

01170  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
Facultad de Ingeniería

11  
20)

"PREDICCIÓN DE SISTEMAS DINÁMICOS"  
Aplicación al proceso de contaminación  
en aislamientos externos

J. GERARDO MONTOYA TENA

T E S I S

PRESENTADA A LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DE LA  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER  
EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA  
(ELÉCTRICA)

CIUDAD UNIVERSITARIA

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

1994



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# **DEDICATORIA**

## **A LUPITA Y GERARDO**

**Inspiración y motivo de mi esfuerzo. Por el gran amor y aliento que me brindaron durante el desarrollo de mi trabajo**

## **A MIS PADRES**

**Eterno ejemplo de amor y de constancia**

# **AGRADECIMIENTOS**

**Al DR. YU TANG XU por su constante apoyo durante el transcurso de mis estudios.**

**Al M.C. JORGE GÓNZÁLEZ DE LA VEGA por el decidido y entusiasta apoyo que me brindó durante el desarrollo de mi tesis y muy especialmente por su amistad incondicional.**

**A los DRES. JOSÉ LUIS FIERRO CHÁVEZ, GERARDO ESPINOSA PÉREZ, CRISTINA VERDE RODARTE y VÍCTOR RUIZ CARMONA por sus valiosos comentarios, fuente de enriquecimiento para el desarrollo del presente trabajo.**

**Al INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELÉCTRICAS y a la DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO de la UNAM, por proporcionarme sus instalaciones para la elaboración de mi tesis. En especial al M.C. MARCO ANTONIO PONCE.**

**A mis amigos JOB y MARCO.**

# INDICE

RESUMEN	.....	i 6
---------	-------	-----

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

1.1.	INTRODUCCIÓN	.....	2
1.2.	REFERENCIAS	.....	5

## CAPÍTULO II

### EL PROCESO DE CONTAMINACIÓN EN AISLAMIENTOS EXTERNOS

2.1.	INTRODUCCIÓN	.....	7
2.2.	EFFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN EN AISLAMIENTOS EXTERNOS	.....	9
2.3.	ESTUDIOS REALIZADOS	.....	14
2.4.	MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL NIVEL DE CONTAMINACIÓN	.....	16
2.4.1.	Métodos directos	.....	16
2.4.2.	Métodos indirectos	.....	23
2.4.3.	Métodos de evaluación en laboratorio	.....	24
2.5.	RESUMEN	.....	25
2.6.	REFERENCIAS.	.....	26

## CAPÍTULO III

### IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS DINÁMICOS

3.1.	INTRODUCCIÓN	30
3.2.	ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS.	32
3.3.	ALGORITMOS DE ESTIMACIÓN	33
3.4.	PRINCIPIO DE MÍNIMOS CUADRADOS	35
3.4.1.	Algoritmo de mínimos cuadrados recursivo (M.C.R)	37
3.5.	PREDICCIÓN ADAPTIVA.	39
3.5.1.	Formas de aproximación al predictor óptimo	40
3.5.2.	Definición del orden y retardo del modelo	40
3.6.	MODELOS DE PREDICCIÓN ADAPTIVA DIRECTA	42
3.6.1.	Algoritmo mínimos cuadrados extendido.	43
3.7.	PREDICCIÓN VERTICAL.	44
3.8.	REFERENCIAS.	46

## CAPÍTULO IV

### APLICACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS AL PROCESO DE CONTAMINACIÓN EN AISLAMIENTOS EXTERNOS

4.1.	INTRODUCCIÓN	49
4.1.1.	Descripción del Método de Resistencia Superficial	50

4.2.	INSTRUMENTACIÓN	52
4.2.1.	Diseño del módulo de Resistencia Superficial	53
4.2.1.	Diseño del módulo de Flameo	54
4.3.	DEFINICIÓN DEL SISTEMA	55
4.3.1.	Factores de Correlación	56
4.4.	PARAMETRIZACION DEL MODELO	58
4.5.	SELECCIÓN DEL ALGORITMO DE ESTIMACIÓN	62
4.5.1.	Algoritmo MC normalizado	64
4.5.2.	Algoritmo MC extendido	65
4.5.3.	Algoritmo MC con proyección vertical	66
4.5.4.	Comparación de los diferentes algoritmos utilizados	68
4.5.5.	Selección del periodo de muestreo	71
4.5.6.	Selección del orden de la proyección vertical	71
4.5.7.	Resumen	75
4.6.	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO	75
4.6.1.	Desarrollo del software	76
4.6.2.	Descripción del sistema TMP	79
4.6.3.	Implementación del hardware	80
4.7.	INSTALACIÓN DEL MODELO	81
4.7.1.	Adquisición de datos	82
4.8.	REFERENCIAS	83

CAPÍTULO	V	
CONCLUSIONES	.....	85

## APÉNDICES

A)	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS SENSORES UTILIZADOS .....	A1
B)	SISTEMA DE PREDICCIÓN TMP. ....	B1

## RESUMEN

El presente trabajo trata sobre el análisis de la predicción de sistemas dinámicos y su aplicación al proceso de contaminación en aislamientos externos.

El objetivo principal es coadyuvar a la optimización de planes de mantenimiento en zonas de alta contaminación. Para realizar este objetivo, es necesario tener un conocimiento a priori del nivel de contaminación y su correlación con la falla del aislador. La teoría de estimación de parámetros puede ayudar a formular un modelo de predicción del nivel de contaminación, mediante el cual se pueden tomar acciones preventivas en el caso de que el nivel de contaminación pronosticado pueda ocasionar una falla por flameo en el aislamiento. En el desarrollo, se considerará el proceso de contaminación como un sistema lineal cuyas entradas serán los diferentes factores meteorológicos involucrados y su salida será el nivel de contaminación del aislamiento.

En el capítulo I se presenta una breve descripción del problema de contaminación en aislamientos externos y como la teoría de estimación de parámetros puede ayudar a resolver el problema.

En el capítulo II se describe el proceso de contaminación y su efecto sobre el aislamiento externo, los diferentes métodos de medición del nivel de contaminación así como su clasificación por tipos y niveles. Adicionalmente, se

presenta una retrospectiva del estudio de la contaminación en México, cuál es su estado actual y cuáles han sido los logros de estos estudios en el país.

En el capítulo III se presenta un análisis de las diferentes técnicas para la predicción de sistemas dinámicos. Se describe el concepto de estimación de parámetros y su aplicación mediante el algoritmo de mínimos cuadrados. También se muestra una forma de construir un predictor bajo diferentes estructuras. Finalmente, se da una forma de parametrización para señales periódicas bajo el concepto de proyección vertical.

En el capítulo IV se da la aplicación de la teoría de estimación de parámetros al proceso de contaminación en aislamientos externos. Se establecen los argumentos para la selección del método de medición del nivel de contaminación. Además, se describe la instrumentación requerida para realizar la medición de las variables meteorológicas.

En este capítulo se realiza la definición de la estructura del algoritmo, sus órdenes y retardos y el período de muestreo utilizado. Así mismo, se presenta un sistema interactivo de adquisición de datos y predicción del nivel de contaminación basado en el algoritmo seleccionado. Este sistema fue programado en lenguaje de alto nivel y ofrece la graficación en tiempo real de las señales medidas.

En el capítulo V se presentan las conclusiones del trabajo. Las referencias utilizadas se detallan al final de cada capítulo.

En el apéndice A se describe el principio de operación de cada uno de los sensores utilizados. En el apéndice B se detalla la operación del sistema de predicción, así como la utilización de cada uno de los renglones de los diferentes menús que contiene el sistema.

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

## 1.1. INTRODUCCIÓN

En México durante los últimos años, el sector eléctrico se ha topado con el problema de la mala calidad en algunos de los productos que utiliza. Este problema motivó a las Gerencias de Distribución y de laboratorio de equipo de prueba (LAPEM) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), a establecer un convenio para conformar un "Sistema de Evaluación a Proveedores" (SIEVAP) y así mantener un control de calidad sobre los productos requeridos. Para lograr este objetivo, se establecieron grupos de trabajo para las diferentes áreas de evaluación. Estos grupos están formados por especialistas del área de diversas instituciones públicas.

Dentro del grupo de "Especialistas de aislador", se decidió observar el comportamiento operativo del producto tanto en líneas de distribución como en estaciones de prueba. Para ello, la CFE a través de la Gerencia de Distribución, firmó un convenio con el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) para evaluar en campo el comportamiento de los diferentes tipos de aisladores existentes en el país. Una de las metas de este convenio, es el determinar los niveles de contaminación de la zona y correlacionarlos con el comportamiento de los aisladores (Reynoso y González, 1992).

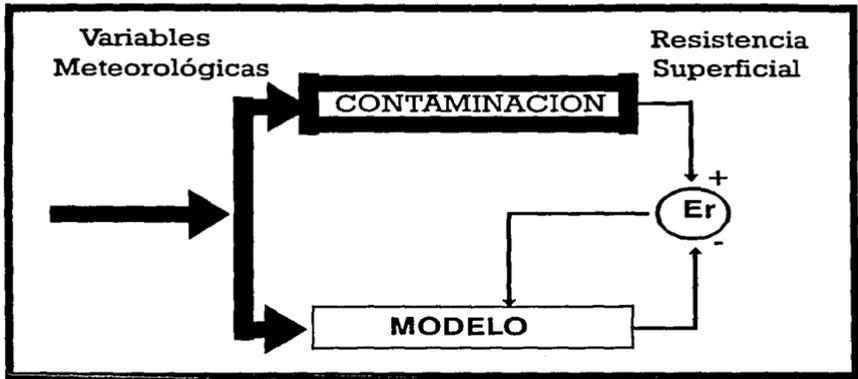
Como se verá en el capítulo II, el índice de fallas en instalaciones eléctricas por efecto de la contaminación puede ser reducido en gran medida si se utilizan aisladores de materiales y diseños adecuados. Aunado a esto, es posible diseñar el nivel de aislamiento para un determinado nivel de contaminación de una región. Sin embargo, actualmente estas soluciones a la par de caras, no son

definitivas, especialmente si se quiere solucionar el problema en una línea ya existente, ya que es necesario determinar el nivel y tipo de contaminante de la región. Por otro lado, se ha encontrado que en zonas urbanas (como la ciudad de Monterrey) el nivel de contaminación se incrementa gradualmente con el crecimiento de la ciudad.

Ante esta perspectiva, el camino mas viable actualmente a la solución del problema es el alternar el diseño contra contaminación con un buen programa de mantenimiento. El pronóstico del nivel de contaminación puede ayudar a optimizar el programa de mantenimiento de líneas y subestaciones. Este pronóstico puede ser formulado a través de la creación de un modelo que nos permita simular el comportamiento del sistema.

La idea de utilizar la teoría de estimación de parámetros recursiva para determinar el comportamiento de un sistema, ya ha sido aplicada por Young and Wallis, (1985) y Jakeman, (1985) para la identificación de sistemas hidrológicos. También existen algunos trabajos enfocados al pronóstico adaptivo del gasto en tuberías (Beck, 1977; Tan et al, 1991).

Para poder aplicar la teoría de estimación a la solución del problema de contaminación, se requiere modelar al proceso de contaminación como un sistema con múltiples entradas y una salida, donde las entradas son los diferentes factores meteorológicos y la salida una variable que permita cuantificar el nivel de contaminación en tiempo real (fig. 1.1). Por otro lado, en función del comportamiento de la variable de salida seleccionada, debe ser posible determinar el riesgo de falla por flameo.



**Fig. 1.1** Estimación del Proceso de contaminación

Al contar con mediciones en tiempo real del nivel de contaminación, es posible construir un modelo paramétrico que sirva como base para formular un predictor adaptivo. Si el grado de contaminación es representativo del riesgo de falla de un aislador, y si posible predecir el valor del nivel de contaminación con un tiempo de al menos 4 horas, entonces podrá pronosticarse un riesgo de falla por contaminación con 4 horas de anticipación.

## 1.2. REFERENCIAS

- Beck, M.B. (1977). The identification and adaptive prediction of urban sewer flows. *Int. J. Control*, 25, pp 425-440.
- Jakeman, A. J. (1985). Application of identification and system parameter estimation to environmental problems: some recent examples. *IFAC Identification and systems parameter estimation*, York UK pp 445-450.
- Reynoso, Eduardo y J. González de la Vega, (1992). "Procedimiento de pruebas de campo a los aisladores sometidos a prueba en las estaciones de monitoreo". *RPI'93. IEEE, México*. pp. 110-116.
- Tan, P.C., C.S. Berger, K.P. Dabke, and R.G. Mein (1991). "Recursive identification and adaptive prediction of wastewater flows". *Automatica*, Vol. 27 No 5, pp 761-768.
- Young, P. and S. Wallis (1985). "Recursive estimation: A unified approach to the identification, estimation and forecasting of hydrological systems. *Appl. Math. Computer*, vol 17 pp 299-334.

# **CAPÍTULO II**

## **EL PROCESO DE CONTAMINACIÓN EN AISLAMIENTOS EXTERNOS**

## 2.1. INTRODUCCIÓN

En México, un país con una gran variedad de climas y suelos, la contaminación ambiental en aislamientos externos es una de las causas más frecuentes de falla en líneas y subestaciones de energía eléctrica. La severidad del nivel de contaminación está directamente asociado tanto con la climatología como con el tipo de contaminante de la región. Existen diferentes clasificaciones del nivel de contaminación (IEC, Norma 815, 1986). Para efectos del presente trabajo, se definirá la contaminación con base en su origen y composición química.

De acuerdo a su origen, la contaminación se clasifica en:

### Contaminación Rural

La contaminación rural, asociada fundamentalmente con la rama agropecuaria, presenta niveles bajos de contaminación. Es causada por la acción de las diversas variables meteorológicas (Viento, temperaturas de bulbo seco y húmedo, presión barométrica, etc.), sobre el relieve y suelo del lugar. Los efectos de depositación y remoción del contaminante en el aislador son generados por la acción del viento y la lluvia respectivamente. La intensidad de estas interacciones, depende principalmente de las variaciones de temperatura y humedad en el sitio, las cuales a su vez, están determinadas por la localización y altura de la región, así como por los cambios introducidos por la variación estacional. El tipo de contaminante que predomina es la calcita, aunque esto puede variar dependiendo de la región que se trate (Ramos et al, 1990).

### Contaminación Industrial

Es producida por la emisión de desechos industriales a la atmósfera, principalmente a través de sus chimeneas. Depende directamente de la actividad económica del lugar. Este tipo de contaminación puede ser controlado. Su nivel así como el tipo de contaminante que predomina varía dependiendo de la cercanía del foco de emisión y de la industria que la produce. Algunos desechos se adhieren fuertemente a la superficie del aislador, ocasionando su deterioro y una mayor captación de contaminante en períodos largos de tiempo. En algunos casos puede alcanzar niveles altos en períodos cortos de tiempo.

### Contaminación Marina

Es generada por la brisa marina, la cual generalmente tiene una dirección de mar a tierra por lo que contiene un alto contenido de sal con un grado de humedad elevado. Los aisladores localizados en un área de contaminación salina están expuestos a condiciones severas de contaminación. Este tipo de contaminación es muy inestable y depende en gran medida de las condiciones meteorológicas predominantes, ya que en un año pueden alcanzarse tanto el nivel mínimo como el máximo de contaminación. Las regiones afectadas por contaminación salina son las costas, aunque se han reportado regiones apartadas a la costa (meseta de la costa oeste de USA) con este tipo de contaminación.

Con base en su composición química, la contaminación se clasifica en:

### Materia Soluble

Está formada por partículas sólidas de elementos químicos cuyo índice de disolución en agua es alto. Desde el punto de vista eléctrico, la materia soluble

(llamada comúnmente sal), es la que permite la conducción eléctrica de fase a tierra a través de la superficie del aislador.

### Materia Insoluble

Está formada por partículas sólidas de elementos químicos cuyo índice de disolución en agua es bajo. Generalmente, la materia insoluble no contribuye en la conductividad eléctrica, pero si influye en el voltaje de flameo debido a su capacidad para retener agua. Un ejemplo de material insoluble es el caolín, material utilizado en laboratorio para contaminar artificialmente un aislador (Norma IEC 507, 1991).

## **2.2. EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN EN AISLAMIENTOS EXTERNOS**

Los aisladores sintéticos y vidriados<sup>1</sup> instalados en campo sufren una degradación constante debido a la acción del medio ambiente. La rapidez de este efecto aun no ha sido cuantificado ya que varía dependiendo del tipo y material del aislador, así como de la climatología de la región. Los efectos tales como la corrosión o la erosión, pueden ser catalizados por el tipo y nivel de contaminación del lugar.

---

<sup>1</sup> Los primeros aisladores fueron fabricados con porcelana y vidrio. En la década de los 40 se inició la búsqueda de diversos materiales para su utilización en la fabricación del aislamiento. En el siguiente subcapítulo se describe las características de los nuevos materiales.

La contaminación degrada mecánicamente el aislamiento y afecta algunas de sus características eléctricas, como el voltaje de flameo<sup>2</sup>. Este voltaje se define como la tensión de voltaje requerida para romper la rigidez dieléctrica de un material a través del aire en contacto con su superficie. El voltaje de flameo de un aislador contaminado es menor que el de un aislador limpio bajo las mismas condiciones climatológicas. Esto incrementa el riesgo de flameo aun cuando ambos se encuentren energizados al mismo voltaje nominal de operación.

A continuación se describe el proceso de ruptura mecánica del aislador por el efecto de la contaminación. De no indicarse lo contrario, esta descripción es válida tanto para los aisladores sintéticos como para los vidriados.

- Diversos elementos químicos (sales, calcita, sílice, etc.) se depositan sobre la superficie inferior y superior del aislador por la acción del viento. En la superficie superior por efecto de la gravedad se depositan partículas de contaminante incluso de un tamaño mayor a 10 micras<sup>3</sup>, las cuales algunas veces son de material insoluble.
  
- Al humedecerse la capa de contaminación por lluvia o por la humedad del ambiente, ésta se vuelve conductora y permite la circulación de corriente eléctrica a través de la capa de

---

<sup>2</sup> El término flameo se utiliza cuando ocurre una descarga disruptiva sobre la superficie de un dieléctrico en un medio líquido o gaseoso.

<sup>3</sup> Las partículas suspendidas en el aire mayores a 10 micras son atraídas al suelo por la acción de la gravedad. Por ello su suspensión en el aire es de pocas horas a partir de su emisión.

contaminación. La corriente genera calor por efecto Joule y por consiguiente provoca evaporación del agua absorbida por la capa contaminante.

- En condiciones reales, la capa de contaminación no es uniforme y el diámetro del aislador no es constante. Por esa razón, la densidad de corriente no es uniforme y se tendrá una mayor densidad de corriente en las zonas de menor espesor de la capa de contaminación y en las zonas de menor diámetro del aislador.
- La evaporación por calor no es uniforme. En las zonas donde la densidad de corriente es mayor, existe una mayor generación de calor y por ende, una mayor evaporación.
- En las zonas de mayor evaporación, se forman zonas secas de alta resistencia eléctrica, las cuales se encuentran rodeadas de zonas conductoras. El voltaje aplicado prácticamente es transferido a los extremos de las zonas secas.
- Debido a la mala distribución de voltaje a lo largo de la superficie aislante, existen gradientes eléctricos altos (2 kvolts por mm) en la superficie del aislador que rompen la rigidez dieléctrica del aire provocando descargas superficiales en los extremos de las zonas secas. A este fenómeno se le conoce como actividad de bandas secas. En aisladores sintéticos la alta

temperatura del arco eléctrico, particularmente en sus raíces, provoca el efecto de pirólisis<sup>4</sup>.

- Dependiendo de la humectación y temperatura del aislador, la duración de la actividad de bandas secas se establece durante períodos de tiempo de horas o segundos. Si las descargas superficiales se logran encadenar, provocarán el flameo completo del aislador. En caso de suceder esto se establece un arco de potencia cuya energía depende de la potencia de corto circuito del sistema y del tiempo en que las protecciones del circuito interrumpen la falla<sup>5</sup>.
- La energía liberada durante el arco de potencia puede ser de tal magnitud, que ocasione la falla del aislador ya sea por ruptura mecánica (caída de la línea) o por daño parcial que no permita mantener el aislamiento eléctrico requerido.
- En caso de no llegar a la ruptura mecánica después del arco de potencia, el aislador seguirá trabajando hasta que nuevamente la actividad de bandas secas ocasione otro arco de potencia.

En aisladores sintéticos existen otros fenómenos involucrados a partir de la formación de bandas secas y el establecimiento del efecto de pirólisis. La

---

<sup>4</sup> Descomposición del material por efecto de la energía calorífica transferida.

<sup>5</sup> En la subestación Playa Norte de Veracruz se presume que existe una corriente de corto circuito mayor a 11 mil amperes.

descripción detallada de los mecanismos de falla en aisladores sintéticos por diversas fuentes se encuentra en González de la Vega y Fierro, (1987). El mecanismo de falla por contaminación en aisladores sintéticos se describe a continuación.

- Cuando el efecto de pirólisis se ha hecho presente, si la energía del arco es baja, o se limita el acceso de oxígeno de la atmósfera (depósitos de sarro, cemento, etc.), el material se carboniza dejando un rastro conductor sobre la superficie aislante. Este fenómeno se conoce como "tracking" (camino conductor carbonizado aun en condiciones secas).
- Cuando existe suficiente energía en el arco y oxígeno en el ambiente, el material se volatiliza y provoca erosión en la superficie del aislador. El resultado de tener una superficie erosionada, no ocasiona por si misma una falla del aislador. Sin embargo produce un acabado áspero que puede aumentar la captación del contaminante y modificar las propiedades hidrofóbicas de la superficie, favoreciendo con esto a una mayor actividad de bandas secas.
- El ciclo "bandas secas", "pirólisis", "tracking-erosión", "bandas secas", puede cerrarse varias veces hasta lograr que las descargas superficiales se encadenen y provoquen un arco de potencia con los efectos descritos anteriormente.

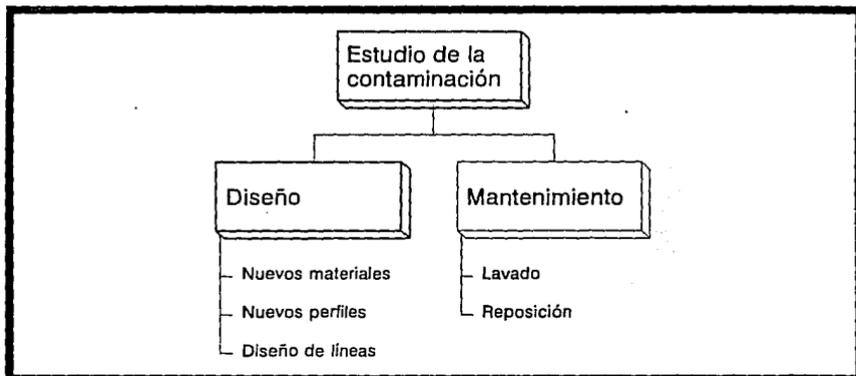
### 2.3. ESTUDIOS REALIZADOS

A partir de la segunda mitad de este siglo, la demanda de energía eléctrica ha crecido más rápidamente que la generación de ésta. Para poder satisfacer la demanda del usuario, además de mejorar la eficiencia de las instalaciones eléctricas, fue necesario incrementar el voltaje nominal tanto en transmisión como en distribución y reducir las fallas en el aislamiento externo de líneas y subestaciones. Esto motivó la apertura de diferentes líneas de investigación tales como la búsqueda de nuevos materiales, recubrimientos (Cherney, 1991), o nuevos perfiles del aislamiento (Morita, 1982), (Matsuoka et al, 1991). Las primeras investigaciones definieron a la contaminación como una de las mas frecuentes causas de falla en aislamientos externos (NGK, 1968). Actualmente, la contaminación es la principal causa de falla en la mayoría de los países.

Se formularon dos posibles soluciones al problema de contaminación: tomar en cuenta el nivel de contaminación para el diseño de la línea y selección del tipo y material de aislador; elaborar planes de mantenimiento mas eficientes (fig. 2.1).

Inicialmente, el vidrio y la porcelana eran los materiales mas utilizados para la fabricación de aisladores. A la mitad de la década de los sesentas, formalmente en Alemania se instalaron aisladores sintéticos (conocidos como no cerámicos, de plástico o poliméricos). Este material presenta varias ventajas sobre los aisladores cerámicos (porcelana o vidrio) tales como:

- mayor resistencia al vandalismo



**Fig. 2.1 Líneas de investigación**

- son livianos y de bajo costo
- el material es mas maleable
- presentan buen desempeño ante contaminación

Las desventajas de este material radican en que su envejecimiento afecta directamente la vida del aislador, y que no ha sido utilizado en forma general. Por ello, sus especificaciones y criterios de selección no están bien definidos. Los aisladores sintéticos son utilizados generalmente en líneas de distribución (líneas de bajo voltaje < 34 kvolts ).

Paralelamente con los aisladores sintéticos, y debido a la gran cantidad de aisladores cerámicos instalados, surgieron las grasas y posteriormente los recubrimientos sintéticos. Estos recubrimientos se aplican sobre la superficie del aislador cerámico dándole las propiedades hidrofóbicas que tendrfa un aislador sintético.

Durante la década de los ochenta, en México se llevó a cabo un proyecto de investigación conjunta realizado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) (Ramos et al, 1990). El objetivo de este proyecto fue el desarrollar una metodología para optimizar el diseño de aislamientos externos expuestos en ambientes contaminados. El resultado de esta investigación complementó y modificó investigaciones realizadas en otras instituciones y/o laboratorios internacionales.

Uno de los logros principales de este proyecto, fue el identificar las ventajas y desventajas de los métodos utilizados. Estos métodos fueron: la medición de la densidad equivalente de sal depositada (DESD) como método de evaluación en campo y la técnica de niebla limpia en laboratorio. Adicionalmente, se realizaron mediciones con los métodos de colectores de polvo y corrientes de fuga. La descripción de estos y otros métodos se hará en el siguiente subcapítulo.

Actualmente en el IIE se realizan investigaciones para evaluar algunos recubrimientos hidrofóbicos, nuevos perfiles y materiales sintéticos<sup>6</sup>. Paralelamente al modelo de predicción, se está desarrollando un modelo matemático del fenómeno de flameo que permita evaluar mediante simulación el diseño de nuevos perfiles para aisladores cerámicos. Adicionalmente, se trabaja en la caracterización de la contaminación de la línea Monterrey Frontera para reproducir el tipo de contaminante en laboratorio y así resolver los problemas de esta línea en particular.

---

<sup>6</sup> En el IIE se desarrollo un aislador de arena de sílice con un porcentaje de materia orgánica (concreto polimérico) con excelentes resultados. Este aislador fue comercializado por CONDUMEX. El material se ha utilizado para desarrollar otras piezas de material aislante.

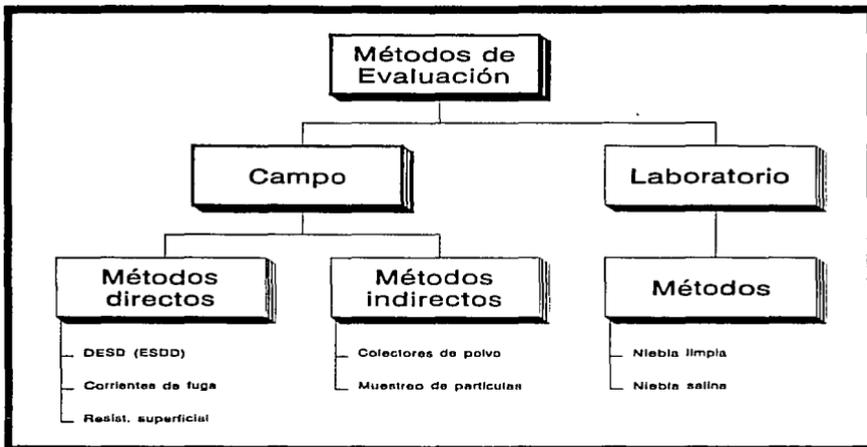
## **2.4. MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL NIVEL DE CONTAMINACIÓN**

Para el estudio del efecto de la contaminación en aislamientos externos, además de las pruebas de contaminación artificial en laboratorio (IEC, Norma 507, 1991), se han desarrollado diferentes métodos de medición para determinar el nivel de contaminación en campo (Lambeth and Stalewski, 1973a). Estos se clasifican en directos e indirectos (fig 2.2).

### **2.4.1. Métodos directos**

Los métodos directos utilizan el aislador como elemento de captación del contaminante. El nivel de contaminación es medido directamente sobre la superficie del aislador. La ventaja de estos métodos es la confiabilidad de sus resultados, ya que muestran el estado real del aislamiento.

Dentro de los métodos directos, los mas utilizados son: la determinación de la "Densidad Equivalente de Sal Depositada", (DESD)(IEEE, Working group, Trans 1979), la medición de corrientes de fuga, (IEC, Norma 507,1991), y la medición de la resistencia superficial, (Norma ASTM D 257-90). A continuación se describen cada uno de ellos.



**Fig. 2.2 Métodos de medición del nivel de contaminación**

Densidad Equivalente de Sal Depositada (DESD)

Esta técnica consiste en retirar el contaminante depositado en un aislador de manera natural (campo) o artificial (laboratorio), mediante un lavado de cada superficie (superior e inferior) del aislador con agua destilada y una espátula o brocha. A la muestra obtenida, se le mide su temperatura, volumen y conductividad. Esta última se normaliza a 18°C. Utilizando las gráficas de correlación y concentración-conductividad, se determina la cantidad de cloruro de sodio necesaria para obtener una solución con el mismo volumen y conductividad que la muestra obtenida. Dividiendo la cantidad de sal (en miligramos) entre la superficie del aislador (en centímetros cuadrados), se obtiene la densidad equivalente de miligramos de cloruro de sodio en un centímetro cuadrado de superficie. En lo sucesivo, a este nivel se le denominará como el DESD o nivel

de DESD y a este método como el "Método de DESD". En la tabla (2.1) se muestra la clasificación del nivel de contaminación utilizando este método.

**Tabla 2.1 Niveles de contaminación en base al método DESD**

Nivel de contaminación	DESD (mg/cm <sup>2</sup> )
Muy ligera	menor que 0.03
Ligera	0.03 - 0.06
Media	0.06 - 0.12
Alta	0.12 - 0.24
Muy alta	0.24 - 0.48
Excepcional	mayor que 0.48

Las ventajas de este método son:

- Facilidad de implementación, ya que requiere de muy poca instrumentación.
- Existencia de una gran cantidad de información, debido a que es una técnica que ha sido muy estudiada.
- Es considerado como el método más razonable y práctico para definir el grado de contaminación.

Las desventajas son:

- Para determinar el nivel de DESD de una región en particular se requiere de un período de muestreo mínimo de un año.
- El proceso para retirar el contaminante del aislador es laborioso, lento y puede estar sujeto a errores, ya que algunos elementos se adhieren fuertemente en el material aislante. Además, se requiere al menos un muestreo por superficie.
- Este método fue desarrollado para contaminación marina, por lo que no se obtienen los mismos resultados en la medición de otros tipos de contaminación donde el nivel de insolubles es elevado.
- Si se desea medir el cambio gradual de las sustancias contaminantes acumuladas por un largo período de tiempo, es necesario instalar al menos un aislador por cada período de muestreo, ya que el muestreo es destructivo.
- El método de DESD sólo determina el nivel de contaminación del aislador. El voltaje de flameo es determinado en laboratorio por el método de niebla limpia. La correlación entre el nivel de contaminación y el voltaje de flameo no considera correcciones por altitud ni los factores de humectación en el momento del flameo.
- El análisis estadístico de las mediciones debe ser hecho fuera de línea. Si se desea un monitoreo en tiempo real, se requiere de un

gran número de aisladores incrementándose más aun el elevado costo de este método.

- Este método no es apropiado para evaluar aisladores sintéticos o recubrimientos hidrofóbicos.

### Corrientes de fuga

Este método consiste en energizar un aislador testigo, y medir continua o periódicamente la corriente que pasa a través de su superficie. Existen varias formas de analizar la señal. Algunas de ellas son :

- Contabilizar los picos de diferente amplitud de la corriente de fuga. Con base en la cantidad de picos y amplitud de los mismos, se determina el nivel de contaminación del aislamiento.
- Medir las corrientes de fuga con un equipo suficientemente rápido<sup>7</sup> que defina la actividad del aislador testigo. Las características que se determinan son; el valor máximo en el período de adquisición, la máxima diferencia entre dos adquisiciones y el registro en memoria de los últimos diez valores pico de la corriente exactamente antes de una falla.

---

<sup>7</sup> La corriente de fuga puede tener frecuencias del orden de 100 khz. Estos picos son muy rápidos si se considera que la frecuencia base de la señal es de 60 hz. Aun no se ha determinado la frecuencia de los picos que pueden desencadenar un flameo.

La ventaja de este método es la automatización del mismo. Esto permite realizar mediciones en tiempo real, pudiendo aplicarse a la toma de decisiones para un mantenimiento eficiente.

La desventaja que presenta es que no ha sido ampliamente estudiado como el DESD y aun no se ha determinado un patrón previo al flameo. Aunado a esto, puede presentar interferencias debido a diversos factores tales como; interrupción de la trayectoria a tierra, inserción de un aislador extra, etc.

### Resistencia Superficial

Este método consiste en medir la resistencia del contaminante depositado en el aislador, ya sea retirando el contaminante y midiendo la conductividad del electrólito resultante, o colocando electrodos superficiales para medir dicha conductividad. Los niveles críticos de contaminación se obtienen al reproducir en el laboratorio los valores de conductividad medidos para diferentes niveles de humectación.

Algunas investigaciones reportan diferentes maneras de obtener el nivel de contaminación, de las cuales sobresalen:

- Medir la resistencia superficial del aislador contaminado, energizándolo a voltaje nominal durante tres períodos (50 ms) y memorizando el pico máximo de voltaje medido a través de una resistencia en serie con el aislador testigo. Considerando constante el voltaje nominal del aislador, el voltaje medido es directamente proporcional a la corriente de fuga que pasa por el

aislador, por lo que por ley de ohm se obtiene la resistencia superficial para cada medición (Cortina et al, 1976).

- Por medio de una cámara de niebla humectar un aislador testigo energizado a bajo voltaje y medir la resistencia entre diferentes electrodos colocados en su superficie. De la resistencia superficial calculada se obtiene el nivel de contaminación.

La ventaja de utilizar este sistema es que no se retira el contaminante del aislador, lo que da mayor confiabilidad a los resultados. Además, el aislador se puede monitorear en tiempo real.

Una de sus desventajas es que la repetición en la obtención de valores de resistencia superficial bajo las mismas condiciones es afectada por diversos factores, tales como; temperatura y humedad del ambiente, la variación en la tensión aplicada, deficiencias en el circuito de medición, etc. Aunado a ello, el aislador debe ser humectado a un nivel conocido para poder comparar la resistencia superficial con el nivel de contaminación para un grado de humectación constante.

#### **2.4.2. Métodos indirectos**

Los métodos indirectos caracterizan la zona de acuerdo al tipo y nivel de contaminación sin tomar en cuenta el aislamiento como elemento receptor del contaminante (González y Castro, 1989). Los muestreos se relacionan a través de

experimentación en laboratorio con niveles de contaminación en aisladores. De los métodos utilizados actualmente, los más importantes son: colectores de polvo no direccionales, colectores de polvo tipo direccional, monitores de partículas suspendidas en el aire y colectores de niebla.

Este tipo de métodos presenta una correlación muy pobre con la experimentación en laboratorio, ya que no se cuenta con información sobre el estado real de los aislamientos. Aunado a esto, existe el problema de depositación de basura, agua e insectos en el interior de los colectores de polvo. Dentro del proyecto citado en el subcapítulo anterior, no se encontró una buena correlación entre el método de colectores de polvo y el de DESD.

#### **2.4.3. Métodos de evaluación en laboratorio**

En cuanto a los métodos de evaluación en pruebas de laboratorio, la literatura reporta varias técnicas para realizar la experimentación, (e.g. IEC Norma 507, 1991; Lambeth et al, 1973; Kimoto et al, 1972; Karady et al, 1976). Dentro de estas técnicas, los métodos de medición en cámara de niebla con niebla limpia o salina son los más utilizados. En el método de niebla limpia el aislador es contaminado de manera natural (campo ) o artificial (sumergiendo el aislador en una mezcla de contaminante basado en caolín y sal simulando un cierto nivel de contaminación). Posteriormente, (con el aislador seco), se introduce en la cámara de niebla donde el agua utilizada para generar niebla es agua limpia (agua destilada o con un nivel muy bajo en conductividad). En el método de niebla salina el agua utilizada para generar la niebla es agua con un nivel de conductividad alto.

Aunque el parámetro DESD se utiliza para medir el nivel de contaminación tanto en campo como en laboratorio, subsiste el problema de no poder reproducir el patrón de acumulación del contaminante de campo en el laboratorio.

## **2.5. RESUMEN**

Debido a su orografía y diversidad climas, existen en México diferentes tipos y niveles de contaminación. Para detectar las áreas con mayor problema, se elaboró un mapa de contaminación y una guía para el diseño de líneas y selección del aislamiento.

Sin embargo, para las instalaciones ya existentes, es necesario la elaboración de planes de mantenimiento selectivos que permitan optimizar los recursos utilizados. Se han intentado crear modelos matemáticos con el fin de simular las condiciones de campo en el laboratorio. No obstante, este tipo de modelos no pueden pronosticar el comportamiento bajo condiciones meteorológicas específicas.

La teoría de predicción de sistemas aplicada al proceso de contaminación podría generar el pronóstico de la falla del aislamiento en campo con la suficiente precisión para tomar medidas correctivas.

## 2.6. REFERENCIAS

Cherney, Edward R. Hackam and S.H. Kim, (1991). "Porcelain insulator maintenance with RTV silicone rubber coatings. IEEE Trans. on power Delivery. Vol. 6, No. 3.

Cortina R., E. Dabusti, G. Marrone, (1976). "Experimental research at ENEL on surface insulation in naturally polluted conditions". Conference on "Partial Discharge in Electrical Insulation". Bangalore, India.

NGK, (Nippon Gaishi Kaishi), (1968). "Study of pollution problems". technical note, TN-68069.

González de la Vega Jorge y J. L. Fierro, (1987). "Mecanismos de Falla en Aisladores Sintéticos". Reporte IIE/30/31/1934/1-02/F/87.

González Ramón y M. Castro, (1989). "Métodos indirectos de medición de niveles de contaminación del aislamiento". Ingeniería energética Vol X, No. 2, pp.155-161.

IEC Norma 507, (1991). "Artificial Pollution test on high-voltage insulators to be used on a.c. systems".

IEC Norma 815, (1986). "Gide for the selection of insulators in respect of polluted conditions.

IEEE Working Group on Insulator Contamination, (1979). "Application Guide for Insulators in Contaminated Environment". IEEE Trans. Electrical Insulation, Vol pas\_9, No.5, pp.1676-1695.

Karady G., K. Naito, H.M. Schneider, (1976). "The Clean Fog Test Used for Contaminated Insulators in North America and Japan". CIGRE SC33-76 (WG 04) 8 IWD.

Kimoto I., T. Fujimura, K. Naito, (1972). "Performance of heavy Duty Disc Insulators under Polluted Condition". IEEE Trans. Electrical Insulation, Vol. 91, No. 1, pp. 311-316.

Lambeth P.J. and A. Stalewski, (1973a). "Review of methods of measuring site pollution severity from the point of view of insulator flashover. IEE Conference publication No. 94,(Part I), pp. 132-138.

Lambeth P.J., J.S.T. Looms, M. Sforzini, R. Cortina, Y. Porcheron and P. Claverie (1973b). "The Salt Fog Test and Its Use in Insulator Selection for Polluted Localities". IEEE Trans. Vol. PAS-92, No. 6, pp. 1876-1887, 1973.

Matsuoka, R., S. Ito, K. Sakanishi and K. Naito, (1991). "Flashover on contaminated insulators with different diameters". IEEE Trans. Electrical Insulation, Vol. 26, No. 6, pp. 34-40.

Morita Kenji, (1982). "Anti-contamination design of insulators". EPSI 3-11.

Norma ASTM D257-90, (1990). "Standard Test Methods for D-C Resistance or Conductance of Insulating Materials".

Ramos Gaudencio, R. Diaz, P. Velázquez, T. Campillo, (1990). "Guía y Procedimientos de diseño para aislamientos externos de líneas y subestaciones eléctricas expuestas en ambientes contaminados". Reporte proyecto final IIE-2013/CFE-862008.

# **CAPÍTULO III**

## **PREDICCIÓN DE SISTEMAS DINÁMICOS**

### 3.1. INTRODUCCIÓN

La identificación de sistemas es un método experimental para la construcción del modelo de un proceso. El modelado de sistemas lineales está basado en la selección de los coeficientes de los polinomios que forman la función de transferencia del sistema. En algunos casos, la obtención de estos coeficientes es con base en leyes físicas o químicas conocidas. Sin embargo, en los casos donde se desconocen las leyes que rigen el comportamiento del sistema. Los parámetros pueden ser estimados observando el comportamiento de las entradas y/o salidas del sistema bajo condiciones experimentales apropiadas. A este procedimiento se le conoce como *Estimación de Parámetros*.

La idea esencial para la estimación de parámetros es comparar la respuesta  $Y$  de un sistema observado con la salida  $\hat{Y}$  de un modelo parametrizado, a partir de un modelo propuesto (fig. 3.1).

Para que el error  $e = Y - \hat{Y}$  de esta comparación sea mínimo, es importante definir las variables de entrada y salida involucradas, la estructura del modelo paramétrico y el criterio de comparación y convergencia.

#### Planeación de la Experimentación

Todo experimento tiene un objeto de investigación, por ello, su planeación está basada en la formulación de una hipótesis sobre el resultado del mismo. Después de establecer cual es el objetivo del experimento, se fijan las condiciones para su realización y se eligen las variables más significativas del fenómeno en observación. Algunas veces estas variables no son físicamente medibles, o su costo

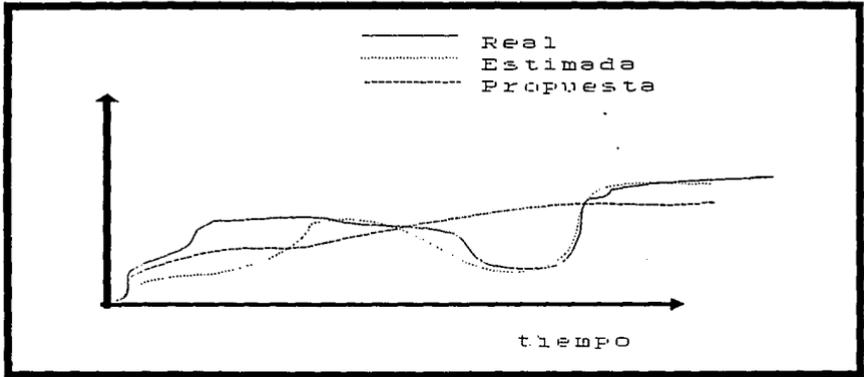


Fig. 3.1 Estimación de parámetros.

de operación es elevado. Ante estos casos, es recomendable buscar variables adicionales que si bien no reflejan completamente el comportamiento de la primera, si nos dan una idea en buena medida de su desempeño.

### ESTRUCTURA DEL MODELO

Generalmente, la estructura del modelo es derivada de un conocimiento "A Priori" del sistema. En algunos casos, la única definición del sistema con que se cuenta es que este es lineal en un rango determinado. Para un sistema lineal, la estructura del modelo está determinada por el orden del polinomio del numerador y/o del denominador de la función de transferencia.

Sea  $\{e[k], k = \dots -1, 0, 1, \dots\}$  una señal de ruido blanco. Para procesos estocásticos es posible generar varias estructuras.

El proceso generado por

$$Y[k] = A_1 Y[k-1] + A_2 Y[k-2] + \dots + A_n Y[k-n] \quad (3.1)$$

es conocido como AR (Auto regresivo). La salida depende de las salidas pasadas. También es conocido como "Todo polo". El proceso generado por

$$(3.2) \quad Y[k] = C_0 e[k] + C_1 e[k-1] + C_2 e[k-2] + \dots + C_s e[k-s]$$

es conocido como MA (Promedio Móvil). También es conocido como "Todo cero". El proceso generado por

$$Y[k] + A_1 Y[k-1] + \dots + A_n Y[k-n] = C_0 e[k] + C_1 e[k-1] + \dots + C_s e[k-s] \quad (3.3)$$

es conocido como ARMA. También es conocido como "Polo-cero". Si se utiliza una señal de control el proceso generado es

$$Y[k] + A_1 Y[k-1] + \dots + A_{n_0} Y[k-n_0] = B_0 U[k] + B_1 U[k-1] + \dots + B_m U[k-m] + e[k] + C_1 e[k-1] + \dots + C_s e[k-s] \quad (3.4)$$

el cual se conoce como una estructura ARMAX.

## CRITERIO DE COMPARACIÓN Y CONVERGENCIA

Cuando se ha formulado un problema de identificación, es necesario determinar un criterio para evaluar que tan bueno es el modelo. Este criterio puede ser postulado por asunciones estadísticas o argumentos probabilísticos. Para sistemas discretos, este criterio puede ser establecido como

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^N g(e(k)) \quad (3.5)$$

donde  $e$  puede ser el error de entrada, el error de salida, o algún error generalizado,  $N$  es el número de datos. El error de predicción es un típico error generalizado. La función  $g$  es generalmente cuadrática.

El principio de mínimos cuadrados es un criterio muy utilizado ya que tiene una rápida convergencia del valor estimado al valor real. Su descripción se detallará mas adelante.

### 3.3. ALGORITMOS DE ESTIMACIÓN

Antes de hacer estimación, es necesario expresar los parámetros en forma lineal de señales conocidas, este proceso se llama parametrización. El modelo (3.3) puede ser reparametrizado como:

$$Y[k] = \phi^T[k] \theta. \quad (3.6)$$

donde  $Y[k] \in \mathbb{R}$  son las salidas medibles y/o generadas,  $\phi[k] \in \mathbb{R}^r$  es el regresor que contiene los valores pasados de señales medibles y/o generadas,  $\theta_0 \in \mathbb{R}^r$  es el vector de parámetros a identificar y  $r$  es el número de parámetros.

Los algoritmos de estimación pueden ser formulados fuera de línea o en línea. Estos se describen a continuación.

### Algoritmos Fuera de Línea

Los algoritmos fuera de línea requieren un bloque completo de datos antes del análisis, por lo que no existen restricciones de tiempo para hacerlo. El algoritmo fuera de línea tiene la forma

$$\hat{\theta} = F(\phi, y) \quad (3.7)$$

donde  $\hat{\theta}$  denota el estimado de  $\theta_0$ .

### Algoritmos En Línea

Estos algoritmos requieren datos secuenciales. La estimación paramétrica es secuencialmente actualizada con la restricción del período de muestreo. Esto hace que en muchos casos se utilice un algoritmo de estimación más sencillo, o una computadora más rápida. Una clase particular de los algoritmos en línea que es particularmente atractiva, es cuando la estimación paramétrica actual  $\hat{\theta}[k]$  es calculada en términos de los parámetros estimados  $\hat{\theta}[k-1]$  de la siguiente forma

$$\hat{\theta}[k] = F(\hat{\theta}[k-1], \phi[k], k) \quad (3.8)$$

Para la parametrización lineal (3.6), una forma muy utilizada en la práctica es

$$\hat{\theta}[k] = \hat{\theta}[k-1] + M[k-1] \phi[k-1] \bar{e}[k] \quad (3.9)$$

donde

$\hat{\theta}[k]$  parámetros estimados en el tiempo  $k$   
 $M[k-1]$  algoritmo de ganancia  
 $\phi[k-1]$  vector de regresión  
 $e[k]$  error de estimación

### 3.4. PRINCIPIO DE MÍNIMOS CUADRADOS (fuera de línea)

Asumiendo que todas las mediciones tienen el mismo grado de precisión, en un sistema discreto el principio de mínimos cuadrados establece que si la salida de un sistema LIT es dada por (3.6) de la forma

$$Y = \varphi_1[k] \theta^*_1 + \varphi_2[k] \theta^*_2 + \dots + \varphi_N[k] \theta^*_N \quad (3.10)$$

y la función de costo (3.5) es

$$J(\hat{\theta}) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{k=N} e^2[k] \quad (3.11)$$

donde

$$e[k] = Y[k] - \hat{Y}[k]$$

$$\hat{Y}[k] = \varphi^T[k] \hat{\theta}[k]$$

y si ésta es mínima, entonces los parámetros seleccionados son los óptimos. En forma compacta, la función de costo puede ser establecida como

$$J(\theta) = \frac{1}{2} \epsilon^T \epsilon = \frac{1}{2} \|\epsilon\|_2^2 \quad (3.12)$$

donde  $\epsilon = (\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_{N-1}, \epsilon_N)^T$ .

Como  $J(\hat{\theta})$  es una función convexa, tiene un mínimo global, el cual se puede obtener utilizando el principio de la primera y segunda derivada. Tomando la derivada parcial respecto a  $\hat{\theta}$  e igualando a cero. De (3.11) se tiene

$$\begin{aligned} J(\theta) &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{k=N} ( Y^T[k] Y[k] - \theta^T[k] \phi[k] Y[k] - \\ &\quad - Y^T[k] \phi^T[k] \theta[k] + \theta^T[k] \phi[k] \phi^T[k] \theta[k] ) \\ \frac{\partial J(\theta)}{\partial \theta} &= \sum_{k=1}^{k=N} ( - \phi[k] Y[k] + \phi[k] \phi^T[k] \hat{\theta}[k] ) = 0 \\ \sum_{k=1}^{k=N} \phi[k] Y[k] &= \sum_{k=1}^{k=N} \phi[k] \phi^T[k] \hat{\theta}[k] \\ \hat{\theta}[k] &= ( \sum_{k=1}^{k=N} \phi[k] \phi^T[k] )^{-1} \sum_{k=1}^{k=N} \phi[k] Y[k] \quad (3.13) \end{aligned}$$

La segunda derivada debe ser mayor que cero

$$\frac{\partial^2 J(\theta)}{\partial \theta} = \sum_{k=1}^{k=N} \phi \phi^T > 0 \quad (3.14)$$

Esto implica que (3.14) debe ser no singular, es decir se requiere que el regresor  $\phi$  sea permanentemente existente.

### 3.4.1. Algoritmo de Mínimos cuadrados recursivo (M.C.R.)

De acuerdo a (3.9), el algoritmo de mínimos cuadrados recursivo es

$$\begin{aligned}\hat{\theta}[k] &= \hat{\theta}[k-1] + M[k-1] [ y[k] - \phi[k-1]^T \hat{\theta}[k-1] ] \\ M[k-1] &= \frac{P[k-2] \phi[k-1]}{1 + \phi[k-1]^T P[k-2] \phi[k-1]} \\ P[k-1] &= P[k-2] - M[k-1] \phi[k-1]^T P[k-2]\end{aligned}\tag{3.15}$$

El análisis de estabilidad y convergencia de este algoritmo puede encontrarse en Goodwin and Sin, (1984).

Cualquier algoritmo recursivo requiere algún valor inicial para su primera iteración. Para el algoritmo (3.15) se requiere la matriz inicial  $P(0)$  y el vector  $\theta(0)$ . Una alternativa muy utilizada es tomar las condiciones iniciales  $P(0) = \alpha I$  y  $\theta(0) = 0$  (Gopal, 1988). Donde  $\alpha$  es una constante positiva.

Existen diferentes versiones del algoritmo de M.C.R., estos pueden aplicarse especialmente si el sistema es variante en el tiempo. Algunas de estas variantes son:

### Algoritmo de M.C.R. con ponderación selectiva de los datos

El algoritmo (3.15) parte del principio que todos los errores de estimación son igualmente importantes. Esto no es necesariamente cierto, es por ello que en este algoritmo se modifica el peso que tiene el error de determinados puntos de la señal.

### Algoritmo de M.C.R. con ponderación exponencial de los datos (factor de olvido)

Este algoritmo es una modificación del anterior. La diferencia estriba en que el peso de los datos disminuye de forma exponencial en el tiempo, es decir los datos más viejos tienen menos peso que los más recientes. La función de costo (3.11) tendrá la forma

$$J(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{k=N} \lambda^{N-k} e^2[k] \quad 0 < \lambda \leq 1 \quad (3.16)$$

### Algoritmo de M.C.R. con reinicio de la matriz de covarianza

En la práctica, el algoritmo de M.C.R. tiene al inicio una convergencia muy rápida, sin embargo, ésta se ve drásticamente reducida después de varias iteraciones. Si la matriz  $\mathbf{P}$  se reinicia, el algoritmo se revitalizará y lo ayudará a mantener una razón de convergencia rápida. Esto es particularmente útil cuando el sistema es variante en el tiempo.

### Algoritmo de M.C.R. con modificación de la matriz de covarianza

Una variante del reinicio de la matriz  $\mathbf{P}$  es propuesta por Vogel and Edgar, (1982). Ellos sugieren utilizar el algoritmo de M.C.R. ordinario y solo agregar un nuevo término a la matriz  $\mathbf{P}$  cuando se detecte un cambio en los parámetros.

### 3.5. **PREDICCIÓN ADAPTIVA** (Goodwin and Sin, 1984)

El pronóstico del comportamiento de un sistema está en función de la predicción de las salidas del mismo. Se puede obtener la predicción a través de la extrapolación de las salidas como series de tiempo en el futuro o utilizando cualquiera de las estructuras anteriormente señaladas.

La predicción adaptiva, se basa en la utilización de los datos actuales para ajustar los parámetros de tal forma que las predicciones sean cada vez más cercanas al valor observado. Posteriormente, los parámetros calculados son utilizados para generar futuras predicciones.

Si el sistema es determinístico, la predicción adaptiva puede verse como un caso especial de la estimación de parámetros, donde el modelo de estimación es visto como el predictor.

Para hacer que el error de predicción sea mínimo, nuevamente resaltan algunas cuestiones a resolver:

- Bajo que criterio deben ser ajustados los parámetros.
- Que orden debe ser utilizado.
- Cuánto tiempo se puede predecir en el futuro.
- Se deben estimar los parámetros en el predictor directamente, o debe ser a través de la estimación de un modelo del sistema y posteriormente obtener el predictor correspondiente por manipulación algebraica.

### 3.5.1. Formas de aproximación al predictor óptimo

La solución del problema de la predicción adaptativa puede resolverse a través de una aproximación directa o indirecta. En la aproximación directa los parámetros del predictor óptimo son estimados directamente, por lo cual no es necesario realizar cálculos adicionales para determinar el predictor del modelo estimado. Otra ventaja de esta aproximación radica en el hecho de que el criterio de convergencia para la estimación de parámetros es expresado en términos de la variación del error de predicción.

Si se realiza una aproximación indirecta, es posible realizar la estimación paramétrica de un modelo arbitrario del sistema y posteriormente convertir este modelo en la forma del predictor requerido. Esta aproximación tiene la ventaja de que puede generar una serie de predictores a partir de un solo modelo, además involucra el cálculo de pocos parámetros.

### 3.5.2. Definición del orden y retardo del modelo

La determinación del orden óptimo es más arte que ciencia, ya que no existe ninguna técnica que nos permita *a priori* evaluar que tan buena es la estimación con un orden dado. Aun cuando el criterio de mínimos cuadrados nos permite determinar un valor cuantitativo del error de estimación a través de la norma  $\|\cdot\|_2$ , esto no es suficiente, ya que este valor por si mismo no indica si la

estimación es aceptable, y únicamente nos dirá que tan buena es una estimación con respecto a otra.

Existen algunos métodos para seleccionar el orden de procesos autorregresivos, por ejemplo el criterio de error de predicción final (FPE) (Akaike, 1970) y el criterio de información (AIC) (Akaike, 1972). Sin embargo, estos criterios fueron propuestos para procesos estocásticos y son definidos en función de la máxima entropía. Young et al, (1980), sugiere una técnica de correlación múltiple para evaluar la eficiencia del modelo con un determinado orden, a través del índice de desempeño (IDD) dado por

$$IDD = 1 - \frac{\|e\|_2}{\|Y\|_2}$$

$$IDD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (3.17)$$

donde  $\epsilon_i$  es el error de estimación,  $y_i$  los valores de la salida y  $n$  el número de datos. Si el modelo se encuentra sobre parametrizado, entonces los coeficientes del modelo no serán únicos, y su presencia puede ser detectada por una variación grande del error en la estimación de parámetros (ver Young et al, 1980).

El retardo del modelo no puede ser mayor que el retardo del sistema real, es por ello que el orden de la predicción está limitado por el retardo del sistema. Dicho de otra forma, si el modelo tiene la estructura

$$A(Z^{-1})Y[k] = Z^{-d}B(Z^{-1})U[k] \quad (3.18)$$

donde  $d$  es el retardo de la planta, entonces la máxima predicción será  $y[k+d]$ , la cual estará dada por

$$\hat{y}[k+d] = \phi[k]^T \hat{\theta}[k] \quad (3.19)$$

### 3.6. MODELOS DE PREDICCIÓN ADAPTIVA DIRECTA

Como se mencionó anteriormente, es posible construir un predictor con base en un algoritmo de estimación como lo es (3.6). Si se considera que la salida estimada es una función lineal de los parámetros  $\hat{\theta}$ , entonces la salida del predictor es de la forma

$$\hat{y}[k+d, \hat{\theta}] = \phi[k]^T \hat{\theta}[k] \quad (3.20)$$

donde  $\phi(k)$  es un regresor con las salidas y/o entradas del sistema hasta el tiempo  $k$ . De acuerdo a (3.15), el algoritmo de mínimos cuadrados recursivo para un predictor con  $d$  pasos adelante es

$$\hat{\theta}[k] = \hat{\theta}[k-1] + M[k-d] [ y[k] - \phi[k-d]^T \hat{\theta}[k-1] ]$$

$$M[k-d] = \frac{P[k-d-1] \phi[k-d]}{1 + \phi[k-d]^T P[k-d-1] \phi[k-d]} \quad (3.21)$$

$$P[k-d] = P[k-d-1] - M[k-d] \phi[k-d]^T P[k-d-1]$$

La predicción de la salida es dada por

$$\hat{y}[k+d] = \phi[k]^T \hat{\theta}[k] \quad (3.22)$$

con :

$$\phi[k] = \begin{bmatrix} y[k], \dots, y[k - n_y], \\ u_1[k], \dots, u_1[k - n_1], \\ \vdots \\ u_m[k], \dots, u_m[k - n_m] \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

donde  $m$  es el número de entradas,  $n_1, n_2, \dots, n_{m-1}, n_m$  son los órdenes para las  $m$  entradas. Nuevamente, todas las modificaciones descritas para (3.15), pueden aplicarse a (3.21).

### 3.6.1. Algoritmo de mínimos cuadrados extendido

Este algoritmo fue introducido por Panuska, (1968, 1969) para sistemas estocásticos utilizando una estructura ARMAX ( ec 3.4). La predicción adaptativa es dada por

$$\hat{y}[k] = \phi[k-d]^T \hat{\theta}[k-d] \quad (3.24)$$

donde  $\hat{\theta}[k-d]$  es secuencialmente calculada por

$$\hat{\theta}[k] = \hat{\theta}[k-1] + \frac{P[k-d-1] \phi[k-d] \epsilon[k]}{1 + \phi[k-d]^T P[k-d-1] \phi[k-d]} \quad (3.25)$$

con

$$\epsilon[k] = y[k] - \phi[k-d]^T \hat{\theta}[k-1] \quad (3.26)$$

$$\phi[k-d] = \begin{bmatrix} y[k-d], \dots, y[k-d-n_y], \\ u_1[k-d], \dots, u_1[k-d-n_1], \\ \vdots \\ u_m[k-d], \dots, u_m[k-d-n_m], \\ \epsilon[k-d], \dots, \epsilon[k-d-n_e] \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

### 3.7. PREDICCIÓN VERTICAL

Los algoritmos descritos anteriormente, requieren que las mediciones de sus entradas y/o salidas sean tomadas secuencialmente, es decir, los datos contenidos en el vector  $\phi$  son mediciones consecutivas. A ésta forma de estimación se le definirá como estimación horizontal.

Para el caso MISO, si alguna de las entradas es periódica, es posible realizar una estimación de la misma en función de sus valores en ciclos pasados. A esta forma de estimación se le definirá como estimación o proyección vertical. Sea  $H$  el período de la señal de salida, si la señal es muestreada con un período  $T$ , entonces  $H$  puede ser representado por

$$H = hT.$$

donde  $h$  es el número de muestreos en un ciclo de la señal de salida. Utilizando la estructura AR el modelo tendrá la forma

$$Y[k] = A_1 Y[k-h] + A_2 Y[k-2h] + \dots + A_n Y[k-nh] \quad (3.28)$$

La estimación vertical permite predecir un ciclo completo de la salida al estar en función de los valores de los ciclos pasados, es claro que en este tipo de estimación tanto el período de muestreo como el retardo de la planta no implican ninguna restricción. La desventaja de esta forma de estimación radica en que si existen algunas entradas no periódicas, el efecto de estas sobre la salida no es contemplado.

Las dos formas de estimación (vertical y horizontal), pueden ser combinadas para tomar las ventajas de cada una de ellas y así mejorar el predictor resultante. Utilizando una estructura ARMA, la estructura del modelo tendría la forma

$$A Y[k] + C Y[k] = B U[k] + D U[k] \quad (3.29)$$

Los polinomios A y B reflejan el comportamiento del sistema debido a la estimación horizontal, mientras que los polinomios C y D son debido a la proyección vertical. La descripción de cada uno de estos polinomios es la siguiente

$$\begin{aligned} A &= 1 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2} + \dots + a_n Z^{-n} \\ C &= c_1 Z^{-H} + c_2 Z^{-2H} + \dots + c_s Z^{-sH} \\ B &= b_0 + b_1 Z^{-1} + b_2 Z^{-2} + \dots + b_m Z^{-m} \\ D &= d_1 Z^{-H} + d_2 Z^{-2H} + \dots + d_p Z^{-pH} \end{aligned}$$

donde n y m son los órdenes de los polinomios A y B. Este orden no debe ser mayor a h. El orden de la proyección vertical está dado por s y p para C y D respectivamente.

Para la estimación de este modelo es posible utilizar cualquiera de los algoritmos descritos anteriormente. Su parametrización se verá en el siguiente capítulo cuando se hable sobre la aplicación de la teoría de estimación de parámetros al proceso de contaminación.

### 3.8. REFERENCIAS

Akaike, H. (1970). "Statistical predictor identification". Ann. Inst. Statist. Math. 22, 203-217.

Akaike, H. (1972). "Use of an information theoretical quantity for statistical model identification". Proc. Fifth Int. Conf. on Systems Science. pp. 249-250.

Åström Karl and B. Wittenmark, (1990). Computer Controlled Systems, segunda edición de Prentice Hall.

Goodwin C. Graham and Kwai Sang Sin, (1984). "Adaptive Filtering Prediction and Control". Prentice Hall.

Gopal M., (1988). Digital Control Engineering". John Wiley & Sons.

Panuska, V. (1968). "A stochastic approximation method for identification of linear systems using adaptive filtering". Joint Autom. Control Conf., University of Michigan.

Panuska, V. (1969). "An adaptive recursive least square identification algorithm", Proc. IEEE Symp. Adapt. Process. Decis. Control.

Vogel E.G. and T. F. Edgar, (1982). "Application of an adaptive pole-zero placement controller to chemical processes with variable dead time". AMCA, Washington, DC.

Wellstead P. E., (1979). "Introduction to Physical System Modelling". Academic Press Inc.

Young, Peter, A. Jakeman and R. McMurtrie (1980). "An instrumental variable method for model order identification". Automatica vol. 16 pp 281-294.

# **CAPÍTULO IV**

**APLICACIÓN DE LA PREDICCIÓN DE SISTEMAS  
AL PROCESO DE CONTAMINACIÓN  
EN AISLAMIENTOS EXTERNOS.**

## 4.1. INTRODUCCIÓN

Los intentos por modelar el proceso de contaminación van encaminados hacia dos grandes fines: (a) una mejor comprensión del proceso físico de flameo por contaminación y, (b) si el modelo presenta una buena correlación con la experiencia en campo y/o en laboratorio, este podrá ser usado para la predicción del riesgo de flameo en ciertas condiciones de operación (Sundararajan and Gorur, 1993).

La mayoría de los modelos de flameo elaborados hasta la fecha son modelos estáticos (Risk, 1981). Sin embargo, debido a que el fenómeno es un proceso muy rápido, es de esperarse que un modelo dinámico sea más representativo del proceso.

Considerando el proceso de contaminación como un sistema dinámico, este puede ser modelado a través de la estimación de parámetros adaptativa. Adicionalmente, en Montoya y Tang, (1993) se observa que el proceso es variante en el tiempo. Para realizar la estimación de parámetros, es necesario observar el comportamiento de las entradas y/o salidas del sistema. En este caso, la variable de salida será el nivel de contaminación, el cual será medido a través de alguna de las metodologías descritas en el capítulo II. El método de medición seleccionado, debe ser económico, confiable y tener cierta correlación con otros métodos. Con base a estas premisas, se seleccionó el método de resistencia superficial con ciertas modificaciones.

La evaluación del nivel de contaminación por medición de resistencia superficial (RS) es un método que ha sido estudiado (e.g. Nossier et al, 1991) y puede tener cierta correlación con otros métodos de evaluación como el DESD

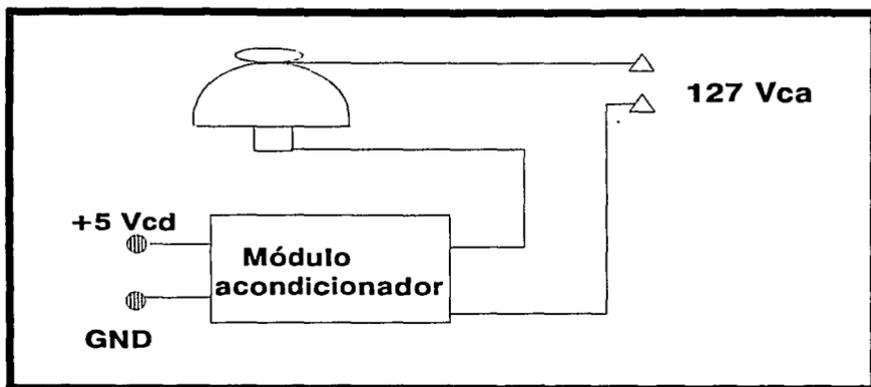
(Kindersberger and Kuhl, 1991), o la medición de corrientes de fuga (Holtzhausen and Potgieter, 1991). La medición de esta variable requiere de un único sensor de monitoreo para cada tipo de aislamiento y su valor es representativo del voltaje de flameo (González de la Vega y Montesinos, 1993).

#### **4.1.1. Descripción del Método de Resistencia Superficial.**

El método de resistencia superficial consiste en aplicar un voltaje constante a un aislador contaminado bajo condiciones de humedad y medir la corriente que circula sobre la superficie de éste. La resistencia superficial se obtiene por ley de ohm para una superficie determinada. La utilización convencional de este método ha sido detallada en el capítulo II.

Para eliminar las desventajas de esta metodología descritas en el capítulo II, se propone energizar un sensor (aislador de porcelana de 13 k volts), a bajo voltaje (127 volts), con el fin de poder regular el voltaje aplicado (fig. 4.1). A este voltaje no se genera el fenómeno de bandas secas, por lo que la señal medida no presenta los picos de alta frecuencia ocasionados por las descargas parciales. Por otro lado, la instrumentación se torna más simple al no utilizar alto voltaje para la medición.

Las propiedades dieléctricas de un aislador, se modifican por la influencia de la humedad originando un cambio en la resistencia superficial.



**Fig. 4.1 Sensor de Resistencia Superficial.**

La resistencia superficial está en función del nivel de contaminación, de la condensación del agua en la superficie del aislador, la capacidad de humectación de este, así como de su aspereza y la uniformidad de la capa contaminante. Es por esto que, mediante la resistencia superficial pueden realizarse mediciones indirectas del contenido de humedad, contaminación y deterioro del aislamiento, y ya que el voltaje de flameo es afectado por el grado de humectación del aislador, la medición de resistencia superficial tiene una estrecha relación con el voltaje de flameo. El diagrama esquemático del circuito se muestra en la fig. (4.2).

En todos los métodos existentes para la medición de la resistencia superficial, es necesario humectar artificialmente la superficie del aislador testigo, ya que se desconoce el nivel de humedad relativa del medio ambiente. Esto ocasiona problemas especialmente en los aisladores sintéticos donde sus propiedades hidrofóbicas dificultan la humectación de su superficie (Kindersberger and Kuhl, 1991).

El problema de humectar el aislador artificialmente es eliminado al aplicar la teoría de estimación de parámetros, ya que la humedad relativa es una función de las diversas variables meteorológicas, las cuales se utilizan como variables de entrada al modelo paramétrico.

## **4.2. INSTRUMENTACIÓN**

La medición de las diferentes variables meteorológicas es hecha a través de una estación de monitoreo marca Qualimetrics, Inc., la cual monitorea las variaciones de velocidad de viento, dirección de viento, temperatura de bulbo seco, temperatura de punto de rocío, precipitación pluvial y presión barométrica.

Estas variaciones de señales físicas las acondiciona a variaciones de voltaje de CD en un rango de 0 a 5 volts. La resistencia superficial es medida por un sensor diseñado en el IIE (González de la Vega y Montesinos, 1993). La variación de la resistencia superficial también es acondicionada a un nivel de voltaje de CD en el mismo rango. Todas las variaciones de voltaje de CD de las diferentes señales muestreadas son digitalizadas y almacenadas en una memoria de 32 K bytes. Cuando la memoria está llena, la información se vacía a una computadora personal (PC) a través del puerto serie de la misma.

Para lograr la comunicación con la PC, se realizó un programa que permite procesar la información captada por la estación meteorológica (Montoya, 1993). El programa tiene la versatilidad de leer la fecha y hora de inicio, así como

el período de muestreo con el que fueron grabados los datos. Además, el programa gráfica cada una de las señales grabadas.

Ya que la resistencia superficial tiene un rango entre 5 k ohms y 10 M ohms, fue necesario introducir varias escalas para su graficación. El programa presenta la opciones de imprimir, desplegar y transcribir a un archivo ASCII los datos grabados. En el apéndice A se detalla el principio de operación de cada uno de los sensores utilizados.

#### **4.2.1. Diseño del módulo de Resistencia Superficial**

El módulo de resistencia superficial es un circuito de etapas múltiples de amplificación y rectificación del nivel de voltaje de corriente alterna. El primer diseño fue realizado por Martínez, (1992).

Con base en la experimentación realizada en campo (Reynoso y González de la Vega, 1993), se determinó elevar la resolución del módulo fijando un rango más pequeño para la medición de la resistencia. El rango seleccionado es de 10 M ohms hasta 5 k ohms. (el rango anterior era de  $\infty$  hasta 0 k ohms). Algunas de las modificaciones realizadas al sistema inicial fueron: se introdujo un filtro activo pasa bajas de segundo orden a la salida para eliminar las variaciones. Dado que se detectó un alto nivel de ruido en campo, se cambiaron los amplificadores operacionales iniciales (LM741), por otros con mejor desempeño ante ambientes ruidosos (LF356). Se colocó un seguidor de voltaje para tener baja impedancia a la salida. Adicionalmente, se recableó el sistema para eliminar ruido en el

alambrado, se cambiaron los cables (de diámetro #18) por cable coaxial. Estas modificaciones mejoraron la respuesta de la tarjeta y logró un mejor desempeño en el campo. Como protección para la tarjeta de adquisición de datos, se colocó un diodo zener a la salida.

#### 4.2.2. Diseño del módulo de flameo

El objetivo principal de este módulo es el detectar el evento de flameo en un aislador energizado. El principio de funcionamiento está basado en la detección del flujo de la corriente de falla. Esto se realiza a través de un transformador de corriente (TC) tipo "dona" colocado en la bajada<sup>1</sup> de tierra del aislador. El TC tiene una relación de 2000:5, por lo que al estar energizado el aislador a voltaje nominal, la corriente de fuga que circula de la línea a tierra inducirá en el primario del TC una corriente máxima del orden de mili amperes.

En el caso de que se genere un flameo en el aislador, la corriente de corto circuito (10k amperes aprox.), se inducirá en el primario, esto nos generará una corriente de 25 amperes aproximadamente en el secundario. La corriente del secundario se rectifica y se hace pasar por una resistencia de bajo valor (0.2 ohms), produciendo una señal de voltaje la cual a su vez, es comparada con un voltaje de referencia para mantener un nivel mínimo de corriente al cual se considere que ha existido un flameo. Si el voltaje en la resistencia de carga es

---

<sup>1</sup> Conexión del alfiler del aislador a tierra.

mayor al de referencia, opera un transistor el cual acciona un disparador schmitt trigger (ST) y este a su vez a un contador de década.

Dado que la falla puede durar como máximo tres ciclos de 60 hz y para evitar falsos disparos por transitorios, se utilizó un ST con histéresis. Se calculó su constante de tiempo para elevar la señal de salida después de un ciclo de ocurrir el disparo y mantenerla en alto durante 4 segundos después del último disparo. El contador de década recibe los disparos del ST. La salida del contador es llevada a un convertidor digital analógico. El voltaje analógico se amplifica para ajustar la máxima década a 5 volts.

Cada evento de flameo producirá que la señal de salida caiga a la mitad de su valor. En campo solo se tienen conectados 3 aisladores en cada TC, por lo que éste será el número máximo de flameos que se requieren contabilizar. Adicionalmente, se implementó en la tarjeta un interruptor normalmente abierto para reiniciar el contador y, previa selección de modo de operación, simular un evento de flameo.

### **4.3. DEFINICIÓN DEL SISTEMA**

Con base en un análisis inicial fuera de línea, se determinó que el proceso de contaminación es un sistema dinámico variante en el tiempo (Montoya y Tang, 1993). Las variables meteorológicas que se usarán como entradas al sistema serán el viento (dirección y velocidad), la temperatura (bulbo seco y húmedo), la precipitación pluvial y la presión barométrica.

**FALTA PAGINA**

**No.      a la**

**56**

**Tabla 4.1 Factores de Correlación.**

	R. S.	V. V.	D. V.	TEMP.	T.P.R.	P. B.
R. S.	1.000					
V. V.	0.238	1.000				
D. V.	-0.233	-0.039	1.000			
TEMP.	0.747	0.273	-0.300	1.000		
T.P.R.	0.020	-0.191	-0.089	0.198	1.000	
P. B.	-0.166	-0.250	0.094	-0.446	-0.150	1.000
Dif. Temp.	0.658	0.370	-0.211	0.769	-0.474	-0.303

únicamente por los factores meteorológicos que se relacionan directamente con la remoción o depositación de contaminante en el aislador (lluvia y viento respectivamente). No obstante, el viento y la lluvia si son influenciados por los cambios en las temperaturas y la presión barométrica.

Por otro lado, si bien la temperatura de punto de rocío no tiene una gran correlación con la resistencia superficial, la diferencia de temperaturas ocupa el segundo lugar de correlación con respecto a la RS. Este resultado es lógico ya que la humedad relativa puede verse como una función del gradiente de temperaturas y la presión barométrica.

Para poder ocupar una parametrización aplicando la proyección vertical, se debe verificar si existen señales con un cierto período. Si suponemos que existen ciclos noche-día, el período de muestreo obvio es 24 horas. Al correlacionar la temperatura y la resistencia superficial (tabla 4.2), se observa una fuerte correlación entre la RS de un día con respecto al otro. Así mismo, la

correlación que existe entre la RS y la temperatura permite asegurar que la temperatura ambiente es un factor fundamental en el comportamiento de la RS.

#### 4.4. PARAMETRIZACIÓN DEL MODELO

Si se considera la resistencia superficial una función de los diversos factores meteorológicos (fig 4.2), el proceso de contaminación puede representarse por una estructura ARMAX de la forma

$$Y[k] = \frac{B_1'[z]}{A_1[z]} U_1[k] + \frac{B_2'[z]}{A_2[z]} U_2[k] + \dots + \frac{B_6'[z]}{A_6[z]} U_6[k] \quad (4.1)$$

donde la resistencia superficial es la salida  $Y[k]$  y las variables meteorológicas las entradas  $U_i[k]$ . Obteniendo el factor común de la ec. (4.1), la salida del modelo en el tiempo  $k$  será

$$Y[k] = \frac{B_1'[z] U_1[k] + B_2'[z] U_2[k] + \dots + B_6'[z] U_6[k]}{A'[z]} \quad (4.2)$$

Adicionalmente, considerando que la resistencia superficial es una señal periódica, (fig 4.3), es posible introducir la estimación vertical en la estructura del modelo con un período  $H$  para la proyección vertical.

De esta forma, los polinomios  $A'$  y  $B_i'$  pueden descomponerse en  $A' = A + C$  y  $B_i' = B_i' + C_i'$ . El modelo puede presentarse como

$$A[z] Y[k] + C[z] Y[k] = B_1[z] U_1[k] + B_2[z] U_2[k] + \dots + B_6[z] U_6[k] + D_1[z] U_1[k] + D_2[z] U_2[k] + \dots + B_6[z] U_6[k] \quad (4.3)$$

**Tabla 4.2 Factores de correlación periodos de 24 horas**

		RESISTENCIA SUPERFICIAL						
		D 1	D 2	D 3	D 4	D 5	D 6	D 7
R S U P E R F I C I A L	D 1	1.0						
	D 2	0.93	1.0					
	D 3	0.95	0.97	1.0				
	D 4	0.97	0.98	0.97	1.0			
	D 5	0.94	0.98	0.99	0.99	1.0		
	D 6	0.9	0.97	0.98	0.97	0.97	1.0	
	D 7	0.94	0.97	0.98	0.97	0.93	0.96	1.0
T E M P E R A T U R A	D 1	0.8	0.79	0.77	0.83	0.74	0.73	0.8
	D 2	0.91	0.91	0.9	0.93	0.89	0.88	0.9
	D 3	0.76	0.74	0.78	0.77	0.74	0.74	0.77
	D 4	0.79	0.79	0.75	0.82	0.73	0.73	0.79
	D 5	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.88	0.88
	D 6	0.9	0.93	0.91	0.94	0.91	0.9	0.92
	D 7	0.87	0.82	0.8	0.88	0.78	0.76	0.84
		T E M P E R A T U R A						
T E M P E R A T U R A	D 1	1.0						
	D 2	0.73	1.0					
	D 3	0.86	0.8	1.0				
	D 4	0.76	0.76	0.72	1.0			
	D 5	0.7	0.8	0.88	0.63	1.0		
	D 6	0.84	0.71	0.85	0.67	0.71	1.0	
	D 7	0.88	0.79	0.9	0.73	0.87	0.86	1.0

Cada columna contiene datos de 24 horas con un periodo de muestreo de 5 minutos (288 datos en 24 horas)..

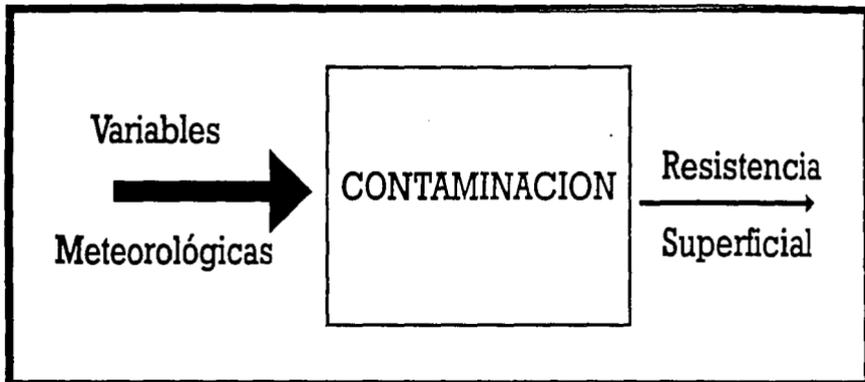


Fig. 4.2 Proceso de contaminación

Donde

$$A [Z] = 1 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2} + \dots + a_n Z^{-n}$$

$$B_i [Z] = b_{0,i} + b_{1,i} Z^{-1} + b_2 Z^{-2} + \dots + b_{m,i} Z^{-m,i}$$

$$C [Z] = c_1 Z^{-h} + c_2 Z^{-2h} + \dots + c_s Z^{-sh}$$

$$D_i [Z] = d_{1,i} Z^{-h} + d_{2,i} Z^{-2h} + \dots + d_{p,i} Z^{-ph}$$

$$U_i [k] = U_{k,i} \text{ } i\text{ésima entrada con } i = 1, 2, \dots, 6$$

$$Y [k] = Y_k \text{ salida}$$

Recuerde que  $h$  es el número de muestros durante un período de la señal de salida,  $n$  y  $m$  son los órdenes de la estimación horizontal para la salida y las entradas respectivamente,  $s$  y  $p$  son los órdenes de la estimación vertical. Los términos  $b_{0,i}$  son cero, ya que se requiere de al menos un retardo de la entrada con respecto a la salida para evitar cualquier distorsión en la parametrización. Por simplificación considérese  $n = m$  y  $s = p$ . Desarrollando los polinomios para  $n$  y  $s$  se tiene

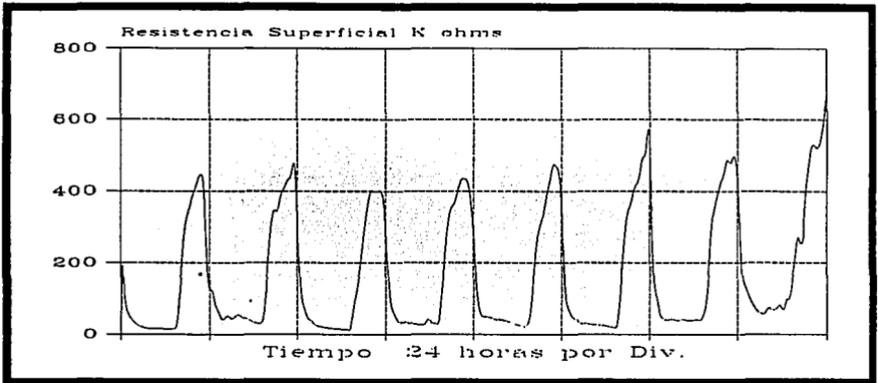


Fig. 4.3 Resistencia Superficial

$$\begin{aligned}
 Y[k] = & (a_1 Z^{-1} + \dots + a_n Z^{-n}) Y[k] + \sum_{i=1}^{i=6} (b_{1i} Z^{-1} + \dots + b_{ni} Z^{-ni}) U_i[k] + \\
 & + (c_1 Z^{-T} + \dots + c_s Z^{-sT}) Y[k] + \sum_{i=1}^{i=6} (d_{1i} Z^{-T} + \dots + d_{pi} Z^{-pT}) U_i[k]
 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Agrupando los coeficientes en forma vectorial

$$\begin{aligned}
 \varphi_0 &= [Z^{-1}, \dots, Z^{-n}] Y_k & \varphi_1 &= [Z^{-1}, \dots, Z^{-n}] U_{k1} \\
 \varphi_0' &= [Z^{-H}, \dots, Z^{-sH}] Y_k & \varphi_1' &= [Z^{-H}, \dots, Z^{-sH}] U_{k1} \\
 \theta_0 &= [a_1, a_2, \dots, a_n]^T & \theta_1 &= [b_{11}, b_{21}, \dots, b_{n1}]^T \\
 \theta_0' &= [c_1, c_2, \dots, c_s]^T & \theta_1' &= [d_{11}, d_{21}, \dots, d_{s1}]^T \\
 \Phi^T &= [\varphi_0 \ \varphi_1 \ \dots \ \varphi_6 \ \varphi_0' \ \varphi_1' \ \dots \ \varphi_6'] \\
 \Theta &= [\theta_0 \ \theta_1 \ \dots \ \theta_6 \ \theta_0' \ \theta_1' \ \dots \ \theta_6']^T
 \end{aligned}$$

con  $i = 1, 2, 3, \dots, 6$

(4.2) se puede escribir como

$$\begin{aligned}
 Y_k &= [\varphi_0 \ \varphi_1 \ \dots \ \varphi_6 \ \varphi_0' \ \varphi_1' \ \dots \ \varphi_6'] [\theta_0 \ \theta_1 \ \dots \ \theta_6 \ \theta_0' \ \theta_1' \ \dots \ \theta_6']^T \\
 &= \Phi^T \Theta
 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Se puede apreciar que la ec. (4.5) tiene la misma forma que la ec (3.2), por lo que ya podemos aplicar cualquiera de los algoritmos de identificación a la estimación de los coeficientes del modelo.

#### 4.5. SELECCIÓN DEL ALGORITMO DE ESTIMACIÓN

Ya que el proceso de contaminación es un sistema variante en el tiempo (Montoya y Tang, 1993), el algoritmo de estimación que se tomó como base es el de mínimos cuadrados con reinicio de la matriz de covarianza y con factor de olvido. Adicionalmente, se compararán las estimaciones horizontal y vertical descritas en el capítulo anterior, utilizando el algoritmo de mínimos cuadrados extendido (ecs. 3.25, 3.26, 3.27). Este algoritmo tiene la forma

$$\begin{aligned} \hat{\theta}[k] &= \hat{\theta}[k-1] + M[k-d] [y[k] - \phi[k-d]^T \hat{\theta}[k-1]] \\ M[k-d] &= \frac{P[k-d-1] \phi[k-d]}{\lambda + \phi[k-d]^T P[k-d-1] \phi[k-d]} \end{aligned} \quad (4.6)$$

con

$$\begin{aligned} \phi[k-d] &= [y[k-d], y[k-d-1], \dots, y[k-d-n], u_1[k-d], u_1[k-d-1], \dots \\ &\quad \dots, u_1[k-d-n], u_2[k-d], \dots, u_5[k-d-n], u_6[k-d], \dots \\ &\quad \dots, u_6[k-d-n], e[k-d], \dots, e[k-d-m], y[k-T], \dots \\ &\quad \dots, y[k-sT], u_1[k-T], \dots, u_3[k-T], \dots, u_6[k-sT] ] \end{aligned} \quad (4.7)$$

La matriz **P** será calculada por

$$\begin{aligned} P(-1) &= \alpha I && \text{con } \alpha \in \mathfrak{R} \\ \text{si } k &\geq d \end{aligned}$$

para  $\text{Tr}(P) < 10^3$

$$P[k-d] = P[k-d-1] - M[k-d] \phi[k-d]^T P[k-d-1] \quad (4.8)$$

Para  $\text{Tr}(P) \geq 10^3$

$$P[k-d] = \alpha I$$

donde  $\text{Tr}(P)$  es la traza de la matriz  $P$ .

Los criterios de mínimos cuadrados y factor de desempeño serán utilizados para seleccionar el orden mas conveniente. Se utilizará la forma de aproximación directa para encontrar la mejor predicción.

Para comparar el desempeño de los algoritmos utilizados, es necesario que se utilice el mismo bloque de datos para cada una de las estimaciones. Para ello, se creó un programa que simula la lectura de datos en tiempo real y realiza la estimación en línea. Este programa lee secuencialmente los datos de un archivo ASCII y efectúa la estimación de la salida mediante el algoritmo seleccionado. Además, presenta gráficamente la convergencia de la salida del modelo a la salida observada, el error de estimación, y los parámetros de cada variable.

Es importante recalcar que el tiempo de predicción requerido es de al menos 4 horas. Esto implicará que de acuerdo al período de muestreo seleccionado, el retardo en el modelo podrá variar tantos pasos adelante como se deban predecir hasta alcanzar 4 horas.

Para seleccionar el mejor algoritmo, las primeras simulaciones se hicieron con ordenes de 6,8,12 y 18. Se utilizó el mismo orden para cada una de las

entradas y la salida. El factor de olvido se varió de 0.9 a 0.98. Los períodos de muestreo utilizados fueron de 5, 15, 20 y 30 minutos. A continuación se describe el desempeño de cada uno de los algoritmos utilizados.

#### 4.5.1. Algoritmo de mínimos cuadrados normalizado (MCN)

La estimación y predicción mediante este algoritmo se utilizó como base de comparación para los demás algoritmos. El vector de regresión  $\phi$  tiene la forma

$$\begin{aligned} \phi[k-d] = [ & y[k-d], y[k-d-1], \dots, y[k-d-n], u_1[k-d], \\ & u_1[k-d-1], \dots, u_1[k-d-n], \\ & u_2[k-d], \dots, u_2[k-d-n], \\ & u_6[k-d], \dots, u_6[k-d-n] ] \end{aligned} \quad (4.9)$$

En la fig. (4.4) se presentan los índices de desempeño de la estimación a diferentes ordenes y períodos de muestreo.

Como se puede observar, el mejor índice de desempeño es cuando se utiliza un período de muestreo de 5 minutos con un orden de 6. Sin embargo, la mejor predicción se alcanza cuando se muestrea a 30 minutos con un orden de 12, (fig 4.5). El algoritmo de mínimos cuadrados normalizado puede dar una buena estimación, sin embargo, no puede decirse lo mismo del predictor basado en este algoritmo.

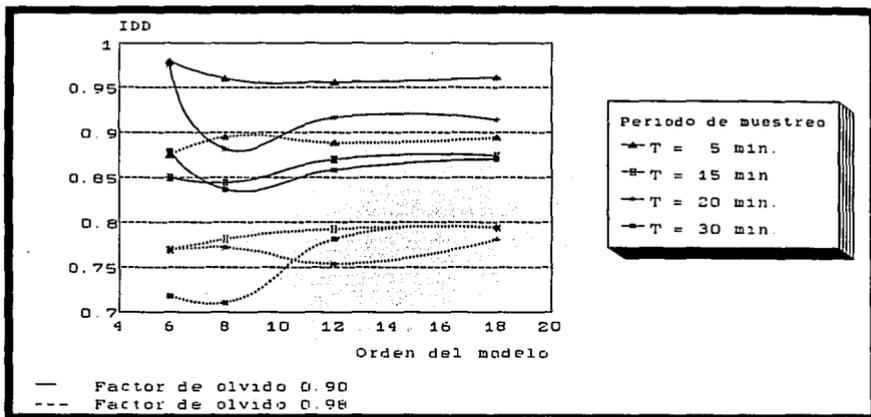


Fig. 4.4 IDD Estimación con el algoritmo MCN

#### 4.5.2. Algoritmo de mínimos cuadrados extendido

En este algoritmo es necesario agregar al vector de regresión  $\phi$ , el error de predicción  $\epsilon$ , quedando de la forma

$$\phi[k-d] = [ y[k-d], y[k-d-1], \dots, y[k-d-n], u_1[k-d], u_1[k-d-1], \dots, u_1[k-d-n], u_2[k-d], \dots, u_5[k-d-n], u_6[k-d], \dots, u_6[k-d-n], \epsilon[k-d], \dots, \epsilon[k-d-m], y[k-T], \dots, y[k-sT], u_1[k-T], \dots, u_5[k-T], \dots, u_6[k-sT] ] \quad (4.10)$$

El orden del nuevo vector puede definirse con base en el conocimiento físico del sistema. Se decidió que una buena aproximación sería el considerar la influencia del error de estimación al menos dentro de la última hora de muestreo. Como el período de muestreo mínimo es 5 minutos, entonces el orden del vector  $\epsilon$  se fijó en 12 para las simulaciones con órdenes mayores a 12, y en el orden

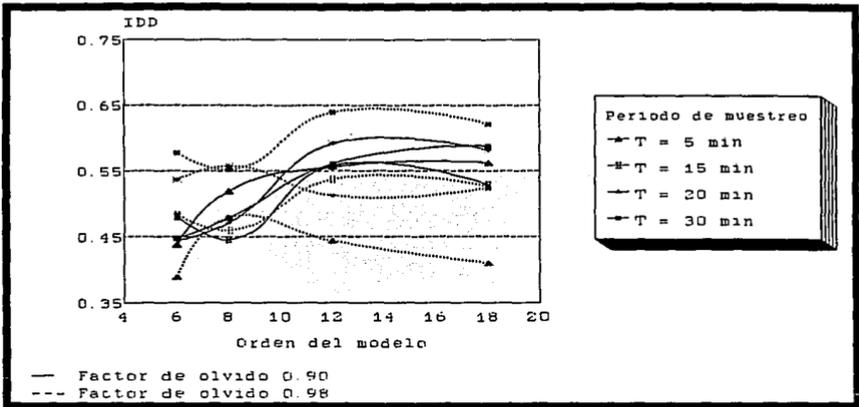


Fig. 4.5 IDD Predicción con el algoritmo MCN

máximo de cualquier polinomio si éste es menor a 12.

La mejor estimación se logró con un período de muestreo de 5 min. y un orden de 6 (fig. 4.6), en tanto que la mejor predicción fue hecha con un período de muestreo de 30 min y un orden de 4 con un factor de olvido de 0.98 (fig. 4.7). Los índices de desempeño de las estimaciones realizadas son aceptables, no así los IDD de las predicciones.

#### 4.5.3. Algoritmo de mínimos cuadrados extendido con proyección vertical (MCEV)

Tanto la temperatura de punto de rocío como la temperatura ambiental son afectadas por los cambios de noche a día, por lo que presentan un comportamiento

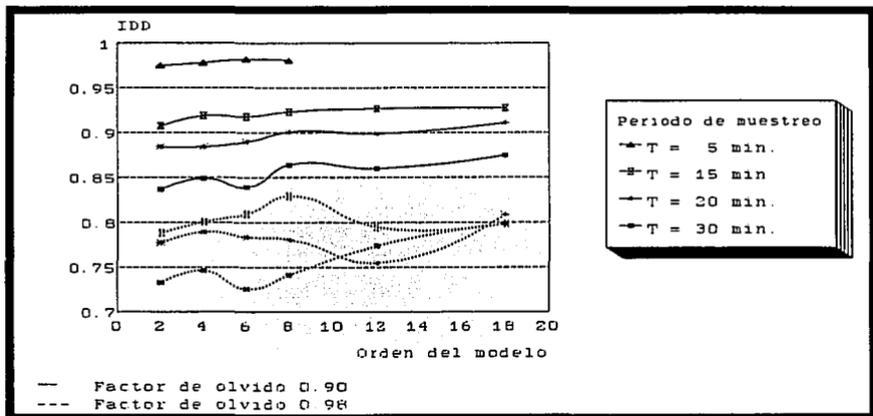


Fig. 4.6 IDD Estimación con el algoritmo MCE

cíclico de 24 horas. La resistencia superficial al ser influenciada principalmente por la humedad (la cual es una función de las temperaturas y de la presión barométrica), también presenta un comportamiento cíclico (fig. 4.3). Debido a esto, es posible aplicar una predicción vertical para buscar una mejor aproximación a la predicción deseada. El período de muestreo vertical se ajustará a 24 horas independientemente del período de muestreo horizontal que se esté utilizando. El vector de regresión  $\phi$  tendrá la forma

$$\phi[k-d] = [ y[k-d], y[k-d-1], \dots, y[k-d-n], u_1[k-d] u_1[k-d-1], \dots, u_1[k-d-n], u_2[k-d], \dots, u_5[k-d-n], u_6[k-d] \quad (4.11) \\ \dots, u_6[k-d-n], e[k-d], \dots, e[k-d-m], y[k-T], \dots, y[k-sT], u_1[k-T], \dots, u_3[k-T], \dots, u_6[k-sT] ]$$

Nuevamente se utilizaron los mismos órdenes y períodos de muestreo para estas simulaciones. En la fig. (4.8) se presenta el índice de desempeño de la

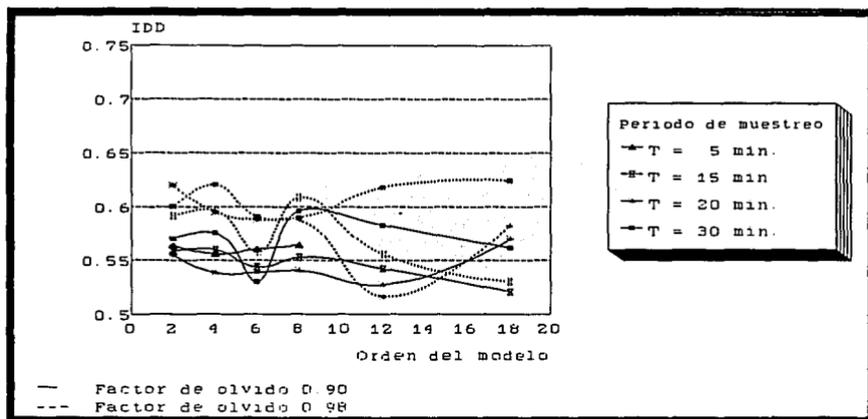


Fig. 4.7 IDD Predicción con el algoritmo MCE

estimación con este algoritmo. Tanto la mejor estimación como predicción se logró con el período de muestreo de 5 min y un orden de 4 (fig. 4.9).

#### 4.5.4. Comparación de los diferentes algoritmos utilizados

La comparación se realizó tomando el mejor desempeño de cada uno de los algoritmos y comparándolo con los demás. En la fig. (4.10) se muestra la comparación de las mejores estimaciones. En la fig. (4.11) se presentan las mejores predicciones de cada algoritmo.

Con base en las figuras anteriores, se afirma que los mejores índices de desempeño en la estimación se lograron con un período de muestreo muy corto y con órdenes bajos. La mejor predicción se logró con el algoritmo MCEV. Este

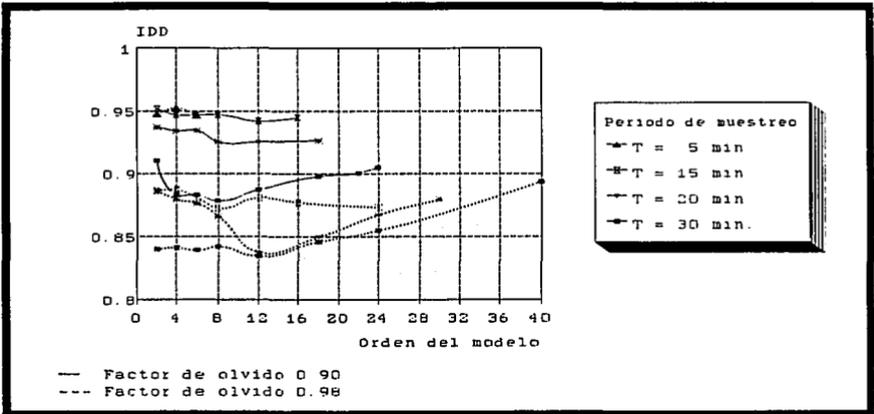


Fig. 4.8 IDD Estimation with the MCEV algorithm

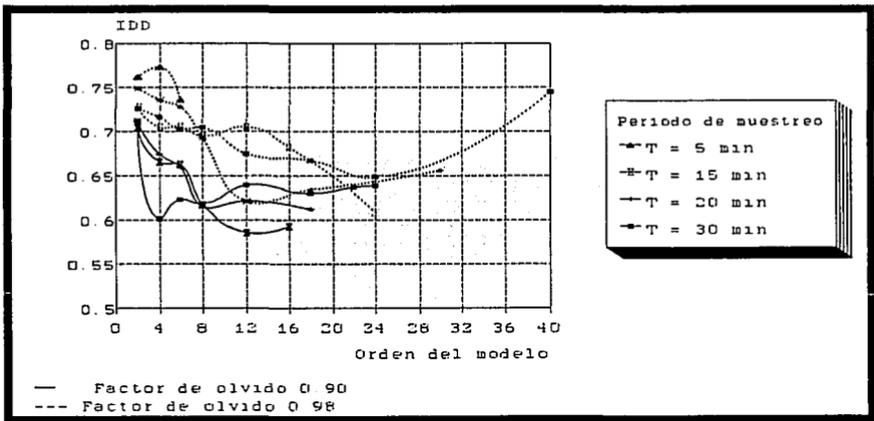


Fig. 4.9 IDD Prediction with the MCEV algorithm

algorithm will be used to implement it in the prediction system.

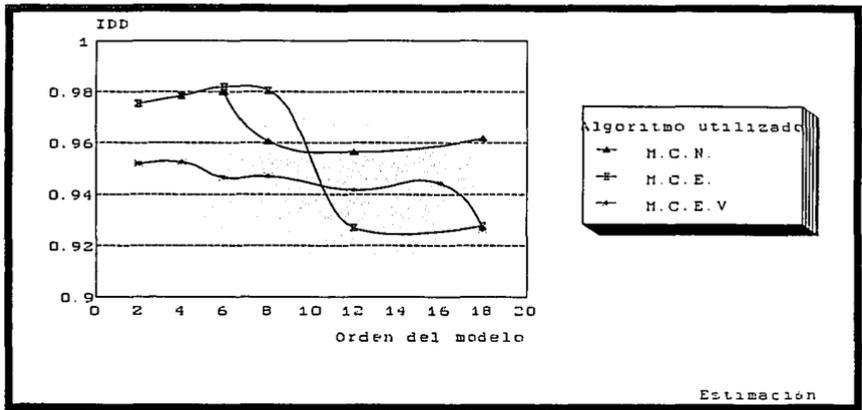


Fig. 4.10 Comparación de los diferentes algoritmos utilizados

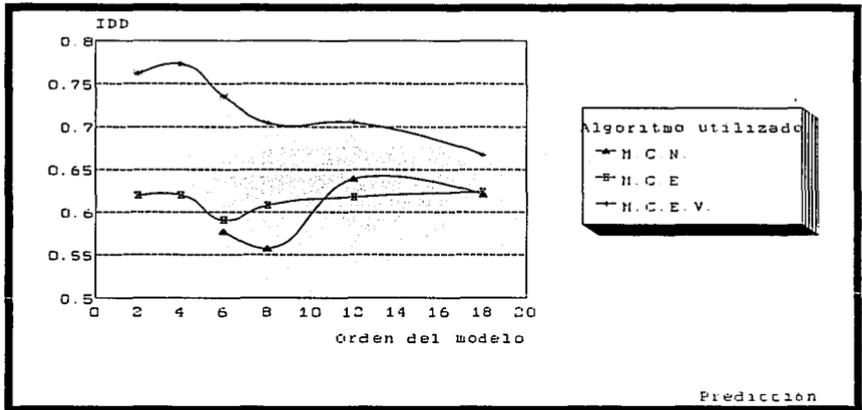


Fig. 4.11 Comparación de los dif. algoritmos utilizados.

#### **4.5.5. Selección del período de muestreo**

Utilizando el algoritmo de mínimos cuadrados extendido con proyección vertical (el cual presenta el mejor desempeño), es conveniente realizar nuevas simulaciones para verificar el período de muestreo óptimo. De la fig. (4.12) se observa que los IDD de las estimaciones para un mismo orden disminuyen conforme el período de muestreo aumenta.

En el caso de la predicción (fig. 4.13), no se logró detectar un comportamiento regular, no obstante, puede verse que el período de muestreo de 5 min. con un factor de olvido de 0.98, presenta un mejor desempeño que el resto de las predicciones.

#### **4.5.6. Selección del orden de la proyección vertical**

Para seleccionar el orden de la predicción vertical, se realizaron nuevas estimaciones con órdenes de 4 y 6 para la estimación horizontal con los diferentes períodos de muestreo utilizados, (fig. 4.14). El orden para la proyección vertical se varió de 1 a 4. Nuevamente se notó un decremento en el IDD conforme el período de muestreo aumenta. El orden en la proyección vertical con un mejor desempeño fue de 4.

El máximo IDD obtenido hasta el momento para la predicción a cuatro horas es de 0.7733 (fig. 4.15). Este valor fue obtenido con un período de muestreo de 5 min. y con un orden de 4 para la proyección vertical y la estimación

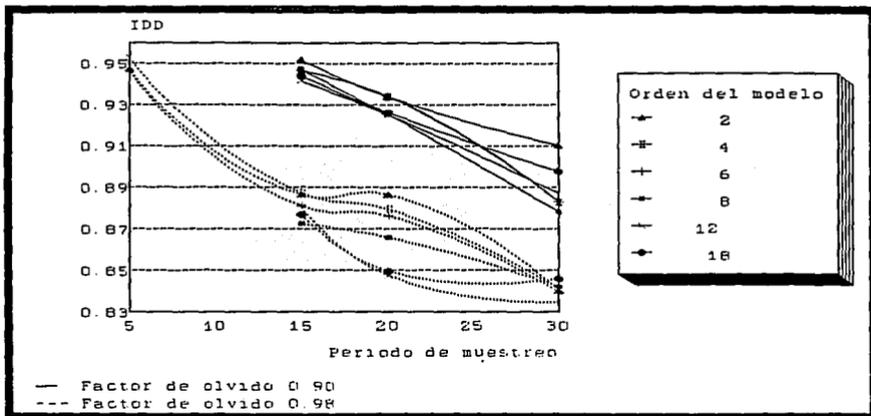


Fig. 4.12 Efecto del periodo de muestreo en la estimación

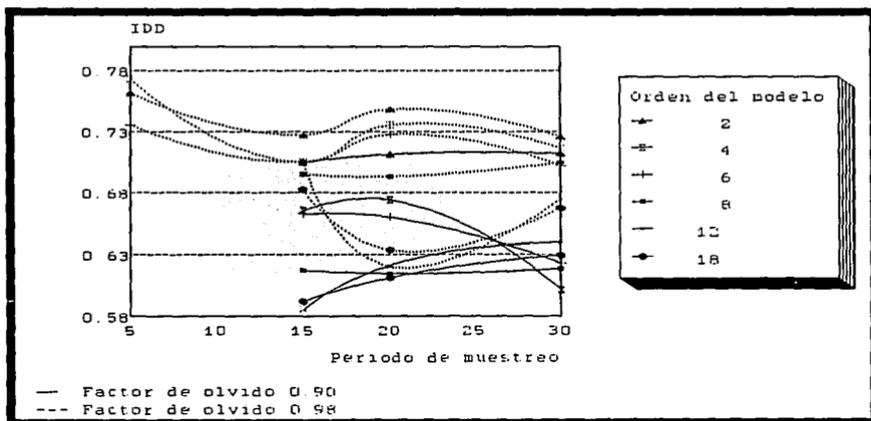
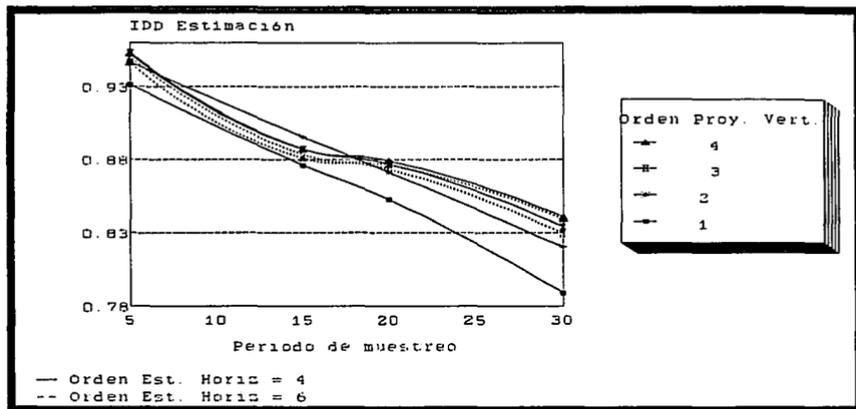


Fig. 4.13 Efecto del periodo de muestreo en la predicción

horizontal. Este valor para el IDD es aceptable, sin embargo en nuestro caso se requiere una predicción con una mejor precisión ya que del pronóstico del nivel



**Fig. 4.14** IDD Estimación proyección vertical

de contaminación se generará una decisión de lavado de aisladores para mantenimiento y una falsa alarma produciría desviación de recursos y pérdidas económicas.

La tendencia de los IDD para las diferentes combinaciones de órdenes y períodos de muestreo revela que si se desea elevar el IDD en las predicciones sería necesario utilizar órdenes muy elevados. Esta solución presenta grandes inconvenientes, el primero es que la mejora en la calidad de la predicción no está asegurada, el segundo es que si se tiene un orden elevado de muestreo, se tendrán restricciones en cuanto a períodos de muestreo cortos, ya que el análisis de la información no puede durar más allá que el período de muestreo.

Como el máximo IDD alcanzado fue con un período de muestreo de 5 min. y un orden de 4, se utilizaron estos datos para realizar las estimaciones con

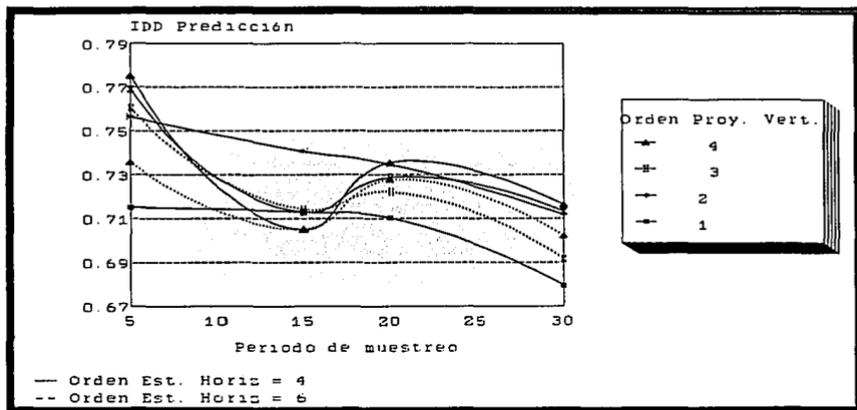


Fig. 4.15 IDD Predicción Proyección vertical

diferentes tiempos de predicción.

Nuevamente se varió el orden de la proyección vertical para determinar el efecto de esta sobre el tiempo de predicción. Bajo esta nueva perspectiva, el máximo IDD logrado fue para la predicción de una hora con un IDD de 0.943. En la fig. (4.16) se observa que las estimaciones a una hora alcanzan un mejor índice de desempeño.

En cuanto a los IDD de las predicciones (4.17), puede observarse que la proyección vertical tiene un gran peso sobre las predicciones a largo tiempo, mientras que las predicciones a corto tiempo serán mayormente influenciadas por la estimación horizontal.

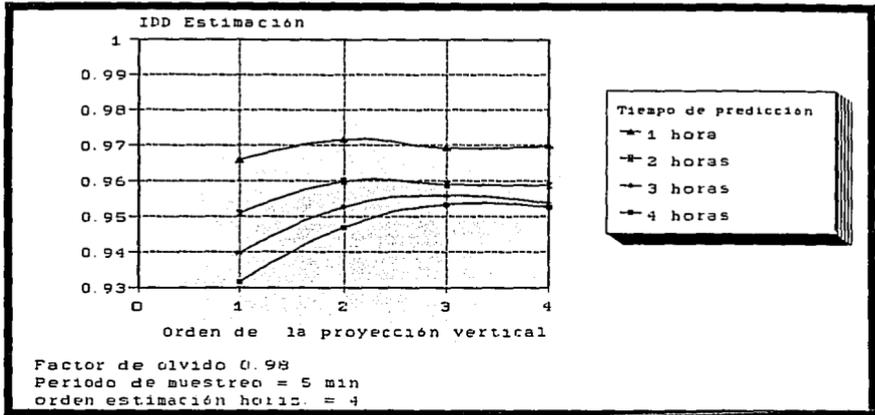


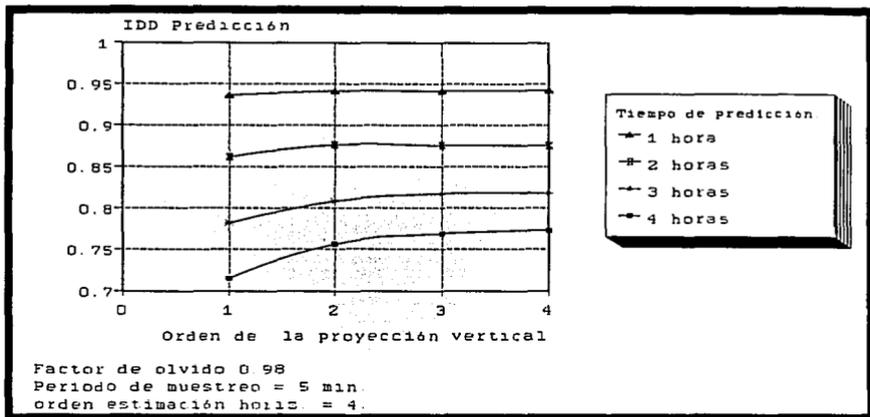
Fig. 4.16 IDD Estimación, diferentes tiempos de predicción

#### 4.5.7. Resumen

Con base en las simulaciones anteriores, se determinó utilizar el algoritmo de mínimos cuadrados extendido con proyección vertical. Los órdenes que se utilizarán son de 4 para la estimación horizontal y vertical. El período de muestreo inicial será de 5 minutos. Así mismo, se presentará las predicciones a una, dos, tres y cuatro horas para tener un mejor desempeño de nuestra predicción.

#### 4.6. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

Toda vez que se ha determinado el período de muestreo así como la estructura y orden del algoritmo de estimación, es necesario diseñar un sistema que permita la predicción de la resistencia superficial en campo. Este sistema debe



**Fig. 4.17** IDD Predicción, diferentes tiempos

tener la capacidad de adquirir las mediciones de las diferentes variables y utilizarlas en el algoritmo de predicción. Posteriormente, debe almacenarlas en una memoria no volátil. La creación de este sistema se dividió en dos partes, el desarrollo del software y la implementación del hardware.

#### 4.6.1. Desarrollo del software

El sistema de adquisición de datos fue construido en forma de un entorno integrado de desarrollo (EID) a través de la programación orientada a objetos (POO). La POO es el método más reciente y actual de desarrollo de software que existe. Esta programación se basa fuertemente en el concepto de objeto.

En la POO los datos y las subrutinas se combinan para producir objetos. Un objeto contiene las características de una entidad (sus datos) y su comportamiento (sus subrutinas). Combinando estas características y comportamientos, un objeto conoce cualquier cosa que necesite para hacer su trabajo. Este concepto puede ser más fácil de entender a través de un ejemplo.

"Si consideramos a un automóvil como un objeto, este puede ser descrito en términos físicos por el número de pasajeros, velocidad, potencia, rendimiento, cantidad de gasolina, etc. Por otro lado, el automóvil también puede ser descrito en términos funcionales; acelera, frena, vuelta a la izquierda, vuelta a la derecha, reversa, para, etc. Cada una de estas descripciones por separado no describen lo que es un automóvil, sin embargo al unir las en una sola descripción, es posible entender la esencia del automóvil y de esta forma poder manejarlo como se quiera".

La POO depende de tres conceptos básicos; combinación de código y datos, herencia y encapsulación.

La combinación de código y datos da por resultado el cuerpo real del objeto. La descripción funcional está formada por subrutinas denominadas métodos. Estos métodos utilizan la descripción física del objeto (datos) para cumplir con la finalidad del objeto.

Aunque los objetos contienen sus propios métodos y datos, también es posible heredarlos de otros objetos. Los métodos heredados pueden ser utilizados directamente o ser modificados para construir un nuevo objeto (los métodos del

objeto automóvil pueden ser modificados para obtener la descripción de un Topaz, Tsuru, Spirit, etc, los cuales pueden definirse como automáticos o estándar).

Uno de los objetivos primordiales de la POO es la encapsulación. Este concepto permite la utilización de un objeto como entidad completa. Una de las reglas de la encapsulación es que el programador nunca necesita acceder directamente a los campos de datos de un objeto. En vez de esto, se deben definir métodos dentro del objeto que gobiernen toda la manipulación de los datos (carga gasolina, sube pasajero, cambia velocidad, afina auto, etc).

Las versiones más recientes de los compiladores comerciales de los diferentes lenguajes de programación, han introducido dentro de sus utilerías el concepto de POO. Tal vez el lenguaje que más se preste a la POO sea el PASCAL. Esto es debido a su forma de programación estructurada. Dentro del compilador Turbo Pascal® de Borland, existe un conjunto de herramientas de POO extremadamente potente llamado TURBO VISION (TV). TV es la interfase de los mecanismos subyacentes que ha utilizado Borland para construir el EID de Turbo Pascal 6. Al tener acceso a estos mecanismos, Borland permite desarrollar software con el mismo aspecto y filosofía que el EID de Turbo Pascal 6.

La mayor utilidad de TV es el software reutilizable que contiene, el cual nos permite simplemente definir objetos tales como barra de menú, ventana de confirmación, etc. Si estos objetos no tienen la capacidad que se desea, se puede añadir al objeto definido anteriormente la característica que se requiere. Esto hace a TV extremadamente flexible, sin embargo, también lo hace bastante complicado,

por lo que solo se recomienda su uso para sistemas que requieren una presentación profesional (O'Brien, 1992).

#### 4.6.3. Descripción del sistema TMP

El sistema TMP es un programa de adquisición de datos de las diferentes variables meteorológicas y de la RS, que realiza la estimación y predicción de ésta mediante el algoritmo mínimos cuadrados extendido con proyección vertical. Adicionalmente puede detectar flameos en los aisladores monitoreados. Al accesar el programa TMP, en la parte superior de la pantalla se encuentra el menú principal del sistema, que da acceso a todas sus funciones (fig. 4.18), la descripción detallada del sistema se encuentra en el apéndice B.

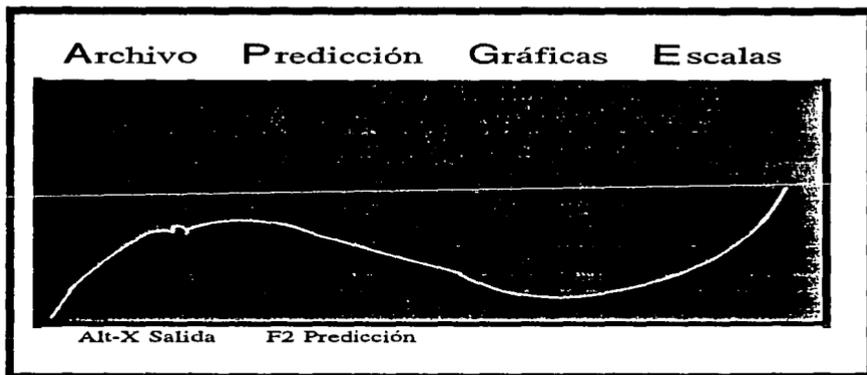


Fig. 4.18 Pantalla del sistema de predicción

#### 4.6.4. Implementación del hardware

La adquisición de señales es hecha a través de una tarjeta de adquisición de datos de Analog Device modelo RTI 815-F. Esta tarjeta es capaz de monitorear señales analógicas/digitales para entrada/salida. Puede ser conectada en un peine de ocho bits. La tarjeta es mapeada por la computadora por 16 bytes consecutivos. La dirección de la localidad base puede ser seleccionada a través de un DIP localizado en la tarjeta. Cada byte del mapa de la tarjeta tiene una función preasignada. Los dos bytes más altos no se utilizan, el resto de los bytes del mapa son de solo lectura, solo escritura, o lectura/escritura, dependiendo de su función.

##### Descripción señales analógicas

La tarjeta RTI 815-F puede realizar mediciones de 16 canales analógicos en modo simple u ocho en modo diferencial. Con adición de un multiplexor, el número de canales de adquisición puede incrementarse hasta 32 y 16 respectivamente.

Para la conversión A/D, la tarjeta cuenta con un convertidor analógico digital (ADC) de 12 bits, el cual puede recibir señales analógicas de 0 a +10 V,  $\pm 5$  V, o  $\pm 10$  V. Antes de iniciar la conversión, existe un amplificador que puede dar una ganancia de 1, 10, 100 o 500 a la señal analógica de entrada. Si se utiliza una ganancia mayor a 1, se debe tener cuidado en no sobrepasar el rango de operación del ADC.

### Inicio de conversión

El inicio de la conversión puede hacerse a través de un comando externo, de un reloj externo, o escribiendo sobre el byte CONVERT COMMAND en el mapa de memoria.

## **4.7. INSTALACIÓN DEL MODELO**

El modelo fue instalado en la subestación (S.E.) Playa Norte de Veracruz, Ver. Este lugar presenta las condiciones adecuadas para evaluar el modelo ya que se encuentra en la parte norte de la ciudad a 300 metros de la costa. El banco se encuentra energizado a 13 kv contando con diferentes tipos de aisladores. Por la experiencia de campo obtenida, el aislador con mayor probabilidad de falla es el IUSA de 13kv (este aislador es el utilizado como sensor). Es por ello que se decidió utilizarlo para asegurar que existan flameos durante una temporada de nortes.

Al inicio de la operación del banco, cuando existía un flameo en algún aislador, debido a la proximidad con la S.E. esta lo veía como falla propia, lo que ocasionaba la salida de varios circuitos de distribución. Para eliminar esta falla se requirió rediseñar la coordinación del aislamiento del bus alimentador del banco con respecto a la S.E.

Para eliminar transitorios e interferencias por fallas con retorno por tierra, se decidió colocar una red de tierra independiente para la estación meteorológica y el sistema de predicción. El mínimo valor óhmico alcanzado fue de 5 ohms.

Adicionalmente, la caseta donde se encuentra ubicada la instrumentación cuenta con un sistema de aire acondicionado permanente.

#### **4.7.1. Adquisición de datos**

Debido a problemas financieros, el modelo se instaló con un año de retraso, por lo que aun no se cuenta con información de la temporada de nortes. Es por ello que su evaluación fue postergada hasta marzo de 1994. No obstante, la información con la que se realizó este trabajo es del mes de marzo de 1993. Esta información fue recabada fuera de línea y es representativa de la parte final de la temporada de nortes.

La primera información recabada del banco de pruebas contenía un alto nivel de ruido, por lo que se procedió a rediseñar los módulos para ambientes ruidosos y replantar el cableado de la instrumentación. Actualmente, el sistema opera correctamente y realiza la adquisición de datos y predicción en línea. Se espera que durante el último trimestre del año las aseveraciones aquí realizadas sean confirmadas.

#### 4.8. REFERENCIAS.

- González de la Vega, Jorge y J. Montesinos (1993). Reporte IIE/30/31/RP-002/5234/1993.
- Holtzhausen J.P., and O.C.T. Potgieter, (1991). "Continuous on site monitoring of insulator surface conductance and leakage currents". 7<sup>th</sup> International Symposium on HV Engineering, paper 44.14, pp 307-310.
- Kindersberg, J. and H. Kuhl (1991). "Surface conductivity of polluted silicone rubber insulators". 7<sup>th</sup> International Symposium on HV Engineering". paper 43.15, pp.223-225.
- Martínez, Victor (1993). "Sistema basado en PC para medir el nivel de contaminación en aisladores por medio de la conductancia superficial". Tesis de licenciatura, Universidad Veracruzana.
- Montoya, Gerardo (1993). Medición de variables meteorológicas. Reporte. IIE/30/31/RP-001/5234/1993.
- Montoya Gerardo y Y. Tang (1993). "Identificación de parámetros del proceso de contaminación en aislamientos externos". Segundo taller eléctrico internacional, IIE, Morelos, México.

Nossier et al (1991). "effect of DC source parameters on the flashover voltage of polluted insulators". 7<sup>th</sup> International Symposium on HV Engineering". paper 43.19, pp.237-239.

O'Brien Stephen, (1992). "Turbo Pascal 6. Manual de Referencia". Mc Graw Hill.

Reynoso, Eduardo y J. González de la Vega, (1992). "Procedimiento de pruebas de campo a los aisladores sometidos a prueba en las estaciones de monitoreo". RPI'93. IEEE, México. pp. 110-116.

Risk, F. A. M. (1981). "Mathematical models for pollution flashover". Electra, Vol, 78, pp. 71-103.

Sundararajan, R. and R.S. Gorur, (1993). "Dynamic arc modeling of pollution flashover of insulators under dc voltage". IEEE Trans. on Elect. Insul. Vol, 28. No.2.

# **CAPÍTULO V**

## **CONCLUSIONES**

El flameo de aisladores externos por contaminación es un proceso muy complejo en el cual intervienen un gran número de variables tales como: las características propias del aislador (perfil, material, etc), el tipo y nivel de contaminación, la climatología y urbanización del lugar, tipo y nivel del voltaje de aplicación, etc. Al reproducir el fenómeno en el laboratorio, se adicionan nuevos factores a considerar, tales como el voltaje aplicado, el método y tipo de generación de niebla, dimensión de la cámara de niebla, variables climatológicas no controladas en el laboratorio, etc.

Al aplicar la estimación de parámetros al proceso de contaminación, se tomó una estructura lineal variante en el tiempo. Se utilizaron técnicas adaptivas para encontrar el predictor óptimo mediante un algoritmo de mínimos cuadrados. El algoritmo con mejor desempeño fue el de mínimos cuadrados extendido con proyección vertical.

Durante la experimentación se encontró que la resistencia superficial presenta un comportamiento periódico influenciado por los ciclos noche-día. Para aprovechar esta característica de algunas señales de entrada, se utilizó una proyección vertical de los ciclos pasados de las señales periódicas hacia el tiempo presente combinando ambas estimaciones. La proyección vertical tiene un gran peso sobre las predicciones a largo plazo, mientras que las predicciones a corto tiempo son mayormente influenciadas por la estimación horizontal.

En el laboratorio se encontró que los aisladores contaminados a diferentes niveles flameaban con valores de resistencia superficial menores a 400 k ohms. En campo esta franja de advertencia aun no ha sido detectada.

El orden de los polinomios fue de 4 tanto para la predicción horizontal como para la vertical. El período de muestreo con mejor desempeño fue a cinco minutos. Estos valores serán confirmados o ajustados de acuerdo con los próximos bloques de datos.

Las predicciones realizadas hasta el momento son aceptables (fig. 5.1). Sin embargo, si se requiere un tiempo de predicción mayor del propuesto, será necesario buscar nuevas estructuras que logren un mejor desempeño. Algunas ideas para estas nuevas estructuras son:

- Medición de variables con diferentes períodos de muestreo.
- Visualizar el proceso de contaminación como un sistema no lineal.
- Eliminar la medición de la dirección de viento y sustituirla por la medición de la temperatura del aislador.

Si bien la filosofía del presente trabajo es predecir la resistencia superficial únicamente durante la temporada de nortes, la utilización de redes neuronales podría servir para almacenar información sobre las diferentes estructuras que presumiblemente adopta el proceso durante el año.

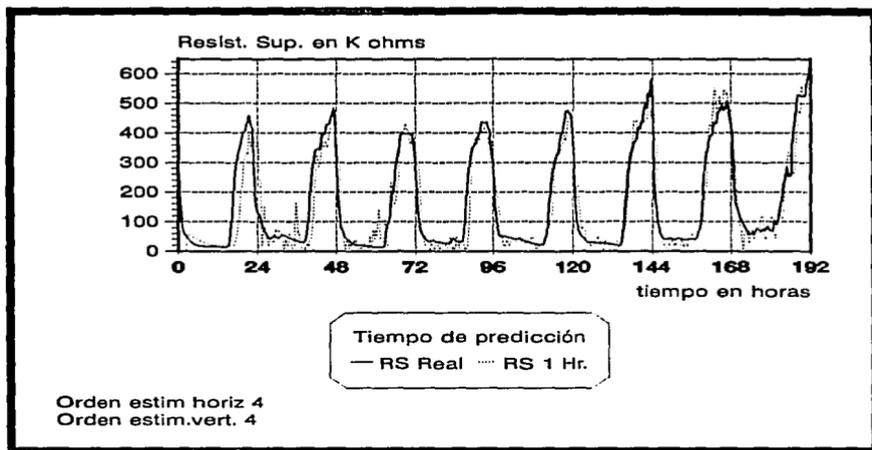


Fig. 5.1 Predicción de la Resistencia superficial a una hora

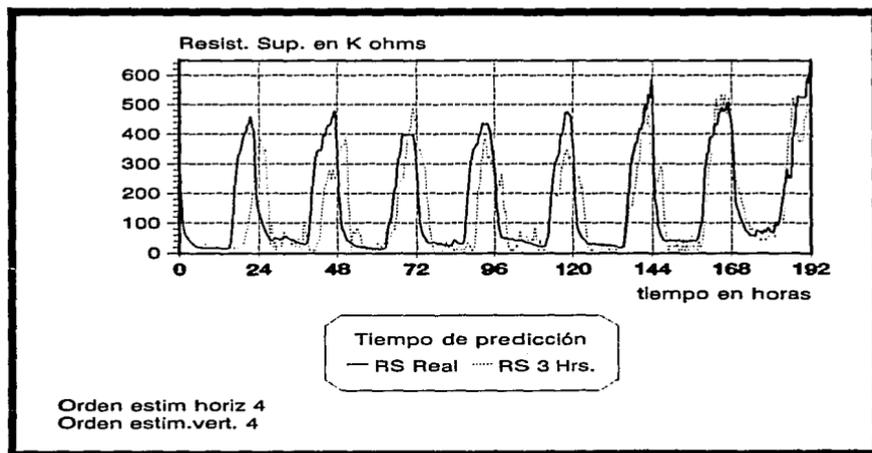


Fig. 5.2 Predicción de la resistencia superficial a tres horas

# APÉNDICES

# APÉNDICE A

## PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LOS SENSORES UTILIZADOS

A continuación se describe el principio de operación de cada una de las variables meteorológicas con que cuenta la estación. Así mismo, se explica el principio de funcionamiento de los sensores adicionales de resistencia superficial y flameo.

### Viento

Velocidad de viento.- El sensor de velocidad de viento consiste en un elemento foto transistor cuyo haz de luz es cortado por una placa giratoria ranurada. La interrupción del haz de luz produce un cambio en la corriente de colector del foto transistor generándose una corriente pulsante. La frecuencia de la corriente es proporcional a la velocidad del viento, la cual al pasar por el acondicionador de señales se traduce en una señal analógica proporcional a la frecuencia y por ende, a la velocidad del viento. Como la rueda acanalada (interruptor giratorio) tiene 30 ranuras el resultado son 30 pulsos por revolución. El módulo puede aceptar como entrada una señal senoidal o una cuadrada.

Dirección de Viento.- El elemento sensor es un potenciómetro de precisión de 5 K ohms con un margen de error del 0.5 %, protegido contra transitorios inducidos por fuentes externas por un par de diodos zener.

El potenciómetro es girado mecánicamente mediante una flecha acoplada a una veleta giratoria, siendo la resistencia una función de la dirección del viento.

### Temperatura

El elemento sensor es un alambre de platino, el cual tiene una resistencia de  $100 \Omega$  a  $0^{\circ}\text{C}$ . Este elemento sensor viene montado dentro de un contenedor de acero inoxidable de una longitud de 6 pulg. aproximadamente. El elemento sensor varía proporcionalmente con la temperatura.

Las temperaturas de operación de este sensor son de  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$  con una precisión de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ .

### Temperatura de Punto de Rocío

Este sensor consiste en un elemento bifilar devanado sobre una tela de fibra de vidrio, la cual es tratada con una solución de sal de cloruro de litio. Cuando el sensor entra en operación, la sal se vuelve conductora y absorbe la humedad del ambiente. La corriente eléctrica calienta el elemento bifilar, entrando en una condición de temperatura tal, que ésta es una función de la humedad contenida en el aire. Esta temperatura es medida por el termistor y es dada como temperatura de punto de rocío.

Las temperaturas de operación de este sensor son de  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$  con una precisión de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ .

### Presión Barométrica

El sensor es un puente medidor de deformación de un diafragma para obtener una presión barométrica en el rango normal. Este diafragma viene protegido con un tubo de 1/4 de pulgada.

El voltaje de excitación es de 10.5 a 24 VDC y el voltaje de señal entregado es de un rango de 2.9008 a 5.3167 VDC correspondiente a 600 a 1100 milibars.

### Precipitación Pluvial

El equipo sensor consiste en una balanza calibrada para obtener 0.25 mm de lluvia en cada inclinación. Viene equipado con un equipo periférico de recolección de lluvia y protección contra el viento y basura.

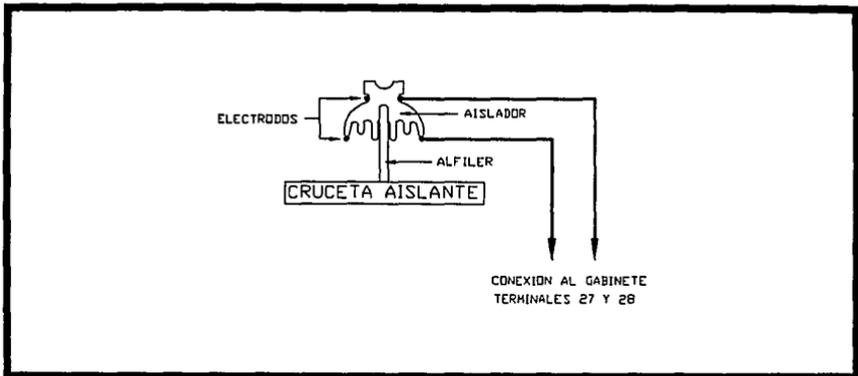
### Resistencia Superficial

El elemento utilizado como sensor es un aislador tipo alfiler clase 55-4, acondicionado con electrodos de malla de cobre recubiertos con pintura de plata.

La resistencia superficial, determinada por la contaminación y humedad depositadas en la superficie del sensor, es medida a través de la aplicación de una tensión de 127 volts entre electrodos y el registro de la corriente circulante (fig. 3.3).

### Flameo

El sensor de flameo consiste en un transformador que sensa el paso de la corriente durante el flameo y la transforma en un pulso de 5 VDC, el cual es

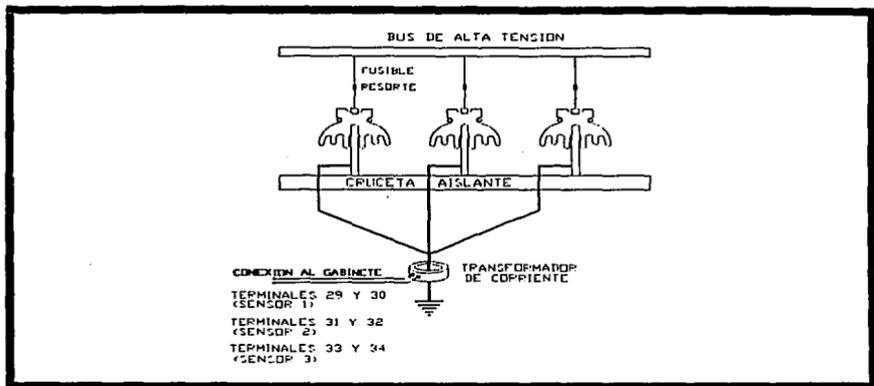


**Fig. A.1 Sensor de resistencia superficial.**

registrado en el sistema de adquisición de datos para marcar el momento de la falla. Puede registrar simultáneamente el flameo de hasta 3 aisladores que se aterricen en el circuito donde se instale el transformador.

Los aisladores del banco de pruebas que se utilizarán para monitorear el flameo, deben ser instalados en crucetas aislantes y aterrizados por medio de un cable que pase por el orificio del transformador de corriente del sensor. Dicho transformador puede ser instalado en cualquier parte del circuito de aterrizamiento y admite hasta 3 señales (fig. 3.4). Tanto el sensor como el módulo fueron diseñados en el IIE.

La estación meteorológica cuenta con una fuente de poder, la cual puede ser alimentada con un voltaje de 115 VCA o directamente con un banco de baterías a 12 volts. Si existe alguna interrupción en el suministro de energía, la fuente



**Fig. A.2 Sensor de Flameo.**

cambiará automáticamente a la alimentación del banco de baterías, y podrá mantener en operación el sistema por un tiempo de 8 horas.

Para un buen desempeño de los sensores meteorológicos, estos deben ser colocados a una altura de 12 metros sobre el nivel del suelo en una área abierta libre de obstáculos como edificios, árboles u otros cuerpos que impidan el libre circulamiento del viento. El resto de los sensores pueden colocarse al mismo nivel que los sensores de viento. De existir algún obstáculo los sensores deben colocarse al menos a 1.5 veces la altura del punto mas alto.

## APÉNDICE B

### DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PREDICCIÓN TMP

El sistema TMP es programa de adquisición de datos de las diferentes variables meteorológicas y de la RS, que realiza la estimación y predicción de esta mediante el algoritmo mínimos cuadrados extendido con proyección vertical. Adicionalmente puede detectar flameos en los aisladores monitoreados. Al acceder el programa TMP, en la parte superior de la pantalla se encuentra el menú principal del sistema, que da acceso a todas sus funciones.

#### Menú ≡

Este Menú es accesado presionando las teclas Alt-espacio y aparece a la izquierda de la barra de menús. Cuando se pulse ≡ se verán las siguientes funciones:

Créditos.- Cuando se seleccione Créditos del menú ≡, un cuadro de diálogo será desplegado mostrando la versión y el copyright del sistema. Para cerrar la ventana presione Esc, espacio, Retorno, o un click en el botón OK.

Calculadora.- La calculadora es una simple función de 4 cálculos; suma, resta, división y multiplicación. Para operarla se puede introducir los datos por teclado o presionando las tecla de esta con el ratón. La 'C' limpia la calculadora, la tecla '^[' borrará el último carácter, y la tecla '±' cambiará el signo del número. (la tecla equivalente de '±' en el teclado es '\_').

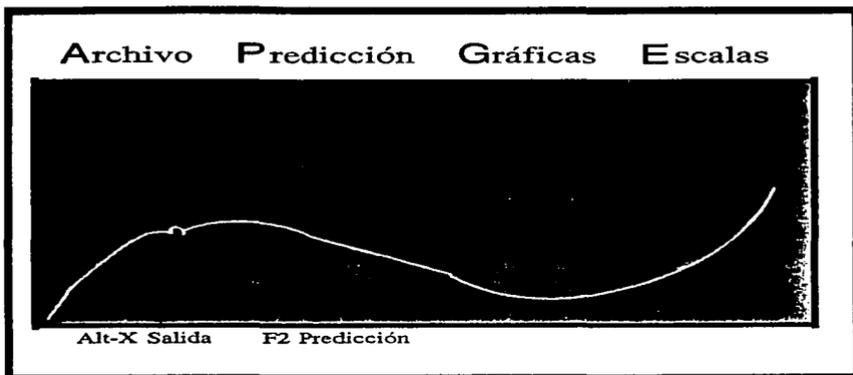


Fig. B.1

Calendario.- El calendario despliega el mes corriente, resaltando el día actual. Se pueden ver los meses siguientes o pasados usando las flechas arriba o abajo respectivamente.

Tabla ASCII.- La tabla de valores ASCII presenta el juego de caracteres para la IBM PC. El carácter corriente es marcado resaltándolo por el cursor. La tabla también contiene los valores decimal y hexadecimal del carácter.

#### Menú Archivo

El menú archivo es accedido mediante las teclas ALT-A. Ofrece las alternativas de inicio y reinicio del sistema de predicción, además de algunas utilerías del DOS.

Inicio del Sistema de Predicción (Ctrl-F9).- Al oprimir esta opción se inicia la captura de datos para la predicción. El período de muestreo es fijo a 5 min. Los

primeros 16 datos serán accedados rápidamente. Cada vez que un evento ocurra, la computadora emitirá un pitido de frecuencia alta indicando el fin de la captura de dato. Después del dato 16, la computadora emitirá un pitido de tono grave, indicando que entra en un proceso de cálculo. Este tiempo de cálculo puede oscilar dependiendo de los valores que se estén capturando. Durante este lapso el sistema **NO PODRÁ REALIZAR NINGUNA ACCIÓN**, sin embargo, guardará en el buffer todas las instrucciones y comandos que se tecleen, por lo que no se recomienda teclear nada durante este tiempo. Al finalizar el tiempo de cálculo, se emitirán una serie de pitidos indicando el final del cálculo del nuevo dato.

#### ADVERTENCIA:

El uso de esta instrucción borrará todos los datos anteriores, ocasionando que el sistema pierda la información de predicción. Los nuevos datos podrán ser vistos a través del menú gráficas. La predicción actual se muestra en el menú predicción.

Reinicio del sistema de predicción (F9).- Si Por alguna causa (falla en el suministro de energía) la computadora pierde el control del sistema, es necesario reiniciar el programa desde DOS. Si se utiliza la opción {inicio del Sist...}, el sistema entenderá que no existen datos anteriores y reescribirá sobre los datos almacenados hasta ese momento. Para evitar esto, después de entrar al sistema tome esta opción y el programa utilizará los archivos de datos anteriores.

Si no existe alguno de los archivos de datos requeridos, el sistema fallará y terminará su ejecución. Por ello verifique la existencia de estos archivos en el directorio corriente mediante la ayuda de visualización de archivos.

Los archivos requeridos son:

- param.tp6
- datos.tp6
- predict.tp6

Visualizar un archivo de Texto (F3).- El comando visualizar un archivo de texto, permite abrir un archivo de texto y ver su contenido sin poder modificarlo. El archivo puede ser seleccionado a través de una ventana de directorio. La ventana de abrir un archivo contiene:

- Una ventana de entrada con una lista de las últimas llamadas.
- Una ventana de archivos para mostrar los archivos en el directorio seleccionado.
- El botón estándar de cancelar.  
El botón de abrir.
- Un panel de información general que describe al archivo seleccionado.

Cambiar de directorio.- Cambia el directorio corriente donde se almacenan los datos.

Salir del sistema (ALT-X).- El comando Exit termina el programa y retorna a DOS

### Menú Predicción

En este menú se muestra la graficación de la predicción actual y datos de la predicción como el número de datos, los índices de desempeño, así como la fecha y hora de inicio. Es accesado mediante las teclas ALT-P.

Gráfica de la predicción (F2).- Grafica la resistencia superficial medida hasta el último muestreo. También presenta la estimación realizada y la predicción a una dos tres y cuatro horas. Esta gráfica puede contener hasta 18 horas de información. Pasadas las cuales, la gráfica se irá recorriendo a la izquierda conforme vayan llegando nuevos datos. La raya amarilla gruesa indica el tiempo actual, La gráfica en rojo indica el valor de la resistencia superficial en K ohms, la gráfica en verde indica la estimación y la gráfica en blanco indica la predicción a 4 horas.

Así mismo, es posible que se presenten eventos de flameo mismos que serán marcados de acuerdo al color mostrado en la parte superior de la pantalla dependiendo del aislador de que se trate. Se puede variar el rango del ej Y de la gráfica mediante el menú ESCALAS.

Datos del sistema (F5) .- En esta ventana se muestra el número de datos que se han recibido, los índices de desempeño de la estimación y la predicción y la fecha y hora de inicio del sistema. El índice de desempeño es dado de 0 a 100.

### Menú Gráficas

Este menú es accesado mediante las teclas ALT-G. Grafica las mediciones de las diferentes variables meteorológicas hasta el último muestreo. Estas gráficas pueden

contener hasta 24 horas de información, pasadas las cuales la gráfica se irá recorriendo a la izquierda conforme vayan llegando nuevos datos.

El rango de la escala en el eje x es fijo, mientras que el rango de la escala en el eje Y puede ser modificado desde un valor mínimo fijo hasta un valor máximo dependiendo de la gráfica que se trate.

Directorio BGI .- Cambia el directorio donde se encuentran los archivos BGI. Estos archivos son necesarios para la graficación de los datos. El directorio por definición es el corriente.

### Escalas de Graficación

En este menú se pueden cambiar el rango de la escala vertical de cualquiera de las gráficas mostradas por el sistema. El rango por definición es el mas grande permitido por el sistema de adquisición. Al cambiar el rango de la escala debe darse el nuevo valor en las unidades especificadas por el sistema. Al cambiar el rango, el valor máximo de la escala variará de acuerdo al cambio del rango, mientras que el valor mínimo de la escala permanecerá fijo. El rango del eje X es fijo. Este menú posee las siguientes funciones:

Escala RS (Ctrl-F2).- Cambia el rango para la graficación de la resistencia superficial. El rango máximo permitido es 10,000. Este rango es dado en K ohms. El valor mínimo de la escala es 5 K ohms. La gráfica se muestra en {predicción actual} del menú {predicción}.

Escala VV.- Cambia el rango para la graficación de la velocidad de viento. El rango máximo permitido es 162. Este rango es dado en Km/hr. El valor mínimo de la escala es 0.

Escala DV.-Cambia el rango para la graficación de la dirección de viento. El rango máximo permitido es 360. Este rango es dado en grados. El valor mínimo de la escala es  $-180^{\circ}$ . Esto significa que un valor medio en la escala señalará al norte, (dirección de los vientos dominantes), por lo tanto valores negativos marcaran una desviación hacia el oeste y valores positivos una desviación hacia el este, ambas desviaciones son tomando como azimut el norte.

Escala T.- Cambia el rango para la graficación de la temperatura ambiental. El rango máximo permitido es 100. Este rango es dado en grados centígrados. El valor mínimo de la escala es  $-50^{\circ}\text{C}$ .

Escala PP.- Cambia el rango para la graficación de la precipitación pluvial. El rango máximo permitido es 360. Este rango es dado en mm de lluvia. El valor mínimo de la escala es 0.

Escala TPR.- Cambia el rango para la graficación de la temperatura de punto de rocío. El rango máximo permitido es 100. Este rango es dado en grados centígrados. El valor mínimo de la escala es  $-50^{\circ}\text{C}$ .

Escala PB.- Cambia el rango para la graficación de la presión barométrica. El rango máximo permitido es 100. Este rango es dado en milibars. La escala mínima es 950 milibars.

Escala Vca.- Cambia el rango para la graficación de el voltaje. El rango máximo permitido es 255. Este rango es dado en Volts.

En cualquier parte del sistema se puede recurrir al menú de AYUDA mediante la tecla F1. Este menú está formado en forma anidada de tal manera que se puede saltar a los tópicos relacionados con la ayuda solicitada.