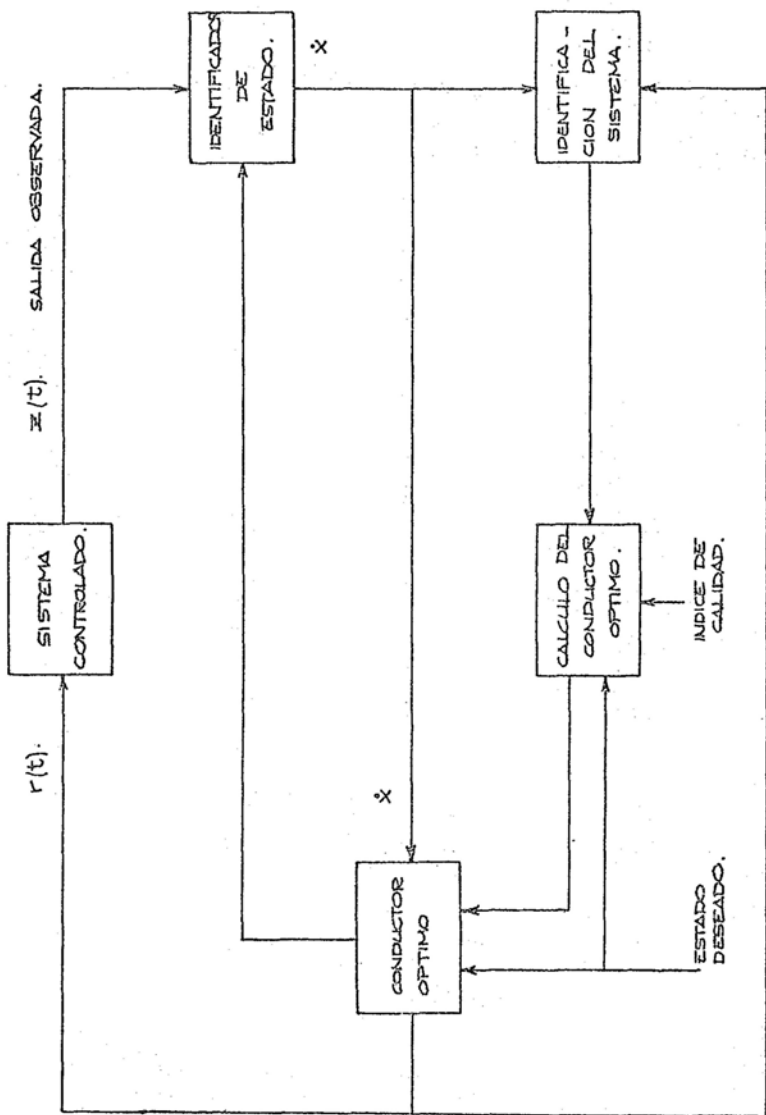


FIGURA N°26

programa en código de máquina, que es el único que entiende el ordenador, para poder así ejecutar el programa.

La teoría de autómatas, se dedica al estudio de otro tipo de máquinas, que son tales, que pueden utilizar sus experiencias anteriores, y programarse de acuerdo con ellas.

De esta manera se comporta también el sistema hombre-ordenador.

3.6.1.- Autómata finito.-

Como en todo campo de la ciencia, en el estudio de los autómatas, hay que establecer modelos.

El primer modelo que ha surgido, es el del autómata finito, el cual consiste en una máquina, que únicamente puede tomar una decisión de sí o no según unos condicionantes, y retener esta información para sucesivas pruebas.

De este tipo son las llamadas "tortugas", que al presentarles un rayo de luz, lo podían aceptar/ó no, según unos condicionamientos externos. Luego al repetir las mismas condiciones, la tortuga, "recordaba" lo ocurrido.

3.6.2.- Autómata probabilístico.-

Cuando se empezaron a estudiar máquinas, que fuesen capaces de jugar a juegos de azar, como el ajedrez, utilizando una cierta estrategia, surgieron al comienzo modelos, que jugaban siempre igual.

Luego surgieron otras que simulaban el juego del contrario y tomaban decisiones de un modo aleatorio, por lo que han recibido el nombre de autómatas probabilísticos.

Estos sistemas pueden ser simulados mediante ordenador digital.

En la figura nº 27, aparece esquemáticamente representado, este tipo de autómatas, realizado mediante ordenador digital.

Este tipo es el que comprende al sistema hombre-ordenador.

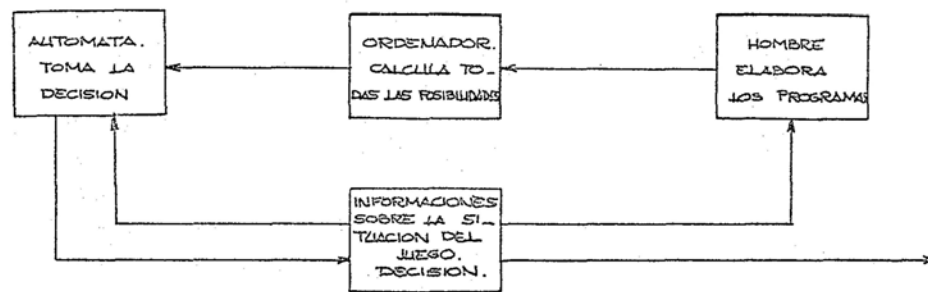


FIGURA Nº27

Se ve que el autómata, toma sus decisiones entre las más probables, de las que le ha presentado el ordenador, según la situación del juego.

El hombre es el que programa, y al mismo tiempo juega con la máquina.

En la enseñanza, el problema es parecido al que se acaba de describir. El ordenador va tomando decisiones, según se van desarrollando las contestaciones al programa de enseñanza.

Se tiene así el típico lazo de realimentación, y por tanto cabe preguntarse si el sistema será estable, y en que condiciones. Esto se va a estudiar en los apartados siguientes:

3.6.3.- Aplicación a la enseñanza por ordenador.-

Se puede hablar en este campo de una interacción, entre el hombre y el ordenador.

El hombre introduce en el ordenador, el programa de enseñanza. Éste lo presenta al alumno, y analiza las respuestas, contestando lo adecuado, y corrigiendo los posibles errores del alumno.

Por tanto, aunque el escucha de selección, puntuación, etc., es dado por el profesor, al programar el trabajo, pero el ordenador es el que selecciona las respuestas, y toma las decisiones lógicas.

Así se tiene un modelo de autómata probabilístico para el sistema hombre ordenador.

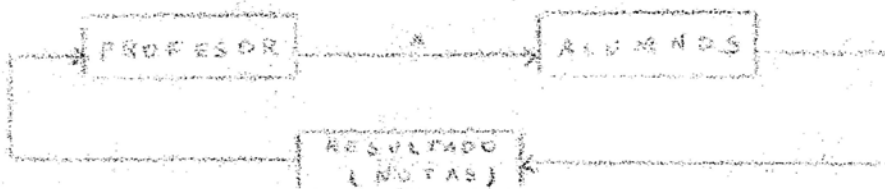
La ciencia que se encarga del estudio de este campo, es la Pedagogía-Gubernática, ciencia muy interesante, y con un futuro tan prometedor como insospechado.

Como se ha dicho antes los lenguajes de programación convencionales, no son válidos para el propósito pedagógico, que se persigue.

Por eso se ha aplicado uno especial, que tiene el número mínimo de instrucciones indispensables. De esta forma es posible que su aprendizaje se realice en un tien-

Descripción del proceso clásico de enseñanza.-

El proceso educativo clásico se puede representar en forma de lazo de realimentación. El esquema sería el siguiente:



El profesor actúa sobre los alumnos, y estos dependiendo de las explicaciones dan unos ciertos resultados. De acuerdo con estos resultados, el profesor modifica sus explicaciones, para tratar de encontrar el rendimiento óptimo del sistema.

Se tiene pues un modelo muy sencillo del conjunto profesor-alumnos. Las ecuaciones que lo describen, se pueden plantear de una forma muy parecida al sistema de enseñanza por ordenador. En este caso se tendría:

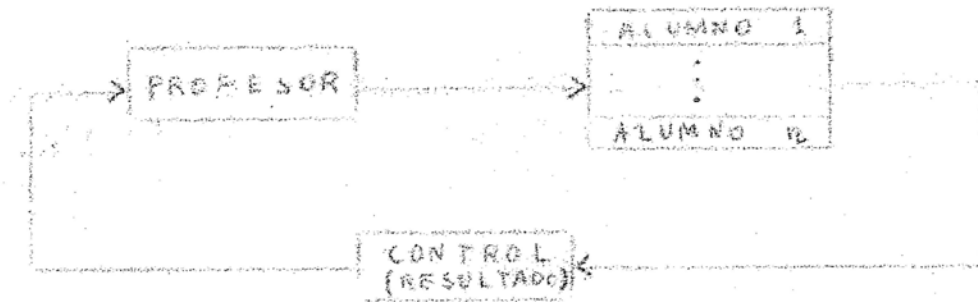
Vector de control: nota o evaluación del alumno.

Vector de estado: información recibida por el alumno.

Resulta difícil medir de alguna forma la cantidad de información que asimila un alumno, y únicamente sería posible hacer una serie de grupos más o menos homogéneos por la información asimilada, ya que la suministrada por el profesor, es en todo caso la misma siempre.

Este esquema es solo válido en una primera aproximación, ya que cada alumno es una entidad individual, y por muy homogéneo que sea el grupo de alumnos, nunca se obtendrán los mismos resultados de cada alumno.

Por tanto es preferible introducir un nuevo modelo, tal como el siguiente:



En este modelo se considera que el profesor actúa sobre cada alumno de una manera individual, evaluando los conocimientos de cada uno por separado.

De esta forma habrá tantos niveles de información, como alumnos existan en el conjunto.

El profesor controla de esta forma el vector de estado (información), que posee cada alumno. En función de los resultados obtenidos modifica sus explicaciones, para poder obtener el máximo rendimiento.

El modelo así planteado es útil para cualquier disciplina.

Uno de los inconvenientes primordiales de este sistema, es que resulta muy difícil realizar una enseñanza individualizada, de una forma sistemática.

En la enseñanza por ordenador, esto es posible, ya que el alumno no depende de los demás, y puede marcarse el mismo el ritmo de trabajo según su capacidad.

Por otra parte el profesor se despreocupa de la carga que pueda suponer preparar sus explicaciones de clase a un nivel medio.

El inconveniente principal de la enseñanza automática, está en los alumnos de coeficiente intelectual más bajo, que responden muy mal al sistema, y han de ser separados de él.

po mínimo, por parte de profesor y alumno.

Existen algunos programas de enseñanza, en los cuales, es posible modificar alguna instrucción, desde el terminal del alumno, pudiendo mediante un código especial, empleado por el profesor, introducir nuevas instrucciones, o corregir las existentes. En este trabajo no se ha hecho uso de esta posibilidad, para evitar que en un momento dado, el propio alumno, modificase el programa.

3.7.- TELEPROCESO.-

Aquí únicamente interesa, destacar de este campo, lo concerniente al problema de enseñanza.

En general, los alumnos estarán apartados del ordenador, y por tanto, los equipos que utilicen han de estar conectados a él, por una red de teleproceso.

Esta red ha de ser tal, que permita la transmisión de la información a gran velocidad. En general, serán canales multiplexores, que van tomando los datos de muchos equipos, que previamente se han almacenado en las memorias tampón correspondientes.

Lo único, que se pide al canal, es que tenga el ancho de banda y la confiabilidad, necesarias para este propósito.

En la figura n.º. 28, se puede ver la red de teleproceso, que se utilizó en este trabajo.

El canal multiplexor, es de 40.000 baudios.

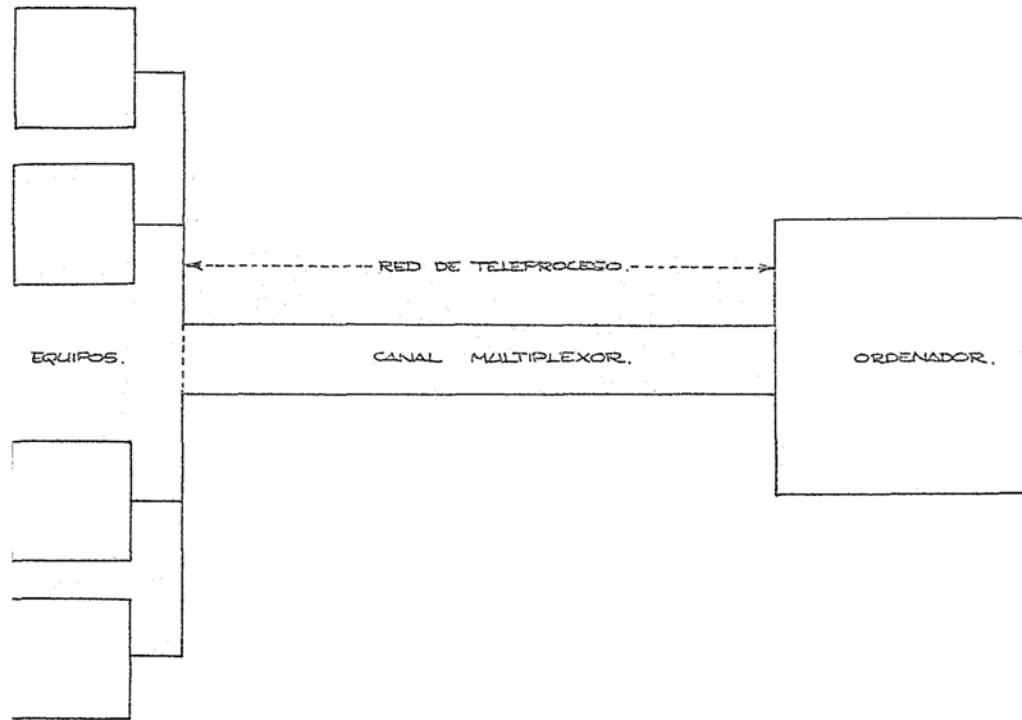


FIGURA Nº28

3.8.- ESTABLECIMIENTO DEL MODELO MATEMATICO PARA EL SISTEMA HOMBRE-ORDENADOR.-

Para que sea posible realizar un estudio cuantitativo, es necesario poseer un modelo matemático del sistema.

En este caso, se va a considerar un vector de estado, compuesto por las dos variables de estado siguientes:

x_1 , representa la información suministrada al ordenador por la persona.

x_2 , es la información que el ordenador, suministra a la persona, como consecuencia de la información que anteriormente ha dado esta al ordenador.

\dot{x}_1 y \dot{x}_2 , representan las variaciones temporales de ambas.

Las componentes del vector de control del sistema, son:

r_1 , que es la decisión en el caso de contestación correcta.

r_2 , es la decisión tomada por el ordenador en el caso en que la respuesta no sea la prevista.

La variación de información que vaya habiendo dentro del sistema, se puede poner como una combinación lineal del vector x y el vector r .

La UCP, únicamente puede recibir o enviar información a las restantes unidades en un momento dado, por lo cual, al no poder hacer estas dos operaciones de un modo simultáneo, los coeficientes a_{12} y a_{21} , son nulos. Por tanto la matriz A , solo tendrá los elementos de la diagonal principal. Se puede tomar una escala de tal forma que estos elementos sean unitarios, de una forma parecida en caso se hace en teoría de circuitos.

De esta misma forma los elementos de la matriz B , son la unidad.

La información se puede medir en % de la información total.

Por tanto, la ecuación del sistema hombre-ordenador dentro del espacio de estado, es de la forma:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix}$$

Siempre que \bar{x} y \bar{r} sean vectores no nulos, hay variación de la información. Esta variación es nula únicamente en el caso de que los vectores sean nulos.

La información que contienen las variables de estado, viene expresada en bits, según se especifica:

- La información, puede variar de 0, en el caso en que no se transmite nada, hasta la cantidad máxima de bits, que permita transmitir el canal.

- El vector que contiene información nula, es tal, que sumado a uno cualquiera, no le añade nada nuevo, lo que quiere decir que es el elemento neutro de la suma de vectores.

- La información inversa de una dada, es aquella que la anula, por ejemplo una rectificación a una contestación, que anule esta. A estos bits de información negativa, se les considere como números negativos, en este estudio, aun cuando esto es de una forma simbólica.

De esta forma se tiene establecido el modelo matemático, que permite el estudio del sistema hombre-ordenador.

El vector de control, podrá tomar los valores 1 y 0, en cualquiera de sus dos componentes, según se tome la decisión correspondiente, a cierto o a falso.

La matriz A, es una matriz diagonal, por lo que se puede aplicar aquí todo lo dicho en la segunda parte, sobre este tipo de matrices.

3.9.- ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DEL SISTEMA HOMBRE-ORDENADOR.-

Un tema de máxima importancia, es el estudio del

sistema hombre-ordenador.

Actualmente, en que el ordenador va entrando a formar parte de gran número de actividades de la vida diaria, y teniendo en cuenta que en el futuro aun será mayor esta intervención, se hace necesario revisar sus relaciones con el hombre, y el estudio conjunto de ambos, cosa sobre la que hasta la fecha, se ha hecho muy poco.

El modelo del sistema hombre-ordenador, ha sido expuesto en el apartado anterior. Este modelo es válido además de para el sistema de enseñanza, para cualquier otro tipo de relación entre hombre y ordenador, ya que en todo proceso de este tipo, habrá un flujo de información del ordenador al hombre (programador u operador), y otro flujo de información del hombre al ordenador.

Por tanto se puede estudiar como un conjunto único el sistema hombre-ordenador.

De este estudio es posible sacar conclusiones muy interesantes para el futuro de la Cibernética, que por el camino que va desarrollará nuevos sistemas autoprogramables, y adaptativos, muy parecidos a este conjunto.

De momento lo que se sabe es que se tiene el modelo matemático de este sistema. El sistema hombre-ordenador, es además adaptativo, pues el hombre asimila las experiencias anteriores. Como esto lo hace de un modo espontáneo, se puede decir que el sistema es auto adaptativo. Además es un sistema de los que se han definido como autómatas probabilísticos, pues el alumno puede responder de una forma aleatoria.

Interesa saber sobre todo si el sistema es estable, pues si no lo fuese sería muy difícil, y tal vez imposible su funcionamiento.

Para hacer este estudio, se va a emplear el mismo método que en el caso de las máquinas sincronas.

Se parte de la ecuación de estado, tal como ha sido formulada anteriormente, y mediante el método del gradiente, se extrae la función de Lyapounov, para poder estudiar la estabilidad del sistema.

Tal como se vió en la parte segunda, la derivada temporal de la función de Lyapounov, viene expresada de la siguiente forma:

$$\dot{V} = \begin{pmatrix} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_1 + r_2 \\ x_2 + r_2 \end{pmatrix}$$

Se trata de calcular los coeficientes a_{ij} , teniendo en cuenta que se ha de cumplir la ley de derivadas cruzadas.

Esto quiere decir que $a_{ij} = a_{ji}$.

Lo primero, hay que especificar de que tipo es la variación de las variables de estado con el tiempo, para poder calcular $V(t)$.

Como la información parte de cero, hasta que en el tiempo t , se ha acumulado en el lugar destinado a ella, esta variación, se puede considerar lineal, sin ningún error, en el tiempo. Por tanto los valores de las variables de estado, son:

$$x_1 = at \text{ y } x_2 = bt.$$

Las derivadas temporales, serán nulas, puesto que se anulan las variables, solo en el origen. En el resto del intervalo, se tendrá $\dot{x}_1 = -a \, dt$, y $\dot{x}_2 = -b \, dt$, siendo el signo menos, debido a que la variación de las variables de un estado a otro, es contraria a la variación del tiempo.

Si se toman $a_{11} = 0$ y $a_{12} = -1$, los valores de los otros dos coeficientes, vienen ya obligados, y son $a_{22} = 0$ y $a_{21} = -1$.

Con esto la expresión de \dot{V} tiene la forma:

$$\dot{V} = -x_2(x_1 + r_1) - x_1(x_2 + r_2)$$

Por ser las variables de estado siempre simultáneamente o positivas o negativas, esta función es siempre definida negativa.

Por tanto se cumple la primera condición para la estabilidad, según el método directo de Lyapounov.

La función V , se obtiene por integración de lo anterior. Esta puesta en función del tiempo es de la forma:

$$\dot{V} = -bt(at + r_1) - at(bt + r_2)$$

siendo a y b constantes positivas, cuyo valor no resta generalidad al estudio, y no interesa tampoco.

Por tanto:

$$V = \int_0^{x_1} (-x_2(x_1 + r_1) - (x_2 + r_2)x_1) dx_1 + \int_0^{x_2} (-x_2(x_1 + r_1) - (x_2 + r_2)x_1) dx_2$$

$x_2 = 0$

Poniendo los valores de las diferenciales de las variables de estado, tal como se han indicado antes, se tiene por resultado de la integración:

$$V = \frac{1}{2}r_2a^2t^2 + \frac{2}{3}abt^3 + \frac{1}{2}b^2t^2r_1 + \frac{1}{2}r_2abt^2$$

Esta función es siempre definida positiva, luego se cumple la segunda condición del método directo de Lyapunov, por lo cual el sistema es asintóticamente estable.

Se tiene pues que el sistema hombre-ordenador es estable, lo cual garantiza la validez de los experimentos realizados, en el campo de la confianza.

3.10.- ESTUDIO DE LA CONTROLABILIDAD Y OBSERVABILIDAD DEL SISTEMA.-

Los criterios generales, que se han visto en la segunda parte, son también válidos aquí.

Observando la ecuación de estado del sistema, se ve que la matriz B , no tiene sus elementos nulos, lo que quiere decir, que el sistema es controlable, ya que las variaciones del vector de control r , afectan a las variaciones temporales del vector x .

La matriz A , es una matriz diagonal, y el estado inicial queda determinado por la ausencia total de información, por lo cual, el sistema es observable.

Se podría integrar también la ecuación de estado, por un método idéntico al empleado en la máquina sincrona, pero como se ha visto no es necesario para el estudio de la estabilidad, controlabilidad y observabilidad del sistema, siendo esto una ventaja, pues así es posible el realizar estos estudios, partiendo únicamente de la ecuación de estado, y sin necesidad de integrarlas.

Respecto a la validez del modelo matemático, empleado en este estudio, hay que destacar que es válido en todas las condiciones del espacio de estado (en este caso plano).

Como se ve el estudio realizado, es muy similar al de la máquina sincrona, llegándose a los mismos resultados. En la parte siguiente, se justifica matemáticamente esta similitud, dando de paso una visión más amplia del espacio de estado.

I V

RELACION DE AMBOS CASOS EN EL ESPACIO DE ESTADO

4.1.- INTRODUCCION.-

Hasta este punto, se han estudiado dos problemas aparentemente distintos, pero utilizando los mismos recursos.

Por tanto es posible preguntarse, si es una coincidencia, o bien los métodos del espacio de estado puedan generalizarse.

En esta parte, se trata de poner de manifiesto una relación fundamental, entre ambos casos.

Para ello se comienza por demostrar que el espacio de estado, tiene estructura de espacio vectorial.

Como ambos problemas son espacios de estado, resultarán ser espacios vectoriales.

Entonces, se puede encontrar una aplicación lineal, entre sus elementos, de tal forma, que dado un vector del espacio electrotécnico, le corresponda siempre un vector del espacio hombre-ordenador.

Ambos espacios tienen distinta dimensión, uno cuatro y otro dos, por lo cual la relación no puede ser biunívoca, pero si es posible que sea unívoca, del espacio de mayor dimensión al de menor.

De esta manera se puede definir un homeomorfismo, entre ambos espacios, lo cual permite justificar de un modo formal, la identidad de métodos empleados en su estudio.

Además de esta forma, cualquier método que se emplee en uno de los dos casos, es aplicable en el otro.

Esto se puede generalizar a más espacios de estado, siempre que se defina de una forma adecuada la aplicación lineal.

En lo que sigue se expresan de una forma matemática las ideas anteriores.

4.2.- EL ESPACIO VECTORIAL DE ESTADO.-

Supongamos, un espacio de estado de n dimensiones, lo cual quiere decir, que el vector de estado tiene n variables de estado.

En los casos anteriores, n tomaría los valores 4 y 2.

Tomemos el cuerpo K , de los números reales. Si se denomina el espacio de estado con la letra X , se va a demostrar que X es un espacio vectorial, sobre el cuerpo K .

Para ello, se define la operación interna de suma entre vectores x , pertenecientes a X , de la misma forma, que la suma ordinaria de vectores.

Las propiedades, que se han de cumplir, para que X , sea espacio vectorial, son:

I) Propiedad conmutativa.-

Sean \bar{X}_1 , y \bar{X}_2 , dos vectores pertenecientes a X .

Se verifica:

$$\bar{X}_1 + \bar{X}_2 = \bar{X}_2 + \bar{X}_1$$

ya que la suma matricial, de dos vectores, es independiente del orden de los sumandos.

II) Propiedad asociativa.-

Tomados tres vectores, del espacio de estado, \bar{X}_1 , \bar{X}_2 , y \bar{X}_3 , se verifica evidentemente:

$$\bar{X}_1 + (\bar{X}_2 + \bar{X}_3) = (\bar{X}_1 + \bar{X}_2) + \bar{X}_3$$

III) Elemento cero.-

Es aquel vector del espacio de estado, que contiene n variables, que son nulas.

IV) Elemento inverso.-

Es un vector tal que contiene a las variables de estado, que tienen valores contrarios a las de un vector dado, y que por tanto, sumados ambos dan el elemento cero.

Por tanto para la operación interna de suma, se tiene un grupo abeliano.

Dado un p , perteneciente al cuerpo K , se define la operación interna de producto $p.\bar{X}$, como el resultado de multiplicar a cada componente de todos los vectores de X , por el número p .

De esta definición, se deduce:

I*) Elemento unidad.-

$$1.\bar{X}_i = \bar{X}_i \quad \forall \bar{X}_i, \text{ contenido en } X$$

En efecto, al multiplicar por 1 cada componente del vector \bar{X}_i , estas quedan igual.

II*) Propiedad asociativa.-

Si a y b , son elementos pertenecientes al cuerpo K , se verifica:

$$a.(b.\bar{X}_i) = (a.b).\bar{X}_i, \text{ para todo } \bar{X}_i \text{ perteneciente a } K$$

En efecto, es lo mismo multiplicar cada componente del vector \bar{X}_i , primero por b y luego por a , que simultáneamente por a y por b .

III*) Distributiva por la derecha.-

$$(a+b).\bar{X}_i = a.\bar{X}_i + b.\bar{X}_i$$

El razonamiento es análogo al anterior.

IV*) Distributiva por la izquierda.-

$$a.(\bar{X}_1 + \bar{X}_2) = a.\bar{X}_1 + a.\bar{X}_2$$

Al cumplirse todas estas propiedades, se tiene que el espacio de estado formado por todos los vectores de estado, que contienen a las variables de estado, tiene estructura de espacio vectorial.

4.3.- ESTABLECIMIENTO DEL HOMOMORFISMO.-

Se han considerado los dos espacios de estado siguientes:

- El espacio D, formado por todos los vectores de intensidad posibles en una máquina síncrona. Cada vector, contiene cuatro variables de estado, por lo cual la dimensión de este espacio es cuatro.

- El espacio E, constituido por todos los vectores de información, que son posibles dentro del sistema hombre-ordenador. Sus vectores contienen dos variables de estado, por lo que el espacio tiene dimensión dos.

Se toman dos vectores \bar{Z}_1 y \bar{Z}_2 , pertenecientes al espacio D. Se define una ley de composición interna en D, llamada suma, y representada por H, de la forma siguiente:

El vector suma de los dos dados, es otro vector \bar{Z}_3 cuyas componentes, son las sumas de las componentes homólogas de \bar{Z}_1 y \bar{Z}_2 .

De la misma forma, en el espacio E, se define una ley de composición interna T, llamada suma, y tal que aplicada a dos vectores \bar{Y}_1 e \bar{Y}_2 , pertenecientes al espacio E, da por resultado otro vector \bar{Y}_3 , que tiene por componentes la suma de las componentes homólogas, de ambos vectores.

Dado un vector \bar{Z} , perteneciente a D, se le puede asociar otro vector \bar{Y} , perteneciente a E, mediante una aplicación f, definida de la siguiente forma:

Sean los vectores:

$$Z = \begin{pmatrix} i \\ ds \\ i \\ dr \\ i \\ qr \\ i \\ qs \end{pmatrix} \in D \quad \text{e} \quad Y = \begin{pmatrix} x \\ 1 \\ x \\ 2 \end{pmatrix} \in E$$

A \bar{Z} , se lo hace corresponder \bar{Y} , de tal forma que las componentes de Y , quedan definidas como:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 (1 & +1) \\ 1 & ds & dr \\ k_2 (1 & +1) \\ 2 & qs & qr \end{bmatrix}$$

Es decir, la primera componente de Y , es la suma de las corrientes directas, y la segunda componente, es la suma de las corrientes cuadratura, afectadas por unas constantes de cambio de escala.

Por tanto todo vector de D , tiene una imagen única en E , pero cada vector de E , tiene múltiples imágenes en D , por lo que la aplicación f es unívoca.

Las constantes k_1 y k_2 , se pueden determinar haciendo que se correspondan los vectores de máxima intensidad y máxima información. En el caso de la máquina IEB, el vector de máxima intensidad apareció en el instante 0 , y su valor lo proporciona el programa MR1:

$$\bar{Z}_m = \begin{bmatrix} 1.96 \\ 1.96 \\ 1.96 \\ 1.96 \end{bmatrix}$$

El vector de máxima información, es aquel que tiene sus dos componentes igual a la unidad.

$$\text{Por tanto } k_1 = k_2 = \frac{1}{3.92} = 0.255$$

En forma matricial, la aplicación f , es:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & k_1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & & \\ 0 & 0 & k_2 & k_2 \\ & & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ ds \\ dr \\ qs \\ qr \end{bmatrix}$$

Se trata de una aplicación lineal, pues:

$$a) f(z_1 + z_2) = f(z_1) + f(z_2)$$

$$f(z_1 + z_2) = f \begin{pmatrix} 1 & + & 1 \\ ds_1 & & ds_2 \\ 1 & + & 1 \\ dr_1 & & dr_2 \\ 1 & + & 1 \\ qr_1 & & qr_2 \\ 1 & + & 1 \\ qs_1 & & qs_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k(1 & + & 1 & + & 1 & + & 1) \\ 1 & ds_1 & & ds_2 & & dr_1 & & dr_2 \\ k(1 & + & 1 & + & 1 & + & 1) \\ 2 & qr_1 & & qr_2 & & qs_1 & & qs_2 \end{pmatrix}$$

$$f(z_1) + f(z_2) = f \begin{pmatrix} 1 \\ ds_1 \\ 1 \\ dr_1 \\ 1 \\ qr_1 \\ 1 \\ qs_1 \end{pmatrix} + f \begin{pmatrix} 1 \\ ds_2 \\ 1 \\ dr_2 \\ 1 \\ qr_2 \\ 1 \\ qs_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k(1 & + & 1 & + & 1 & + & 1) \\ ds_1 & & ds_2 & & dr_1 & & dr_2 \\ k(1 & + & 1 & + & 1 & + & 1) \\ 2 & qr_1 & & qr_2 & & qs_1 & & qs_2 \end{pmatrix}$$

$$b) f(\lambda z) = \lambda f(z), \forall \lambda \in K$$

$$f(\lambda z) = \begin{pmatrix} \lambda x \\ 1 \\ \lambda x \\ 2 \end{pmatrix} \quad \lambda f(z) = \begin{pmatrix} \lambda x \\ 1 \\ \lambda x \\ 2 \end{pmatrix}, \text{ pues para multi-}$$

plicar un vector por un escalar, basta con multiplicar sus componentes por el escalar.

Por tanto al ser f , definida de esta manera, una aplicación lineal y unívoca se ha establecido una aplicación de D en E , que constituye un homomorfismo entre ambos espacios.

Esto justifica, de una manera matemática la identidad de métodos y resultados, que se han visto en ambos espacios.

El elemento neutro o cero del espacio D , es aquel vector, que tiene las cuatro componentes nulas, pues sumado a cualquier otro, lo deja invariante.

El conjunto de imágenes de este vector cero, en D

a través de f^{-1} , es lo que se denomina núcleo del homomorfismo. Este conjunto de imágenes, viene definido por el sistema homogéneo:

$$0 = i_{ds} + i_{dr}$$

$$0 = i_{qs} + i_{qr}$$

Por tanto, todos los vectores de D, que satisfacen esta ecuación, constituyen el núcleo de este homomorfismo.

Isomorfismo particular.- En el caso de la máquina EKB, que se ha empleado en este trabajo, i_{dr} e i_{qr} , eran nulas, transcurrido el transitorio inicial. Por tanto en régimen permanente, la aplicación f, queda en la forma:

$$x_1 = k'_1 i_{qs}$$

$$x_2 = k'_2 i_{qs}$$

En este caso el vector de intensidad máxima, es:

$$i_m = \begin{bmatrix} 1.8 \\ 1.67 \end{bmatrix}$$

por lo cual las constantes son:

$$k'_1 = \frac{1}{1.8} = 0.5555 \quad k'_2 = \frac{1}{1.67} = 0.597$$

El vector cero del espacio E, tiene ahora únicamente una imagen en D, determinada por f^{-1} , y que es el vector con todas sus componentes nulas, es decir el vector cero de D.

Al corresponderse los elementos cero de ambos espacios, a través de la aplicación f, se tiene establecido un isomorfismo.

En este caso la aplicación f, es inyectiva.

Este resultado es muy particular, y solo es posible en la máquina EKB. Sin embargo, las corrientes del rotor, tienden siempre a ser muy pequeñas, con respecto a las del estator, por lo cual, si se desprecian, se puede tener un isomorfismo aproximado, para cualquier tipo de máquina síncrona.

V

CONCLUSIONS

5.1.- INTRODUCCION.

A lo largo de la exposición del trabajo, salta a la vista la identidad de métodos empleados, en el tratamiento de ambos problemas.

El cálculo de la estabilidad, por el método del gradiente, tiene especial interés, pues unifica el tratamiento.

Al establecerse el homomorfismo, con carácter general, y el isomorfismo de un modo restringido, se puede justificar de un modo matemático, la identidad de métodos, así como de resultados.

Al mismo tiempo queda de esta forma abierto el camino, para poder proseguir en el futuro los estudios en este campo.

5.2.- PERSPECTIVAS FUTURAS.-

Estos problemas, pueden dar origen a tratar temas, tales como el control óptimo, aplicando el teorema de Poincaré-Bendixson, estudio de trayectorias de orden superior, etc.

Por otra parte, uno de los propósitos de este trabajo, ha sido el de contribuir a la unificación de la teoría del control.

Toda ciencia trata de encontrar una serie de postulados básicos, de los cuales sean deducibles todos los casos particulares.

En esta dirección apuntan los métodos de Lyapounov, y también este trabajo, que hace aplicación de los mismos a dos casos diferentes y abre la posibilidad de generalizar aun más estas relaciones.

Un estudio comparativo, paralelo al realizado, se

podría hacer, considerando cada matriz de la ecuación de estado, como un tensor contravariante, y se obtendrían los mismos resultados, pero con un tratamiento matemático distinto.

5.3.- UNIFICACION DE LA TEORIA DEL CONTROL.-

Los métodos de Lyapounov, aplicados en este estudio, han sido los que realmente han unificado los criterios de la teoría del control.

Con ellos se puede saber si un sistema es estable, sin más que fijarse en la energía que este tiene almacenado. Si decrece con el tiempo el sistema será estable. De esta forma se ve de una manera física un concepto, como el de la estabilidad, que en principio pudiera parecer únicamente matemático.

El problema mayor, estriba en el cálculo de la función V .

Esta puede ser establecida por consideraciones físicas o bien analíticamente utilizando el método del gradiente, pero teniendo en cuenta que en ella intervengan únicamente las variables de estado. De esta forma es posible el tratamiento unificado de los sistemas.

Los sistemas no lineales, se linealizan, utilizando los métodos indicados, en el tratamiento de la máquina síncrona.

Por último la introducción del cálculo numérico aplicado a estos problemas, hace posible la utilización de ordenador, para su resolución.

La observabilidad y controlabilidad, son conceptos surgidos de la aplicación del método directo de Lyapounov, utilizables también en cualquier sistema. Su estudio es sumamente fácil, diagonalizando la matriz A , de la ecuación de estado.

De esta forma es posible un estudio muy sencillo

de ambos conceptos.

Por otra parte, el que ambos espacios sean isomorfos, permite aplicar los métodos empleados en la resolución de algún problema, en uno de ellos, al otro.

Aun cuando la teoría del control se va aplicando cada vez más en todos los campos, es de prever, que en el futuro será fundamental en las siguientes ciencias:

- En electrónica, hace ya tiempo que es fundamental, sin embargo, en el futuro la propia electrónica será una parte de la teoría del control.

- En sistemas electromecánicos, como son el control de antenas, y el seguimiento de proyectiles y cohetes, es básica, sobre todo desde la aparición del radar.

- En telecomunicación espacial, es necesaria, y además ha de tener una gran precisión, sobre todo en vuelos espaciales, y comunicaciones por medio de satélites síncronos.

- En electrotécnica se implanta cada vez más, el control numérico de máquinas herramientas. En la parte segunda se dio además una idea del control de una central hidroeléctrica, de una forma automática.

- En economía, aplicando los métodos iniciados por Dillman, es posible estudiar los procesos económicos de un país, de una forma matemática, pudiéndose hacer previsiones para el futuro, y tener en cuenta gran número de variables, gracias al empleo de ordenadores electrónicos.

- En la empresa, sobre todo cuanto mayor es, es imprescindible realizar un control económico, para la buena marcha de sus procedimientos. Los métodos idóneos son el PERT y el PPM, que son especialmente aptos para el empleo de ordenadores.

- En sociología se puede estudiar, un tema tan interesante como la realimentación del poder y su estabilidad.

En consecuencia puede afirmarse que en el futuro

Esta ciencia del control, ejercerá una influencia, que será fundamental en otras muchas.

5.4.- FUTURO DE ESTAS INVESTIGACIONES.-

Después de estos trabajos, vendrá la aplicación directa de los métodos empleados en su resolución, a otros campos afines.

En electrotecnia, se continuará la investigación sobre máquinas síncronas. Se estudiarán las trayectorias de orden superior en el espacio de estado, así como el establecimiento de nuevos modelos matemáticos, que permitan un mejor control mediante ordenadores.

En enseñanza se diseñará un nuevo lenguaje de programación, más adecuado para el español, que el aquí empleado. Se realizará también el correspondiente compilador.

5.5.- CUADROS SINOPTICOS.-

Como resumen se incluyen unos pequeños cuadros sinopticos, para ver de una forma gráfica, el desarrollo de este trabajo.

CLASES DE CONTROL

- Mecánico
- Electrico
- Electrónico
- Con ordenador
- Electromecánico

TEORIAS DEL CONTROL

- Clásica = Analisis y estabilidad
- Moderna = Analisis y síntesis. Estabilidad
Controlabilidad y observabilidad
Control óptimo

SIMULACION

- Mejora de respuestas
- Control automático
- Prevision de respuestas a excitaciones dadas.

APRENDIZAJE AUTOMATICO

- Lenguajes de programación
- Teleproceso
- Sistemas adaptativos

RELACIONES

- Espacio vectorial
- Isomorfismo
- Espacios de estado

5.6.- EQUIPOS EMPLEADOS.-

Para la realización de este trabajo, se emplearon los siguientes equipos:

- Máquinas y aparatos de medida del laboratorio de Electrotecnia de la ERSI de Telecomunicación.

+ Ordenador IBM 7090, del Centro de Cálculo de la Universidad de Madrid.

- Terminales de vídeo, red de teleproceso, y unidad central de Siemens (modelo 4004).

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

Aquí se incluye toda la bibliografía particular, que se ha empleado, para la confección del trabajo. En los artículos se cita la revista de procedencia .

- Congreso de cálculo y tratamiento
de la información.....AFIRO. Ed. DUNOD 1.964
- Logica universal. Un nuevo tipo
de módulos.....Francó P. Freperata
Trans. Computer Junio 1.971
- Síntesis de máquinas de estados
finitos.....A.W. Bierman
Trans. Computer June 1.971
- Programación y utilización de
los ordenadores digitales.....Mc. Graw-Hill 1.962
- Memorias adaptativas para sistemas
tipo "learning".....D.L. Johnson
Dover 1.970
- Inteligencias artificiales.....H. E. Megler
Trans. Computer Oc. 1.971
- Decisión en sistemas "Fuzzy".....R.E. Bellman
Trans. Computer Dic.1.971
- Tratamiento de la información
lingüística.....A. Deweze Dunod 1.964
- Dinámica estadística de los cir-
cuitos de regulación.....J. Benes Dunod 1.966
- Optimización estadística de siste-
mas dinámicos.....P. Lefevre Dunod 1.967
- Síntesis de sistemas de control
optimo.....S.S.L. Chang Dunod 1.968
- Introducción al control optimo.....P. Maslin Dunod 1.967

- Sistemas auto-adaptativos.....P.I. Tchinaiev Dunod 1.969
- Programación de los ordena-
dores digitales de control.....L.N. Volguine Dunod 1.970
- Control numérico de máquinas...J. Thillez Dunod 1.970
- Técnicas binarias y tratamien-
to de la información.....Soubies-Camy
Dunod 1.968
- Dispositivos y redes de Opto-
Electronica.....Poc. IRE 1.955 Pg.1897
- Experimentos con ordenadores di-
gitales.....Proc. 1.957 (Conferencia)
- Procesos de control automático IBM exhibition Enero
1.959 Pg. 22
- Lector automático IBM.....Automatismes
Junio 1.961 pag. 249
- Ingeniería automática.....V.G. Polaskof 1.971
- Lenguaje de las máquina y len-
guaje humanoV. Beleviten
Hermann 1.956
- Teoría de la información y
percepción estética.....A. Moles Flammarion 1.958
- Métodos de control.....E. Peterson
Acad. Soc. Am. 1.953 pg 175
- El cerebro humano.....P. Chauchard
PUF nº 768
- Experimentos de simulación....Proc. IRE Nr. 1.960 Pg. 301
- Experimentos de adaptación....Trans IEEE 1.963 Pg. 174
- Sceptren.....R. Waller J. Scien.
Mayo 1.964
- Diseño del Mark I.....J. C. Hay
Proc. IRE 1.960 pg. 164

- Estudio de las máquinas eléctricas..... Kron Dover 1.943
- La transformación de Park..... H. Johnson Proc IRE Co. 1.950
- Control automático para ingenieros..... D. B. Welbourn Dunod 1.969
- Electrotecnia para ingenieros.. Fouille Dunod 1.964
- Análisis y diseño mediante ordenadores, para ingenieros eléctricos..... B.J. Day Mc Graw Hill 1.972
- Método directo de Lyapunov aplicado al estudio de la estabilidad L.C. Chang
Trans IRE 1.971 enero
- La cibernética y lo humano..... A. David Labor
- Prototipo de robot inteligente Trans. Computers Vol. 21 pág 6
- Modelo para el estudio de la máquina eléctrica generalizada..... A.E. Ferdinand
IRE Syst. J. vol 10 pg. 129
- Control automático en tiempo real: aplicaciones..... W.E. Basauge Commun. Ass. can
Mach. vol. 14 pg. 404
- Teoría del control asincrónico... J. Bruno Trans. Comp.
vol. 20 Pg. 629
- Fortran Conversacional.....D.W. Barron Comp. J.
Mayo 1.971 pg 123
- Autómata finito..... J. Heycraft Trans. Comp.
vol. 20 pg. 125
- Introducción a la organización por ordenador.....Y. Cha Trans. Comp.
vol. 20 pg. 1221
- Realización de un autómata estocástico.....H.M. Sherecury Trans.
Comp.vol 20 pg. 889

- Micro programación y análisis numérico.....** B.D. Shirver Trans.
Comp. vol 20 pg. 808
- Control adaptativo.....** S.S.L. Chang Trans.
Comp. vol. 20 pg. 447
- Controlabilidad en sistemas no lineales.....** C.T. Chen Trans. Aut.
Cont. vol. 17 pg. 534
- Ecuación matricial de Lyapounov** T.K.C. Peng Trans.
Aut. Cont. vol. 17 p. 56^c
- Solución a la ecuación matricial de Lyapounov.....** I.E. Ziedau Trans. Aut.
Cont. Junio 1.972
pg. 379
- Introducción al análisis de matrices.....** R. Bellman Mc. Graw Hill
1.960
- Boletín del lenguaje LIDA.....** Siemens 1.970
- Análisis matemático.....** Rufin Castillo 1.970
- Teoría de los circuitos de control** Olle I. Elgerd
Tokio 1.971
- Teoría matemática de la información.....** C.E. Shannon
- Identificación práctica de procesos automáticos.....** J. Loeb Dunod 1.970
- Sistemas lógicos.....** J.P. Ferrin Dunod 1.967
- Automática.....** H. Zemanek
Proc IRE enero 1.965
- Simulación de experimentos.....** F. Rosenblatt
Proc IRE marzo 1.960

Analisis y diseño de sistemas de control.....	R.C. Dorf
	Proc. IRE junio 1.962
Control no lineal.....	J.E. Gibson
	Proc. IRE 1.964 p.520
Simulación	F. Rosenbart
	Proc. IRE 1.960 p.301
Experimentos de sistemas adaptativos.....	J.E. Bryon
	Spectrum 1.963
Lenguaje de las máquinas y lenguaje humano.....	V. Belevitch
Sistemas adaptativos.....	H. Kasnerk
	Trans. EC dic. 1.963

INDEX

INDICE

RESUMEN DEL TRABAJO

Objeto de la Tesis.

I. INTRODUCCION

- 1.1. Introducción histórica
- 1.2. Teoría clásica
- 1.3. Teoría moderna
- 1.4. Presente de la teoría del control
- 1.5. Futuro de la teoría del control

II. REGULACION Y ESTABILIDAD DE MAQUINAS SINCRONAS EN EL ESPACIO DE ESTADO

- 2.1. Introducción
- 2.2. Modelo matemático
 - 2.2.1. Teoría de Kron
 - 2.2.2. Aplicación de la teoría de Kron a la máquina síncrona de polos salientes.
- 2.3. Técnicas del espacio de estado
 - 2.3.1. Introducción
 - 2.3.2. Espacio de estado
- 2.4. Resolución de la ecuación de estado
 - 2.4.1. Método analítico
 - 2.4.2. Método numérico
 - 2.4.3. Método analógico
- 2.5. Tipos de sistemas.
 - 2.5.1. Sistemas lineales
 - 2.5.2. Sistemas no lineales
 - 2.5.3. Aplicación a la máquina síncrona
- 2.6. Resolución de la ecuación de estado de una máquina síncrona
 - 2.6.1. Introducción
 - 2.6.2. Medida de los parámetros físicos de una máquina síncrona

- 2.7. Controlabilidad, observabilidad y estabilidad de la máquina síncrona
 - 2.7.1. Introducción
 - 2.7.2. Estudio de la estabilidad de la máquina
 - 2.7.2.1. Criterio de estabilidad
 - 2.7.3. Estudio de la controlabilidad y observabilidad del sistema
 - 2.7.4. Aplicación del método del gradiente al estudio de la controlabilidad y observabilidad del sistema
- 2.8. Simulación de la máquina síncrona, por medio de ordenador digital
 - 2.8.1. Introducción
 - 2.8.2. Modelo matemático
 - 2.8.3. Estudio de la validez del modelo
 - 2.8.4. Programa MM2 para el cálculo de la tabla tensión/corriente
 - 2.8.5. Programa MM3 para el cálculo de la tabla intensidad de excitación/intensidad en la carga

III. RELACIONES HOMBRE-ORDENADOR Y APRENDIZAJE AUTOMÁTICO

- 3.1. Objetivos que se persiguen
- 3.2. Aprendizaje automático
- 3.3. Planteamiento del problema
 - 3.3.1. Introducción
 - 3.3.2. Elección del lenguaje
- 3.4. Resultados del experimento
 - 3.4.1. Modo de operar
 - 3.4.2. Grupos de materias
 - 3.4.3. Estudio de la confiabilidad del sistema
- 3.5. Sistemas adaptativos y autodidácticos
- 3.6. Teoría de autómatas

- 3.6.1. Automata finito
- 3.6.2. Automata probabilistico
- 3.6.3. Aplicación a la enseñanza por ordenador
- 3.7. Teleproceso
- 3.8. Establecimiento del modelo matemático para el estudio del sistema hombre-ordenador
- 3.9. Estudio de la estabilidad del sistema hombre-ordenador
- 3.10. Estudio de la controlabilidad y observabilidad del sistema.

IV. RELACION DE AMBOS CASOS EN EL ESPACIO DE ESTADO

- 4.1. Introducción
- 4.2. El espacio vectorial de estado
- 4.3. Establecimiento del homomorfismo

V. CONCLUSIONES

- 5.1. Introducción
- 5.2. Perspectivas futuras
- 5.3. Unificación de la teoría del control
- 5.4. Futuro de estas investigaciones
- 5.5. Cuadros sinópticos
- 5.6. Equipos empleados

BIBLIOGRAFIA