

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



**PROCESADOR DE INFORMACION  
GENERALIZADO PARA LA SUPERVISION EN  
TIEMPO REAL DE SISTEMAS DE  
POTENCIA DEBILES**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN INGENIERIA ELECTRICA**

**P R E S E N T A :**

**FERNANDO MANUEL BETANCOURT RAMIREZ**

**MONTERREY, N. L.**

**DICIEMBRE, 1993**

PROCESADOR DE INFORMACION  
GENERALIZADO PARA LA SUPERVISION EN  
TIEMPO REAL DE SISTEMAS DE  
POTENCIA DEBILES

IME  
TD  
TK3001  
B47  
c.1  
1993

24



1080072479

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**



**PROCESADOR DE INFORMACION GENERALIZADO PARA LA SUPERVISION  
EN TIEMPO REAL DE SISTEMAS DE POTENCIA DEBILES**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN INGENIERIA ELÉCTRICA**

**PRESENTA**

**FERNANDO MANUEL BETANCOURT RAMIREZ**

**MONTERREY, N. L.**

**DICIEMBRE, 1993**

TD  
TK3001  
B 7



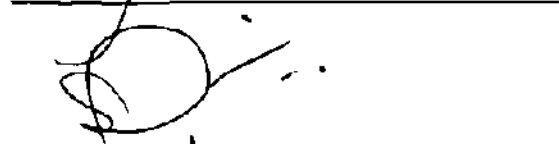
**PROCESADOR DE INFORMACION GENERALIZADO PARA LA  
SUPERVISION EN TIEMPO REAL DE SISTEMAS DE POTENCIA  
DEBILES**

Los miembros del Comité aprueban la Tesis  
Doctoral de Fernando Manuel Betancourt Ramírez

Dr. Florencio Aboytes García  
Asesor



Dr. Salvador Acha Daza



Dr. José Manuel Cañedo Castañeda



Dr. Oscar Leonel Chacón Mondragón



Dr. Joaquín Collado Moctezuma



Dedicado con todo amor a mi FAMILIA porque ellos han sido siempre la inspiración para concluir las metas que me he fijado.

## Agradecimientos

*Con reconocimiento especial a mi asesor el Dr. Florencio Aboytes García por su acertada y perseverante dirección de este trabajo.*

A los profesores del Programa Doctoral que contribuyeron a mi formación como investigador.

A los compañeros Carlos Pérez, Alberto Avalos y Luis Aréchiga por su colaboración en la implementación computacional de este trabajo.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, cuya paciencia y apoyo decidido siempre me estimuló en la persona del Ing. José Antonio Gonzalez Treviño. Director de esta facultad.

A la Comisión Federal de Electricidad por el apoyo prestado a través de la paciente presencia del Ing. Eduardo Meraz Ateca para realizar con éxito esta investigación.

Al Sistema Nacional de Investigadores por el apoyo prestado a través del estímulo otorgado.



## **RESUMEN**

### **PROCESADOR DE INFORMACION GENERALIZADO PARA LA SUPERVISION EN TIEMPO REAL DE SISTEMAS DE POTENCIA DEBILES**

Publicación No. \_\_\_\_\_

Fernando Manuel Betancourt Ramírez, Dr. en Ing.

Universidad Autónoma de Nuevo León, 1993

Profesor Asesor: Dr. Florencio Aboytes García

El tema central de la tesis es la implantación y prueba de algoritmos, así como el análisis de las técnicas utilizadas en el procesamiento de información en tiempo real en un sistema eléctrico de potencia. El trabajo incluye una revisión general del problema de estimación de estado en redes eléctricas, describiendo cada uno de los módulos que integran el proceso de validación de información utilizado en los centros de control.

En el desarrollo de la tesis se trata el tema de propagación de errores anormales en el proceso de estimación de estado, detallando el impacto de diversos factores y su efecto en la detección e identificación de los mismos. Otro aspecto importante que se presenta en el trabajo es la evaluación de resultados del procesador de información en el caso de utilizar equipos de medición con baja precisión. También se analiza el problema de errores anormales múltiples, mostrando alternativas eficientes para la detección e identificación de los mismos.

La parte central del trabajo se desarrolla utilizando la técnica de mínimos

cuadrados ponderados. Sin embargo, también se describen otras formulaciones para el problema de estimación, señalando las características más relevantes de estas técnicas alternas. En la última sección de la tesis se presenta una metodología generalizada, que puede ser aplicada para el procesamiento de información en sistemas de potencia con baja redundancia en mediciones y baja precisión en la información, condiciones comunes en sistemas de potencia débiles.

El procesador de información desarrollado se encuentra preparado para enfrentar la problemática de errores múltiples en sistemas de potencia. Así mismo, el procesador presenta alternativas para identificar mediciones críticas y puntos de apalancamiento en el esquema de medición del sistema.

## Indice

	Pág.
<b>Agradecimientos</b> .....	iv
<b>Resumen</b> .....	v
<b>Lista de figuras</b> .....	xvi
<b>Lista de tablas</b> .....	xiii

### Capítulos

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	
1.1	Motivación .....	1
1.2	Procesador de Información en tiempo real .....	2
1.3	Resumen histórico .....	5
1.4	Aspectos importantes .....	8
1.5	Supervisión de la red de potencia .....	9
1.6	Procesador de topología de la red .....	10
1.7	Estimador de estado .....	13
	1.7.1 Formulación desacoplada rápida del estimador de estado .....	14
1.8	Observabilidad de la red .....	17
	1.8.1 Observabilidad topológica .....	18
	1.8.2 Observabilidad numérica .....	20
	1.8.2.1 Algoritmo de observabilidad .....	21
	1.8.2.2 Restablecimiento de observabilidad .....	22
	1.8.3 Ubicación de mediciones .....	23
1.9	Inyecciones cero .....	23
	1.9.1 Ecuaciones básicas de restricciones de igualdad .....	24
1.10	Detección de información anormal .....	26
	1.10.1 Detectabilidad e identificabilidad de datos anormales .....	27

## Índice (continuación)

1.10.2	Pruebas estadísticas para la detección e identificación de datos anormales individuales .....	28
1.11	Estructura de la tesis .....	31
1.12	Aportaciones .....	33
<b>2</b>	<b>Propagación de errores anormales en el proceso de estimación de estado</b>	
2.1	Ecuaciones de medición .....	36
2.2	Valores esperados .....	36
2.3	Variancias .....	38
2.4	Sesgo en mediciones .....	39
2.5	Análisis de datos anormales .....	40
2.6	Mediciones críticas .....	41
2.7	Propagación de errores en mediciones .....	43
2.8	Casos de estudio .....	43
	Caso 1. Línea de 400 KV.( $20\sigma$ en P) .....	46
	Caso 2. Línea de 230 KV.( $20\sigma$ en P) .....	48
	Caso 3. Línea de 400 KV.( $20\sigma$ en Q) .....	51
	Caso 4. Línea de 400 KV.( $50\sigma$ en P) .....	53
	Caso 5. Línea de 400 KV.( $20\sigma$ en P y Q) .....	55
	Caso 6. Voltaje 230 KV ( $20\sigma$ ) .....	59
	Caso 7. Sesgo de una medición entre mediciones verdaderas .....	61
2.9	Análisis de la propagación de errores .....	65
<b>3</b>	<b>Impacto de la calidad de la información en el estimador de estado</b>	
3.1	Procesador de información .....	68
3.2	Mediciones en el proceso de estimación .....	69
	3.2.1 Análisis de errores .....	69
	3.2.2 Ponderación de mediciones .....	70

## Índice (continuación)

3.3	Calidad de información y modelado de la precisión del equipo de medición .....	71
3.3.1	Casos de estudio .....	71
	Caso 1 ( base ) .....	71
	Caso 2. Modelación con error máximo del 2.5% .....	77
	Caso 3. Modelación con error máximo del 5% .....	79
	Caso 4. Error máximo del 5% en mediciones de voltaje .....	84
	Caso 5. Medición de voltaje con baja calidad .....	85
	Caso 6. Prueba de detección con baja calidad en información .....	86
3.4	Análisis global de resultados .....	88
<b>4</b>	<b>Procesamiento de errores anormales múltiples en un estimador de estado</b>	
4.1	Detección de mediciones anormales .....	91
4.2	Estimación de Errores de medición .....	92
4.3	Identificación por pruebas de hipótesis ( HTI ) .....	93
4.3.1	Prueba de hipótesis para errores estimados .....	94
4.3.2	Algoritmo .....	94
4.3.3	Casos de estudio .....	95
	Caso 4.3.3.1. Error de $20\sigma$ en REC-FRO-400,VDG-FRO-400, REC 400/230 Y FRO 230/400 .....	96
	Caso 4.3.3.2. Se retiran REC-FRO-400 Y REC 400/230 .....	98
	Caso 4.3.3.3. Se retira VDG-FRO-400 .....	99
4.4	Identificación de errores múltiples con un algoritmo de estimación-identificación .....	100
4.4.1	Descripción matemática de la formulación .....	100
4.4.2	Corrección de la estimación de estado .....	101
4.4.3	Casos de estudio .....	102

## Índice (continuación)

Caso 4.4.3.1. Se retiran REC-FRO-400, VDG-FRO-400 y REC 400/230 .....	102
Caso 4.4.3.2. Se retira FRO 230/400 .....	103
4.5 Identificación mediante compensación y cálculo lineal de residuales .....	104
4.5.1 Compensación de mediciones .....	105
4.5.2 Cálculo lineal de residuales en mediciones .....	106
4.5.3 Análisis estadístico de los errores estimados en mediciones compensadas .....	106
4.5.4 Algoritmo formal .....	107
4.5.5 Casos de Estudio .....	108
Caso 4.5.1. Error en REC-FRO-400, VDG-FRO-400, REC 400/230 Y FRO 230/400 .....	108
4.6 Errores en la posición del tap en transformadores .....	111
4.6.1 Estimación del tap mediante el sesgo de mediciones .....	111
4.6.1.1 Proceso de cálculo .....	112
Caso 4.6.1. Error en el tap del transformador VDG 400/230 .....	113
Caso 4.6.2. Error en el flujo y tap de transformador REC 400/230 .....	114
4.6.2 Tap de transformadores como variable de estado .....	115
Caso 4.6.3. Error de tap en transformador VDG 400/230 .....	117
Caso 4.6.4. Error de flujo y tap en transformador VDG 400/230 .....	118
Caso 4.6.5. Cancelación virtual de medición de tap en VDG 400/230 .....	118
Caso 4.6.6. Cancelación virtual de medición de flujo VDG 400/230 .....	119
4.7 Análisis final .....	120
<b>5 Conceptos de técnicas alternas para la estimación de estado</b>	
5.1 Conceptos importantes .....	122
5.1.1 Puntos de apalancamiento .....	123

## Índice (continuación)

5.1.2	Ejemplo Ilustrativo .....	127
5.1.3	Caso de prueba 1 Sistema sin puntos de apalancamiento .....	130
5.1.4	Caso de prueba 2 Sistema con punto de apalancamiento .....	131
5.1.5	Caso de prueba 3 Utilización de ponderaciones .....	132
5.1.6	Caso de prueba 4 Mediciones críticas .....	133
5.2	Estimador de estado mediante programación lineal .....	134
5.2.1	Detección de errores del estimador LP .....	137
5.2.2	Identificación de errores anormales .....	140
5.2.3	Algoritmo LP .....	142
5.2.4	Comentarios sobre el algoritmo .....	143
5.3	Estimador de mínima mediana cuadrada (MMC) .....	144
5.3.5	Algoritmo para el estimador de mínima mediana cuadrada (MMC) .....	145
5.3.6	Selección de las muestras .....	146
5.3.7	Observaciones importantes .....	146
5.4	Aspectos relevantes de las formulaciones .....	147
<b>6</b>	<b>Procesador de información</b>	
6.1	Procesador de información en tiempo real .....	151
6.1.1	Variables de entrada .....	153
6.1.2	Variables de salida .....	153
6.1.3	Preprocesamiento de información .....	154
6.1.4	Configurador .....	155
6.1.5	Observador .....	157
6.1.5.1	Observabilidad de la red .....	157
6.1.5.2	Observabilidad de taps .....	158
6.1.6	Estimador .....	159
6.1.7	Detector .....	161

## Índice (continuación)

6.1.8	Identificador .....	162
6.2	Detección e identificación de datos anormales .....	163
6.3	Algoritmo generalizado de identificación de datos anormales .....	164
6.4	Casos de estudio .....	167
6.5	Caso base .....	168
	Caso 1. Medición anormal en el flujo REC-NAV-230 .....	171
	Caso 2. Medición anormal en el flujo MON-FRO-230 .....	172
	Caso 3. Medición anormal en el flujo REC-FRO-400 .....	174
	Caso 4. Medición anormal en el flujo REC-FRO-400 con inyección cero .....	176
6.6	Comentarios finales .....	179
6.6.1	Índice estadístico J .....	180
6.6.2	Sintonización del estimador .....	180
6.6.3	Estimación de voltajes .....	181
6.6.4	Observabilidad .....	181
7	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	
7.1	Conclusiones .....	183
7.1.1	Conclusiones sobre propagación de errores anormales .....	183
7.1.2	Conclusiones sobre el impacto de la calidad de la información ....	184
7.1.3	Conclusiones sobre procesamiento de errores anormales múltiples .....	185
7.1.4	Conclusiones sobre el análisis de técnicas alternas .....	186
7.1.5	Conclusiones sobre procesador de información generalizado .....	187
7.2	Recomendaciones para trabajos futuros .....	189
	Referencias .....	191
	Apéndice A .....	200
	Apéndice B .....	205
	Apéndice C .....	209



## LISTA DE TABLAS

1.1	Disposición de la topología inicial de la red .....	11
2.1	Esquema de medición en el ACNE .....	45
2.1.1	Caso 1. Residuos normalizados, Línea de 400 KV (20 G en P) .....	46
2.1.2	Caso 1. Residuos sencillos .....	47
2.1.3	Caso 1. Columnas de matrices de sensibilidad .....	47
2.2.1	Caso 2. Residuales normalizados, Línea de 230 KV (20 G en P) .....	49
2.2.2	Caso 2. Residuales simples .....	50
2.2.3	Caso 2. Columnas de matrices de sensibilidad .....	50
2.3.1	Caso 3. Residuales normalizados, Línea de 400 KV (20 G en Q) .....	51
2.3.2	Caso 3. Residuales simples .....	52
2.3.3	Caso 3. Columnas de matrices de sensibilidad .....	52
2.4.1	Caso 4. Residuales normalizados, Línea de 400 (20 G en P) .....	54
2.4.2	Caso 4. Residuales simples .....	54
2.4.3	Caso 4. Columnas de matrices de sensibilidad .....	55
2.5.1	Caso 5. Residuales normalizados (P), Línea de 400 (50 G en P) .....	56
2.5.2	Caso 5. Residuales simples (P) .....	56
2.5.3	Caso 5. Columnas de matrices de sensibilidad .....	57
2.6.1	Caso 5. Residuales normalizados (Q), Línea de 400 KV (20 G en P y Q) .....	57
2.6.2	Caso 5. Residuales simples (Q) .....	58
2.6.3	Caso 6. Columnas de matrices de sensibilidad (Q) .....	59
2.7.1	Caso 6. Residuales Normalizados (V, Q) .....	60
2.7.2	Caso 6. Residuales simples (V, Q) .....	60
2.7.3	Caso 6. Columnas de matrices de sensibilidad (V, Q) .....	61
2.8.1	Caso 7. Mediciones activas. ....	62
2.8.2	Caso 7. Mediciones activas .....	62

## Lista de Tablas (continuación)

2.8.3	Caso 7. Mediciones activas .....	63
2.9.1	Caso 7. Mediciones reactivas .....	63
2.9.2	Caso 7. Mediciones reactivas .....	64
2.9.3	Caso 7. Mediciones reactivas .....	65
3.1V	Voltajes (KV) .....	74
3.1F	Flujos de potencia .....	75
3.1D	Desviación estándar de flujos de potencia .....	76
3.2F	Flujos de potencia .....	78
3.2V	Voltajes (KV) .....	79
3.3F	Flujos de potencia .....	81
3.3V	Voltajes (KV) .....	82
3.3D	Desviación estándar de flujos de potencia .....	83
3.4V	Voltajes .....	84
3.5	Identificación de errores anormales con respecto a la calidad de información .....	87
4.1	Caso 4.3.3.1 Resultados estadísticos .....	97
4.2	Caso 4.3.3.1 Análisis final .....	97
4.3	Caso 4.3.3.2 Resultados estadísticos .....	98
4.4	Caso 4.3.3.2 Análisis final .....	98
4.5	Caso 4.3.3.3 Resultados estadísticos .....	99
4.6	Caso 4.3.3.3 Análisis final .....	99
4.7	Caso 4.4.3.1 Análisis final .....	102
4.8	Caso 4.4.3.2 Análisis final .....	103
4.9	Flujos de potencia .....	104
4.10	Caso 4.5.1 Resultados estadísticos .....	109
4.11	Caso 4.5.1 Resultado final .....	110
4.12	Transformador VDG 400/230 .....	113
4.13	Transformador REC 400/230 flujo y tap en error .....	114

### Lista de Tablas (continuación)

4.14	Transformador VDG 400/230 con error de tap .....	117
4.15	Transformador VDG 400/230 con error de tap .....	118
4.16	Transformador VDG 400/230 con error en tap .....	119
4.17	Transformador VDG 400/230 con error de tap .....	120
6.1	Flujos medidos y estimados ( $M_w$ $M_{VAR}$ ) caso base .....	170
6.2	Residuales normalizados activos. Lectura REC-NAV-230 anormal ....	172
6.3	Residuales normalizados reactivos. Lectura REC-NAV-230 anormal ..	173
6.4	Flujos medidos y estimados( $M_w$ $M_{VAR}$ ). Lectura MON-FRO-230 anormal	175
6.5	Residuales normalizados activos. Lectura REC-FRO-400 anormal ....	176
6.6	Residuales normalizados reactivos. Lectura REC-FRO-400 anormal ..	177
6.7	Residuales normalizados activos. REC-FRO-400 anormal con .....	
	inyección cero en FRO-400 .....	178
6.8	Residuales normalizados reactivos. Lectura REC-FRO-400 anormal con medición de inyección activa cero en barra FRO-400 .....	179
C.1	Matriz de sensibilidad típica activa .....	210
C.2	Matriz de sensibilidad típica reactiva .....	215

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Procesador de información .....	3
1.2	Esquema interruptor-sección de barra del Sistema de Potencia	10
1.3	Esquema nodo-rama del Sistema de Potencia .....	12
2.1	Esquema de medición en la zona Coahuila .....	44
3.1	Esquema de medición en la zona Coahuila .....	73
4.1	Esquema de medición en la zona Coahuila .....	96
5.1	Caso de prueba .....	128
6.1	Procesador de información en tiempo real .....	152
6.2	Modelo T para un transformador de tres devanados .....	159
6.3	Algoritmo generalizado de detección e identificación de datos anormales .....	165
6.4	Esquema de medición en el Area de Control Noreste .....	168
A.1	Esquema unifilar con tres clases equivalentes .....	202
A.2	Esquema unifilar de un sistema de potencia con mediciones .....	203
B.1	Zona del Area de Control Noreste en CFE .....	206