

**MODELADO Y SIMULACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE ESTADO DE LAS  
COMPONENTES ARMÓNICAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE  
ENERGÍA ELÉCTRICA**

**JESÚS FERNANDO CASTRO TORRES  
KEVIN FABIÁN MELO ROJAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2016**

**MODELADO Y SIMULACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE ESTADO DE LAS  
COMPONENTES ARMÓNICAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE  
ENERGÍA ELÉCTRICA**

**JESÚS FERNANDO CASTRO TORRES  
KEVIN FABIÁN MELO ROJAS**

**Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electricista**

**Director:  
JAIRO BLANCO SOLANO  
Magister en Ingeniería Eléctrica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2016**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	22
<b>1. GENERALIDADES DEL PROYECTO</b> .....	24
1.1. ANTECEDENTES .....	24
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	24
1.3 MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN .....	26
1.4 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO .....	27
1.5 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO .....	27
<b>2. METODOLOGÍAS PROPUESTAS I</b> .....	29
2.1 INTRODUCCIÓN A LA ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO (HSE) .....	29
2.2 METODOLOGÍAS ESTUDIADAS BASADAS EN LA ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN .....	32
2.3 CONCLUSIONES DE LAS METODOLOGÍAS ESTUDIADAS .....	32
2.4 INTRODUCCIÓN A LA METODOLOGÍA SELECCIONADA COMO OBJETO DE ESTUDIO .....	36
<b>3. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO</b> .....	40
3.1 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA EN EL SOFTWARE DE ATP .....	42
3.2 UBICACIÓN DE MEDIDORES DE CORRIENTE Y TENSIÓN EN EL DIAGRAMA DE ATP .....	43
3.3 PROCESO DE INYECCIÓN DE COMPONENTES ARMÓNICOS Y EXTRACCIÓN DE DATOS DEL SOFTWARE ATP .....	43

3.3.1 Selección de corrientes para un sistema con medidores en todos los nodos del sistema .....	48
3.3.2 Selección de corrientes para un sistema con menos medidores que nodos	48
3.4 CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ <b>Ybarra</b> POR EL MÉTODO DE SIMPLE INSPECCIÓN USANDO MATLAB .....	49
3.5 CÁLCULO DE LA MATRIZ <b>Zbarra</b> A PARTIR DE LA MATRIZ <b>Ybarra</b> USANDO SVD Y EL SOFTWARE MATLAB .....	50
3.6 CÁLCULO DE LAS MATRICES <b>Zbarra</b> ( <i>i</i> ) ARMÓNICAS USANDO EL SOFTWARE DE MATLAB .....	53
3.7 CONSTRUCCIÓN DE UNA sub-matriz <b>Ybarra</b> DONDE HAY MENOR NÚMERO DE MEDIDORES QUE NODOS.....	54
3.8 CÁLCULO DE LA MATRIZ <b>Zbarra</b> A PARTIR DE LA MATRIZ <b>Ybarra</b> USANDO SVD Y EL SOFTWARE DE MATLAB CUANDO HAY MENOR NUMERO DE MEDIDORES QUE NODOS EN EL SISTEMA.....	55
3.9 CÁLCULO DE LAS MATRICES <b>Zbarra</b> ( <i>i</i> ) ARMÓNICAS USANDO EL SOFTWARE DE MATLAB CUANDO HAY MENOR NUMERO DE MEDIDORES QUE NODOS EN EL SISTEMA .....	57
3.10 ESTIMACIÓN DE ESTADO EN UN SISTEMA DE POTENCIA MEDIANTE MATLAB .....	58
3.11 VALIDACIÓN VISUAL DE RESULTADOS .....	59
3.11.1 Estimación de tensiones para un sistema con medidores en todos lo s nodos del sistema .....	59
3.11.2 Estimación de tensiones para un sistema con menor número de medidores que de nodos .....	63
3.12 CORRECCIÓN DE DATOS ESTIMADOS MEDIANTE MATLAB .....	64
3.13 PRUEBAS CON DIFERENTE NÚMERO DE MEDIDORES Y AJUSTE DE LA ESTIMACIÓN USANDO MATLAB.....	72
3.14 ERROR RELATIVO PORCENTUAL CON EXCEL .....	82
3.15 ANÁLISIS Y CONCLUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS .....	88

<b>4. APLICACIÓN DE LA ESTIMACIÓN ARMÓNICA EN UN SISTEMA REPORTADO POR LA IEEE</b> .....	90
4.1 ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO PARA UN SISTEMA DE TREINTA Y DOS BARRAS COMPLETAMENTE DETERMINADO .....	90
4.1.1 Cálculo de la matriz [ <b>Ybarra</b> ] para el sistema de 32 barras completamente determinado .....	90
4.1.2 Aplicación de SVD a las matrices <b>Ybarra</b> .....	91
4.1.3 Cálculo de <b>Zbarra</b> .....	91
4.1.4 Corrientes inyectadas .....	91
4.1.4.1 <i>Iinyectada</i> = .....	92
4.1.5 Estimación de tensiones armónicas.....	93
4.1.5.1 Graficas de <b>Vbarra</b> (1).....	94
4.1.5.2 Graficas de <b>Vbarra</b> (3).....	95
4.1.5.3 Graficas de <b>Vbarra</b> (5).....	96
4.1.5.4 Graficas de <b>Vbarra</b> (7).....	97
4.1.5.5 Graficas de <b>Vbarra</b> (9).....	98
4.1.6 Análisis para selección de la cantidad mínima de medidores en la estimación optima de estado armónico en el sistema de 32 barras sub-determinado.....	99
4.1.6.1 Análisis de resultados para diferentes cantidades de medidores .....	99
4.1.7.2. Conclusión al análisis de los resultados .....	120
4.2 ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO SUB-DETERMINADO PARA UN SISTEMA DE TREINTA Y DOS BARRAS CON 20 MEDIDORES.....	120
4.2.1 Selección de la sub-matriz <b>Ybarra</b> para el sistema de 32 barras sub-determinado.....	121
4.2.2 Aplicación de SVD a las matrices de <b>Ybarra</b> .....	121

4.2.3 Cálculo de $Z_{\text{barra}} - \text{sub}$ .....	121
4.2.4 Corrientes inyectadas .....	122
4.2.4.1 <i>Iinyectadas</i> .....	122
4.2.5 Coeficientes de corrección $k_j$ para análisis de estimación .....	123
4.2.6 Estimación de las tensiones armónicas .....	123
4.2.6.1 Grafica de $V_{\text{barra}} - \text{sub}(1)$ .....	124
4.2.6.2 Grafica de $V_{\text{barra}} - \text{sub}(3)$ .....	125
4.2.6.3 Cálculo de $V_{\text{barra}} - \text{sub}(5)$ .....	126
4.2.6.4 Cálculo de $V_{\text{barra}} - \text{sub}(7)$ .....	127
4.2.6.5 Cálculo de $V_{\text{barra}} - \text{sub}(9)$ .....	128
4.2.7 Análisis general de los resultados de los casos de estudio .....	129
<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	<b>132</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>135</b>
<b>BIBLIOIGRAFIA</b> .....	<b>138</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>141</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Marco de estimación de estado armónico. [5]. .....	31
Figura 2. Diagrama de la metodología propuesta, para la estimación de estado armónico. ....	41
Figura 3. Sistema con una tensión de línea de 13200 [V].....	42
Figura 4 Diagrama del sistema de 6 barras en ATP Draw. ....	43
Figura 5 Compilación en ATP-Draw de la simulación para el sistema de 6 barras.....	44
Figura 6 Ventana de medidores ubicados en el sistema. ....	45
Figura 7 Opciones Fourier para la extracción de datos de ATPDraw. ....	46
Figura 8 Copia de datos de ATP-Draw. ....	47
Figura 9 Datos extraídos de ATP-Draw en una hoja de Excel. ....	47
Figura 10 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico.....	61
Figura 11 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico.....	61
Figura 12 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico .....	62
Figura 13 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico .....	62
Figura 14 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD y los datos reales extraídos de ATP para el noveno orden armónico .....	63
Figura 15 Ventana de la herramienta optimtool de Matlab .....	69
Figura 16 Ventana de exportación de datos al workspace .....	70

Figura 17 Visualización de datos en la ventana workspace.....	71
Figura 18 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico con dos medidores.....	75
Figura 19 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico con tres medidores .....	75
Figura 20 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico con cuatro medidores .....	76
Figura 21 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico con dos medidores.....	76
Figura 22 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico con tres medidores .....	77
Figura 23 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico con cuatro medidores .....	77
Figura 24 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico con dos medidores.....	78
Figura 25 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico con tres medidores .....	78
Figura 26 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico con cuatro medidores .....	79
Figura 27 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico con dos medidores.....	79
Figura 28 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico con tres medidores .....	80

Figura 29 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico con cuatro medidores .....	80
Figura 30 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el Noveno orden armónico con dos medidores.....	81
Figura 31 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el Noveno orden armónico con tres medidores .....	81
Figura 32 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el Noveno orden armónico con cuatro medidores .....	82
Figura 33 Grafica del error relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el primer orden armónico. ....	83
Figura 34 Grafica del error relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el tercer orden armónico. ....	83
Figura 35 Grafica del error relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el quinto orden armónico.....	84
Figura 36 Grafica del error relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el séptimo orden armónico. ....	84
Figura 37 Grafica del error relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el noveno orden armónico.....	85
Figura 38 Grafica de errores relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el primer orden armónico con diferentes medidores ....	85
Figura 39 Grafica de errores relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el tercer orden armónico con diferentes medidores .....	86
Figura 40 Grafica de errores relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el quinto orden armónico con diferentes medidores.....	86
Figura 41 Grafica de errores relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el séptimo orden armónico con diferentes medidores..	87
Figura 42 Grafica de errores relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el noveno orden armónico con diferentes medidores...	87

Figura 43 Esquema del sistema de 32 barras reportado por la IEEE .....	90
Figura 44 Grafica comparativa del valor obtenido con SVD el corregido por $K(j)$ y el real dado por ATP para el primer orden armónico .....	94
Figura 45 Grafica del error relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el primer orden armónico. ....	95
Figura 46 Grafica comparativa del valor obtenido con SVD el corregido por $K(j)$ y el real dado por ATP para el tercer orden armónico .....	95
Figura 47 Grafica del error relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el tercer orden armónico. ....	96
Figura 48 Grafica comparativa del valor obtenido con SVD el corregido por $K(j)$ y el real dado por ATP para el quinto orden armónico.....	96
Figura 49 Grafica del error relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el quinto orden armónico.....	97
Figura 50 Grafica comparativa del valor obtenido con SVD el corregido por $K(j)$ y el real dado por ATP para el séptimo orden armónico .....	97
Figura 51 Grafica del error relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el séptimo orden armónico. ....	98
Figura 52 Grafica comparativa del valor obtenido con SVD el corregido por $K(j)$ y el real dado por ATP para el noveno orden armónico.....	98
Figura 53 Grafica del error relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el noveno orden armónico.....	99
Figura 54 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico con 15 medidores .....	100
Figura 55 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico con 16 medidores .....	101
Figura 56 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico con 17 medidores .....	101

Figura 57 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico con 18 medidores .....	102
Figura 58 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico con 19 medidores .....	102
Figura 59 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico con 20 medidores .....	103
Figura 60 Grafica de errores relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el primer orden armónico con diferentes medidores ..	103
Figura 61 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico con 15 medidores .....	104
Figura 62 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico con 16 medidores .....	105
Figura 63 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico con 17 medidores .....	105
Figura 64 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico con 18 medidores .....	106
Figura 65 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico con 19 medidores .....	106
Figura 66 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico con 20 medidores .....	107
Figura 67 Grafica de errores relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el tercer orden armónico con diferentes medidores ...	107
Figura 68 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico con 15 medidores .....	108

Figura 69 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico con 16 medidores .....	109
Figura 70 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico con 17 medidores .....	109
Figura 71 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico con 18 medidores .....	110
Figura 72 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico con 19 medidores .....	110
Figura 73 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico con 20 medidores .....	111
Figura 74 Grafica de errores relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el quinto orden armónico con diferentes medidores...	111
Figura 75 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico con 15 medidores .....	112
Figura 76 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico con 16 medidores .....	113
Figura 77 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico con 17 medidores .....	113
Figura 78 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico con 18 medidores .....	114
Figura 79 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico con 19 medidores .....	114

Figura 80 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico con 20 medidores .....	115
Figura 81 Grafica de errores relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el séptimo orden armónico con diferentes medidores	115
Figura 82 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el noveno orden armónico con 15 medidores .....	116
Figura 83 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el noveno orden armónico con 16 medidores .....	117
Figura 84 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el noveno orden armónico con 17 medidores .....	117
Figura 85 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el noveno orden armónico con 18 medidores .....	118
Figura 86 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el noveno orden armónico con 19 medidores .....	118
Figura 87 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el noveno orden armónico con 20 medidores .....	119
Figura 88 Grafica de errores relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el séptimo orden armónico con diferentes medidores	119
Figura 89 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico con 20 medidores .....	124
Figura 90 Errores del primer armónico para un sistema sub-determinado de 32 barras.....	125
Figura 91 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico con 20 medidores .....	125

Figura 92 Errores del tercer armónico para un sistema sub-determinado de 32 barras.....	126
Figura 93 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico con 20 medidores .....	126
Figura 94 Errores del quinto armónico para un sistema sub-determinado de 32 barras.....	127
Figura 95 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico con 20 medidores .....	127
Figura 96 Errores del séptimo armónico para un sistema sub-determinado de 32 barras.....	128
Figura 97 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el noveno orden armónico con 20 medidores .....	128
Figura 98 Errores del noveno armónico para un sistema sub-determinado de 32 barras.....	129

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 corrientes extraídas para el sistema de 6 barras con 6 medidores. ....	48
Tabla 2 corrientes armonicas correspondientes a un sistema con 3 medidores en los nodos 1, 3, 5.....	49
Tabla 3 Matriz $Y_{barra}$ para el primer orden armónico en el sistema de 6 barras.....	49
Tabla 4 Matriz $U(1)$ .....	51
Tabla 5 Matriz $V(1)$ .....	52
Tabla 6 Matriz $W(1)$ .....	52
Tabla 7 Matriz $Z_{barra}(1)$ . ....	53
Tabla 8 Matriz $Z_{barra}(3)$ .....	54
Tabla 9 Matriz $Y_{barra}(1)$ con 3 medidores en los nodos 1, 3, 5. ....	55
Tabla 10 Matriz $U(1)$ .....	56
Tabla 11 Matriz $V(1)$ .....	56
Tabla 12 Matriz $W(1)$ .....	56
Tabla 13 Matriz $Z_{barra} - sub(1)$ .....	57
Tabla 14 Matriz $Z_{barra} - sub(3)$ .....	58
Tabla 15 tensiones estimadas para el primer armónico en un sistema de 6 barras y 6 medidores .....	59
Tabla 16 comparación de las tensiones estimadas para el primer armónico en un sistema de 6 barras y 6 medidores con los datos extraídos de ATP .....	60
Tabla 17 comparación de las tensiones estimadas para el primer armónico en un sistema de 6 barras y 3 medidores con los datos extraídos de ATP .....	64

Tabla 18 Variables $K_j$ para el sistema de 6 barras con 3 medidores.....	72
Tabla 19 tensiones estimadas y corregidas usando dos medidores en el sistema de 6 barras para el primer orden armónico.....	73
Tabla 20 tensiones estimadas y corregidas usando tres medidores en el sistema de 6 barras para el primer orden armónico.....	73
Tabla 21 tensiones estimadas y corregidas usando cuatro medidores en el sistema de 6 barras para el primer orden armónico.....	74
Tabla 22 Vectores <i>Iinyectada</i> .....	92
Tabla 23 Vectores <i>Iinyectadas</i> .....	122
Tabla 24 Variables $k$ para el sistema sub-determinado de 32 barras con 20 medidores .....	123

## RESUMEN

**TÍTULO:** MODELADO Y SIMULACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE ESTADO DE LAS COMPONENTES ARMÓNICAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA\*.

**AUTORES:** JESÚS FERNANDO CASTRO TORRES  
KEVIN FABIÁN MELO ROJAS\*\*.

**PALABRAS CLAVES:** componentes armónicas, estimación de estado armónico, sistemas de distribución, descomposición en valores singulares.

### **D DESCRIPCIÓN:**

Este trabajo se enfoca en el estudio de los modelos matemáticos más usados en estimación de estado armónico y la forma como se aplican, con el fin de seleccionar el mejor estimador y aplicarlo a sistemas de distribución de energía eléctrica, realizando una evaluación de su desempeño al usarlo sobre un sistema base reportado por la IEEE, en el que se incluyen fuentes de inyecciones de corriente armónica con ubicaciones aleatorias. En la modificación del sistema se utilizan modelos de uso generalizado en estudios de calidad de la energía, como el horno de arco [1], que es un modelo de inyección de corrientes que destaca por el alto índice de contaminación armónica que produce. El desarrollo inicia con un análisis general del comportamiento de los modelos encontrados, en el que se visualiza la inyección de corriente de cada modelo en el software ATP-EMTP y su herramienta ATPDraw, extrayendo los datos de tensión armónica en el sistema para luego compararlos con los resultados obtenidos por medio del método de estimación de estado armónico escogido para dar solución a este problema; Posteriormente se realiza un análisis detallado de los datos en caso de tener un sistema completamente determinado, y sub-determinado, luego se comparan los resultados con los valores obtenidos en la simulación de ATP-EMTP.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: MIE. Jairo Blanco Solano.

## ABSTRACT

**TITLE:** MODELING AND SIMULATION FOR ESTIMATING STATE OF HARMONIC COMPONENTS DISTRIBUTION IN ENERGY SYSTEMS ELECTRICAL .

**AUTHORS:** JESUS FERNANDO CASTRO TORRES  
KEVIN FABIÁN MELO ROJAS\*\*

**KEYWORDS:** harmonic component, harmonic state estimation, distribution systems, singular value decomposition.

### DESCRIPTION:

This work focuses on the study of the most used mathematical models in the estimation of the harmonic state and how they are applied, with the purpose to select the best method of estimation and apply it to distribution systems of electricity by realizing an evaluation of their performance used on a system brought by the IEEE, in which sources of harmonic current injections with random locations are included. In the modification of the system, there are models that are generalized to apply in quality studies of the energy, such as arc furnace [1], that is a model of injection of currents which emphasizes on the high index of harmonic pollution that it produces.

The development initiates with a general analysis of the behavior of the opposing models, that visualized the injection of current of every model in the software ATP-EMTP and its tool ATPDraw, by extracting the information of harmonic tension in the system, then to compare them with the results obtained by the estimation method of harmonic condition chosen to give solution to this problem. consecutively a detailed analysis is made over the data in case of having a completely certain, and sub-certain system. Finally, the results are compared with the values obtained in ATP-EMTP's simulation.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Electric, Electronic and Telecommunications School. Director: MIE. Jairo Blanco Solano

## INTRODUCCIÓN

Entre los problemas más comunes que enfrentan los sistemas de energía eléctrica, la distorsión armónica es uno de los más relevantes debido a los efectos perjudiciales para los equipos sensibles conectados a la red. En los sistemas eléctricos actuales de corriente alterna, las formas de onda de tensión y de corriente están distorsionadas con respecto a su forma sinusoidal ideal. Puede decirse que, en un sistema eléctrico la circulación de corrientes distorsionadas causa que las tensiones del sistema se distorsionen y de esta forma la afectación se propaga a todos los usuarios de la red [2].

Es debido a la instalación de dispositivos electrónicos en las redes, que las ondas de corriente y tensión fundamentales se ven contaminadas por el aporte de ondas de diferentes frecuencias, deformando la señal original de frecuencia fundamental, ocasionando el fenómeno de distorsión armónica. Dicha distorsión conlleva a la disminución de la efectividad del transporte y consumo de la energía eléctrica afectando de forma negativa a los distribuidores como a los usuarios finales.

Con el propósito de garantizar la confiabilidad y la calidad de los sistemas eléctricos, los distintos operadores de red se ven obligados a instalar en la red eléctrica dispositivos de medida. Para un buen resultado en la medición y diagnóstico del estado armónico en las redes, son necesarias herramientas que permitan optimizar el número de medidores a ubicar, reduciendo de manera considerable los costos implicados directamente en la instalación de los medidores, permitiendo el diagnóstico de forma eficiente de las componentes armónicas en nodos eléctricos que incluso no se encuentran monitorizados. Esto último se conoce como estimación de estado de las componentes armónicas.

En este trabajo se realiza inicialmente una revisión de diferentes metodologías relacionadas con la estimación de estado de componentes armónicas en redes de distribución, identificando en ellas las fortalezas y debilidades a tener en cuenta para la selección de una metodología con buena aceptación y confiabilidad. Con dicha metodología seleccionada se opta por su aplicación, con modificaciones que permitan una estimación sencilla y satisfactoria, dando así un paso adelante en la mejora de la calidad de la energía eléctrica.

## **1. GENERALIDADES DEL PROYECTO**

### **1.1. ANTECEDENTES**

“A finales del siglo XIX, los transformadores y máquinas rotatorias fueron identificados como las principales fuentes de distorsión armónica” [3] lo que demuestra que el fenómeno de los armónicos en sistemas de potencia no es un problema nuevo; reportándose en ese tiempo los primeros estudios en el tema [3].

Las industrias grandes en años anteriores eran las que contenían las principales cargas armónicas, por lo que intentaron reducir sus distorsiones con maniobras de ajustes, conexión y aterrizaje de los transformadores. A pesar de ser conscientes de esta problemática, la trataban con poca importancia hasta el día de hoy, en el que es considerado como un problema importante en términos de calidad de energía. En la actualidad el avance tecnológico ha generado la mayor contaminación armónica y debido a esto se ha evolucionado en pro de la identificación y mitigación de este problema de la manera más exacta y eficiente [3].

### **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La distorsión armónica representa en la actualidad un gran problema para la calidad de la potencia eléctrica en las redes de distribución, generando pérdidas en la generación y distribución de la energía, además de una disminución de la vida útil de los equipos y/o dispositivos conectados a la red.

La distorsión armónica de corriente y tensión, afecta a la industria en la medida que en los equipos se reduce los tiempos de vida útil, disminuyendo la productividad o simplemente dejando de operar, lo que genera enormes pérdidas.

Las necesidades de detectar los problemas de contaminación armónica son de alta prioridad y en este momento las empresas distribuidoras de energía se esfuerzan por conocer los puntos con mayor distorsión armónica para la búsqueda de soluciones. Esta detección se hace por medio de medidores inteligentes ubicados estratégicamente en la red.

La estrategia de detección de las componentes armónicas se caracteriza por la recolección de muestras de datos de corriente y tensión, para luego ser almacenadas en una base de datos en donde se procesan con aplicaciones de ciertos algoritmos, clasificando las perturbaciones registradas por los medidores. Debido a esto se introduce el concepto de estimación de estado armónico (HSE, sigla en inglés) el cual consiste en la estimación de los niveles de las componentes armónicas presentes en el sistema a partir de los obtenidos por los medidores instalados en ciertos puntos del sistema.

Así se define el objeto de esta tesis de grado orientado a la estimación del estado armónico con base en referencias bibliográficas con técnicas de HSE en sistemas de distribución. Para tal fin se realiza un estudio de estas metodologías escogiendo la que cuente con mayores ventajas y tratando de mejorar las debilidades de esta, incorporando nuevas características que mejoran al método establecido, para obtener la mejor solución al problema en cuestión.

La validación de los resultados de la metodología se realiza a través del software MATLAB, en el cual se implementa la metodología en dos sistemas de distribución: uno de 32 barras de la IEEE y el segundo mostrando como ejemplo base un sistema de 7 barras para hacer un seguimiento paso a paso de la

metodología adoptada. Para la estimación del comportamiento armónico de la red se utilizó el programa de simulación de redes eléctricas ALTERNATIVE TRANSIENT PROGRAM (ATP), el propósito es comparar los resultados de las simulaciones establecidas y concluir a cerca de los resultados obtenidos.

### **1.3 MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN**

El aumento en la demanda de dispositivos electrónicos como fuentes de alimentación, sistemas de alimentación ininterrumpida, variadores de velocidad de motores, etc., ha incrementado los niveles de distorsión armónica significativamente tanto en sectores residenciales, comerciales e industriales. Para esto es de vital importancia conocer el estado de las componentes armónicas que contaminan la red brindando la información necesaria para tomar medidas de mitigación de las mismas. Así mismo, el usuario final debe saber la contaminación armónica que introduce a la red y controlarla para que esté dentro de los límites permitidos.

Por lo tanto, la industria comercializadora de energía eléctrica se interesa por la detección, localización y mitigación de fuentes armónicas y fallos debidos a estas. Partiendo de la medición, se debe garantizar un buen análisis de los datos para la estimación de estado de componentes armónicas en toda la red con un número óptimo de monitores de calidad de potencia conociendo así los niveles de tensión armónica en cada nodo de la red.

La Universidad Industrial de Santander, específicamente el grupo de investigación en sistemas de energía eléctrica (GISEL) como parte de su trabajo investigativo en el análisis y estudio del estado de calidad de la potencia eléctrica, centra sus actividades en el desarrollo de trabajos de grado de pregrado y postgrado, teniendo como uno de sus ejes temáticos esta rama de la ingeniería eléctrica.

## 1.4 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

El objetivo general del proyecto de grado es implementar una metodología para la estimación de estado de las componentes armónicas en sistemas de distribución de energía eléctrica; para ello, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Revisar diferentes fuentes bibliográficas que propongan metodologías referentes a la estimación de estado de las componentes armónicas en sistemas de distribución de energía eléctrica.
- Desarrollar un método para la estimación de estado de las componentes armónicas en sistemas de distribución de energía eléctrica de operación radial, que permita integrar las ventajas de las referencias estudiadas y adicionalmente incluir mejoras respecto a los trabajos previos de la temática.
- Validar la metodología propuesta mediante la simulación en las plataformas MATLAB y ATP-EMTP utilizando sistemas de distribución de prueba reportados en la base de datos de la IEEE.

## 1.5 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este documento se estructura en 4 capítulos descritos brevemente a continuación:

- **Capítulo 1:** Se realiza una revisión teórica acerca de las diferentes metodologías propuestas sobre la estimación de estado de las componentes armónicas; específicamente se concluye acerca de las distintas estrategias planteadas en el tema mostrando sus características para luego hacer una selección de la más adecuada para el desarrollo del trabajo.

- **Capítulo 2:** Se explican los pasos de la metodología desarrollada que integra teoría de estimación, procesamiento de datos, optimización y se identifican los comportamientos de la estimación de las componentes armónicas ante la variación del número de medidores ubicados en un sistema ejemplo. El sistema consta de 6 nodos en los cuales se extraen datos de corriente y tensión para ser comparados con los resultados de las tensiones estimadas.
- **Capítulo 3:** Se aplica la metodología de estimación de componentes armónicas en el sistema de 32 barras reportado por la IEEE, donde se hace un seguimiento y análisis de los datos de tensión, mostrando los errores porcentuales de cada estimación y la evolución obtenida con las mejoras realizadas a la metodología seleccionada.
- **Capítulo final:** Aquí se plantean las conclusiones respectivas al desarrollo total del proyecto investigativo, así como se dan ideas o pautas para siguientes trabajos de investigación referentes al tema de esta tesis de grado.

## **2. METODOLOGÍAS PROPUESTAS I**

### **2.1 INTRODUCCIÓN A LA ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO (HSE)**

Las formas de onda distorsionadas pueden ser descompuestas en la suma de la señal de frecuencia fundamental con sus componentes armónicas. La distorsión armónica se origina debido a las características no lineales de los equipos y cargas presentes en los sistemas de potencia.

La estimación de estado armónico (HSE) es un método que requiere de ciertos datos básicos de la red, como la tensión nominal, potencias instantáneas, frecuencia fundamental, tensión en barrajes y los diferentes tipos de armónicos.

Tradicionalmente esta técnica de estimación ha sido utilizada para la estimación de los flujos de potencia en un sistema de potencia a frecuencia fundamental, tomando la información de los medidores de potencia activa y reactiva. Debido a la gran cantidad de datos de medición de potencia real y reactiva disponibles, la estimación de estado sobre-determinado se ha utilizado para calcular los valores probables de las variables de estado mediante la filtración de ruido y de datos erróneos entre las mediciones. Sólo recientemente, la HSE se ha extendido a identificar las fuentes armónicas [4].

Un método alternativo para la localización de fuentes de armónicos es a través de la técnica de estimación de estado armónico, que es un proceso inverso de simulación de penetración armónica. La estimación del estado armónico tiene la capacidad de determinar los flujos de las componentes armónicas en partes de la red en las que no hay medición directa, utilizando mediciones parciales del

sistema. También se proporciona un enfoque eficaz en la identificación de inyección armónica dentro de un sistema de potencia.

Una fórmula matemática general del problema de HSE para el armónico  $h$  está dada por la ecuación (1).

$$Y(h) = H(h)X(h) + U_{\text{meas}}(h) \quad (1)$$

Dónde:

$Y(h)$ : Vector de las cantidades medidas.

$H(h)$ : Matriz que relaciona las medidas obtenidas con las variables de estado.

$X(h)$ : Vector que representa las variables de estado (Tensiones en barras y/o corrientes de ramas).

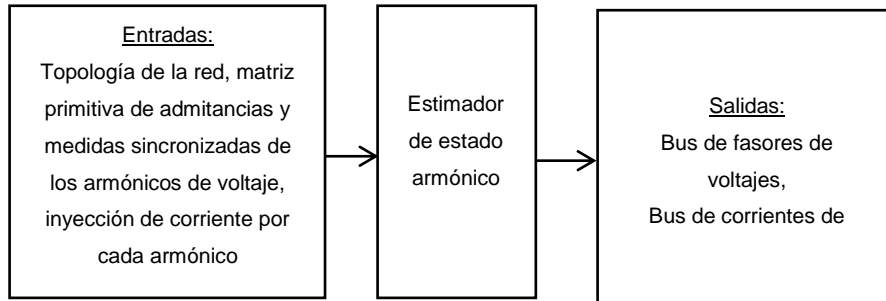
$U_{\text{meas}}(h)$ : Incertidumbre de la medida.

De acuerdo a la ecuación (1), la posibilidad de resolver el sistema se ve ligada a la cantidad de medidas que se tenga de este, y la resolución de ella dependerá de este factor, sin embargo, es posible resolver la estimación de estado armónico sin estar sujeto a las mediciones de cada nodo y rama de la red [4].

El marco de la estimación de estado armónico descrito en la Fig. 1 se basa en un modelo de sistema multi-frecuencia. Se formula de la matriz de entrada del sistema y topología de la red en las frecuencias armónicas, utilizando la medición sincronizada de la inyección de corriente armónica en lugares seleccionados. Sobre la base de la matriz de admitancias nodal del sistema y la colocación de puntos de medición, el estimador de estado que describe las mediciones de armónicos como una función de las variables de estado se puede formar según muestra la ecuación (1) [5].

En un modelo de HSE de tres fases, las condiciones asimétricas tales como desequilibrio sistema de circuito de acoplamiento mutuo también pueden considerarse.

Figura 1. Marco de estimación de estado armónico. [5].



Los problemas de HSE pueden ser sub-determinados, sobre-determinados y completamente-determinados dependiendo si el número de ecuaciones de medición independientes es menor igual o mayor que el número de variables de estado respectivamente. Para un sistema sobre-determinado, se dice que el sistema es completamente observable ya que existe una única solución para las variables de estado. Un sistema sobre-determinado tiene mediciones redundantes lo que reduce al mínimo el efecto de los datos erróneos y es posible la solución del problema aun cuando una o más información de las medidas se pierdan temporalmente. Un sistema sub-determinado es parcialmente observable y solo las variables de estado correspondientes a las islas observables se pueden determinar de forma única [5].

Todas las técnicas de estimación de HSE se basan en los datos de medición y modelos de red para producir resultados de estimación consistentes. Las medidas requieren de una adecuada sincronización; esto se puede lograr usando el sistema de posicionamiento global (GPS) tiempo real, donde el escaneo instantáneo de los puntos de medida es sincronizado. Debido al número limitado de medidores de armónicos para la recolección de datos, la HSE se realiza por lo

general bajo condiciones sub-determinadas. Por lo tanto, la calidad y la ubicación de los medidores y la topología del modelo afectan en gran medida el rendimiento de la HSE; los fallos de medición resultan del ruido en la medida, estos producen errores en los resultados de HSE y causan acciones de falsa alarma [5].

## **2.2 METODOLOGÍAS ESTUDIADAS BASADAS EN LA ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

Para la adopción de una estrategia se comenzó por buscar en diversas bibliografías encontradas en las bases de datos en su mayoría de la IEEE, donde se encontraron diferentes metodologías usadas para la estimación de armónicos y fuentes armónicas (tensiones y corrientes) especificadas para diversos sistemas de distribución de energía eléctrica; viendo como principales protagonistas el filtro de Kalman [6], redes neuronales inteligentes [7], métodos numéricos basados en enjambre de abejas [8], descomposición de valores singulares [9], solución por LMS junto a LMF [10]. Por lo tanto, se hizo un análisis detallado a nivel bibliográfico mostrado por los autores de cada metodología en los trabajos expuestos; para así encontrar las ventajas y desventajas propuestas en cada una de estas metodologías.

## **2.3 CONCLUSIONES DE LAS METODOLOGÍAS ESTUDIADAS**

Del filtro de Kalman se puede concluir que, a pesar de solucionar el inconveniente que tiene de la matriz de covarianza para su funcionamiento, trabaja con dos matrices Q dinámicas más básicas. Toma como base matemática el concepto de la estimación de estado armónico (HSE) y soluciona problemas de divergencia gracias a la adaptación dinámica de las matrices Q básicas con la ayuda de la T-STUDENT. El filtro de Kalman y el filtro adaptativo de Kalman obtienen soluciones

a partir de los mínimos cuadrados lo cual lo expone a problemas de convergencia debido al ruido. La ganancia de este filtro es independiente de las mediciones, generando conflictos en el sistema al momento de converger los resultados, debido a que se inicializa de forma inadecuada. Además, necesita información suficiente para modelar las variables de estado [10]; en su forma adaptativa depende del modelo estadístico para decidir entre cuál de las dos matrices Q usar, lo que trae consigo problemas propios del modelo estadístico t-student como por ejemplo tener problemas con grandes cantidades de datos para su adecuada aplicación.

Con las redes neuronales sucede algo particular, aunque trabaja en medios ruidosos con solo medio ciclo de muestreo optimizando en cierto sentido la estimación; tiene desventajas considerables. Al examinarlo con más detalle se encontró que este algoritmo necesita más recursos computacionales que los demás métodos; es sensible a la frecuencia armónica de detección y en ese caso no considera las perturbaciones. Los estudios previos que usan esta herramienta se limitan a la simulación con consideraciones bastante limitadas y nunca se llevó a cabo una práctica real del método y su comportamiento; en términos de la estructura del método, antes de cualquier estimación se debe entrenar el sistema hasta con 1400 patrones y para iniciar con el proceso de aprendizaje para su funcionamiento, es necesario ingresar ciertos valores aleatorios y como consecuencia de ello en cada ciclo iterativo se deben ajustar los pesos para así reducir el error y llegar a unos valores estables que permitan una estimación adecuada. Por otro lado, si se realizan muchas iteraciones, la red disminuye su voluntad de convergencia y el valor mínimo calculado estaría demasiado lejos del valor mínimo real. Sin embargo, si la red no está bien entrenada no es capaz de detectar el valor global, sino que dará soluciones parciales locales sin tener en cuenta que pueda ser o no la solución real.

El algoritmo basado en los enjambres de abejas entrega una estimación de fase y amplitud veloz y precisa comparada con mínimos cuadrados y algoritmos genéticos; en este método en particular hacen la inclusión de la generación distribuida de fuentes armónicas. No obstante, es necesario aclarar que este tipo de generación distribuida solo es posible si se obtienen los permisos necesarios de los dueños de estas fuentes para ser monitoreados todo el tiempo; las fuentes objetivo de esta generación distribuida no son lineales ni diferenciables lo que obliga a usar métodos evolutivos, algoritmos genéticos, redes neuronales, entre otros. Sin embargo como se analizó anteriormente estos métodos no llegan a un punto absoluto y no tienden a converger en corto tiempo; su modelo matemático y algebraico es complejo y consta de procesos computacionalmente robustos, para la selección de la “REINA” y su posible combinación con las “ABEJAS” es necesario una gran cantidad de pasos e iteraciones con el uso de variables aleatorias que al final no garantizan que sea la selección más favorable si no que se corrobora con el porcentaje de error obtenido; si no funciona es necesario volver a seleccionar la reina junto a sus parejas hasta encontrar la solución óptima. Basados en los resultados expuestos por [14], es notoria una mejoría en comparación con mínimos cuadrados y algoritmos genéticos, pero como se puede observar su mejora es poca, considerando que es un sistema tan robusto es preferible usar los métodos convencionales en los cuales su matemática y computación es más básica y sencilla obteniendo resultados más alejados, pero aun así, muy justos para una solución favorable.

Por otra parte, la descomposición en valores singulares SVD con la medición parcial del sistema eléctrico es capaz de estimar una respuesta. Tradicionalmente, el análisis de observabilidad (OA) se lleva a cabo para encontrar la colocación óptima de medición para obtener una estimación de todo el sistema. Sin embargo, la técnica de descomposición en valores singulares es una herramienta matemática muy fiable y computacionalmente estable, se puede utilizar para proporcionar una solución particular y un vector de espacio nulo para cada

singularidad. SVD también revela las islas observables y no observables dentro del sistema, y por lo tanto esencialmente reemplaza el análisis de la función de observabilidad. Por otra parte, se hace posible el análisis de un sistema parcialmente observable mientras que los métodos tradicionales que utilizan ecuaciones normales parecen fallar, debido al mal acondicionamiento de la matriz de ganancia; no obstante, sufre de problemas debido a que solo entrega respuestas con la menor norma con respecto a un vector  $X$ , esto, en el caso de tener un problema sub-determinado; y en general esta respuesta no siempre es la indicada.

El uso de LMS complementado con LMF es una alternativa interesante ya que su algoritmo es básico y matemáticamente simple, pero aun así no deja de tener los problemas de convergencia afectados por el ruido obtenido en los datos medidos del sistema. Este método estima magnitud y fase armónica; al estar basado en la transformada rápida de Fourier es necesario conocer de manera clara su ventana de observación como el número de ciclos y el muestreo de la señal y debe ajustarse a un bajo nivel de ruido; en el análisis de la metodología propuesta en [10] es notorio que sus comparaciones solo se hacen con LMS. Suponiendo con anterioridad que el complemento que propone la metodología (LMF) hará que sus resultados mejoren, esto deja cierta incertidumbre en la capacidad real del método al no ser comparado con un método de diferentes características como un SVD o un filtro de KALMAN. Cabe aclarar que aun al ser solo comparado con LMS sus diferencias no son tan grandes como debería esperarse, por lo tanto, un cambio de metodología LMS a LMS/LMF no es tan necesario.

En resumen, se analizaron diferentes metodologías teniendo en cuentas sus virtudes y defectos; gracias a estas características es posible seleccionar la que más se ajuste a nuestras necesidades pensando en la definición de algunos criterios para seleccionar una de estas técnicas expuestas anteriormente; dichos criterios son:

- Los documentos investigados estén reportados en una base de datos reconocida.
- Que la técnica seleccionada esté respaldada por resultados coherentes y aplicados en algún sistema eléctrico con resultados favorables con respecto a los reales.
- Identificar diferentes documentos que traten sobre la misma metodología.
- Identificar mayores características positivas que negativas en la estimación de estado armónico comparada con los otros métodos estudiados.

## **2.4 INTRODUCCIÓN A LA METODOLOGÍA SELECCIONADA COMO OBJETO DE ESTUDIO**

La metodología seleccionada como método principal guía de este proyecto de grado es: HARMONIC STATE ESTIMATION: A METHOD FOR REMOTE HARMONIC ASSESSMENT IN A DEREGULATED UTILITY NETWORK [9]. La justificación por la cual se seleccionó dicha metodología es por que cumple con los ítems explicados anteriormente, adicionalmente se muestran las principales características que presenta esta metodología.

- Se basa en la estimación armónica conocida como HSE.
- No necesita de un sistema completamente observable para dar solución al problema planteado, y tampoco requiere de un gran número de datos para garantizar una respuesta; usando así una menor cantidad de medidores inteligentes en la red eléctrica encajando en el perfil de los sistemas reales, donde la cantidad de equipos que las empresas disponen son menores al número de nodos con los que cuenta la red.

- Es computacionalmente estable y no necesita de iteraciones para converger a la respuesta propia del método, gracias a que su formulación matemática no es robusta y tampoco requiere de valores aleatorios para su inicialización.

Respecto a sus desventajas:

- Los resultados obtenidos del método de estimación usando SVD requieren de un ajuste necesario debido a que esta herramienta arroja una respuesta, la de menor norma, sin tener en cuenta si esta es la respuesta real en el caso sub-determinado; sin embargo, se extraen ciertos vectores que representan el espacio nulo del modelamiento matemático de la respuesta los cuales están directamente involucrados con la respuesta y con ellos se hace el ajuste de la respuesta.

La metodología seleccionada no solo se basa en [9], también se hace introducción en otros documentos analizados con la misma metodología [11]-[15].

Muchas técnicas se han usado para la estimación de estado armónico (HSE) y este documento en particular [9], está basado en el método de la descomposición de valores singulares (SVD por sus siglas en inglés), un algoritmo que no requiere que toda la red eléctrica sea totalmente observable para realizar la estimación; este método puede dar una solución incluso con una consideración parcialmente observable del sistema; este método se puede operar independiente del operador del sistema debido a las condiciones de los monitores que identifican las condiciones armónicas de la red.

## • ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO

Esta técnica se usa con muchos datos de medición sincronizada de armónicos donde se tienen múltiples inyecciones armónicas a lo largo de la red de distribución; su forma matemática general es:

$$Z = h * (X) \quad (2)$$

En este caso se desprecia el error en la medición; la variable de estado a estimar son las tensiones nodales  $V(n)$ ; en un sistema sub-determinado teniendo infinitas soluciones

- **FORMULACIÓN MATEMÁTICA**

Para estimar la tensión o corriente armónica se deben tener en cuenta las ecuaciones (3) y (4) que consideran una linealidad del sistema estudiado a lo que se requiere calcular:

$$I(n)_{medicion} = Y(n) * V(n) \quad (3)$$

$$V(n)_{medicion} = 1 * V(n) \quad (4)$$

El método de SVD es una solución de matrices, basada en el álgebra lineal de la siguiente manera; cualquier matriz  $[A]$  ( $m \times n$ ) con número de filas  $m$  y columnas  $n$  se puede reescribir como el producto de  $m \times n$  columnas ortogonales de la matriz  $[U]$ ; una matriz  $[S]$  diagonal  $n \times n$  positiva o cero elementos, y la transpuesta de  $n \times n$ , una matriz ortogonal  $[V]$ .

La descomposición siempre se puede realizar, sin importar la singularidad de la matriz original, una vez que la descomposición está hecha se tienen diferentes caminos para obtener una solución particular bajo un entorno sub-determinado, dependiendo de la ecuación de estado otorgada por HSE, se usa la pseudo inversa como el método de estimación de SVD para el modelo HSE.

Es usual encontrar que la matriz de medición  $h$  para HSE tenga un número de ecuaciones menores al número de incógnitas o variables de estado a estimar; representado en un tamaño  $m \times n$  donde  $m < n$ .

Para la solución general de las ecuaciones matriciales se multiplica  $h^T$  así:

$$h^T Z = h^T h(x) \quad (5)$$

$$(x) = (h^T h)^{-1} h^T Z \quad (6)$$

Haciendo la descomposición de la matriz (h) usando SVD se tiene:

$$\text{SVD de } (h) \text{ es } USV^T \quad (7)$$

$$\text{SVD de } (h)^T \text{ es } VS^T U^T \quad (8)$$

Donde: U es la matriz ortogonal  $m \times m$

V es la matriz ortogonal  $n \times n$

S es la matriz diagonal  $m \times n$

$$(x) = (VS^T U^T USV^T)^{-1} VS^T U^T Z \quad (9)$$

Sabiendo que:  $U^T U = 1$  y  $V^{-T} = (V^T)^{-1} = (V^T)^T = V$  se obtiene:

$$(x) = VS^{-1} U^T Z \quad (10)$$

### **3. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO**

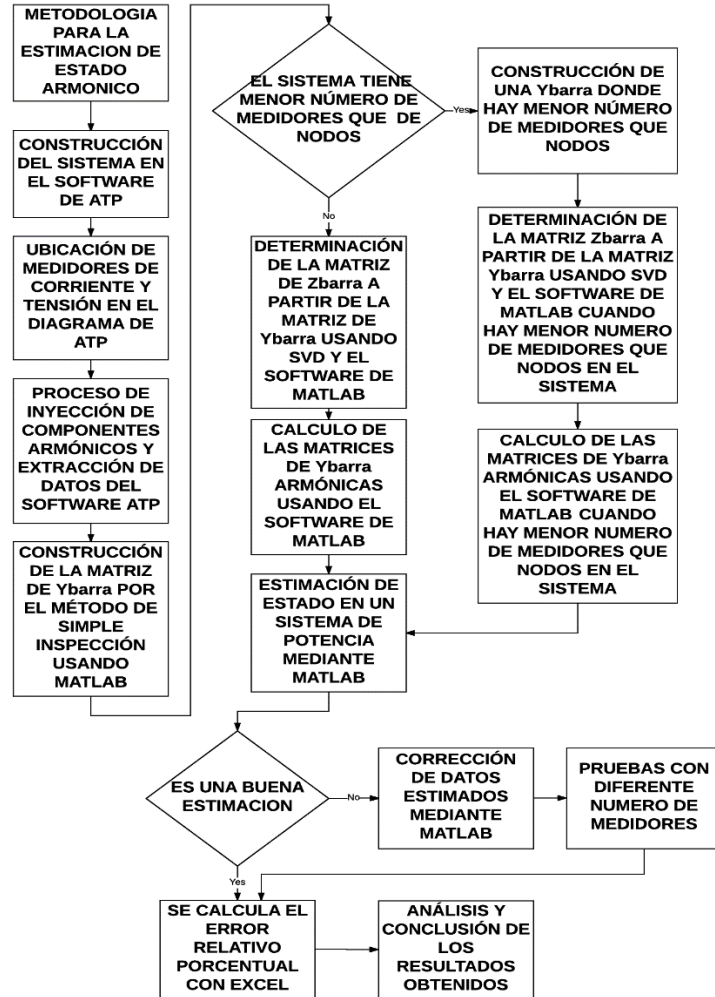
Para el desarrollo de esta metodología se va a trabajar sobre un sistema con una topología radial, se escoge un sistema base de seis barras del cual se conocen las características eléctricas, como impedancias de línea y las cargas finales.

El propósito es estimar las tensiones armónicas en todos los nodos del sistema a partir de las corrientes armónicas inyectadas en nodos aleatorios del sistema.

En esta metodología se usa el simulador ATP y el software Matlab que deben estar previamente instalados en el ordenador.

El proceso general para la estimación se puede ver en el esquema de la figura 2.

Figura 2. Diagrama de la metodología propuesta, para la estimación de estado armónico.



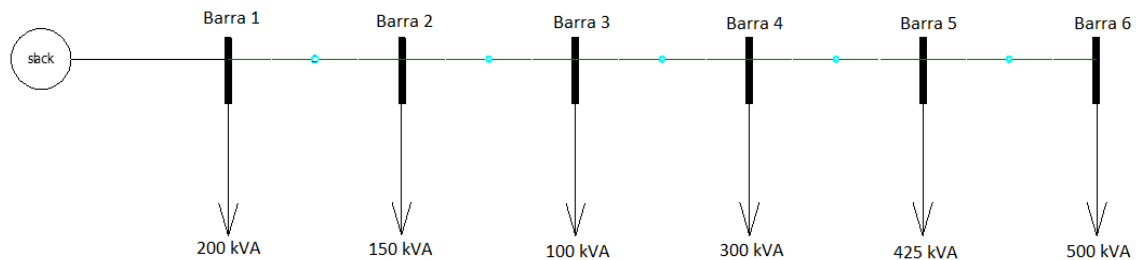
Se tiene el sistema eléctrico de la figura 3, el cual es un sistema radial de 6 barras y media tensión, donde se tienen las siguientes variables de estado:

- Seis tensiones de barra trifásicas lo cual da un total de 18 variables de estado.
- Seis corrientes inyectadas trifásicas siendo 18 variables de estado adicionales.
- Y seis corrientes de rama trifásicas, 18 variables de estado.

Para un total de 54 variables de estado de las cuales en el proceso de estimación del numeral 2.6., se tomaron 18 variables de estado entre las cuales están:

- nueve corrientes inyectadas en las fases a, b, c, de algunas las barras del sistema para la estimación de estado
- y nueve tensiones de la fase a, b, c, en las mismas barras que las corrientes inyectadas y estas tensiones del sistema también se usaron para fines de comparación de resultados.

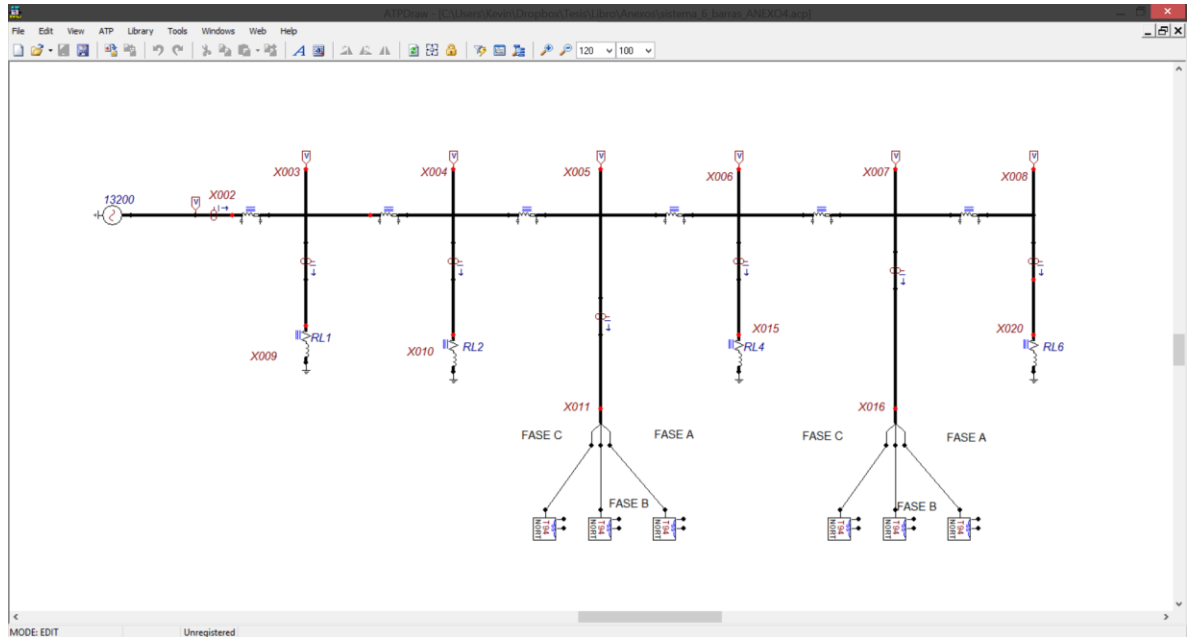
**Figura 3. Sistema con una tensión de línea de 13200 [V]**



### 3.1 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA EN EL SOFTWARE DE ATP

Para comenzar se abre el software de ATP en su opción ATP-Draw, se dirige al menú "File" y se selecciona la opción "New". En la ventana nueva se dibuja el diagrama que se va a trabajar, en el que se configuran los datos que se tienen de cargas e impedancias de línea. Como se muestra en el sistema de seis barras de la figura 4.

**Figura 4 Diagrama del sistema de 6 barras en ATP Draw.**



### **3.2 UBICACIÓN DE MEDIDORES DE CORRIENTE Y TENSIÓN EN EL DIAGRAMA DE ATP**

Los medidores de tensión se ubican en todos los nodos del sistema, mientras que los de corriente se ubican en las cargas y la fuente, como se muestra en la figura 4.

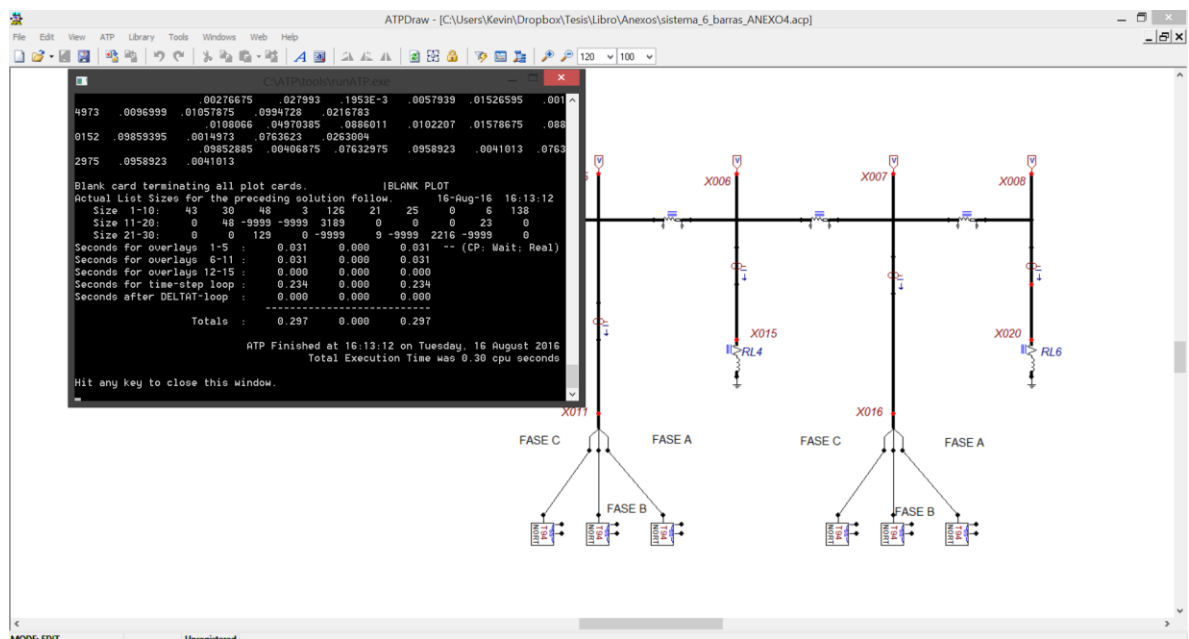
### **3.3 PROCESO DE INYECCIÓN DE COMPONENTES ARMÓNICOS Y EXTRACCIÓN DE DATOS DEL SOFTWARE ATP**

A continuación se presenta el paso a paso para la simulación y extracción de datos de tensión y corrientes armónicas en cada nodo. En la figura 4 se tiene un sistema de 6 barras, al cual se le insertó aleatoriamente en los nodos del sistema

un modelo programado en ATP de inyección armónica conocido como horno de arco.

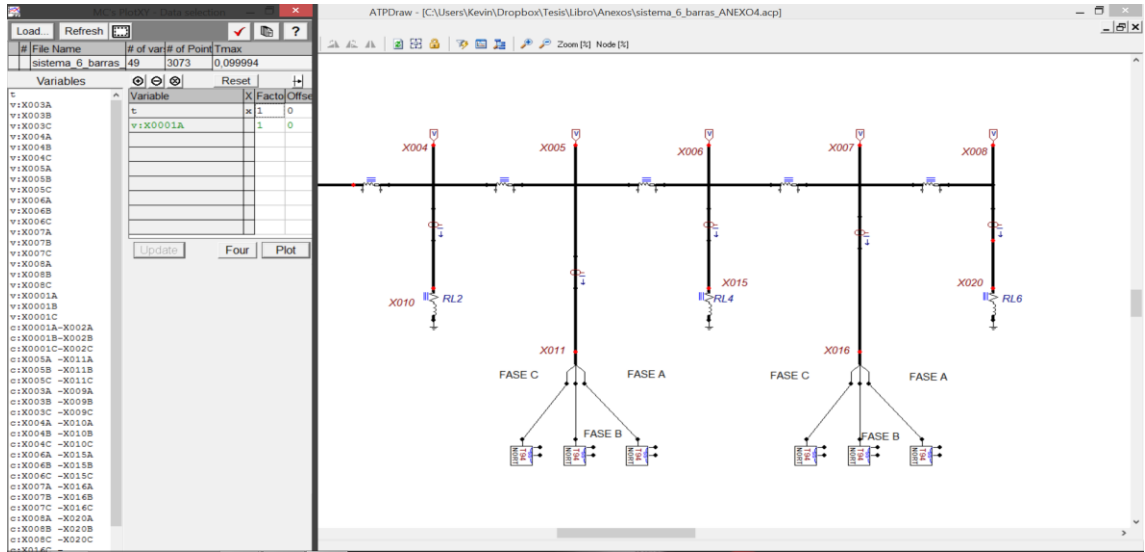
Luego de la configuración inicial de la simulación en donde se especifica el tiempo de la simulación y la frecuencia del sistema, se presiona “F2” y se espera hasta que aparezca en pantalla una ventana como en la figura 5.

**Figura 5 Compilación en ATP-Draw de la simulación para el sistema de 6 barras.**



Para cerrar la ventana emergente se presiona cualquier tecla, luego se deben presionar la siguiente combinación de teclas Ctrl+alt+0 y aparecerá una ventana como la que se muestra en la figura 6.

**Figura 6 Ventana de medidores ubicados en el sistema.**

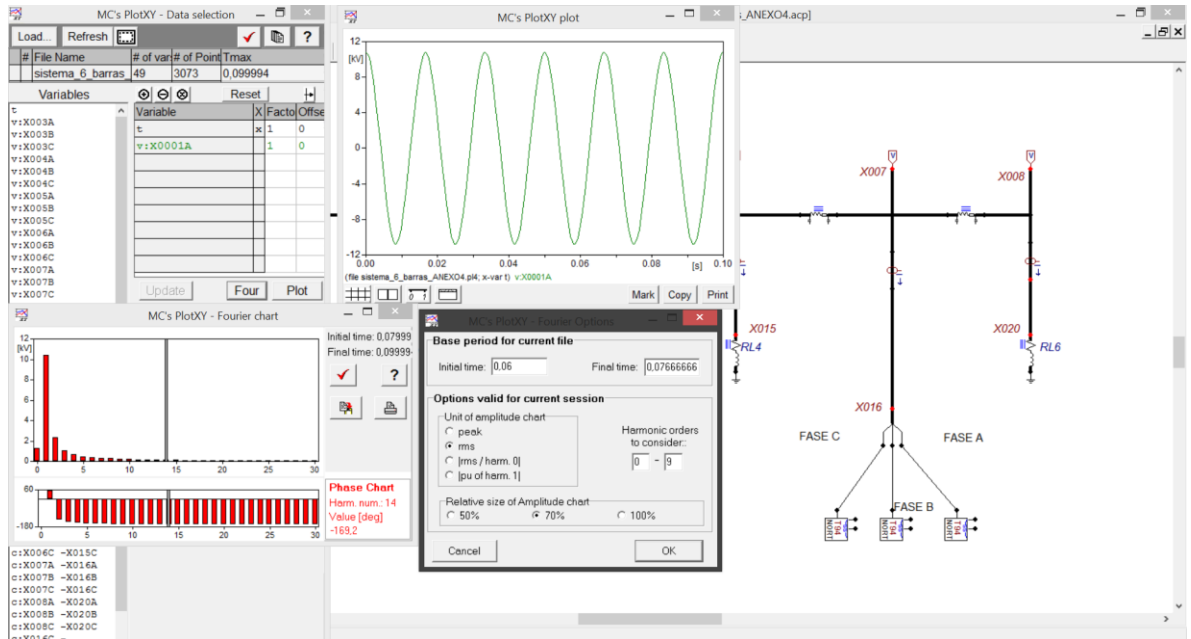


En la ventana “MC’s PlotXY” se seleccionarán los medidores que se desean monitorear; estos aparecerán en colores como se ve en la figura 6, y así, se procede a seleccionar la opción *four*.

Para que aparezca habilitada la opción *four* solo debe haber una señal, por lo que hay que hacer el mismo procedimiento para cada una de los medidores en el sistema.

Al seleccionar *four* aparecerá una ventana “MC’s PlotXY Fourier chart” de gráficos de barras como se muestra en la barra figura 7.

**Figura 7 Opciones Fourier para la extracción de datos de ATPDraw.**



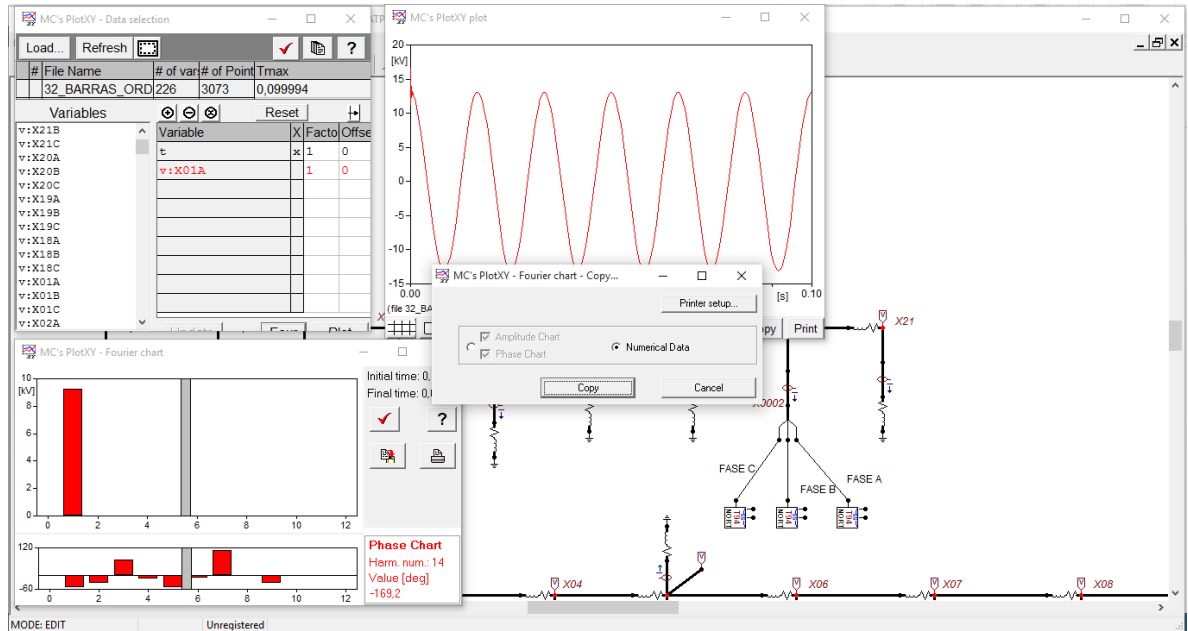
En la ventana “MC’s PlotXY Fourier chart” se selecciona opciones, indicada con una viñeta roja, aparecerá la ventana “MC’s PlotXY Fourier Options” en esta, se llenan las opciones de la siguiente forma:

- *Initial time* :0,06
- *Final time* :0,0766666666
- *Harmonic orders to consider* : 0-(número de armónicos que se consideran)

Al darle en la opción “OK” la gráfica en la ventana “MC’s PlotXY Fourier chart” cambia y muestra el número de armónicos que considere para estudio.

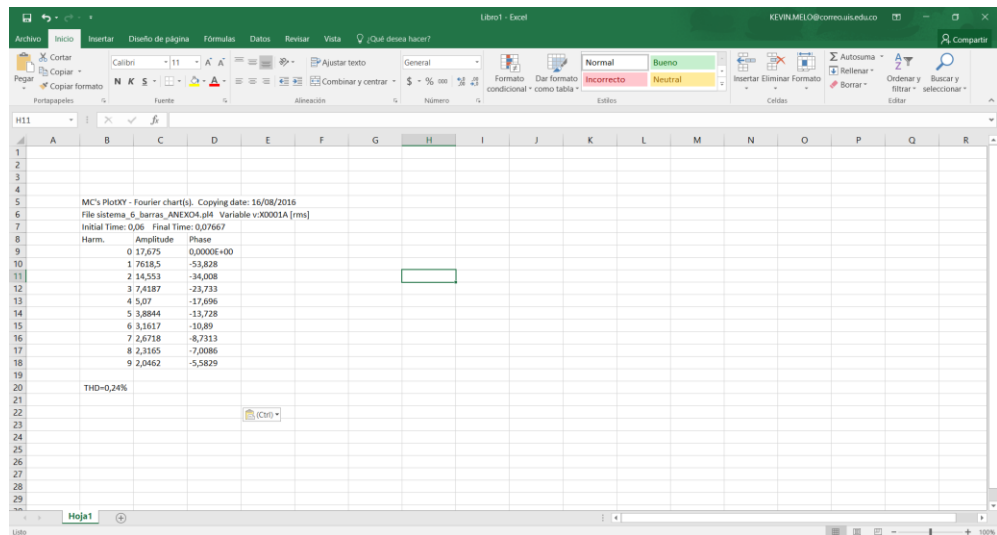
Cuando cambien los datos se selecciona la opción copiar y se verifica que “Numeric Data” este marcado como se muestra en la figura 8.

**Figura 8 Copia de datos de ATP-Draw.**



Los datos quedan copiados en el portapapeles del ordenador, listos para ser archivados en cualquier otro documento; estos datos tienen una presentación como muestra en la figura 9.

**Figura 9 Datos extraídos de ATP-Draw en una hoja de Excel.**



Los diagramas elaborados en este trabajo como el que se muestra en la figura 4 se pueden encontrar en los anexos como “sistema\_32\_barras\_ANEXO3” y “sistema\_6\_barras\_ANEXO4” ambos archivos en extension .acp que es la trabajada por el software de ATP draw.

A continuacion se extraen algunos datos de corriente suponiendo diferentes cantidades de medidores.

**3.3.1 Selección de corrientes para un sistema con medidores en todos los nodos del sistema** En un sistema en el que se ubican medidores en todos los nodos, se conocen todas las corrientes inyectadas a cada nodo del sistema las corrientes extraídas en este caso se ven en la tabla 1.

**Tabla 1 corrientes extraídas para el sistema de 6 barras con 6 medidores.**

Corrientes Inyectadas [A]					
Nodo	Primer	Tercero	Quinto	Séptimo	Noveno
	Armónico	Armónico	Armónico	Armónico	Armónico
1	49373-42417j	-1.331-30.191j	-0.108-9.918j	0.061-4.936j	0.092-2.954j
2	-5,8248+2,9902j	0.002+0.001j	0	0	0
3	-4,0964+1,4932j	0.842+0.24j	-0.388-0.201j	0.207+0.161j	-0.086-0.099j
4	-12,412+4,1018j	-0.003+0.007j	0.002+0.003j	-0.001	0.001j
5	-17,194+6,8352j	3.574+1.034j	-1.649-0.849j	0.879+0.684j	-0.363-0.417j
6	-21,318+4,3763j	-0.084+0.007j	0.004+0.006j	-0.003	0.001+0.002j

**3.3.2 Selección de corrientes para un sistema con menos medidores que nodos** En un sistema con menor número de medidores que de nodos se toman de las corrientes correspondientes a los medidores escogidos, por ejemplo, si hay medidores en las barras 1, 3 y 5 se toma las filas 1,3 y 5 de los vectores de corriente correspondiente al orden armónico deseado como se observa en la tabla 2.

**Tabla 2 corrientes armonicas correspondientes a un sistema con 3 medidores en los nodos 1, 3, 5.**

Corrientes Inyectadas [A]					
Nodo	Primer	Tercero	Quinto	Séptimo	Noveno
	Armónico	Armónico	Armónico	Armónico	Armónico
1	49373-42417j	-1,33-30,19j	-0,11-9,92j	0,06-4,94j	0,09-2,95j
3	-4,1+1,49j	0,84+0,24j	-0,39-0,2j	0,21+0,16j	-0,09-0,1j
5	-17,19+6,84j	3,57+1,03j	-1,65-0,85j	0,88+0,68j	-0,36-0,42j

### 3.4 CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ $\bar{Y}_{barra}$ POR EL MÉTODO DE SIMPLE INSPECCIÓN USANDO MATLAB

Con los datos que se tienen del sistema montado en ATP como las impedancias de línea mostradas en el anexo 9, se hallan las matrices de  $[\bar{Y}_{barra}]$ , en el mismo anexo se presentan las matrices  $\bar{Y}_{barra}$  para los armónicos de primer, tercer, quinto, séptimo y noveno orden. En la tabla 3, se muestra como ejemplo el resultado de la matriz  $\bar{Y}_{barra}$  para el primer orden armónico.

$$[\bar{Y}_{barra}]^{(1)} =$$

**Tabla 3 Matriz  $\bar{Y}_{barra}$  para el primer orden armónico en el sistema de 6 barras.**

12,03-10,34i	-5,55+4,77i	0	0	0	0
-5,55+4,77i	10,41-8,95i	-4,86+4,17i	0	0	0
0	-4,86+4,17i	12,64-10,85i	-7,78+6,68i	0	0
0	0	-7,78+6,68i	12,1-10,39i	-4,32+3,71i	0
0	0	0	-4,32+3,71i	12,1-10,39i	-7,78+6,68i
0	0	0	0	-7,78+6,68i	7,78-6,68i

### 3.5 CÁLCULO DE LA MATRIZ $\bar{Z}_{\text{barra}}$ A PARTIR DE LA MATRIZ $\bar{Y}_{\text{barra}}$ USANDO SVD Y EL SOFTWARE MATLAB

Al construir la matriz de admitancias por simple inspección se hacen notorias algunas de sus características, como:

$\bar{Y}_{\text{barra}}$  Es una matriz compleja y simétrica.

$\bar{Y}_{\text{barra}}$  Tiene muchos términos  $y_{ji} = 0$ , dado que solo las barras que están cercanas se conectan entre sí.

Si existe una admitancia entre una de las barras y la referencia diferente de cero, se tiene que la matriz  $\bar{Y}_{\text{barra}}$  es no singular y es posible calcular la inversa. Si no hay admitancias entre alguna de las barras y la barra de referencia, entonces,  $\bar{Y}_{\text{barra}}$  es singular y no puede invertirse.

Para solucionar la ecuación anterior se puede hacer uso de la descomposición de valores singulares (SVD) para hallar la inversa de la matriz  $\bar{Y}_{\text{barra}}$  sin importar que esta matriz sea singular o no.

Resolviéndolo de la siguiente forma:

$$[\bar{Y}_{\text{barra}}] = [U][W][V]^T \quad (11)$$

De esta forma es posible reacomodar las matrices para hallar la matriz inversa:

$$[\bar{Y}_{\text{barra}}]^{-1} = [V][W]^{-1}[U]^T \quad (12)$$

SVD provee una alternativa para hallar la inversa, tanto para sistemas con  $[\bar{Y}_{\text{barra}}]$  singular como para los sistemas con  $[\bar{Y}_{\text{barra}}]$  no singular. Lo que permite realizar la estimación de estado armónico [16].

Para hacer uso de SVD en el software de Matlab se usa el comando de la siguiente manera:

Primero se escogen los nombres de las matrices en las que se va a descomponer la matriz de  $\bar{Y}_{\text{barra}}$  para las cuales se toman por ejemplo U, V y W luego entonces el comando para Matlab se escribe  $[U,V,W]=\text{svd}(y\text{barra})$  y Matlab automáticamente halla las matrices correspondientes a la descomposición de valores singulares, en las tablas 4, 5 y 6 se observan los resultados de aplicar SVD a la matriz  $\bar{Y}_{\text{barra}}$  del primer orden armónico en el sistema de 6 barras con 6 medidores.

$$[\bar{U}]^{(1)} =$$

**Tabla 4 Matriz  $[\bar{U}]^{(1)}$ .**

-0,12+0,1i	-0,3+0,25i	0,48-0,41i	0,42-0,36i	0,25-0,21i	-0,09+0,08i
0,23-0,2i	0,34-0,29i	-0,29+0,25i	0,36-0,31i	0,4-0,35i	-0,19+0,16i
-0,45+0,39i	-0,21+0,18i	-0,25+0,22i	-0,25+0,22i	0,34-0,29i	-0,29+0,25i
0,45-0,38i	-0,06+0,05i	0,27-0,23i	-0,4+0,34i	0,18-0,15i	-0,34+0,29i
-0,29+0,25i	0,46-0,4i	0,25-0,21i	0,01-0,01i	-0,24+0,21i	-0,4+0,34i
0,15-0,13i	-0,34+0,29i	-0,25+0,22i	0,23-0,2i	-0,38+0,33i	-0,42+0,36i

$$[\bar{V}]^{(1)} =$$

**Tabla 5 Matriz  $[\bar{V}]^{(1)}$ .**

30,04	0	0	0	0	0
0	24,18	0	0	0	0
0	0	20,28	0	0	0
0	0	0	9,63	0	0
0	0	0	0	3,82	0
0	0	0	0	0	0,44

$[\bar{W}]^{(1)}=$

**Tabla 6 Matriz  $[\bar{W}]^{(1)}$ .**

-0,16	-0,39	0,63	0,55	0,32	-0,12
0,3	0,44	-0,38	0,47	0,53	-0,25
-0,6	-0,28	-0,33	-0,33	0,45	-0,38
0,59	-0,07	0,35	-0,52	0,23	-0,44
-0,38	0,61	0,33	0,02	-0,32	-0,53
0,2	-0,45	-0,34	0,3	-0,5	-0,55

Los resultados de las componentes U, V y W para los armónicos 3, 5, 7 y 9 se pueden encontrar en el anexo 9.

Ahora a partir de la reorganización y operación de las matrices U, V y W se obtiene la matriz de  $\bar{Z}_{\text{barra}}$  como se muestra a continuación en la tabla 7.

$$[\bar{Z}_{\text{barra}}]^{(1)} = W * V^{-1} * U' =$$

**Tabla 7 Matriz  $[\bar{Z}_{\text{barra}}]^{(1)}$ .**

0,09+0,08i	0,09+0,08i	0,09+0,08i	0,09+0,08i	0,09+0,08i	0,09+0,08i
0,09+0,08i	0,19+0,17i	0,19+0,17i	0,19+0,17i	0,19+0,17i	0,19+0,17i
0,09+0,08i	0,19+0,17i	0,31+0,27i	0,31+0,27i	0,31+0,27i	0,31+0,27i
0,09+0,08i	0,19+0,17i	0,31+0,27i	0,38+0,33i	0,38+0,33i	0,38+0,33i
0,09+0,08i	0,19+0,17i	0,31+0,27i	0,38+0,33i	0,52+0,44i	0,52+0,44i
0,09+0,08i	0,19+0,17i	0,31+0,27i	0,38+0,33i	0,52+0,44i	0,59+0,51i

### 3.6 CÁLCULO DE LAS MATRICES $\bar{Z}_{\text{barra}}^{(i)}$ ARMÓNICAS USANDO EL SOFTWARE DE MATLAB

Para la determinación de una matriz cuya reactancia tenga el efecto de la frecuencia de un armónico determinado se toma la matriz  $\bar{Z}_{\text{barra}}$ , se separa en parte real e imaginaria y se multiplica su parte imaginaria por el índice armónico que se está trabajando, y luego se vuelve a integrar la parte real e imaginaria para formar nuevamente la matriz armónica.

Este proceso se debe realizar uno a uno por cada índice armónico que se esté trabajando, para obtener las matrices  $\bar{Z}_{\text{barra}}$  de cada ordena armónico deseado.

Con el software de Matlab la separación de la parte real e imaginaria se realiza mediante los comandos  $Z_{\text{busimag}}=\text{imag}(Z_{\text{bus}})$  y  $Z_{\text{busreal}}=\text{real}(Z_{\text{bus}})$ .

Y luego se completa el procedimiento mediante el siguiente comando  $z_{\text{bus\_nueva}}=Z_{\text{busreal}}+Z_{\text{busimag}}*(\text{índice armónico}) *i$ , resaltando que el índice

armónico es un número entero real y positivo; en la tabla 8 se muestra el resultado obtenido para el tercer armónico en el sistema de 6 barras.

$$[\bar{Z}_{\text{barra}}]^{(3)} = Z_{\text{busreal}} + Z_{\text{busimag}} * (3) * i =$$

**Tabla 8 Matriz  $[\bar{Z}_{\text{barra}}]^{(3)}$ .**

0,09+0,23i	0,09+0,23i	0,09+0,23i	0,09+0,23i	0,09+0,23i	0,09+0,23i
0,09+0,23i	0,19+0,5i	0,19+0,5i	0,19+0,5i	0,19+0,5i	0,19+0,5i
0,09+0,23i	0,19+0,5i	0,31+0,8i	0,31+0,8i	0,31+0,8i	0,31+0,8i
0,09+0,23i	0,19+0,5i	0,31+0,8i	0,38+0,99i	0,38+0,99i	0,38+0,99i
0,09+0,23i	0,19+0,5i	0,31+0,8i	0,38+0,99i	0,52+1,33i	0,52+1,33i
0,09+0,23i	0,19+0,5i	0,31+0,8i	0,38+0,99i	0,52+1,33i	0,59+1,53i

Los resultados de las matrices de  $\bar{Z}_{\text{barra}}$  para los armónicos 3, 5, 7 y 9 se pueden encontrar en el anexo 9.

La programación de estos comandos se puede ver en el anexo 5 y 7.

### **3.7 CONSTRUCCIÓN DE UNA sub-matriz $\bar{Y}_{\text{barra}}$ DONDE HAY MENOR NÚMERO DE MEDIDORES QUE NODOS**

Dado que no es económicamente viable tener un medidor en cada nodo del sistema de distribución, se ubican medidores en puntos aleatorios del sistema y se da un punto de partida teniendo en cuenta las siguientes suposiciones:

- Cada medidor monitoriza tanto tensión como corriente en la carga y es ubicado de forma aleatoria en el sistema.
- Se conocen las características del sistema como son las impedancias y las matrices  $\bar{Y}_{\text{barra}}$ .

- Se trabaja sobre un sistema balanceado, es decir que sus corrientes de línea tienen la misma magnitud y desfases de secuencia positiva.
- Se trabaja sobre un sistema equilibrado, denotando que las cargas son trifásicas y de igual magnitud para cada fase.
- El sistema en algunos casos resulta ser singular.

Se toman de las matrices  $\bar{Y}_{barra}$  solo las filas correspondientes a los medidores escogidos, por ejemplo, si hay medidores en las barras 1, 3 y 5 se toma las filas 1,3 y 5 de la matriz  $\bar{Y}_{barra}$  que describirá el sistema con medidores limitados; como se observa en la tabla 9 se obtiene la sub-matriz  $[\bar{Y}_{barra-sub}]^{(1)}$  para el primer orden armónico en el sistema de 6 barras con 3 medidores.

$$[\bar{Y}_{barra-sub}]^{(1)} =$$

**Tabla 9 Matriz  $[\bar{Y}_{barra}]^{(1)}$  con 3 medidores en los nodos 1, 3, 5.**

12,03-10,34j	-5,55+4,77j	0	0	0	0
0	-4,86+4,17j	12,64-10,85j	-7,78+6,68j	0	0
0	0	0	-4,32+3,71j	12,1-10,39j	-7,78+6,68j

El los resultados de las matrices  $\bar{Y}_{barra}$  para los armonicos 3, 5, 7 y 9 se encuentran en el anexo 10.

### **3.8 CÁLCULO DE LA MATRIZ $\bar{Z}_{barra}$ A PARTIR DE LA MATRIZ $\bar{Y}_{barra}$ USANDO SVD Y EL SOFTWARE DE MATLAB CUANDO HAY MENOR NUMERO DE MEDIDORES QUE NODOS EN EL SISTEMA**

Al construir la matriz de admitancias como se muestra en el numeral 2.7 se aplica el procedimiento explicado en el numeral 2.5 a cada sub-matriz  $[\bar{Y}_{barra-sub}]^{(n)}$

obteniendo las matrices que hacen parte de la descomposición como se muestran en las tablas 10-12.

$$[\bar{U}]^{(1)} =$$

**Tabla 10 Matriz  $[\bar{U}]^{(1)}$ .**

-0,2201-10,34j	0,3888+4,77j	-0,8947	0	0	0
-0,8036	0,4477+4,17j	0,3922-10,85j	6,68j	0	0
-0,553	-0,8053	-0,2139	3,71j	-10,39j	6,68j

$$[\bar{V}]^{(1)} =$$

**Tabla 11 Matriz  $[\bar{V}]^{(1)}$ .**

21,8312	0	0	0	0	0
0	18,9556	0	0	0	0
0	0	16,8741	0	0	0

$$[\bar{W}]^{(1)} =$$

**Tabla 12 Matriz  $[\bar{W}]^{(1)}$ .**

-0,12-0,1j	0,25+0,21j	-0,64-0,55j	-0,22+0,15j	0,11-0,23j	-0,07+0,15j
0,23+0,2j	-0,23-0,2j	0,18+0,16j	-0,47+0,33j	0,23-0,5j	-0,15+0,32j
-0,47-0,4j	0,3+0,26j	0,29+0,25j	0,24+0,13j	0,32-0,26j	-0,21+0,17j
0,4+0,34j	0	-0,13-0,11j	0,69	0,38-0,11j	-0,25+0,07j
-0,31-0,26j	-0,51-0,44j	-0,15-0,13j	0,17	0,39-0,03j	0,39+0,02j
0,2+0,17j	0,33+0,28j	0,1+0,08j	-0,11	0,39+0,02j	0,75-0,01j

Los resultados de las componentes U, V y W para los armónicos 3, 5, 7 y 9 se pueden encontrar en el anexo 10.

Ahora a partir de la reorganización y operación de las matrices U, V y W se obtiene la matriz de  $\bar{Z}_{\text{barra}}$  como se muestra a continuación en la tabla 13.

$$[\bar{Z}_{\text{barra-sub}}]^{(1)} = W * V^{-1} * U' =$$

**Tabla 13 Matriz  $[\bar{Z}_{\text{barra-sub}}]^{(1)}$ .**

0,04+0,03i	0	0
-0,02-0,01i	-0,01-0,01i	0
0	0,03+0,03i	0
0	-0,02-0,02i	-0,01-0,01i
0	0	0,03+0,03i
0	0	-0,02-0,02i

### 3.9 CÁLCULO DE LAS MATRICES $\bar{Z}_{\text{barra}}^{(i)}$ ARMÓNICAS USANDO EL SOFTWARE DE MATLAB CUANDO HAY MENOR NUMERO DE MEDIDORES QUE NODOS EN EL SISTEMA

A cada matriz de  $\bar{Z}_{\text{barra}}$  del literal 2,6 se le aplica SVD para encontrarle su respectiva pseudo-inversa lo que permite encontrar las matrices de Ybarra para los diferentes armónicos que están trabajando (3, 5, 7 y 9). Luego se aplica el mismo procedimiento relatado en el literal 2.7. y 2.8. para hallar las matrices de  $\bar{Z}_{\text{barra}}$  que representan al sistema singular.

Los resultados para el tercer armónico se pueden ver en la tabla 14.

$$[\bar{Z}_{\text{barra-sub}}]^{(3)} =$$

**Tabla 14 Matriz  $[\bar{Z}_{\text{barra-sub}}]^{(3)}$ .**

0,04+0,1i	-0,01i	0
-0,02-0,04i	-0,01-0,03i	0
-0,01i	0,03+0,08i	-0,01i
0,01i	-0,02-0,05i	-0,01-0,02i
0	-0,01i	0,03+0,08i
0	0,01i	-0,02-0,05i

Los resultados de las matrices de  $\bar{Z}_{\text{barra-sub}}$  para los armónicos 3, 5, 7 y 9 se pueden encontrar en el anexo 9.

### 3.10 ESTIMACIÓN DE ESTADO EN UN SISTEMA DE POTENCIA MEDIANTE MATLAB

para encontrar  $\bar{V}_{\text{barra}}$  se aplica la ley de ohm como se expresa en la ecuación 13:

$$\bar{V}_{\text{barra}} = \bar{Z}_{\text{barra}} * \bar{I}_{\text{barra}} \quad (13)$$

La ecuación 13 se convierte en la función objetivo para realizar la estimación de estado armónico. tomando los datos de corriente armónica previamente extraídos por el simulador ATP y las matrices  $\bar{Z}_{\text{barra}}$  armónicas calculadas en el literal anterior.

### 3.11 VALIDACIÓN VISUAL DE RESULTADOS

Cada respuesta de estimación es comparada con los datos de tensión reales (obtenidos del software de ATP-Draw) mediante un cálculo de error relativo llevado a cabo en cada barra del sistema y para cada armónico. Estos errores se registraron en las tablas y se graficaron para una mejor interpretación. Estas tablas se pueden ver en el Anexo 9 y 10. Todos los cálculos realizados para la obtención de las tensiones armónicas se realizaron en el código de MATLAB “estimación para el sistema de 6 barras ANEXO 5”.

**3.11.1 Estimación de tensiones para un sistema con medidores en todos los nodos del sistema** Para la estimación de las tensiones armónicas se hace uso de la  $[\bar{Z}_{barra}]$  calculada en el numeral 2.5, la cual se multiplica por las corrientes (ecuación 13) que se extrajeron del software ATP en el numeral 2.3.1 y se obtienen así las tensiones en los nodos del sistema. Ver tabla 15.

$$[\bar{V}_{barra}]^{(1)} =$$

**Tabla 15 tensiones estimadas para el primer armónico en un sistema de 6 barras y 6 medidores**

Barra	respuesta SVD	
	magnitud	fase
1	7612.583	-4.00E-04
2	7604.521	-8.00E-04
3	7596.302	-0.001
4	7591.565	-0.002
5	7585.158	-0.002
6	7583.304	-0.002

Para el caso en el que hay medidores en cada nodo del sistema se pasa directamente a la comparación de resultados. Como se ve en la tabla 16 se obtienen los resultados para cada nodo del sistema; las tablas de resultados de los armónicos se presentan en el Anexo 9. En los resultados se presentan graficas ilustrativas de los resultados obtenidos en donde se ven las tendencias de la estimación armónica realizada con respecto a los datos reales extraídos de ATP.

Comparación de  $[\bar{V}_{barras}]^{(1)}=$

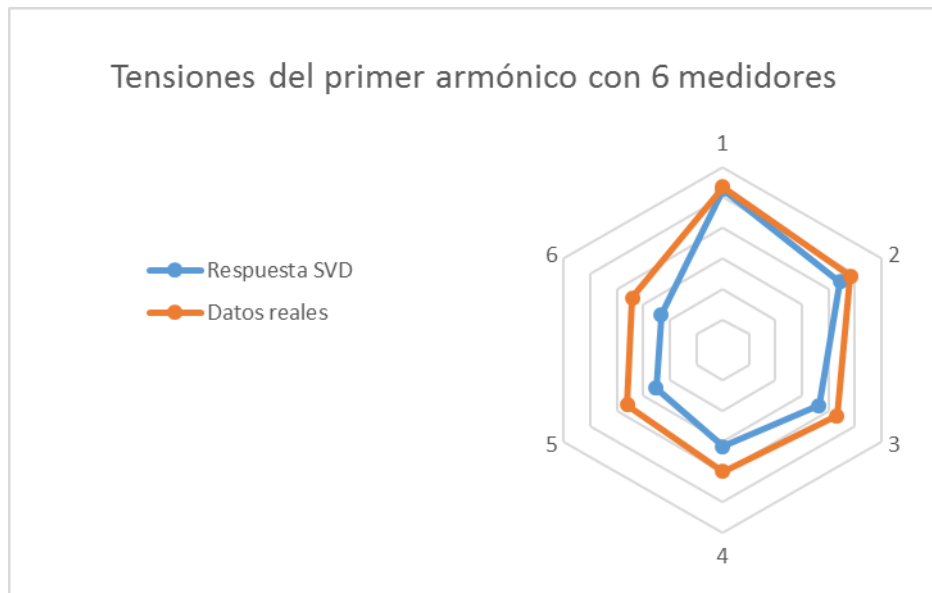
**Tabla 16 comparación de las tensiones estimadas para el primer armónico en un sistema de 6 barras y 6 medidores con los datos extraídos de ATP**

Tensiones del primer armónico usando 6 medidores				
Barra	respuesta SVD		resultado ATP	
	magnitud	fase	magnitud	fase
1	7612.583	-4.00E-04	7613.4	-0.9392
2	7604.521	-8.00E-04	7608.3	-0.9388
3	7596.302	-0.001	7603.1	-0.9384
4	7591.565	-0.002	7599.9	-0.9383
5	7585.158	-0.002	7596	-0.9379
6	7583.304	-0.002	7594.1	-0.9380

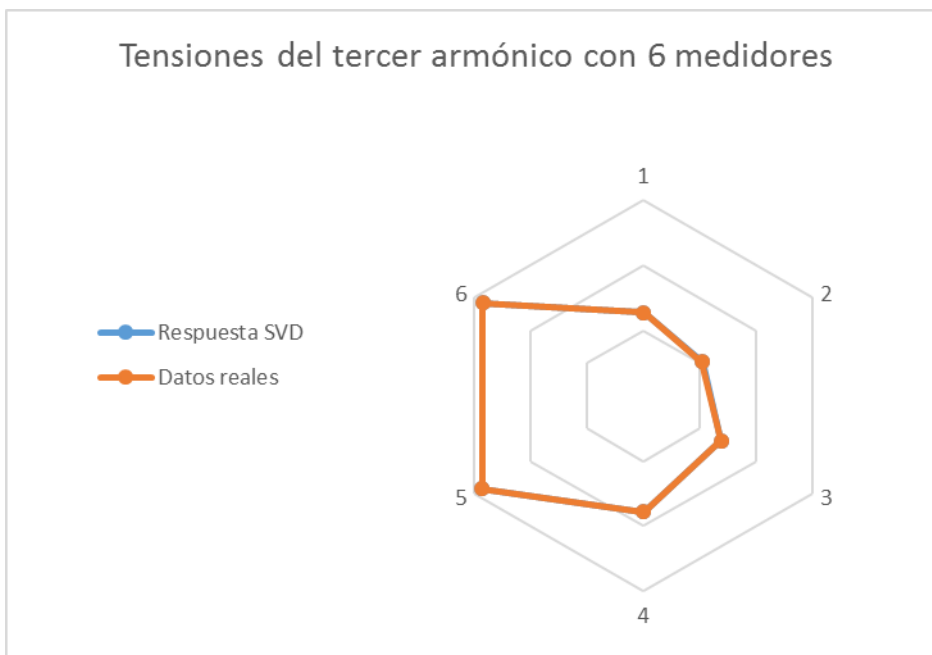
Las gráficas aquí presentadas desde la 10 a la 19 muestran la tendencia de las tensiones estimadas como comparación de las tensiones halladas con el método SVD y las obtenidas por ATP junto a sus graficas de error para cada orden armónico.

Resultados obtenidos para el sistema de 6 barras completamente determinado.

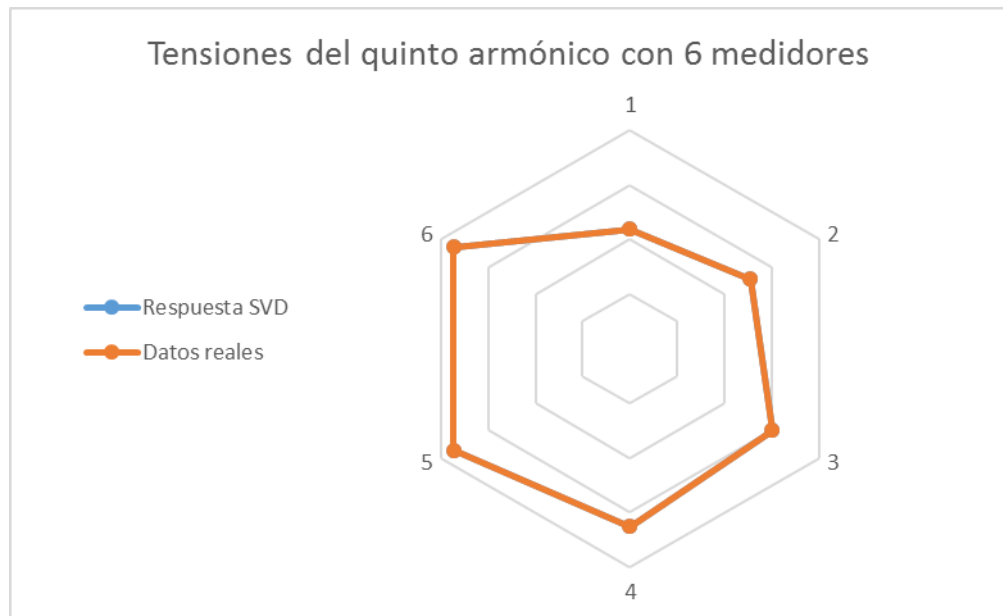
**Figura 10 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico**



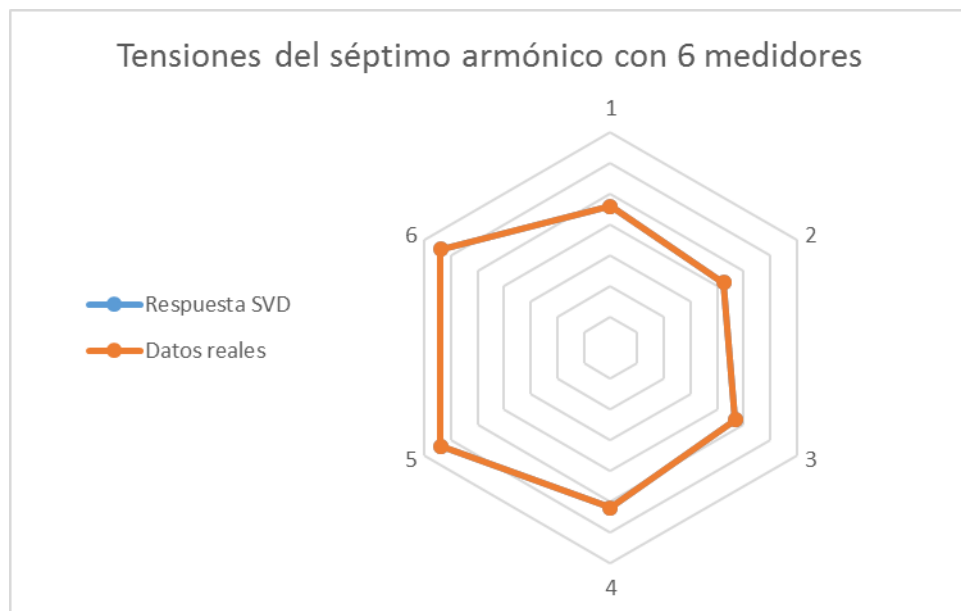
**Figura 11 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico**



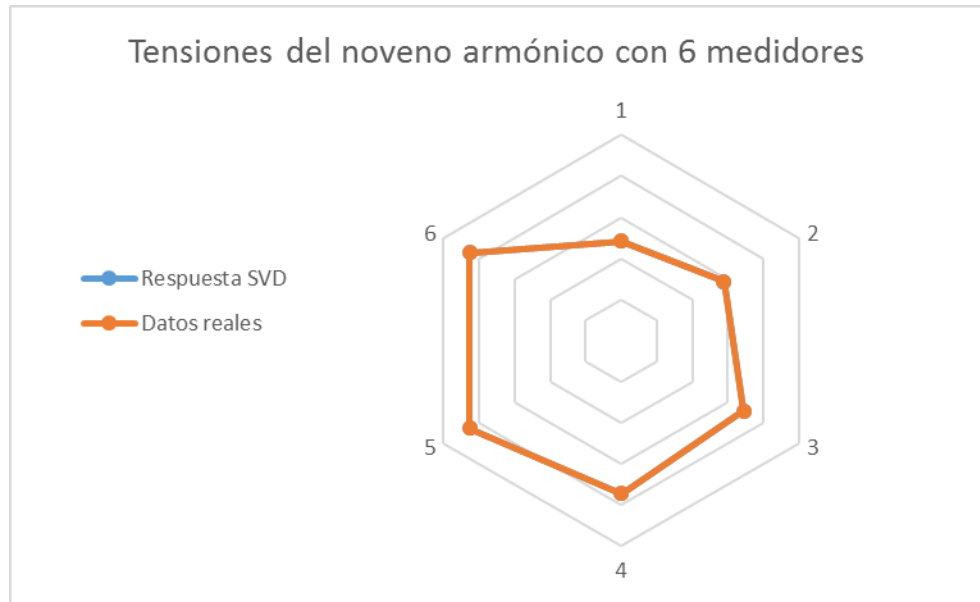
**Figura 12 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico**



**Figura 13 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico**



**Figura 14 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD y los datos reales extraídos de ATP para el noveno orden armónico**



**3.11.2 Estimación de tensiones para un sistema con menor número de medidores que de nodos** Para el caso en el que hay menor número de medidores que de nodos en el sistema se pasa al literal 2.12. dado que en los resultados obtenidos se puede apreciar que no hay similitud entre los valores estimados y los reales como se ve en el ejemplo para tres medidores en el sistema de 6 barras para el primer orden armónico en la tabla 17, los resultados obtenidos para la estimación con menor número de medidores (2, 3 y 4) en el sistema de 6 barras se observan en el anexo 10.

Comparación de  $[\bar{V}_{barra-sub}]^{(1)}=$

**Tabla 17 comparación de las tensiones estimadas para el primer armónico en un sistema de 6 barras y 3 medidores con los datos extraídos de ATP**

Tensiones del primer armónico usando 3 medidores				
Barra	respuesta SVD		resultado ATP	
	magnitud	magnitud	magnitud	fase
1	3442.251	7613.400	7613.400	-0.834
2	1431.489	7608.300	7608.300	-1.412
3	408.698	7603.100	7603.100	-0.969
4	230.941	7599.900	7599.900	-0.483
5	57.585	7596.000	7596.000	-0.989
6	37.019	7594.100	7594.100	-1.239

### 3.12 CORRECCIÓN DE DATOS ESTIMADOS MEDIANTE MATLAB

Como se observará en los resultados presentados a continuación en el numeral 2.11.2, se nota que las respuestas obtenidas por la metodología de estimación armónica SVD en sistemas singulares arroja resultados dentro del conjunto de posibles soluciones pero que no corresponde a la respuesta real del sistema. Debido a esto se introdujo una solución a este problema complementado la herramienta desarrollada; dicha solución es un ajuste de datos por medio de la optimización de los resultados limitados en el espacio dado por la combinación lineal de los vectores de espacio nulo, suministrados por la herramienta SVD, los cuales corresponden a los ceros mostrados en la diagonal de las matrices [V] y que se observan numéricamente en la misma ubicación de estas columnas cero, pero en la matriz [W]. Al usar estos vectores de espacio nulo y combinarlos con constantes se obtiene una respuesta óptima.

En Matlab solo se programan las operaciones que se muestra en los anexos 5 y 7. Este proceso se debe hacer para cada uno de los armónicos y casos que se trabajen. Si los datos desde la validación visual son acertados entonces no se realiza esta corrección y se pasa a calcular el error como se indica en el numeral 2.14 con Excel.

### **Coefficientes de corrección $k(j)$ para análisis de estimación**

Debido a que el método de estimación de estado de las componentes armónicas SVD arroja una respuesta dentro de un conjunto finito de soluciones, el cual está limitado por un conjunto de vectores de espacio nulo la respuesta arrojada por este método no siempre es la indicada; por esta razón es necesaria una herramienta para la corrección de datos; la cual se expone a continuación.

De las matrices  $[\bar{Z}_{\text{barra-sub}}]$  y de la  $[\bar{I}_{\text{inyectada}}]$  se concluye que se tiene un sistema sub-determinado del cual se obtienen infinitas soluciones, de esta misma se determina una solución natural del sistema y adicionalmente un conjunto dentro del cual se encuentra la respuesta real, este conjunto se determina por una combinación lineal de los vectores nulos del sistema.

$$[\bar{V}_{\text{barra-medidor}}]_{(i,1)}^{(\text{armonico})} = [\bar{V}_{\text{barra-SVD}}]_{(i,1)}^{(\text{armonico})} + \sum_{j=1}^b \sum_{i=\text{medidor}+j}^a (k(j)) * [\text{Vector de espacio nulo}]_{(i,\text{medidor}+j)}^{(\text{armonico})} \quad (14)$$

$\bar{V}_{\text{barra-medidor}}$ : vector de fasores de tensión medidos

$\bar{V}_{\text{barra-SVD}}$ : vector de fasores de tensión resultado de la estimación de estado armónico

$k(j)$ : coeficientes de corrección

Vector de espacio nulo: vector de números complejos extraído de la matriz  $[\bar{W}]^{(j)}$  según el criterio de valores propios cero vistos en la matriz  $[\bar{U}]^{(j)}$

$j$ : contador de armónicos 1, 3, 5, 7 y 9

$i$ : contador de medidores determinado según el número de medidores que se halla elegido y la barra (1, 3 y 5)

Parte importante de la ecuación (14) es suponer que además conocer el valor de algunas corrientes inyectadas también conocemos el valor de la tensión en los mismos nodos donde se realiza la medición de las corrientes

Como se ve en la ecuación (14), el único dato desconocido para el estudio son los valores de  $k(j)$ ; para determinar estos valores se utiliza el algoritmo *Levenberg-Marquardt* programado en una de las aplicaciones internas del software Matlab; esta herramienta se puede encontrar en la aplicación de *optimtool* seleccionando el método de solución “*fsolve- Nonlinear equation solving*”.

### **Algoritmo de Levenberg-Marquardt (L-M)**

El algoritmo L-M es una técnica iterativa que localiza el mínimo de una función multi-variable que se expresa como la suma de los cuadrados de funciones no lineales. Se ha convertido en una técnica estándar para problemas no lineales de mínimos cuadrados usado comúnmente en diferentes escenarios.

Se puede considerar cómo una combinación de máxima pendiente y el método de Gauss-Newton. Cuando la solución actual está cerca de la solución correcta, se convierte en un método de Gauss-Newton mientras que si la solución está lejos de ser la correcta el método altera la diagonal cuadrada del producto de jacobianos en las ecuaciones normales de Gauss-Newton, lo que mejora la estabilidad del L-M por sobre el G-N [17].

## Justificación de selección del método levenberg-Marquadt

En la ecuación 15 se tiene un caso de minimización de una función no lineal con múltiples variables. Este conjunto de características no permite un desarrollo con cualquier método, por ende, se selecciona un algoritmo con la robustez y confiabilidad suficiente para minimizar las funciones que se están tratando en este trabajo. El método L-M es un algoritmo capaz de minimizar funciones con estas características.

Si se toma como referencia la optimización como posible herramienta de estimación de estado por su cualidad de encontrar múltiples variables minimizando una función objetivo, es notorio que en un sistema de estas características no es recomendable aplicarlo, debido a que el espacio de respuestas es muy grande en comparación con el rango de posibles respuestas que nos puede brindar el acercamiento en un sistema sub determinado con SVD, que también proporciona un conjunto de vectores de espacio nulo. Al intentar hacer estimación con solo la función de optimización no se tendría un punto de referencia y solo se podría calcular una constante, lo que limita el acercamiento a una posible respuesta ideal del sistema de estimación de estado; por lo tanto, la optimización tuvo un papel importante en el ajuste de datos suministrado por SVD llevando a encontrar la respuesta más óptima reflejada en los bajos porcentajes de error calculados en el análisis de los datos.

## **Optimización**

Por las razones expuestas es necesario hacer el ajuste de los datos obtenidos por medio de SVD, esto por medio de la optimización de los datos conocidos y la combinación lineal de los vectores de espacio nulo arrojados por la respuesta después de la descomposición en valores singulares; ahora se muestra de manera detallada la forma en que se realizó la optimización:

La función a optimizar es la siguiente:

Y =

$$(15) \quad \sqrt{\left\{ \left( [\bar{V}_{\text{barra-SVD}}]_{(i,1)}^{(\text{armonico})} + \sum_{j=1}^b \sum_{i=\text{medidor}+j}^a (k(j)) * [\text{Vector de espacio nulo}]_{(i,\text{medidor}+j)}^{(\text{armonico})} \right) - [\bar{V}_{\text{barra-medidor}}]_{(i,1)}^{(\text{armonico})} \right\}^2}$$

$\bar{V}_{\text{barra-medidor}}$ : vector de fasores de tensión medidos

$\bar{V}_{\text{barra-SVD}}$ : vector de fasores de tensión resultado de la estimación de estado armónico

$k(j)$ : coeficientes de corrección

Vector de espacio nulo: vector de números complejos extraído de la matriz  $[\bar{W}]^{(j)}$  según el criterio de valores propios cero vistos en la matriz  $[\bar{U}]^{(j)}$

$j$ : contador de armónicos 1, 3, 5, 7 y 9

$i$ : contador de medidores determinado según el número de medidores que se halla

En esta ecuación se separan las constantes  $K(j)$  que multiplican los vectores de espacio nulo, de modo que la función de error debe dar lo más cercano posible al cero.

Para el sistema evaluado la ecuación del primer armónico a minimizar es la siguiente:

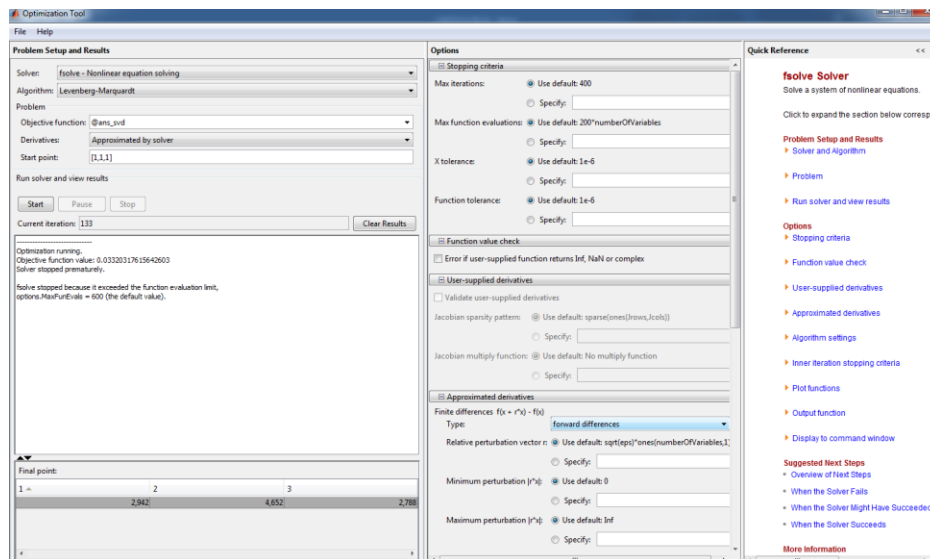
$$f(k(i)) =$$

$$\sqrt{\begin{pmatrix} (4495.4489 - 6144.4933i) - ((3.4423e + 03 - 4.4761e - 02i) + (k(1) * (-0.2188 + 0.1537i)) \\ (4493.7528 - 6132.9694i) - ((-4.0870e + 02 - 1.0058e - 02i) + (k(1) * (0.2415 + 0.1307i)) \\ (4492.6571 - 6124.9691i) - ((57.5841 - 0.2434i) + (k(1) * (0.1741 + 0.0011i)) + k(1) \end{pmatrix}} \quad (16)$$

En donde se organizan los datos correspondientes a la tensión real a la que se quiere llegar y la obtenida por la estimación con SVD, alterada por la suma de las constantes  $K(j)$  que multiplican los vectores de espacio nulo.

Las ecuaciones para el tercero, quinto, séptimo y noveno armónico se desarrollan de igual forma, siguiendo la ecuación (16); En el script de Matlab se pueden ver todas las ecuaciones programadas para cada orden armónico, mostrados en los archivos de MATLAB “ans\_svd\_2”, “ans\_svd\_3”, “ans\_svd\_4” en la carpeta ANEXO 6; Y la configuración del *optimtool* se muestra en la figura 15:

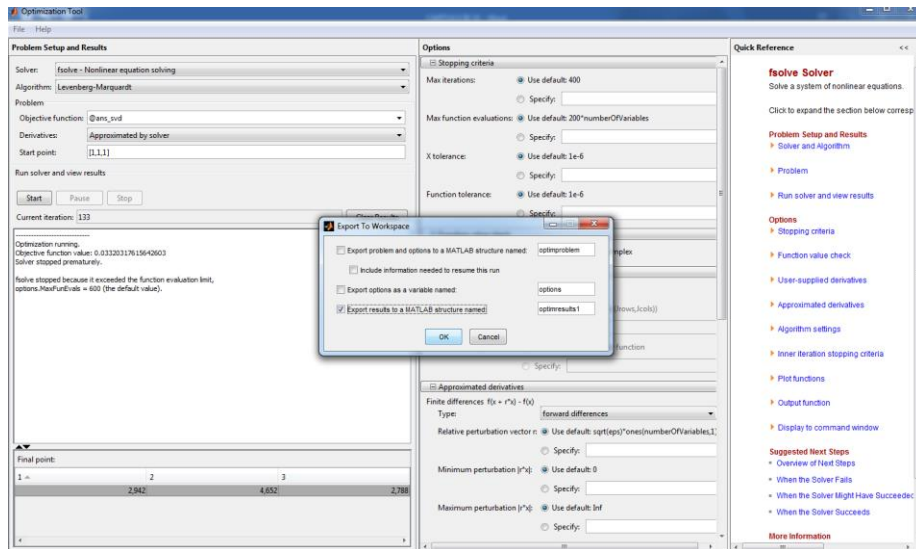
**Figura 15 Ventana de la herramienta *optimtool* de Matlab**



De la figura 15 se resalta la opción *solve* en la que se selecciona el método de solución “*fsolve- Nonlinear equation solving*” y en la opción *algorithm* “*Levenberg-Marquardt*”, el punto inicial depende del número de medidores que se elija, para este caso se tomó como punto inicial [1, 1, 1].

Luego que la aplicación termine de minimizar la función error; es necesario exportar los valores de  $K(j)$ ; que en el programa hecho en matlab se denotan con las variables  $X(i)$ , (estos script se pueden ver en los anexos del 5.1.1. al 5.1.3. En el workspace se verán los valores reales de estos  $K(j)$ ). Para exportar los datos se escoge la opción *file* en la ventana de optimización, luego la opción *exportar*, con esto se despliega una ventana como se ve en la figura 16, y luego se selecciona la opción mostrada en la figura 16; a continuación se le da *OK* para así exportar los datos.

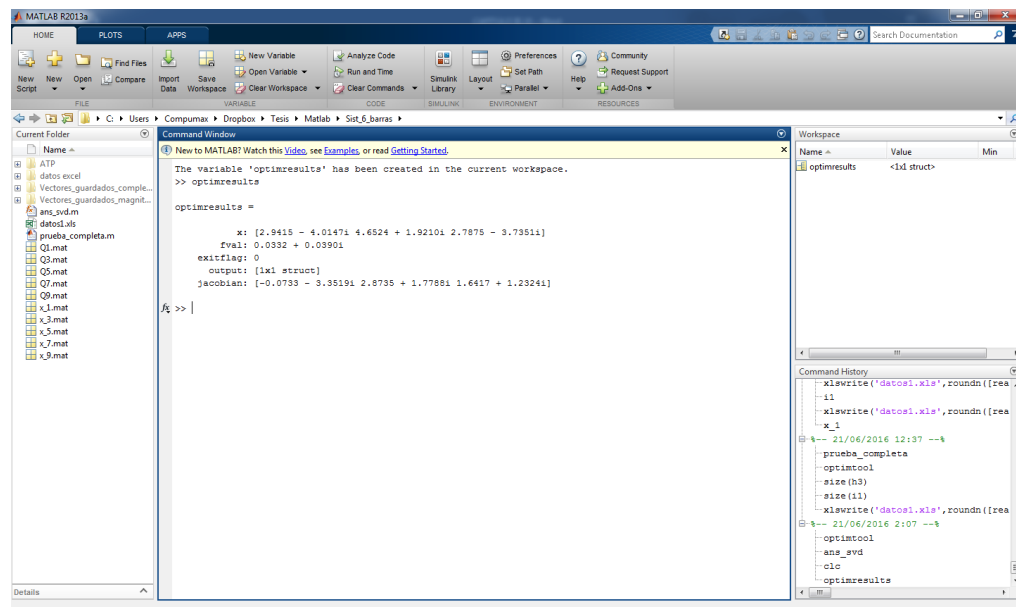
**Figura 16 Ventana de exportación de datos al workspace**



En la figura 17, se ve que un mensaje que dice que los datos han sido exportados, y también menciona como se guardaron en el sistema.

Para este caso las constantes  $K(j)$  o  $X(i)$  según la notación del código, quedan guardados en la variable *optimresults* y para obtener solo los valores de  $x$  se escribe en la ventana de comandos *optimresults.x*, de esta manera se obtienen las constantes con las que se hace el ajuste de los datos obtenidos por la estimación con SVD obteniendo una respuesta mucho mas cercana a la real, como se observa en los resultados obtenidos en la estimación de estado armonico en el sistema de 6 y 32 barras sub-determinado.

**Figura 17 Visualización de datos en la ventana workspace**



El proceso se debe realizar para cada uno de los armónicos y también para cada nuevo medidor usado en el proceso de estimación; Esto arrojará un conjunto de  $K(j)$  que se muestra en la tabla 18 en este caso para cuando se tienen 3 medidores en el sistema de 6 barras.

**Tabla 18 Variables  $K(j)$  para el sistema de 6 barras con 3 medidores**

<b>Armónico</b>	<b>k (1)</b>	<b>k (2)</b>	<b>k (3)</b>
1	2323-4690j	13863+8386j	3478-5370j
3	7,3416-3,5894j	6,6363-11,4133j	6,1167+3,7505j
5	2,5215-8,0263j	8,0263+0,5115j	2,0715+8,0467j
7	2,2329+0,9917j	-1,7443+4,592j	2,1687+1,7395j
9	2,9415-4,0147j	4,6524+1,921j	2,7875-3,7351j

### **3.13 PRUEBAS CON DIFERENTE NÚMERO DE MEDIDORES Y AJUSTE DE LA ESTIMACIÓN USANDO MATLAB**

A continuación, se realiza un análisis con diferente número de medidores ubicados aleatoriamente en el sistema teniendo en cuenta que sea menos medidores que nodos en el sistema. Para realizar una estimación de estado armónico aceptable es necesario conocer el número de medidores que se deben ubicar en la red para obtener resultados que no se alejen mucho de los resultados reales, en este caso por medio de las simulaciones se conoce el valor real al cual se debe llegar por lo tanto se realizó un barrido de prueba partiendo con la mitad de medidores y aumentando de uno en uno hasta llegar aproximadamente al 60% de los medidores y así obtener la respuesta que nos proporcione un mínimo de error aceptable en cada barra del sistema. Todos los cálculos realizados para la obtención de las tensiones armónicas se realizaron en el código de MATLAB “estimación para el sistema de 6 barras ANEXO 5”. Y las optimizaciones con los códigos mostrados en los archivos de MATLAB “ans\_svd\_2”, “ans\_svd\_3”, “ans\_svd\_4” en la carpeta ANEXO 6.

Este análisis del primer armónico se realizará con 2, 3 y 4 medidores en las tablas 19-21 se ven los resultados obtenidos para el primer orden armónico, los resultados para los demás armónicos se encuentran en el anexo 10.

**Tabla 19 tensiones estimadas y corregidas usando dos medidores en el sistema de 6 barras para el primer orden armónico.**

Tensiones del primer armónico usando dos medidores						
Barra	respuesta SVD		respuesta con Ki		resultado ATP	
	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase
1	3382,443	0,000	7613,398	-0,939	7613,400	-0,939
2	1561,077	3,142	13340,501	-1,507	7608,300	-0,939
3	0,000	0,000	1,000	0,000	7603,100	-0,938
4	0,269	0,331	5016,299	-0,938	7599,900	-0,938
5	0,753	-2,810	7596,000	-0,938	7596,000	-0,938
6	0,484	0,331	9029,699	-0,938	7594,100	-0,938

**Tabla 20 tensiones estimadas y corregidas usando tres medidores en el sistema de 6 barras para el primer orden armónico.**

Tensiones del primer armónico usando tres medidores						
Barra	respuesta SVD		respuesta con Ki		resultado ATP	
	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase
1	3442.251	0.000	7412.827	-0.834	7613.400	-0.939
2	1431.489	3.142	12047.656	-1.412	7608.300	-0.939
3	408.698	-3.142	7949.032	-0.969	7603.100	-0.938
4	230.941	0.000	6916.393	-0.483	7599.900	-0.938
5	57.585	-0.004	6825.543	-0.989	7596.000	-0.938
6	37.019	3.137	7490.662	-1.239	7594.100	-0.938

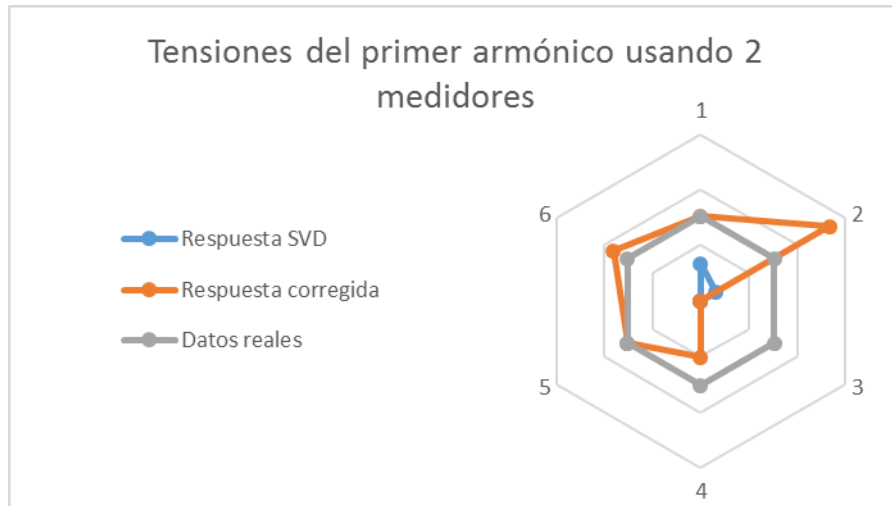
**Tabla 21 tensiones estimadas y corregidas usando cuatro medidores en el sistema de 6 barras para el primer orden armónico.**

Tensiones del primer armónico usando cuatro medidores						
Barra	respuesta SVD		respuesta con Ki		resultado ATP	
	magnitud	fase	magnitud	fase	magnitud	fase
1	3452.511	0.000	5871.824	-0.823	7613.400	-0.939
2	1409.258	-3.141	9329.046	-1.596	7608.300	-0.939
3	478.813	3.139	7301.138	-1.236	7603.100	-0.938
4	103.132	0.020	6727.542	-0.926	7599.900	-0.938
5	96.703	-0.009	6726.023	-0.927	7596.000	-0.938
6	94.862	-0.020	6725.735	-0.928	7594.100	-0.938

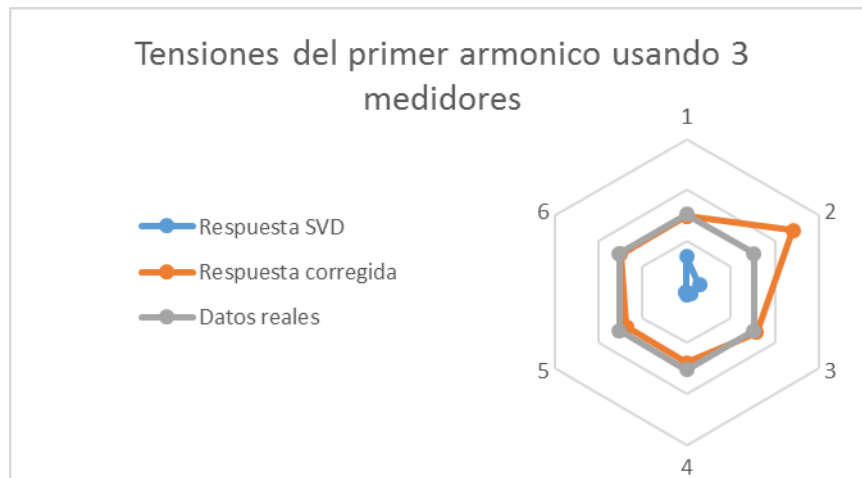
Las gráficas aquí presentadas muestran la tendencia como una comparación de las tensiones halladas con el método SVD y los datos reales de ATP para cada orden armónico.

- Primer orden armónico

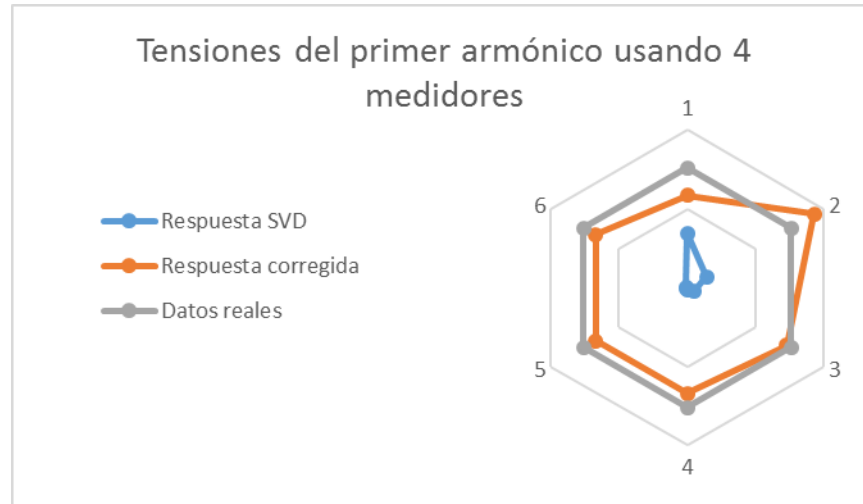
**Figura 18 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico con dos medidores**



**Figura 19 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico con tres medidores**

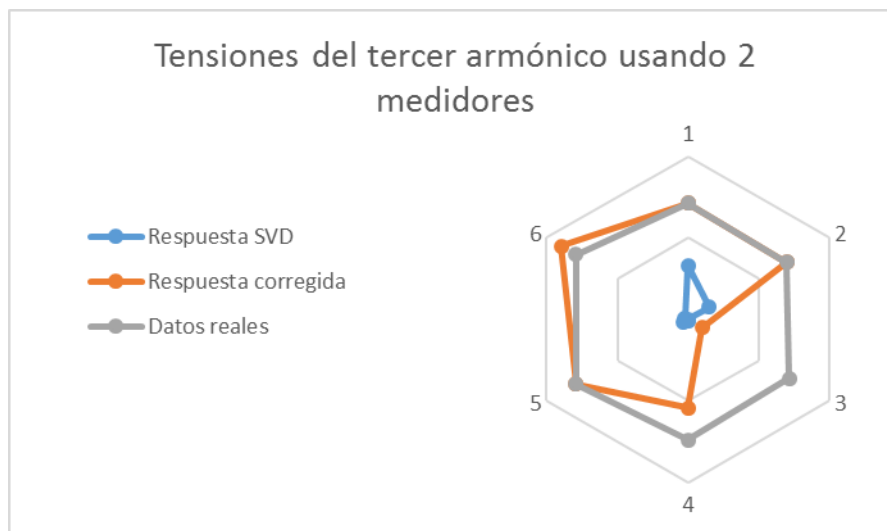


**Figura 20 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico con cuatro medidores**

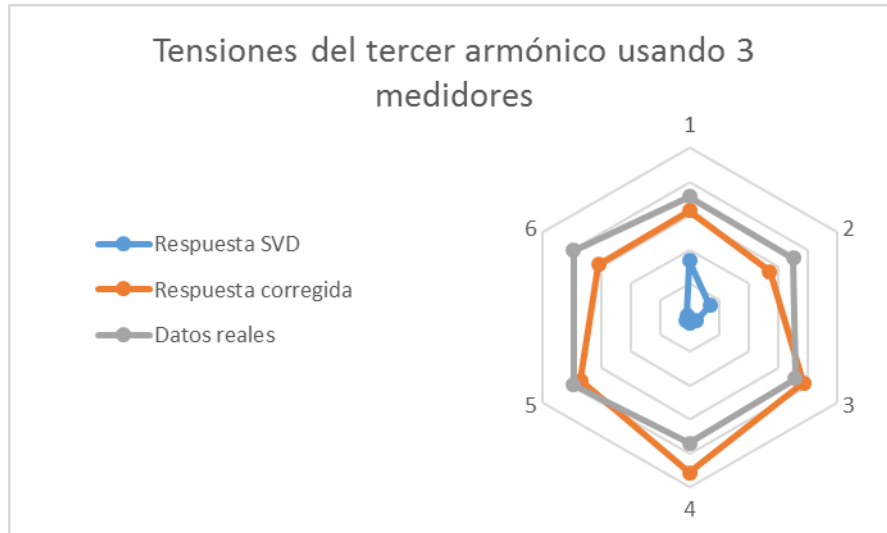


- **Tercer orden armónico**

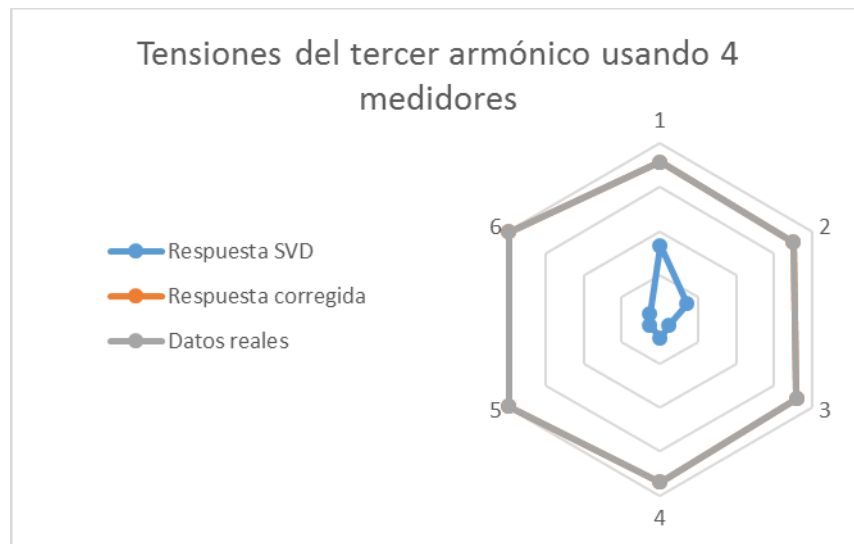
**Figura 21 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico con dos medidores**



**Figura 22 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico con tres medidores**



**Figura 23 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico con cuatro medidores**

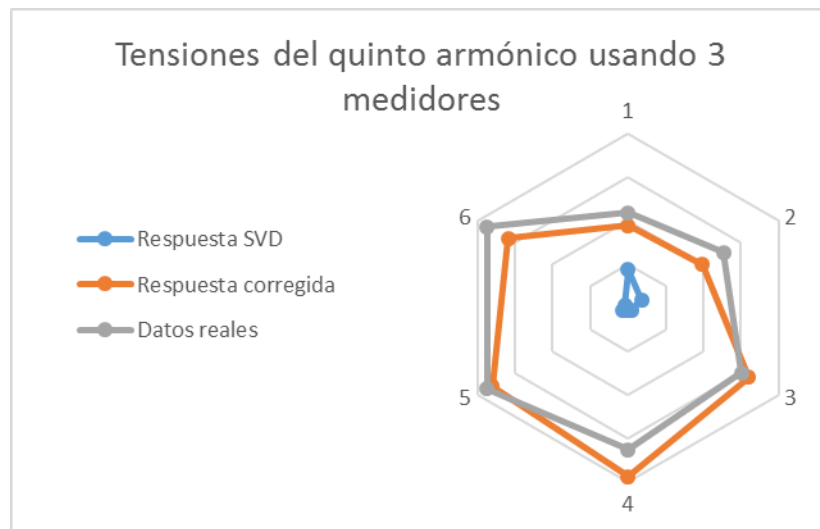


- Quinto orden armónico

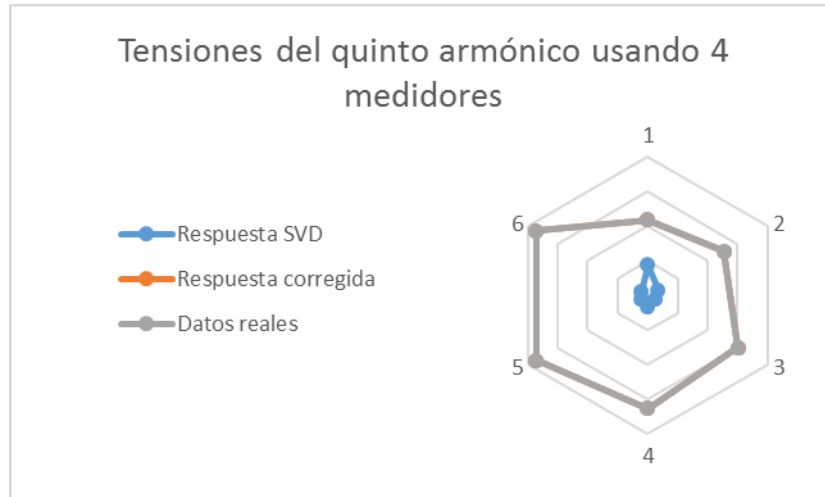
**Figura 24 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico con dos medidores**



**Figura 25 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico con tres medidores**

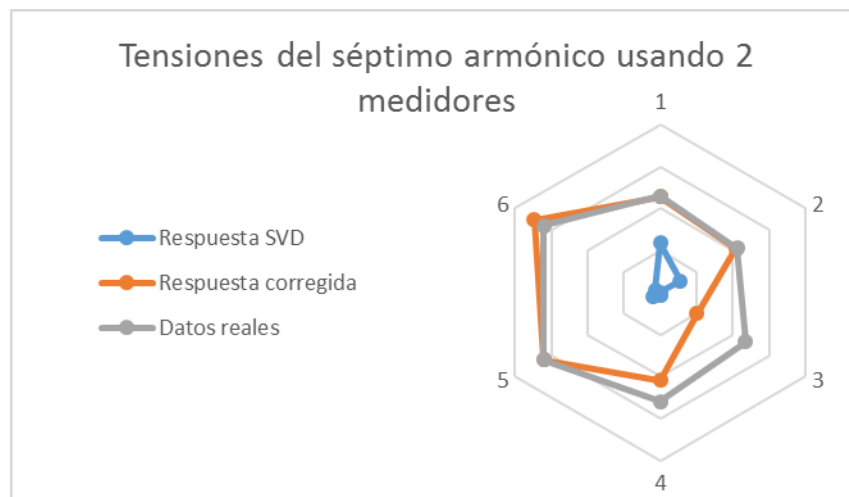


**Figura 26 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico con cuatro medidores**

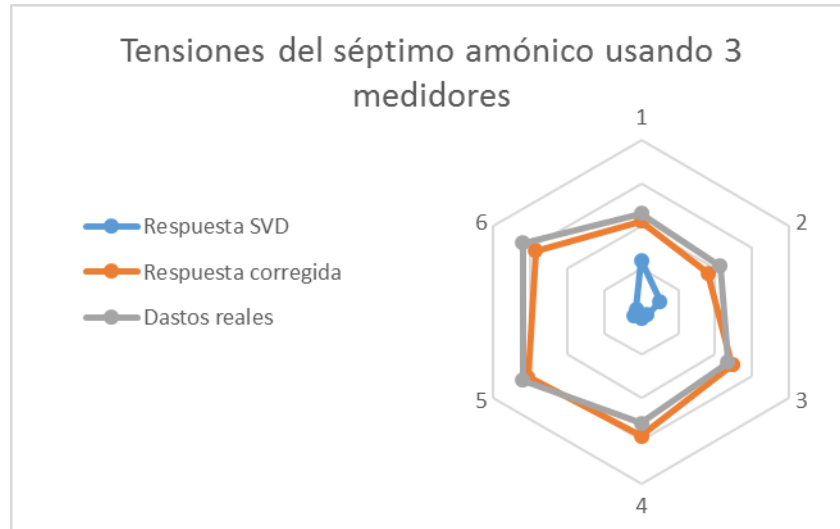


- **Séptimo orden armónico**

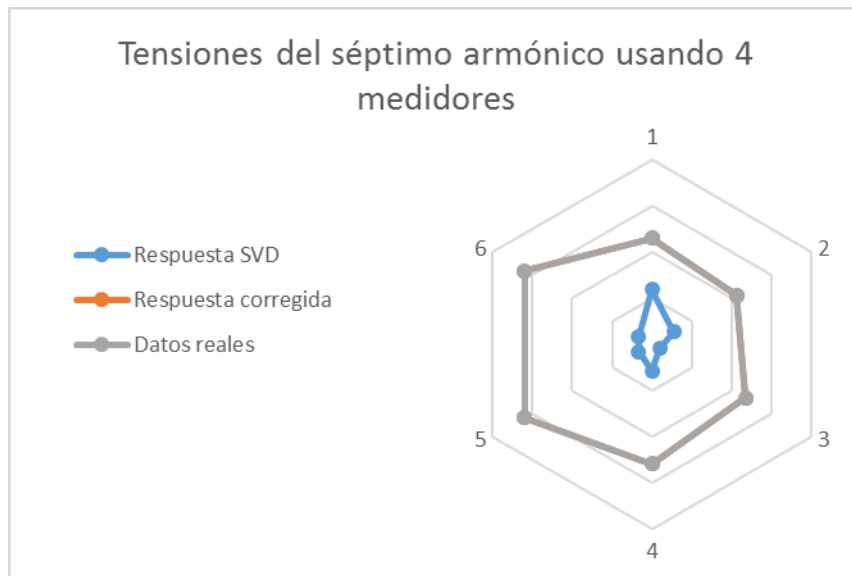
**Figura 27 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico con dos medidores**



**Figura 28 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico con tres medidores**

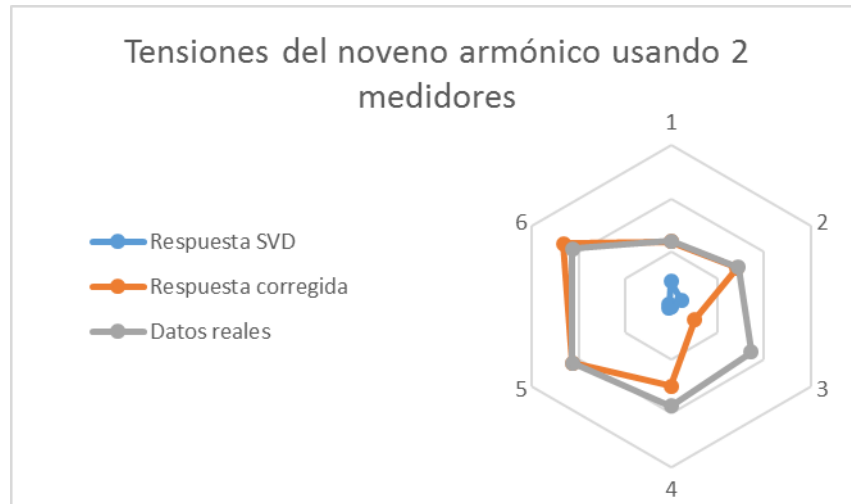


**Figura 29 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico con cuatro medidores**

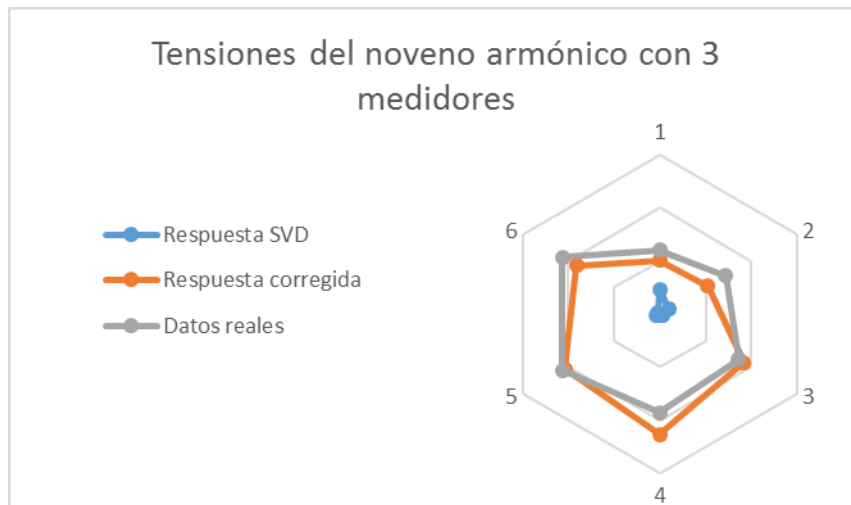


- **Noveno orden armónico**

**Figura 30 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el Noveno orden armónico con dos medidores**



**Figura 31 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el Noveno orden armónico con tres medidores**



**Figura 32 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el Noveno orden armónico con cuatro medidores**

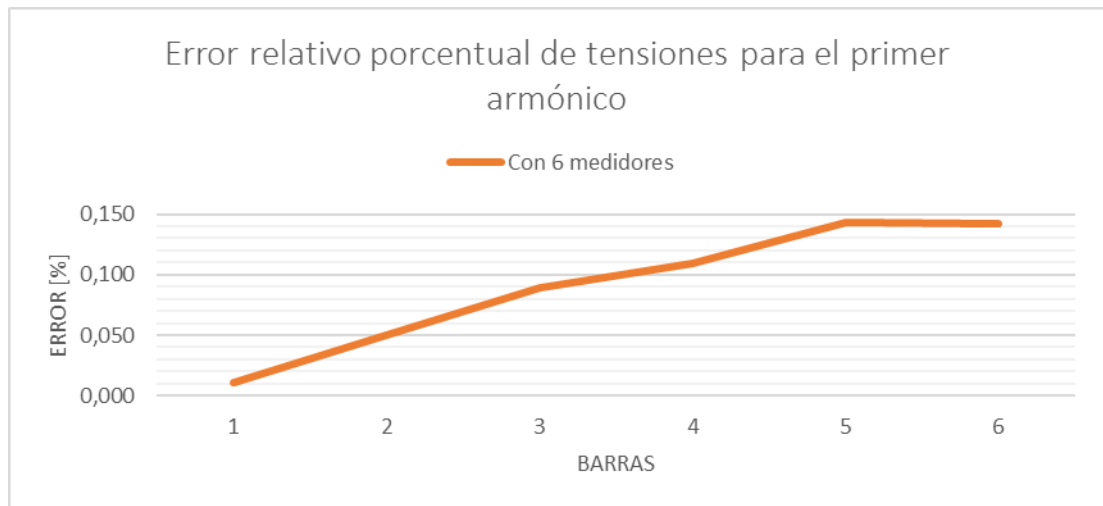


### 3.14 ERROR RELATIVO PORCENTUAL CON EXCEL

teniendo ordenados se calcula el error relativo porcentual de las magnitudes de las tensiones para permitir un análisis de detalle.

Cuando hay igual número de medidores que de nodos

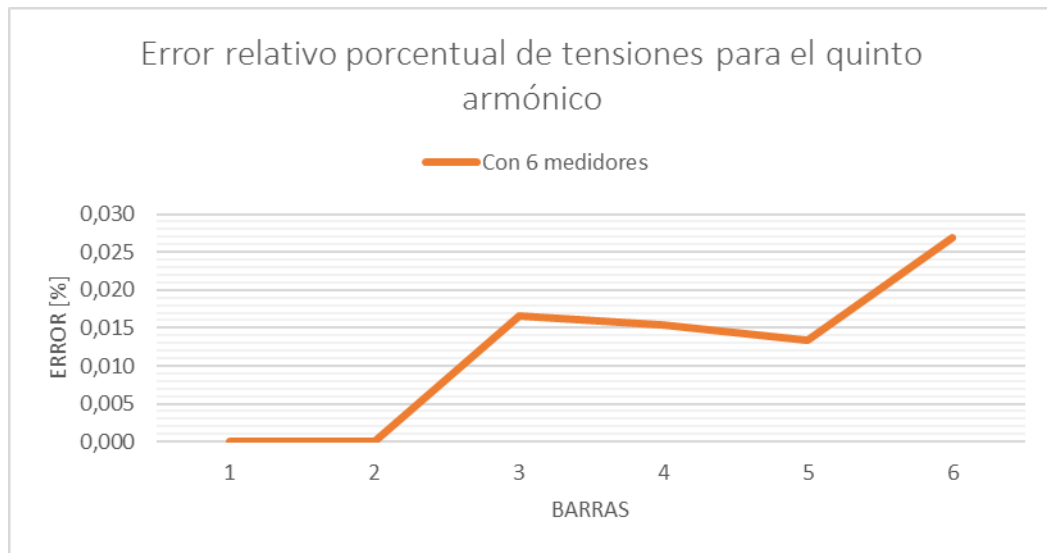
**Figura 33 Grafica del error relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el primer orden armónico.**



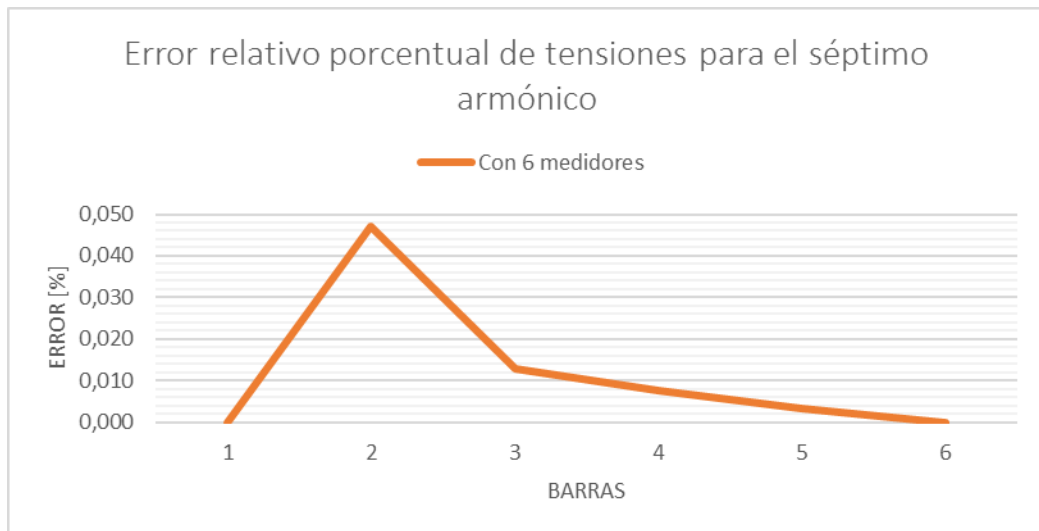
**Figura 34 Grafica del error relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el tercer orden armónico.**



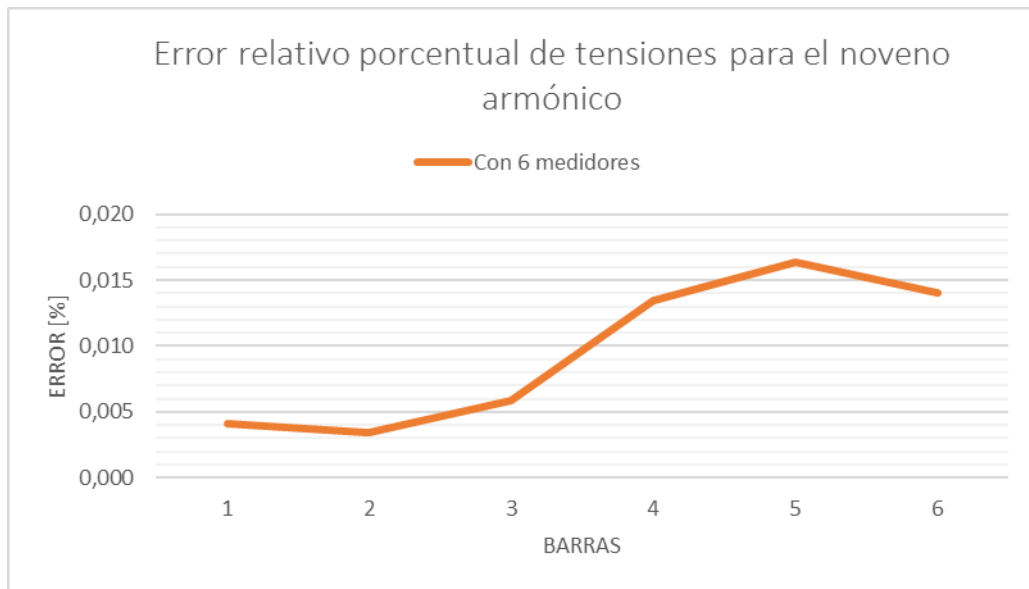
**Figura 35 Grafica del error relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el quinto orden armónico.**



**Figura 36 Grafica del error relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el séptimo orden armónico.**

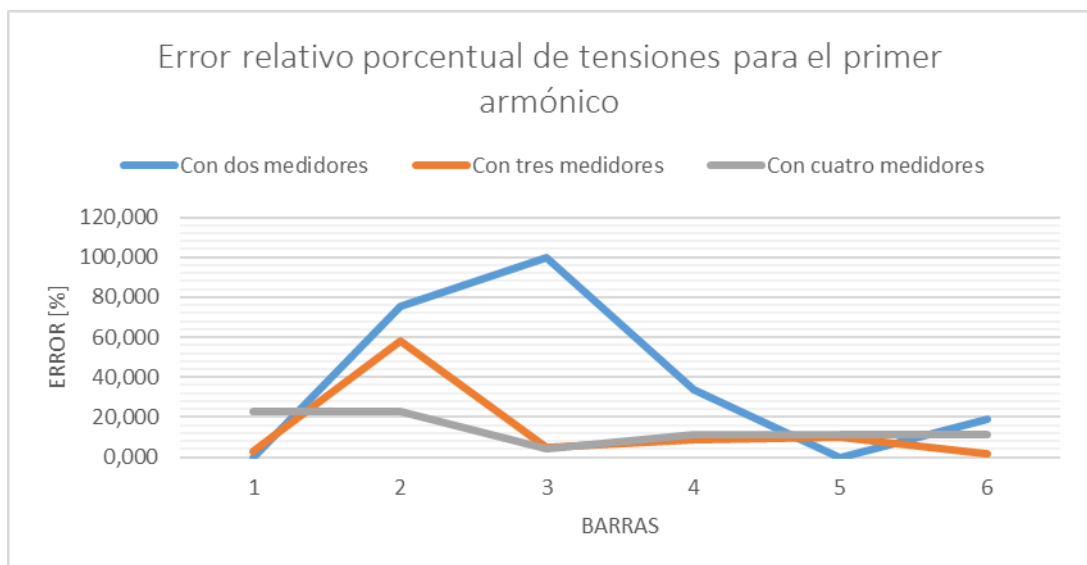


**Figura 37 Grafica del error relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el noveno orden armónico.**

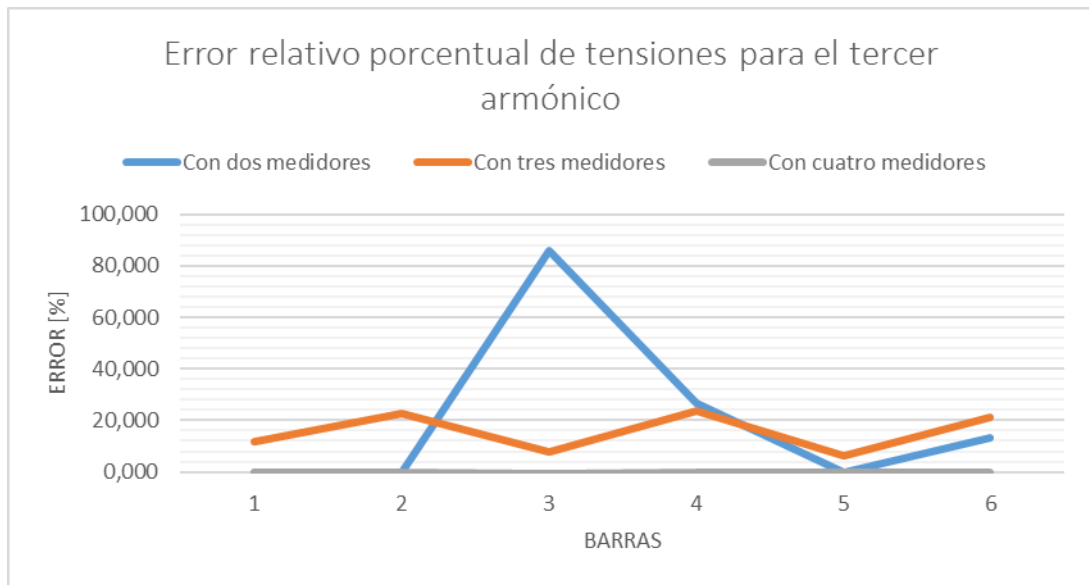


**Cuando hay menor número de medidores que de nodos**

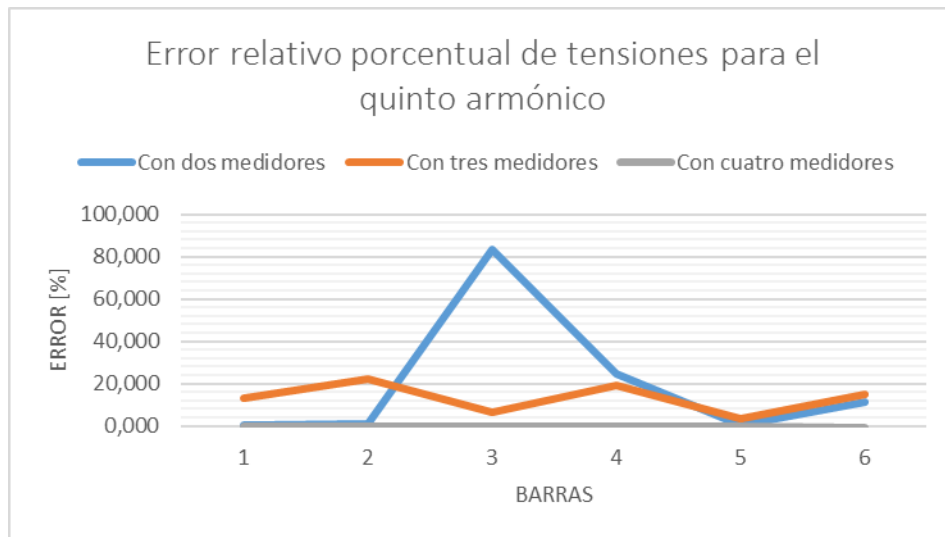
**Figura 38 Grafica de errores relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el primer orden armónico con diferentes medidores**



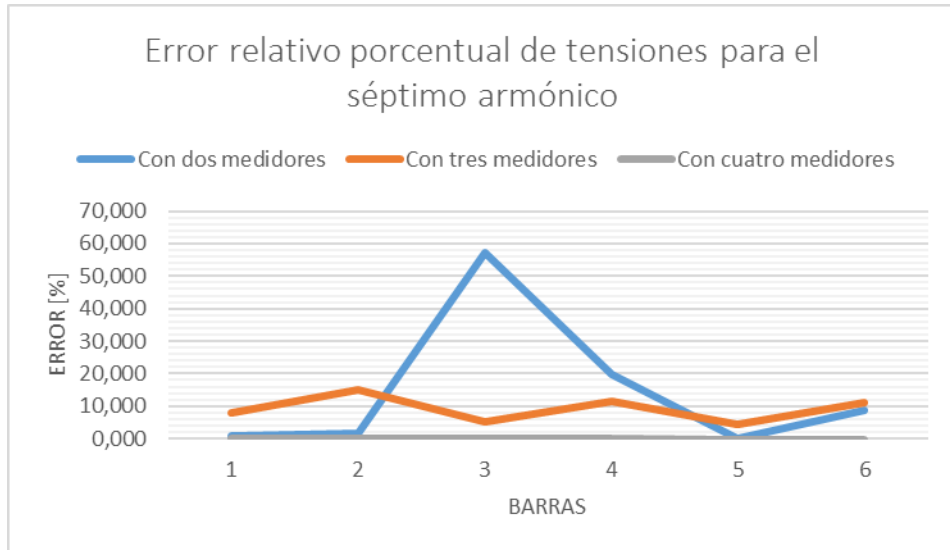
**Figura 39 Grafica de errores relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el tercer orden armónico con diferentes medidores**



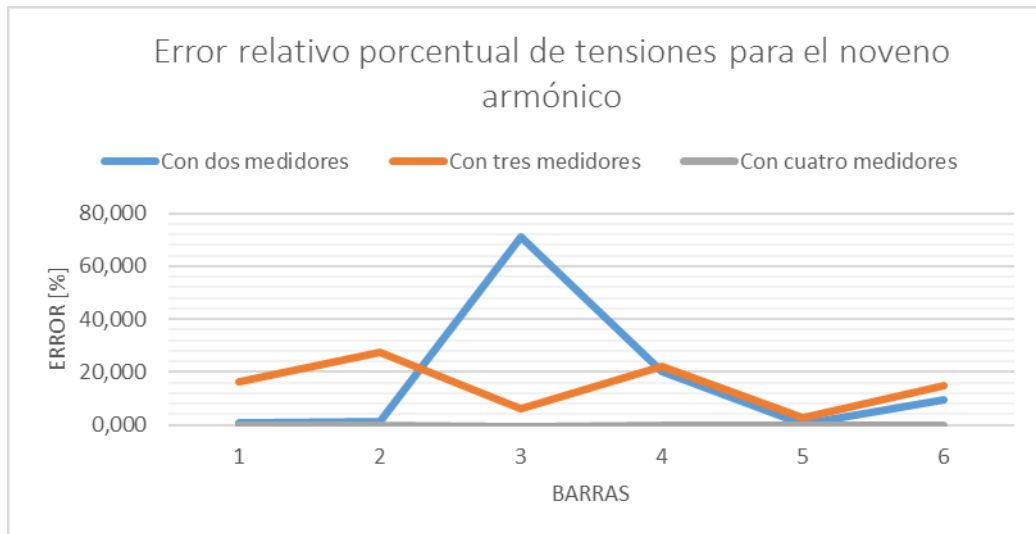
**Figura 40 Grafica de errores relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el quinto orden armónico con diferentes medidores**



**Figura 41 Grafica de errores relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el séptimo orden armónico con diferentes medidores**



**Figura 42 Grafica de errores relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el noveno orden armónico con diferentes medidores**



### **3.15 ANÁLISIS Y CONCLUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS**

Con los datos ya ordenados y los errores calculados se pueden realizar los análisis de resultados para determinar la capacidad del método en realizar una buena estimación de estado armónico.

#### **Análisis grafico**

Como el caso grafico permite una visualización intuitiva de la calidad de la metodología para estimación de estado armónico. Este análisis fue implementado en el documento durante el desarrollo de la metodología.

#### **Análisis de resultados**

Con 3 medidores y la suposición de un sistema balanceado, es posible realizar una estimación de tensiones aceptable, es decir con valores estimados muy cercanos a los valores reales de tensión; esta sería la cantidad mínima de medidores que se podrían instalar en un sistema de 6 barras, teniendo en cuenta que la media de error estaría entre el 15 y 20 %, como se puede evidenciar en las gráficas 38-42; ahora, observando los resultados obtenidos en las mismas gráficas, es notorio que los resultados obtenidos con el aumento de un medidor en el sistema disminuye de manera significativa estos errores, los cuales están alrededor del 1%.

Se optó por el análisis del error relativo el cual se aplica como se indica en el numeral 2.4. donde el valor resultante es el fasor de tensión estimado utilizando el método de SVD y el valor real es el fasor de tensión dado por el software de ATP. Para obtener el error relativo porcentual se halla la magnitud del error relativo se multiplica por 100, de este modo los datos nos ayudan a darnos una idea del nivel de contaminación de cada armónico en cada sección del sistema.

Se concluye que la herramienta de estimación SVD en un entorno completamente determinado (un medidor en cada nodo) es ideal arrojando resultados acertados respecto a los valores esperados que se obtuvieron en el simulador ATP, todos esos resultados son validados por medio del error que como se puede ver en los anexos 9 y 10. Y en las gráficas 33-42.



del sistema reportado por la IEEE, se extrajeron las impedancias de línea y con estas impedancias se hallaron las matrices  $[\bar{Y}_{\text{barra}}]$ . Se tomó el primero, tercero, quinto, séptimo y noveno armónico para el caso de estudio.

Las matrices  $[\bar{Y}_{\text{barra}}]^{(1)}$ ,  $[\bar{Y}_{\text{barra}}]^{(3)}$ ,  $[\bar{Y}_{\text{barra}}]^{(5)}$ ,  $[\bar{Y}_{\text{barra}}]^{(7)}$  y  $[\bar{Y}_{\text{barra}}]^{(9)}$  se pueden ver en el anexo 1

**4.1.2 Aplicación de SVD a las matrices  $\bar{Y}_{\text{barra}}$**  Teniendo las matrices  $\bar{Y}_{\text{barra}}$  se aplica el método de descomposición en valores singulares para hallar de cada matriz, las matrices que la componen como se muestra en la ecuación (11), y como método alternativo para encontrar su matriz pseudo-inversa.

Las matrices  $[\bar{U}]^{(1)}$ ,  $[\bar{V}]^{(1)}$ ,  $[\bar{W}]^{(1)}$  se pueden ver en el anexo 1

Las matrices  $[\bar{U}]^{(3)}$ ,  $[\bar{V}]^{(3)}$ ,  $[\bar{W}]^{(3)}$  se pueden ver en el anexo 1

Las matrices  $[\bar{U}]^{(5)}$ ,  $[\bar{V}]^{(5)}$ ,  $[\bar{W}]^{(5)}$  se pueden ver en el anexo 1

Las matrices  $[\bar{U}]^{(7)}$ ,  $[\bar{V}]^{(7)}$ ,  $[\bar{W}]^{(7)}$  se pueden ver en el anexo 1

Las matrices  $[\bar{U}]^{(9)}$ ,  $[\bar{V}]^{(9)}$ ,  $[\bar{W}]^{(9)}$  se pueden ver en el anexo 1

**4.1.3 Cálculo de  $\bar{Z}_{\text{barra}}$**  Para hallar  $[\bar{Z}_{\text{barra}}]$  se utiliza la ecuación (12); partiendo de las matrices de la descomposición de valores singulares se reubican estas para hallar la matriz inversa  $[\bar{Y}_{\text{barra}}]$ . Las matrices  $[\bar{Z}_{\text{barra}}]^{(1)}$ ,  $[\bar{Z}_{\text{barra}}]^{(3)}$ ,  $[\bar{Z}_{\text{barra}}]^{(5)}$ ,  $[\bar{Z}_{\text{barra}}]^{(7)}$  y  $[\bar{Z}_{\text{barra}}]^{(9)}$  se pueden ver en el anexo 1

**4.1.4 Corrientes inyectadas** Las diferencias en los valores calculados de tensión, se deben al tratamiento de extracción de las corrientes ya que el simulador no arroja exactamente las corrientes de inyección, sino las que el usa para su cálculo de flujos interno.

En este caso las corrientes mostradas en la tabla 22 son extraídas del simulador de ATP, como se observa la corriente del nodo fuente es de magnitud elevada

comparada con las corrientes en otros nodos, esto debido a que se usa el modelo de fuentes de inyección de corriente.

#### 4.1.4.1 $[\bar{I}_{inyectada}] =$

**Tabla 22 Vectores  $[\bar{I}_{inyectada}]$**

Corrientes Inyectadas [A]					
Nodo	Primer	Tercero	Quinto	Séptimo	Noveno
	Armónico	Armónico	Armónico	Armónico	Armónico
1	-14197.2-19289.91j	-2.52-7.77j	-0.46-2.52j	-0.14-1.25j	-0.05-0.75j
2	-1.26+5.74j	-0.01-0.01j	0.01	-0.01j	0
3	-0.42+8.72j	-0.02	0.01+0.01j	-0.01	0
4	4.23+0.39j	0.83+0.23j	-0.37-0.2j	0.2+0.15j	-0.08-0.1j
5	-1.28+3.82j	-0.02-0.01j	0.01+0.01j	-0.01	0
6	-2.54+14.07j	-0.06-0.02j	0.02+0.03j	-0.01-0.01j	0.01j
7	-2.59+14.16j	-0.06-0.03j	0.03+0.02j	-0.02-0.01j	0.01+0.01j
8	-1.31+3.9j	-0.02-0.01j	0.01+0.01j	-0.01-0.01j	0
9	-1.34+3.93j	-0.03-0.01j	0.01+0.01j	-0.02j	0.01j
10	-0.22+3.55j	-0.02-0.01j	0.01+0.01j	-0.02+0.01j	0
11	4.86+0.45j	0.95+0.27j	-0.43-0.23j	0.24+0.18j	-0.09-0.11j
12	4.93+0.46j	0.96+0.27j	-0.44-0.23j	0.24+0.18j	-0.1-0.11j
13	-0.63+9.6j	-0.06-0.02j	0.03+0.02j	-0.02-0.01j	0.01+0.01j
14	-1.92+3.59j	-0.02-0.04j	0.01+0.03j	-0.01-0.02j	0.01j
15	4.54+0.42j	0.88+0.25j	-0.41-0.21j	0.22+0.17j	-0.09-0.1j
16	-1.4+4.02j	-0.04-0.03j	0.02+0.02j	-0.01-0.01j	0.01j
17	7.11+0.67j	1.38+0.4j	-0.64-0.33j	0.34+0.26j	-0.14-0.16j
18	-1.19+5.6j	-0.01	0	0	0
19	-1.2+5.63j	-0.01	0	0	0
20	5.8+0.54j	1.12+0.33j	-0.52-0.27j	0.28+0.22j	-0.11-0.13j

Corrientes Inyectadas [A]					
Nodo	Primer	Tercero	Quinto	Séptimo	Noveno
	Armónico	Armónico	Armónico	Armónico	Armónico
21	-1.2+5.63j	-0.01	0.01j	0	0
22	-0.79+6.12j	-0.01	0.01	0	0
23	28.79+2.72j	5.57+1.61j	-2.57-1.33j	1.37+1.07j	-0.57-0.65j
24	-5.41+27.73j	-0.08-0.03j	0.04+0.04j	-0.02-0.02j	0.01+0.01j
25	-1.03+4.03j	-0.02-0.01j	0.01+0.01j	-0.01j	0
26	4.4+0.41j	0.86+0.24j	-0.39-0.21j	0.21+0.16j	-0.09-0.1j
27	-1.37+3.98j	-0.02-0.01j	0.01+0.01j	-0.01-0.01j	0
28	10.14+0.95j	1.96+0.57j	-0.91-0.46j	0.48+0.38j	-0.2-0.23j
29	24.4+36.24j	-0.12	0.07+0.02j	-0.03-0.02j	0.01+0.01j
30	-2.52+11.21j	-0.06-0.03j	0.03+0.02j	-0.02-0.01j	0.01+0.01j
31	-3.41+15.8j	-0.09-0.04j	0.04+0.03j	-0.02-0.02j	0.01+0.01j
32	5.41+0.51j	1.05+0.3j	-0.48-0.25j	0.26+0.2j	-0.11-0.12j

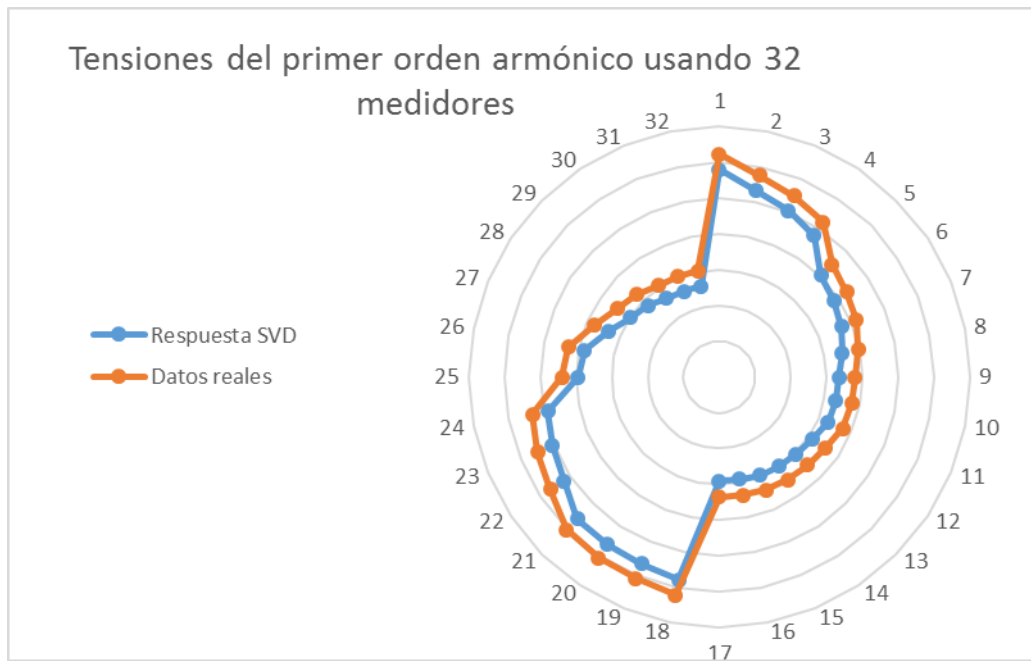
**4.1.5 Estimación de tensiones armónicas** Para el cálculo de las tensiones estimadas armónicas se hace uso de la  $[\bar{Z}_{barras}]$  calculada en el numeral 3.1.3., la cual se multiplica por las corrientes que se extrajeron del software de ATP en el numeral 3.1.4.1. obteniendo así las tensiones en las barras del sistema.

Las tensiones estimadas son comparadas con los datos de tensión reales (obtenidos de ATPDraw) mediante un cálculo de error relativo llevado a cabo en cada barra del sistema y para cada armónico. Estos errores se registraron en tablas y se graficaron para una mejor interpretación de los resultados en donde se muestra la tendencia de las tensiones estimadas, con respecto a los valores reales de tensión. (Figuras 44-53). Todos los cálculos realizados para la obtención de las tensiones armónicas se realizaron en el código de MATLAB “estimación para el

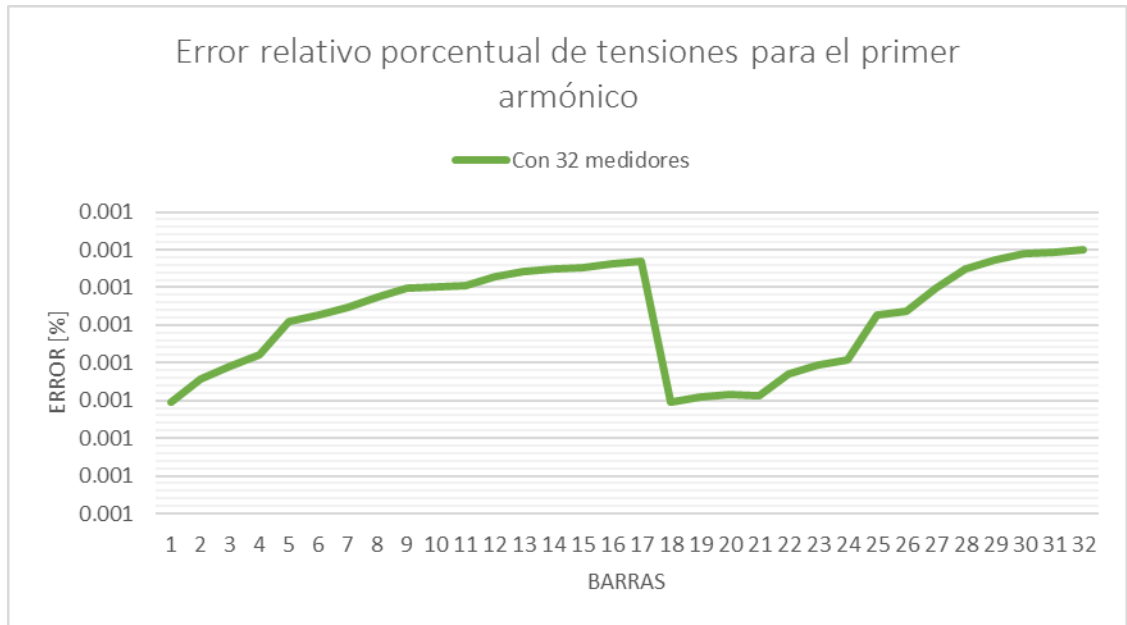
sistema de 32 barras ANEXO 7”, y los resultados tabulados se encuentran en el anexo 1.

#### 4.1.5.1 Graficas de $[\bar{V}_{barra}]^{(1)}$

**Figura 44 Grafica comparativa del valor obtenido con SVD el corregido por  $K(j)$  y el real dado por ATP para el primer orden armónico**

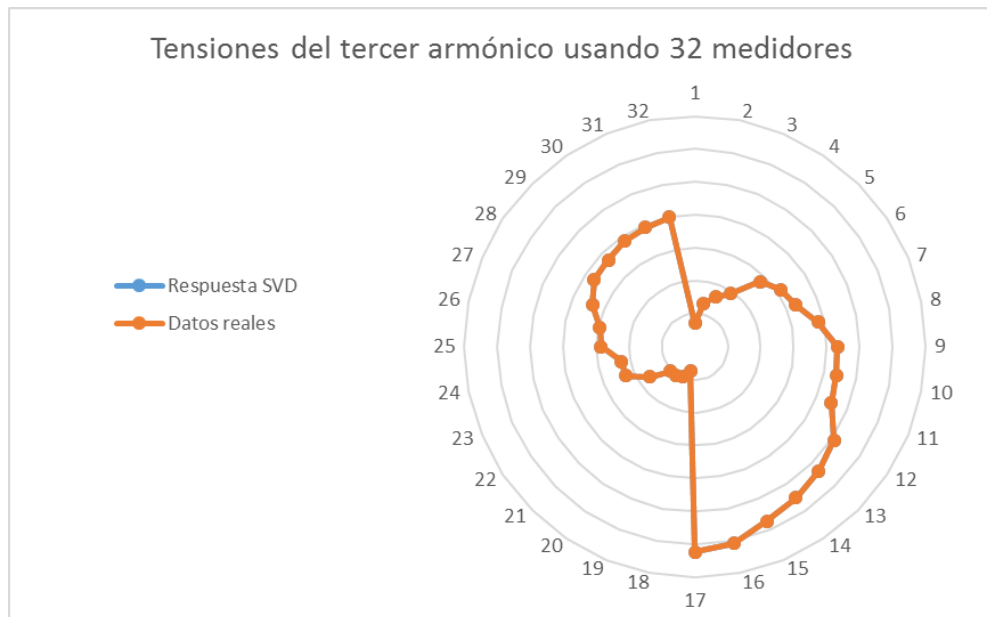


**Figura 45 Grafica del error relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el primer orden armónico.**



**4.1.5.2 Graficas de  $[\bar{V}_{barra}]^{(3)}$**

**Figura 46 Grafica comparativa del valor obtenido con SVD el corregido por K(j) y el real dado por ATP para el tercer orden armónico**

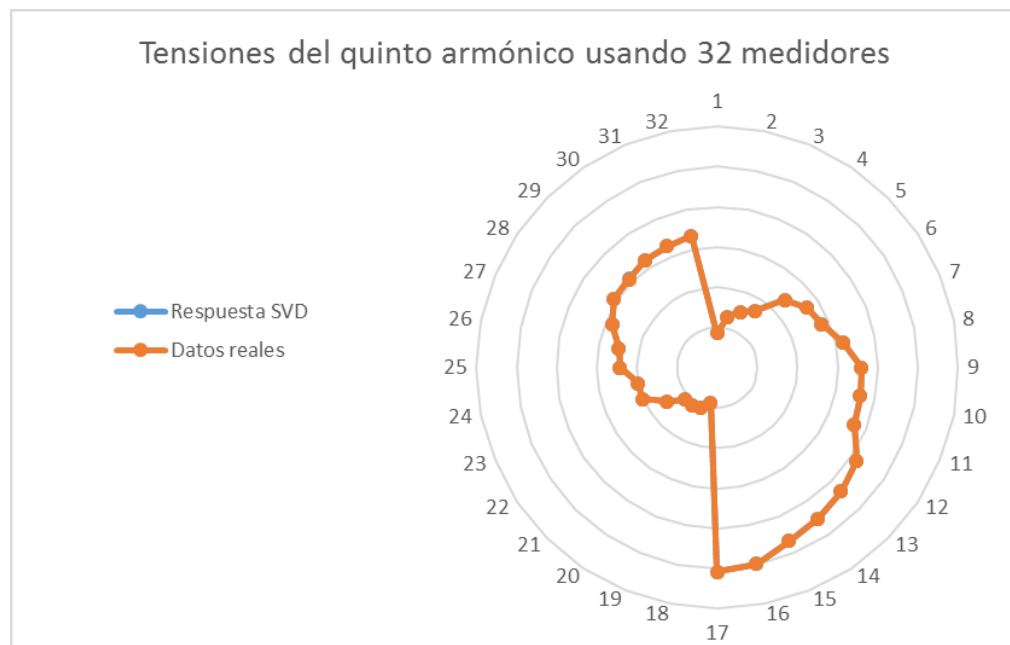


**Figura 47 Grafica del error relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el tercer orden armónico.**



#### 4.1.5.3 Graficas de $[\bar{V}_{barra}]^{(5)}$

**Figura 48 Grafica comparativa del valor obtenido con SVD el corregido por K(j) y el real dado por ATP para el quinto orden armónico**

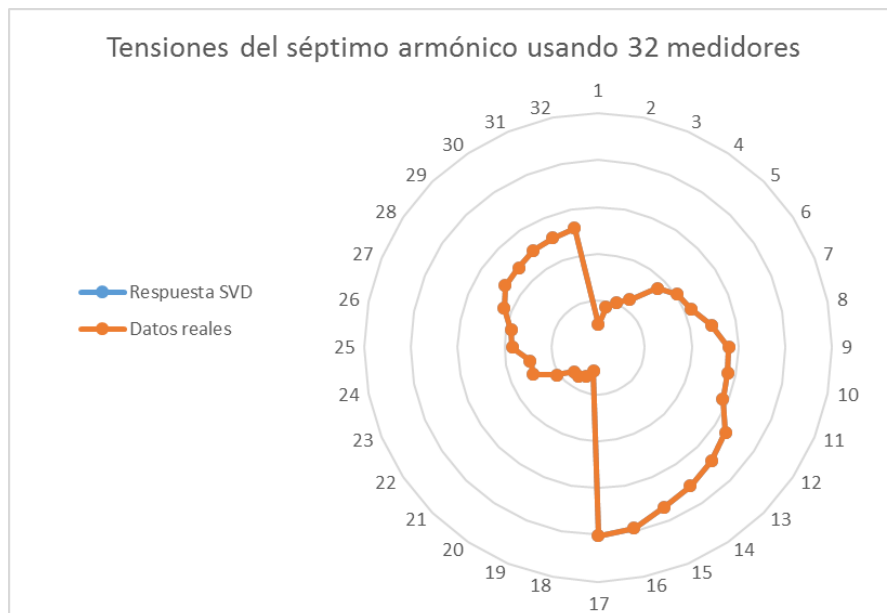


**Figura 49 Grafica del error relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el quinto orden armónico.**



#### 4.1.5.4 Graficas de $[\bar{V}_{barra}]^{(7)}$

**Figura 50 Grafica comparativa del valor obtenido con SVD el corregido por  $K(j)$  y el real dado por ATP para el séptimo orden armónico**

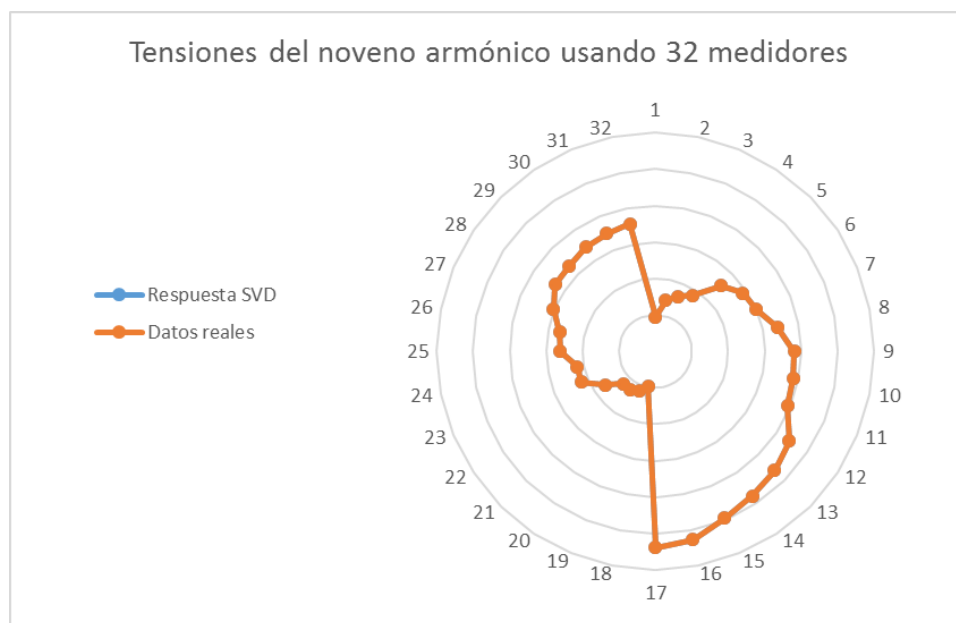


**Figura 51 Grafica del error relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el séptimo orden armónico.**

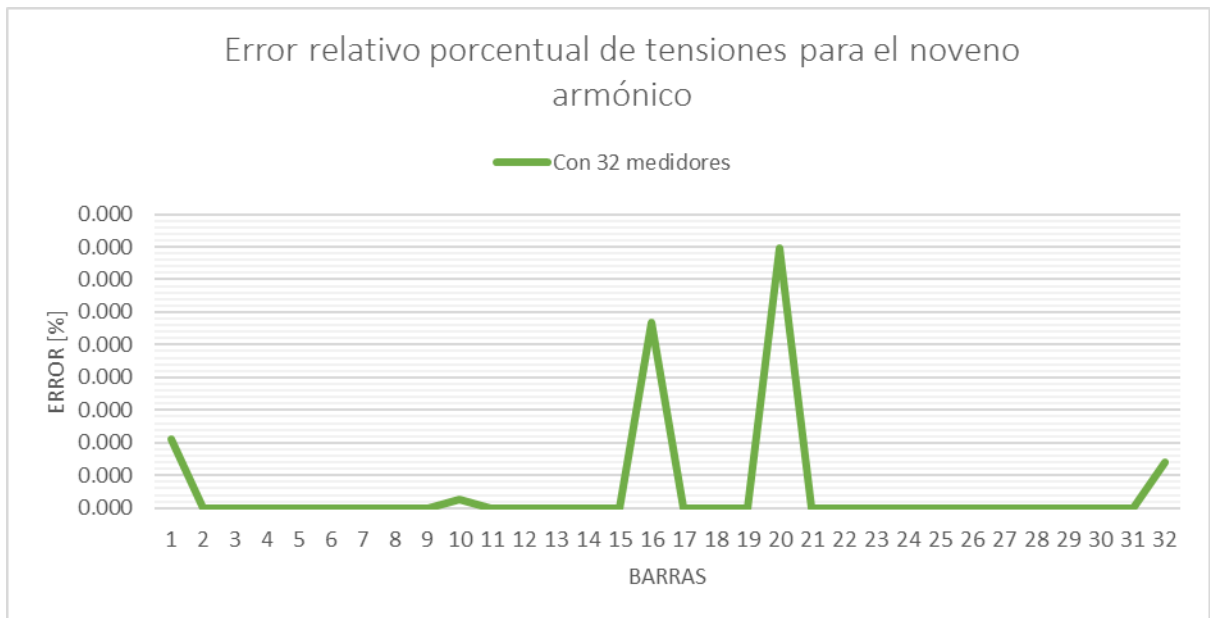


#### 4.1.5.5 Graficas de $[\bar{V}_{barra}]^{(9)}$

**Figura 52 Grafica comparativa del valor obtenido con SVD el corregido por K(j) y el real dado por ATP para el noveno orden armónico**



**Figura 53 Grafica del error relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el noveno orden armónico.**



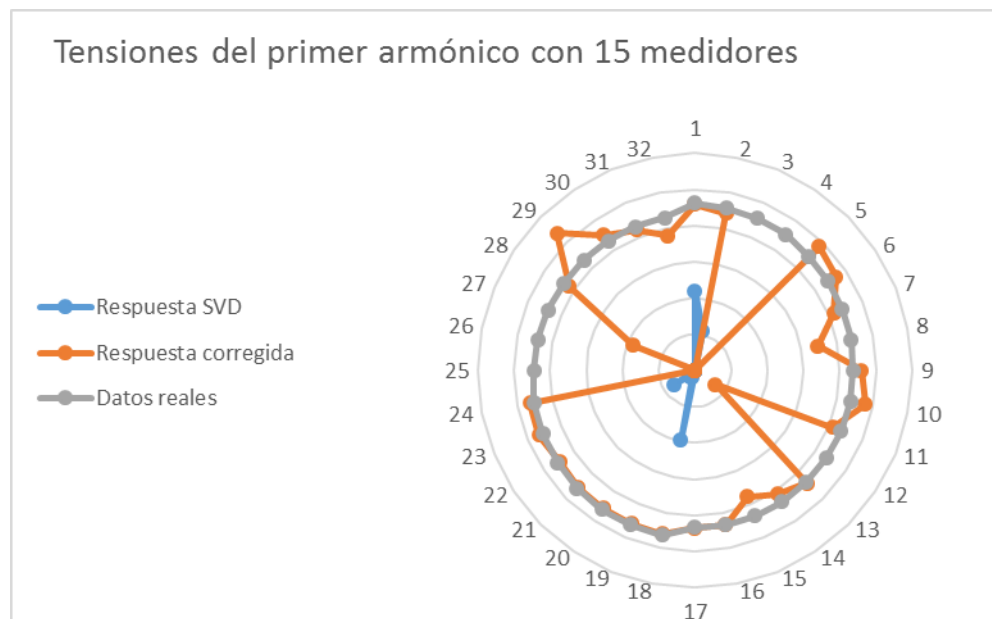
**4.1.6 Análisis para selección de la cantidad mínima de medidores en la estimación óptima de estado armónico en el sistema de 32 barras sub-determinado.**

**4.1.6.1 Análisis de resultados para diferentes cantidades de medidores** Para realizar una estimación de estado armónico aceptable es necesario conocer el número de medidores que se deben ubicar en la red para obtener resultados que no se alejen mucho de los resultados reales, en este caso por medio de las simulaciones se conoce el valor real al cual se debe llegar por lo tanto se realizó un barrido de prueba partiendo con la mitad de medidores y aumentando de uno en uno hasta llegar aproximadamente al 60% de los medidores y así obtener la respuesta que nos proporcione un mínimo de error aceptable en cada barra del sistema. Todos los cálculos realizados para la obtención de las tensiones armónicas se realizaron en el código de MATLAB “estimación para el sistema de 32 barras ANEXO 7”. Y las optimizaciones con los códigos mostrados en los

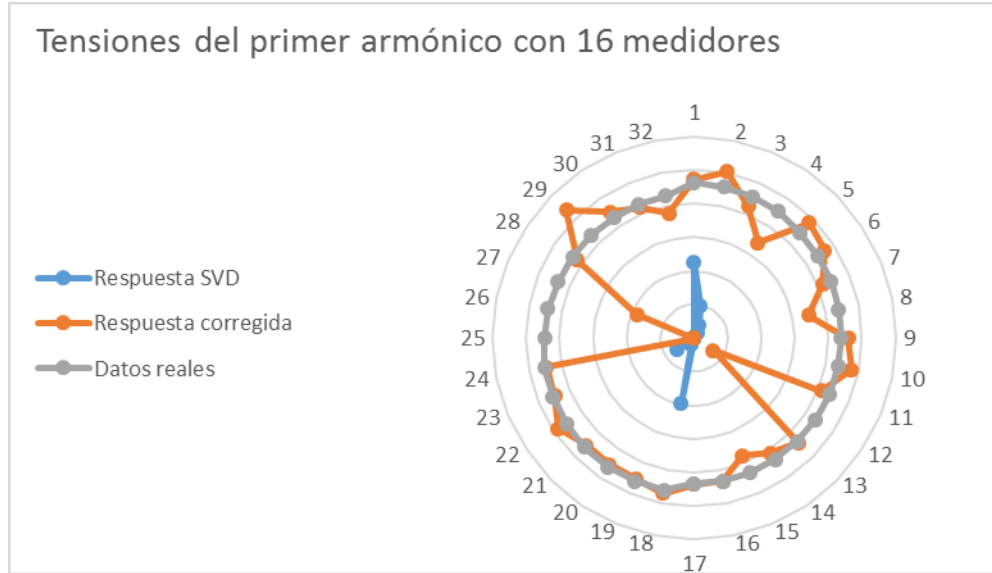
archivos de MATLAB “ans\_svd\_15”, “ans\_svd\_16”, “ans\_svd\_17”, “ans\_svd\_18”, “ans\_svd\_19”, “ans\_svd\_20” en la carpeta ANEXO 8.

**4.1.6.1.1. Análisis para el primer armónico** El análisis del primer armónico se realizará con 15, 16, 17, 18, 19 y 20 medidores; los resultados son mostrados en tablas en las que se comparan con los datos de tensión reales mediante un cálculo de error relativo llevado a cabo en cada barra del sistema. Estos errores se registraron en las tablas las cuales se encuentran en el anexo 2 y se graficaron para visualizar la proporción de los errores en los datos calculados.

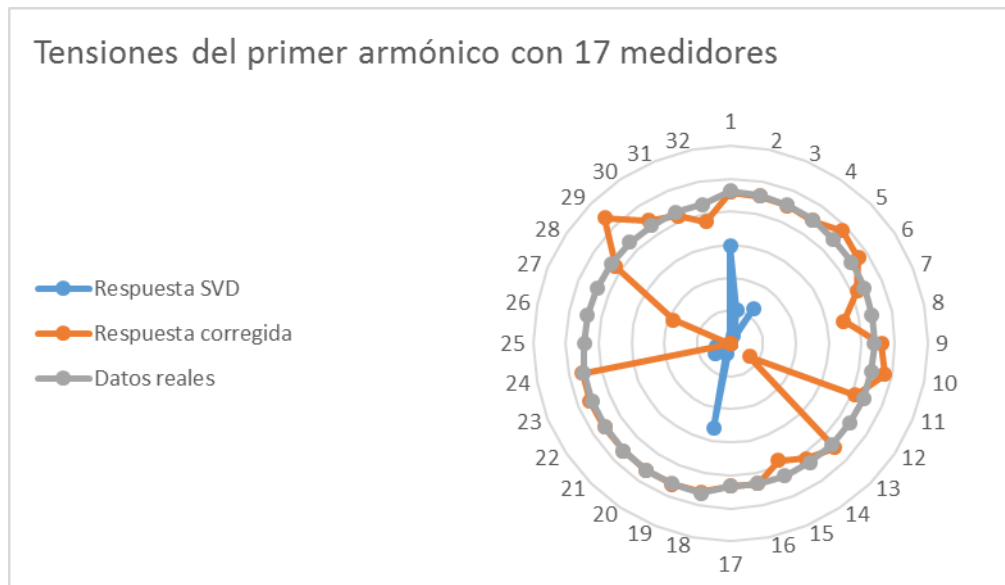
**Figura 54 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico con 15 medidores**



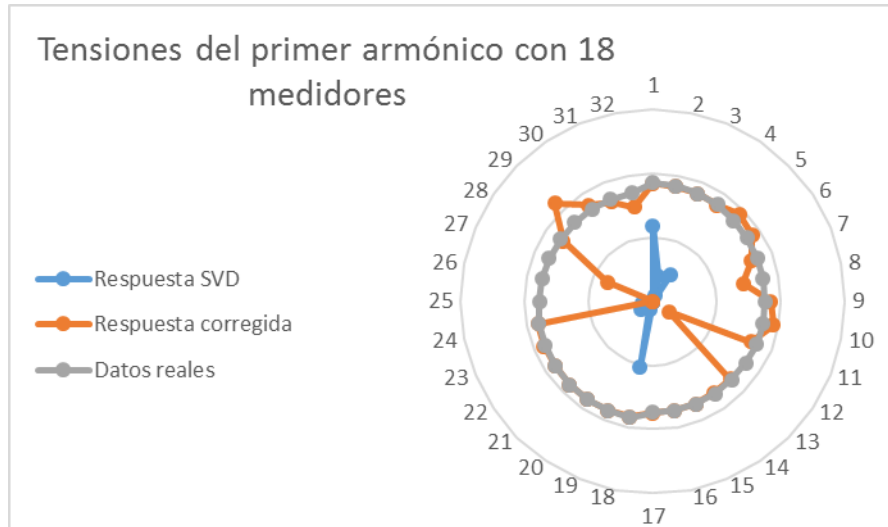
**Figura 55 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico con 16 medidores**



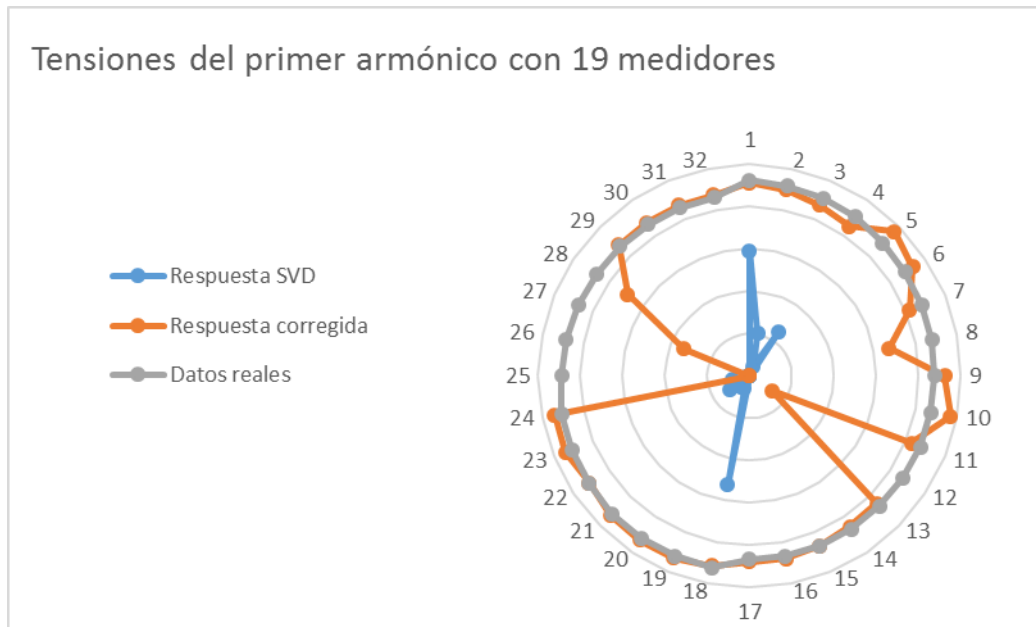
**Figura 56 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico con 17 medidores**



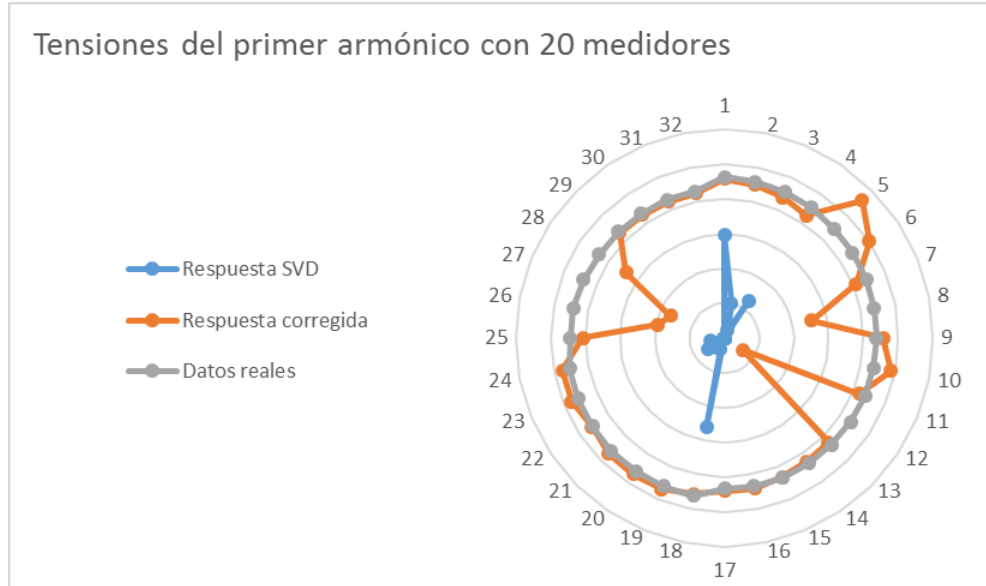
**Figura 57 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico con 18 medidores**



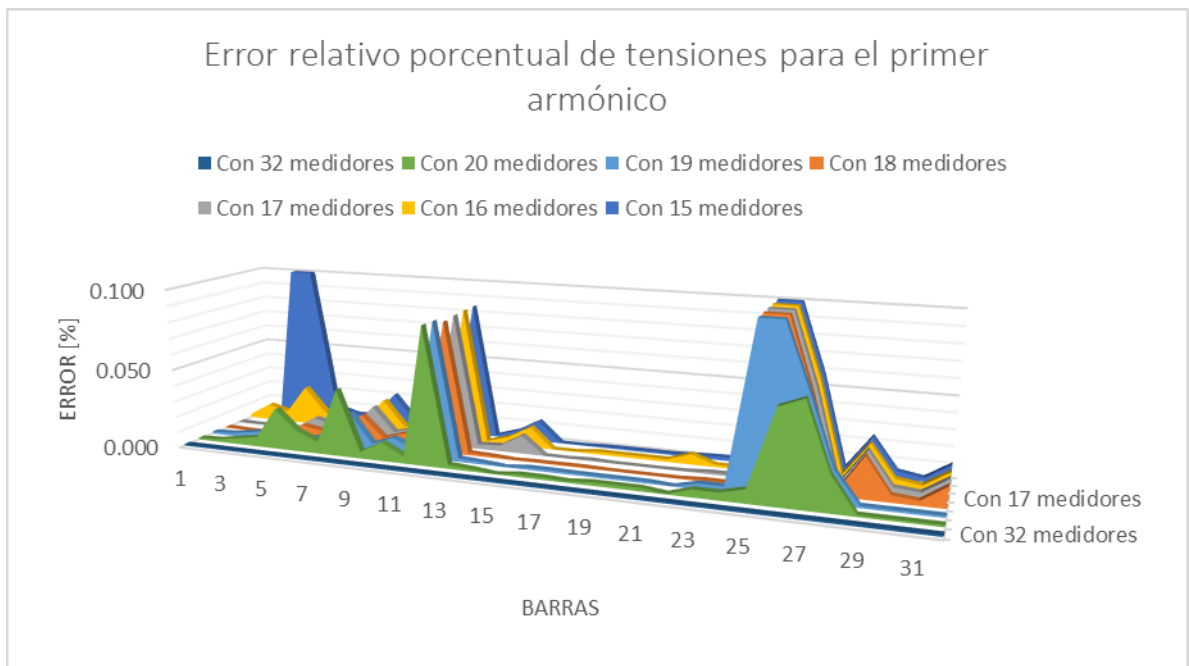
**Figura 58 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico con 19 medidores**



**Figura 59 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico con 20 medidores**

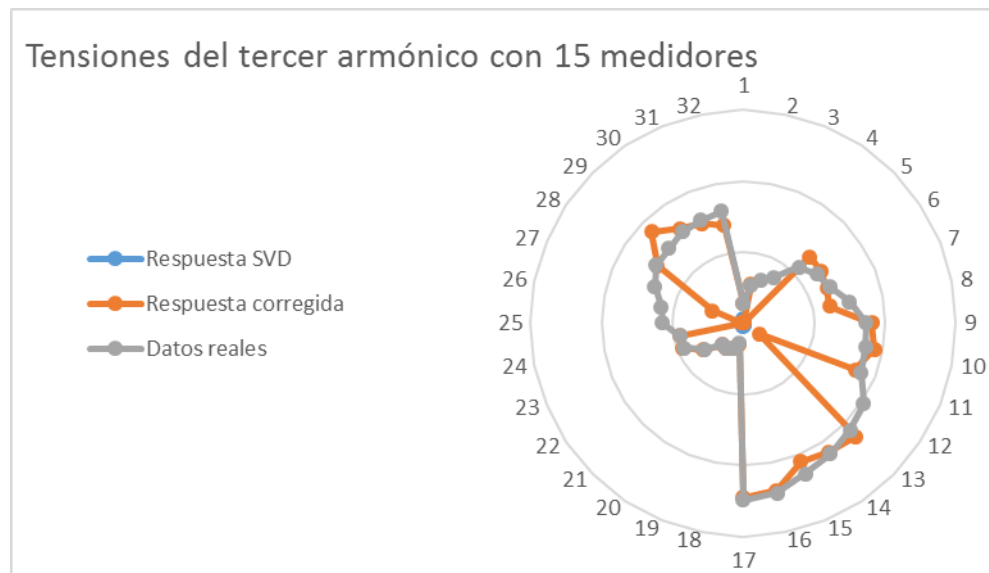


**Figura 60 Grafica de errores relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el primer orden armónico con diferentes medidores**

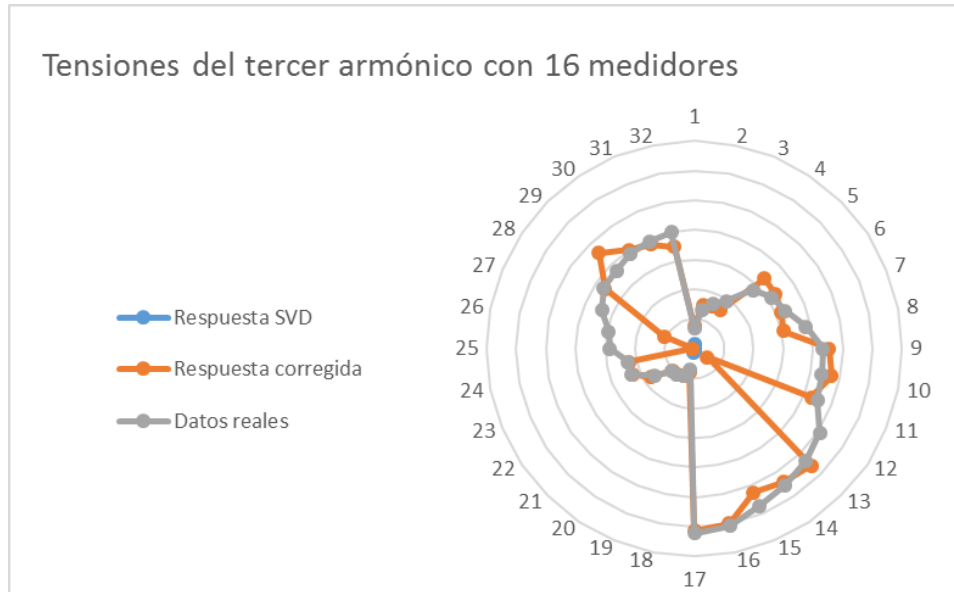


**4.1.6.1.2 Análisis para el tercer armónico** El análisis del tercer armónico se realizará con 15, 16, 17, 18, 19 y 20 medidores; los resultados son mostrados en tablas que son comparadas con los datos de tensión reales mediante un cálculo de error relativo llevado a cabo en cada barra del sistema. Estos errores se registraron en tablas, las cuales se encuentran en el anexo 2 y se graficaron para visualizar la proporción de los errores en los datos calculados.

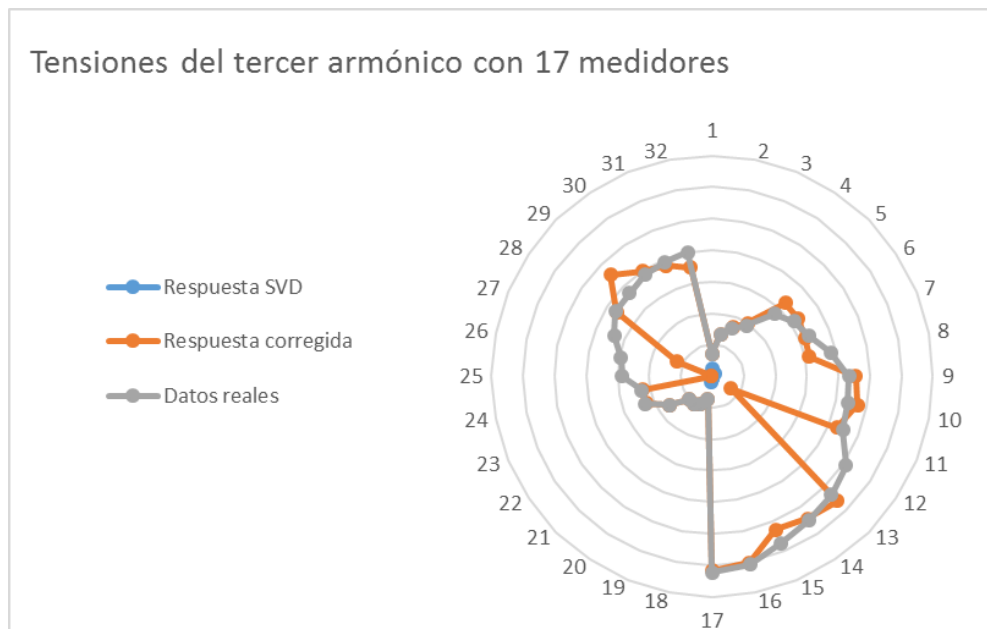
**Figura 61 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico con 15 medidores**



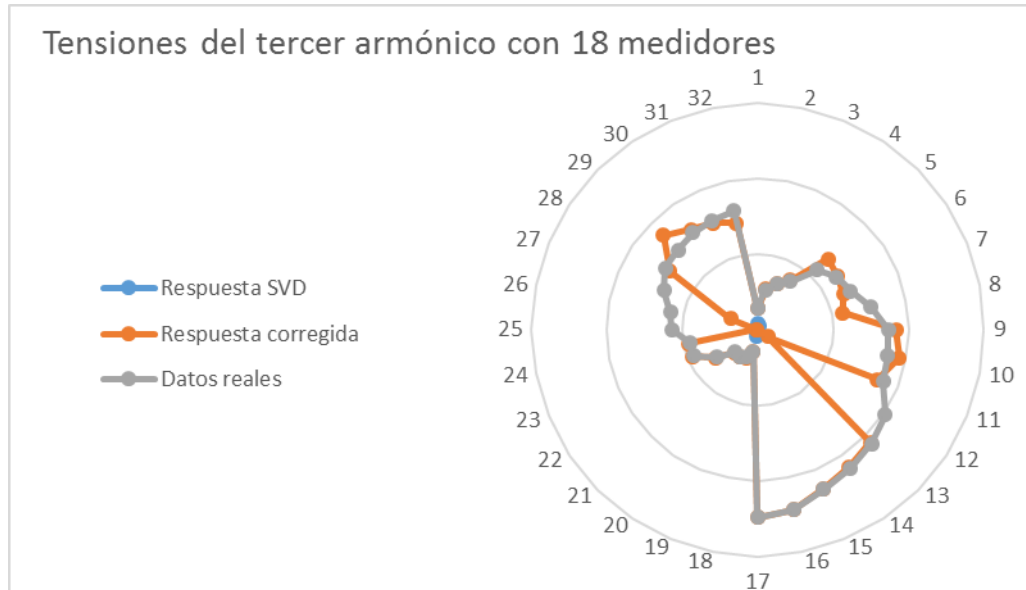
**Figura 62 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico con 16 medidores**



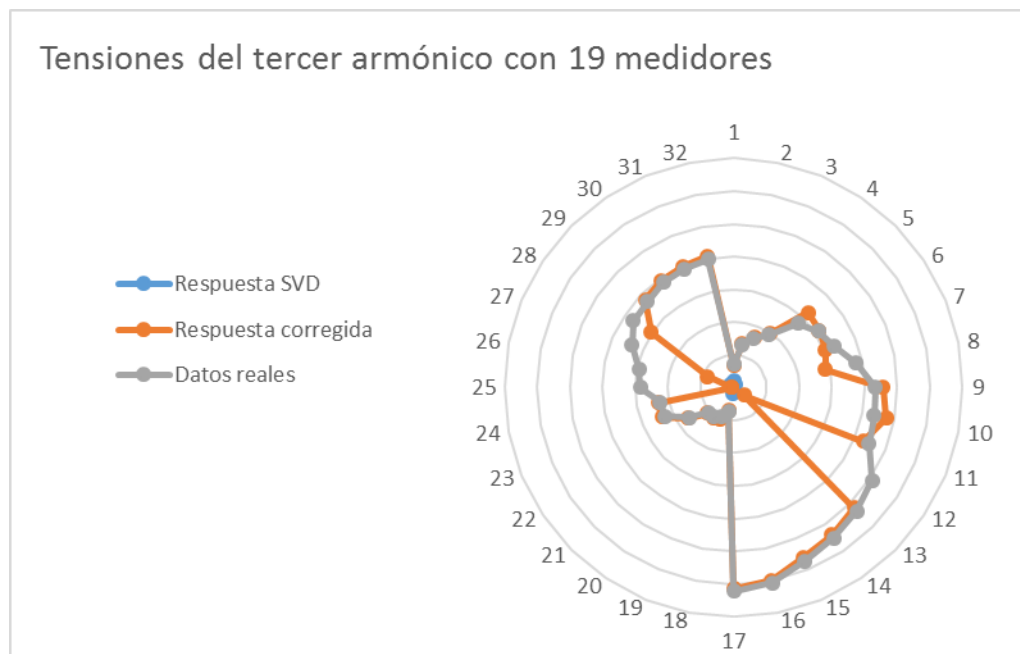
**Figura 63 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico con 17 medidores**



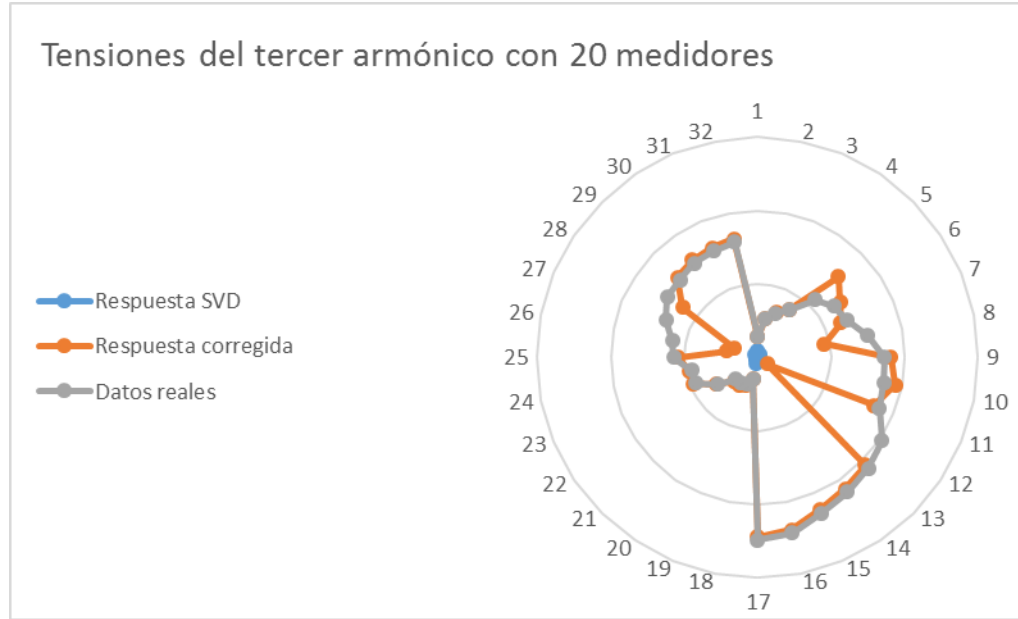
**Figura 64 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico con 18 medidores**



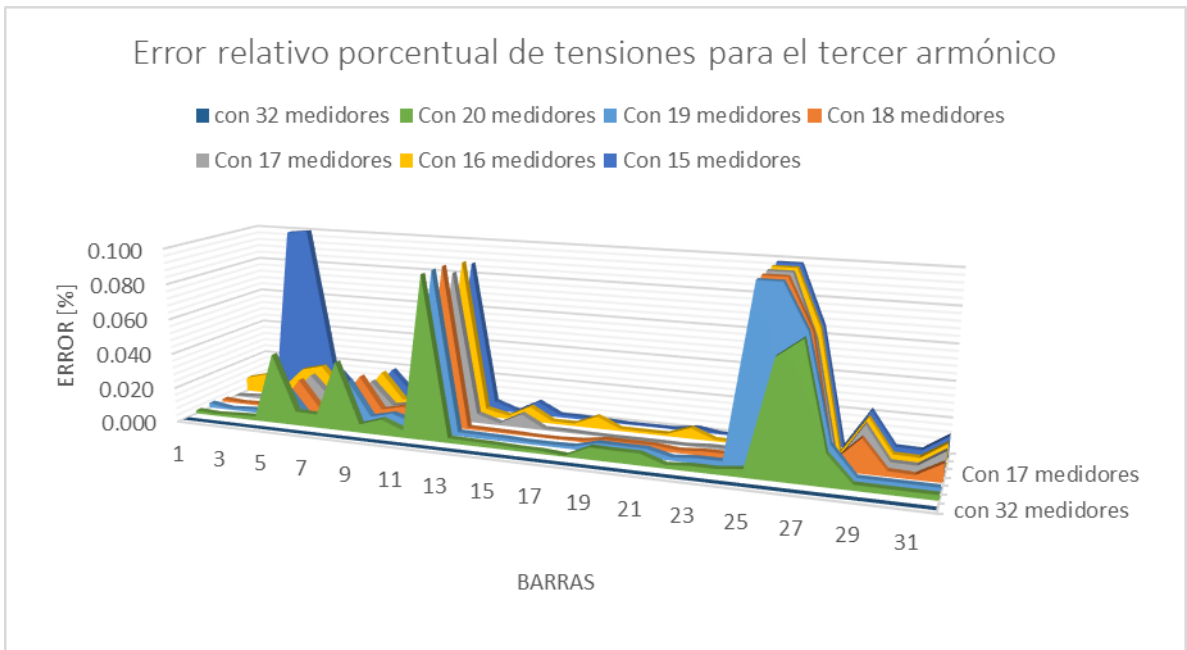
**Figura 65 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico con 19 medidores**



**Figura 66 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico con 20 medidores**

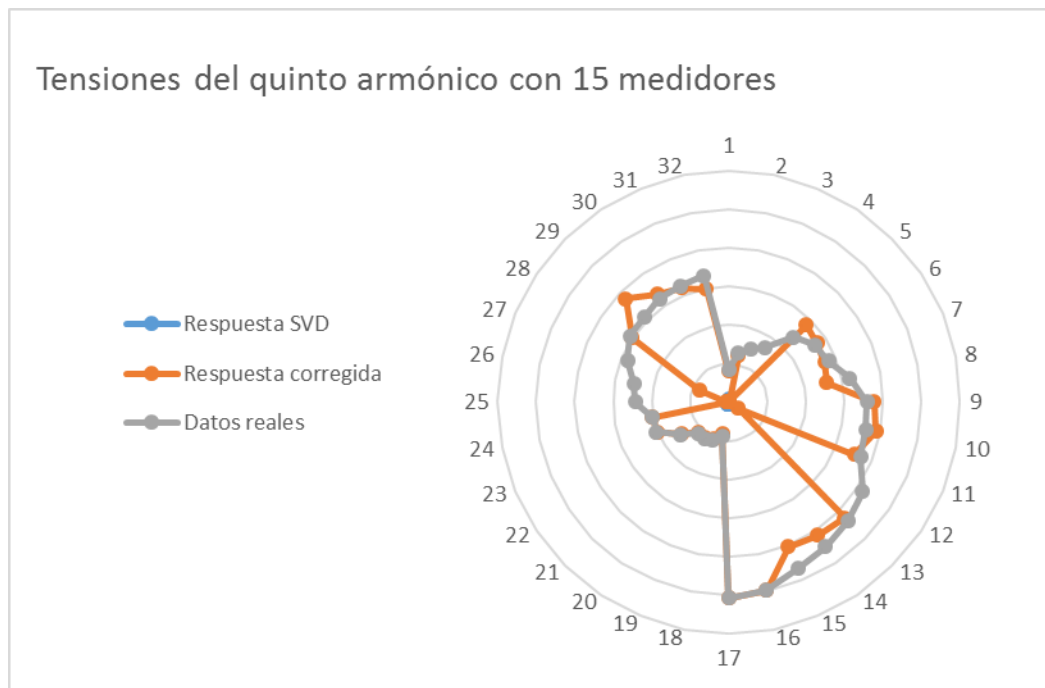


**Figura 67 Grafica de errores relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el tercer orden armónico con diferentes medidores**

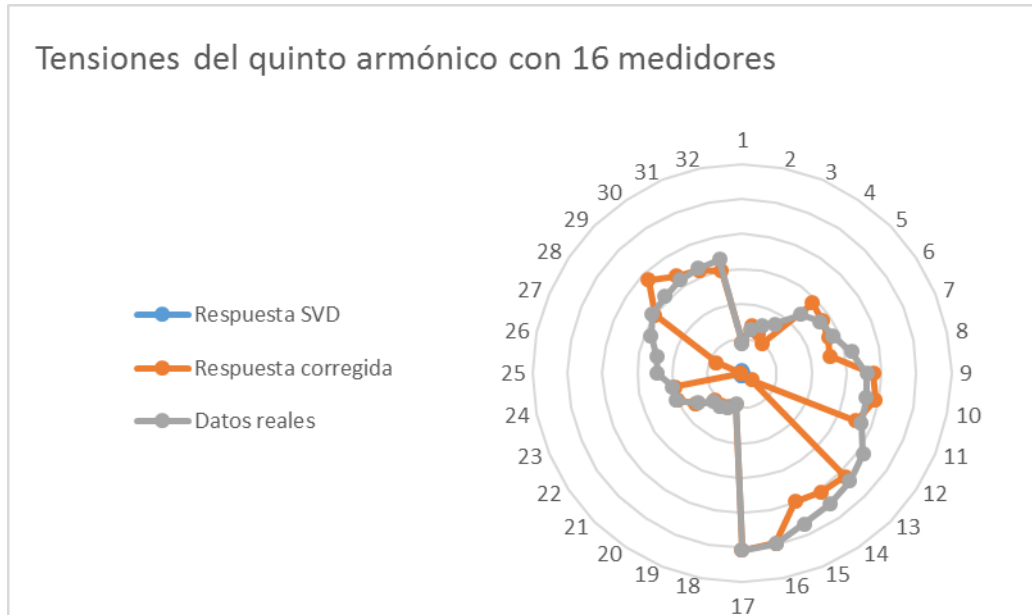


**4.1.6.1.3 Análisis para el quinto armónico** El análisis del quinto armónico se realizará con 15, 16, 17, 18, 19 y 20 medidores; los resultados son mostrados en tablas que son comparadas con los datos de tensión reales mediante un cálculo de error relativo llevado a cabo en cada barra del sistema. Estos errores se registraron en tablas, las cuales se encuentran en el anexo 2 y se graficaron para visualizar la proporción de los errores en los datos calculados.

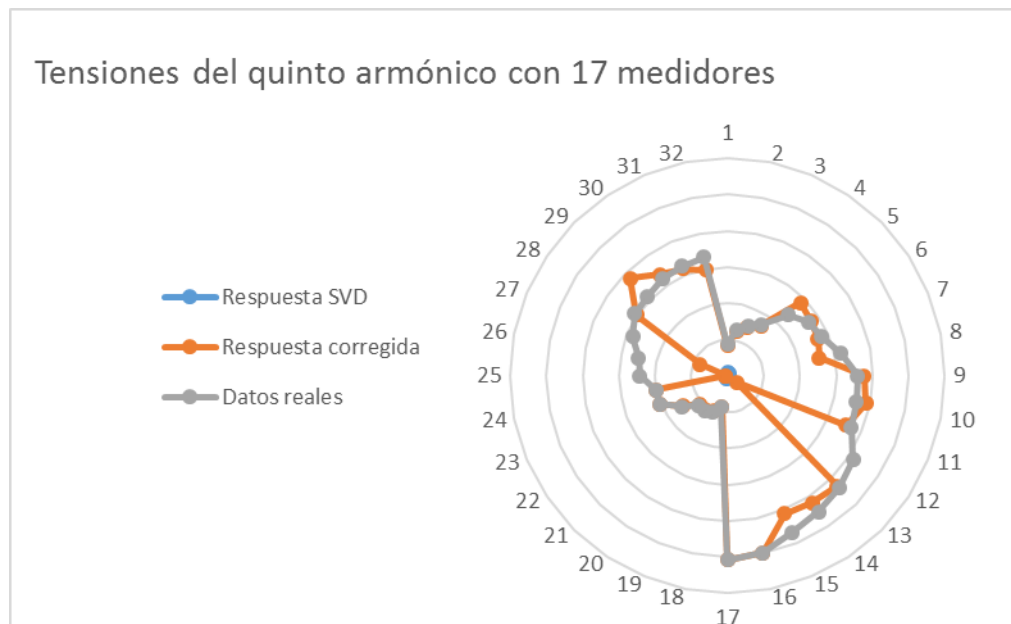
**Figura 68 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico con 15 medidores**



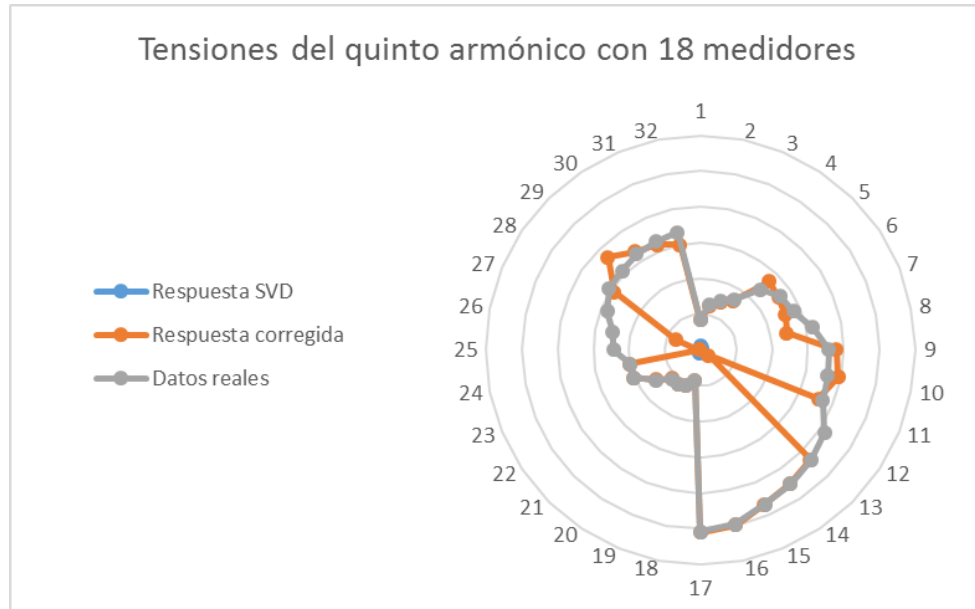
**Figura 69 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico con 16 medidores**



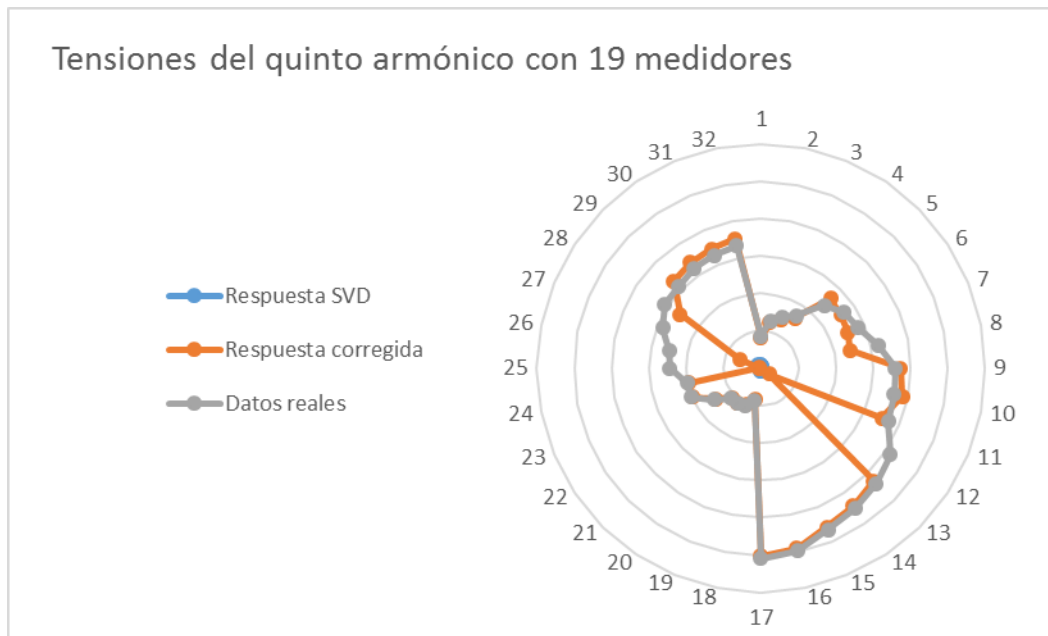
**Figura 70 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico con 17 medidores**



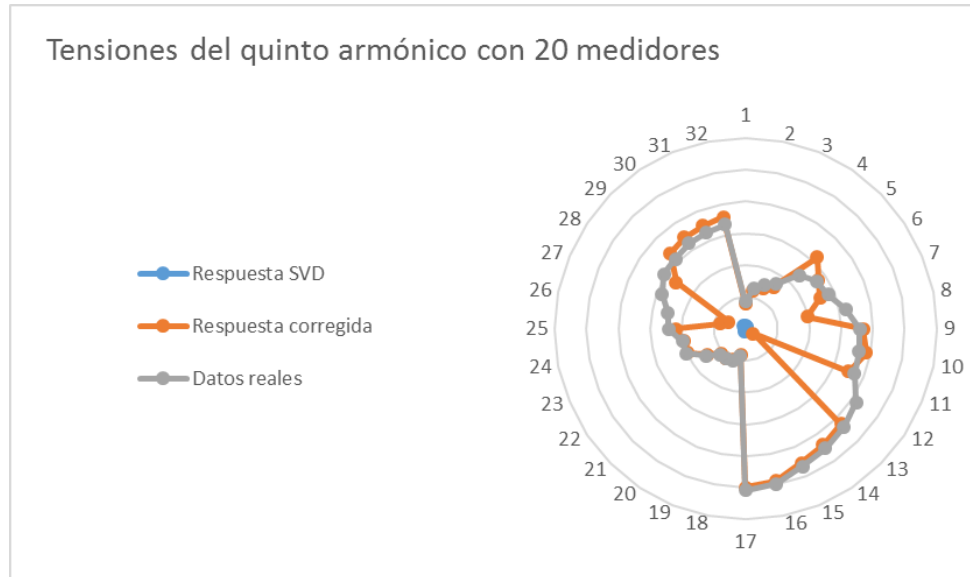
**Figura 71 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico con 18 medidores**



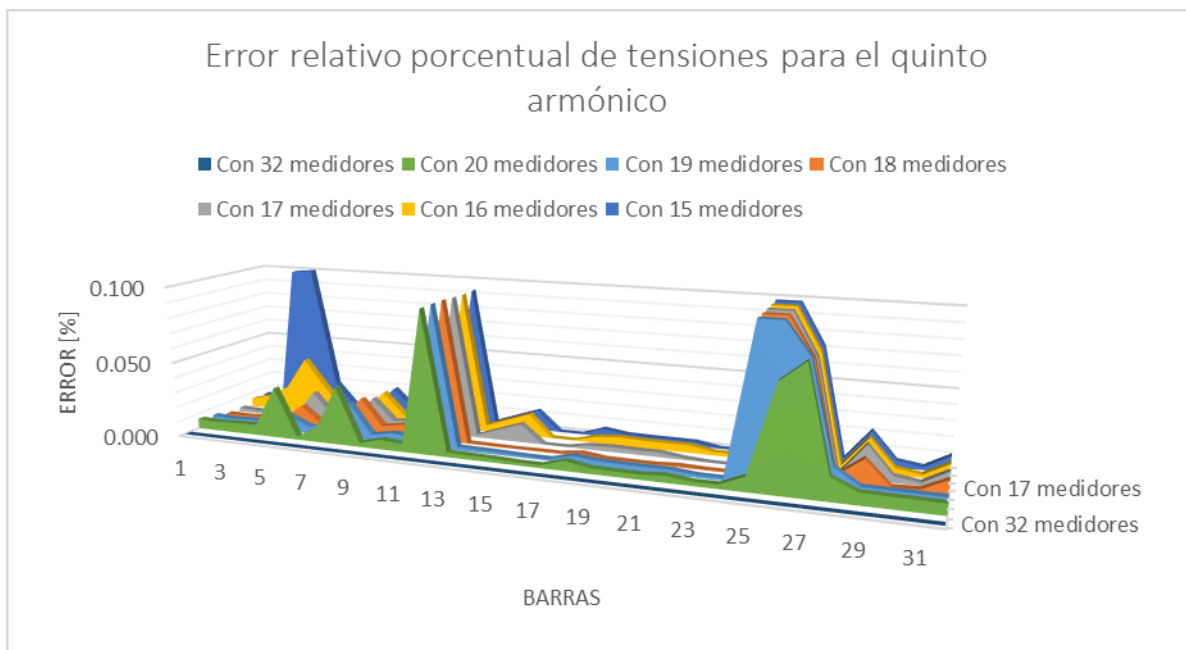
**Figura 72 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico con 19 medidores**



**Figura 73 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico con 20 medidores**

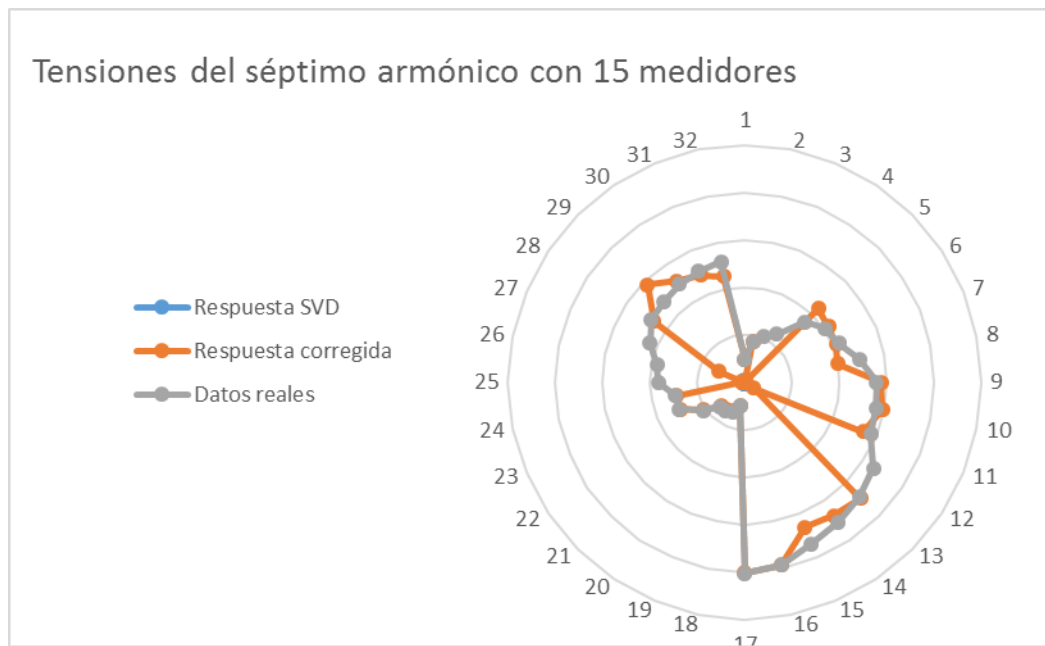


**Figura 74 Grafica de errores relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el quinto orden armónico con diferentes medidores**

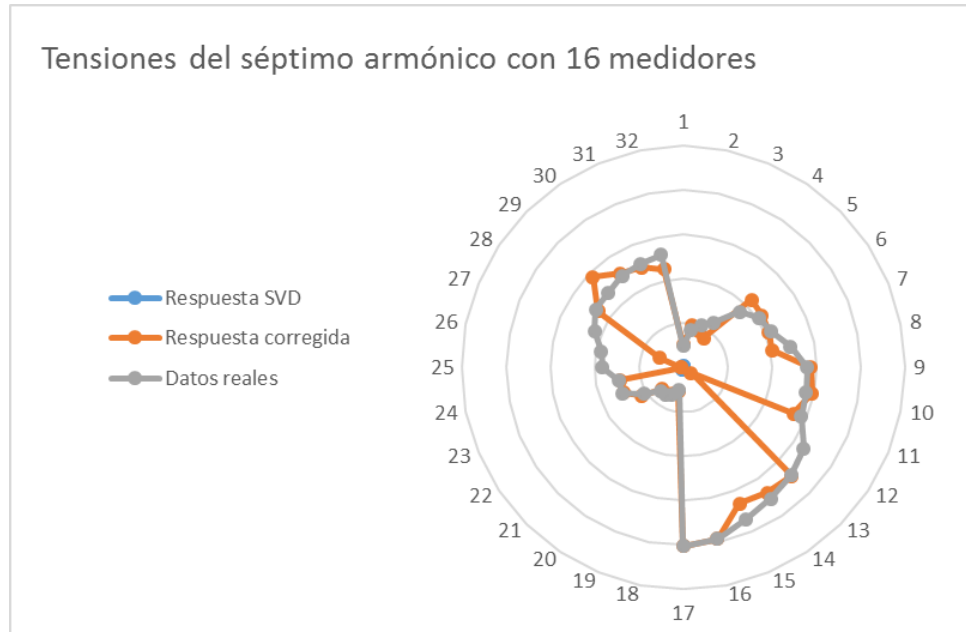


**4.1.6.1.4 Análisis para el séptimo armónico** El análisis del séptimo armónico se realizará con 15, 16, 17, 18, 19 y 20 medidores; los resultados son mostrados en tablas que son comparadas con los datos de tensión reales mediante un cálculo de error relativo llevado a cabo en cada barra del sistema. Estos errores se registraron en tablas, las cuales se encuentran en el anexo 2 y se graficaron para visualizar la proporción de los errores en los datos calculados.

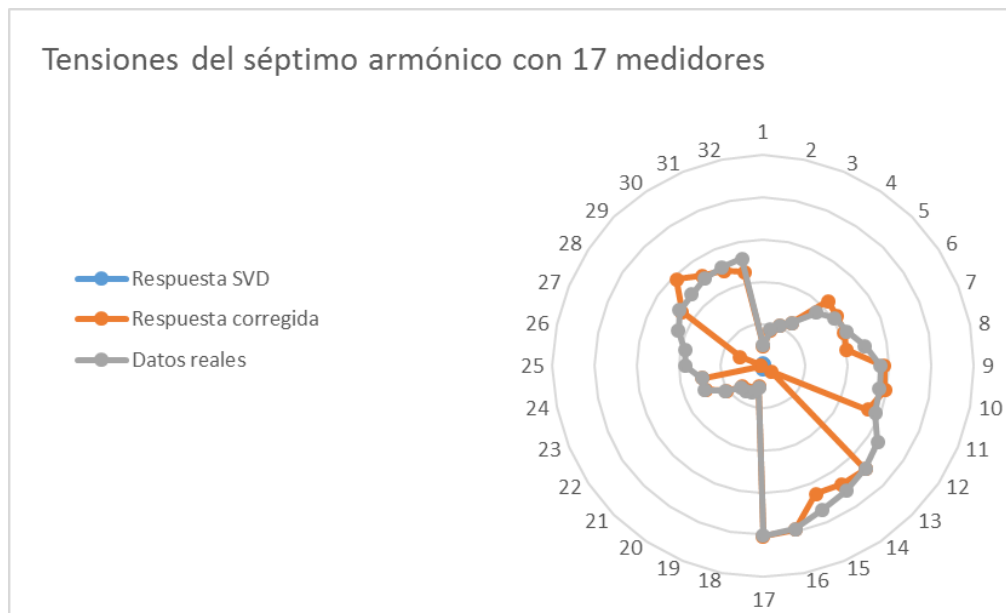
**Figura 75 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico con 15 medidores**



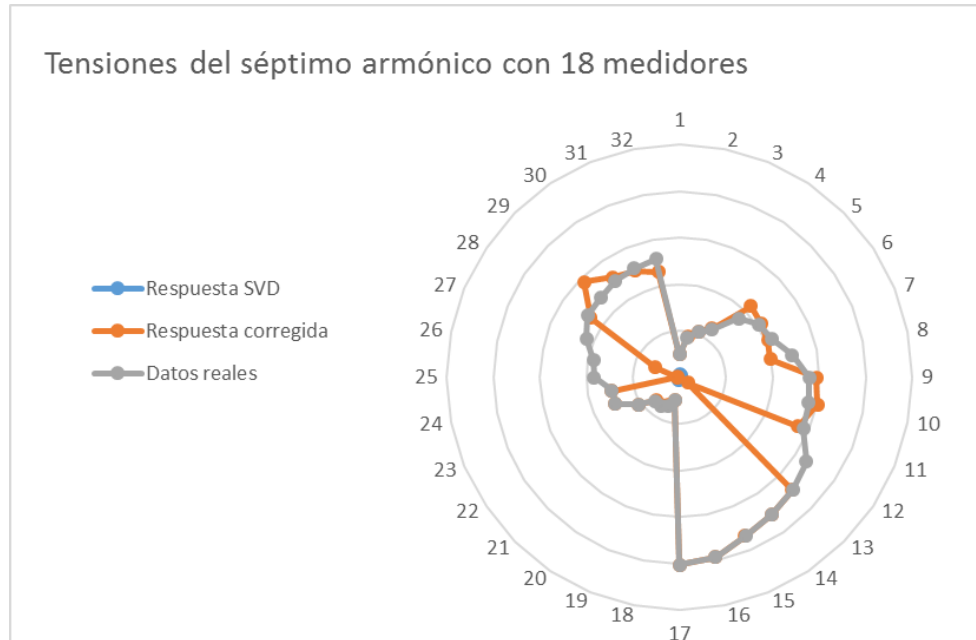
**Figura 76 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico con 16 medidores**



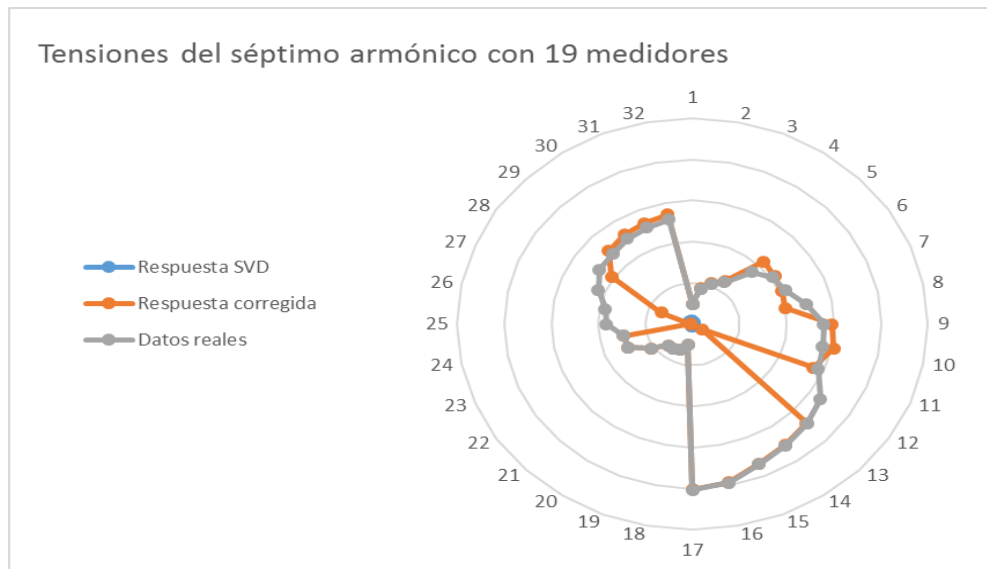
**Figura 77 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico con 17 medidores**



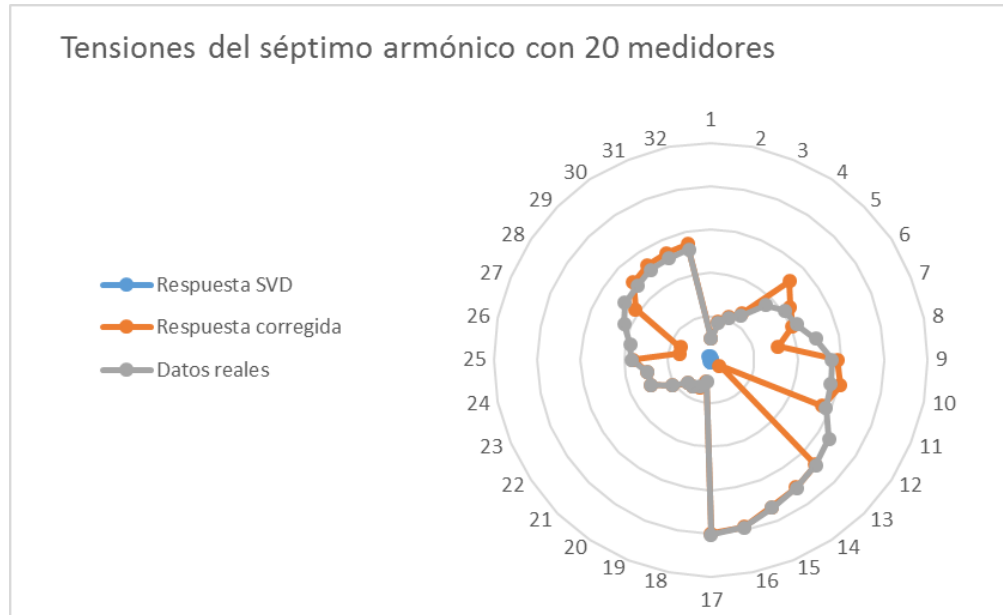
**Figura 78 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico con 18 medidores**



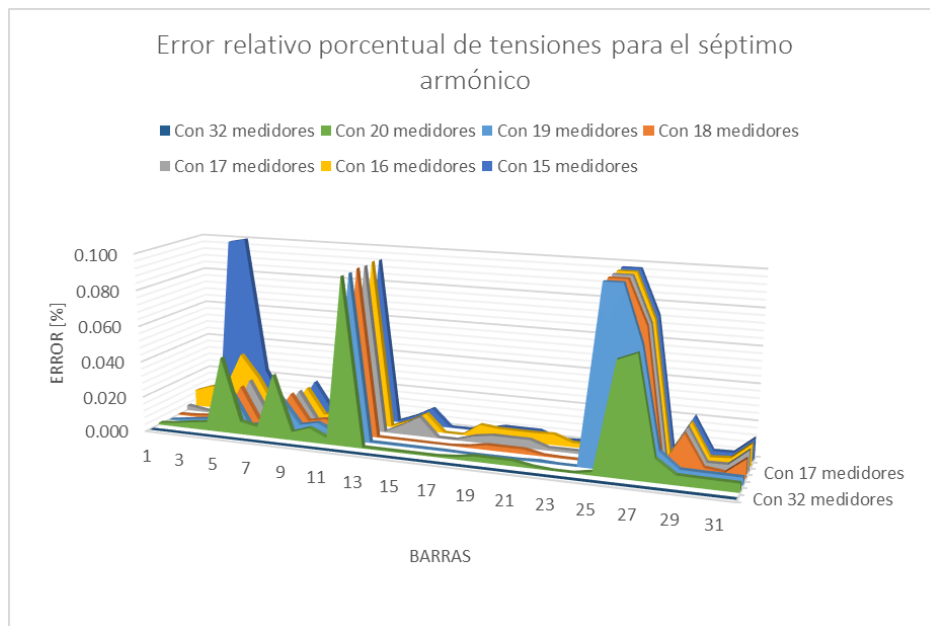
**Figura 79 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico con 19 medidores**



**Figura 80 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico con 20 medidores**

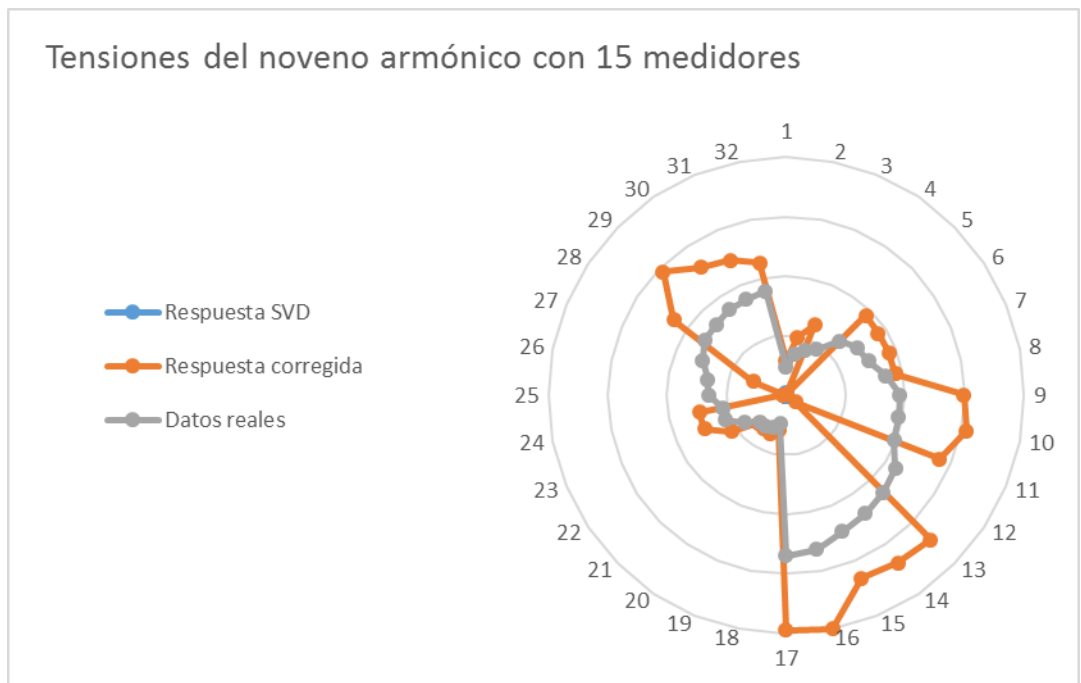


**Figura 81 Grafica de errores relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el séptimo orden armónico con diferentes medidores**



**4.1.6.1.5 Análisis para el noveno armónico** El análisis del noveno armónico se realizará con 15, 16, 17, 18, 19 y 20 medidores; los resultados son mostrados en tablas que son comparadas con los datos de tensión reales mediante un cálculo de error relativo llevado a cabo en cada barra del sistema. Estos errores se registraron en tablas, las cuales se encuentran en el anexo 2 y se graficaron para visualizar la proporción de los errores en los datos calculados.

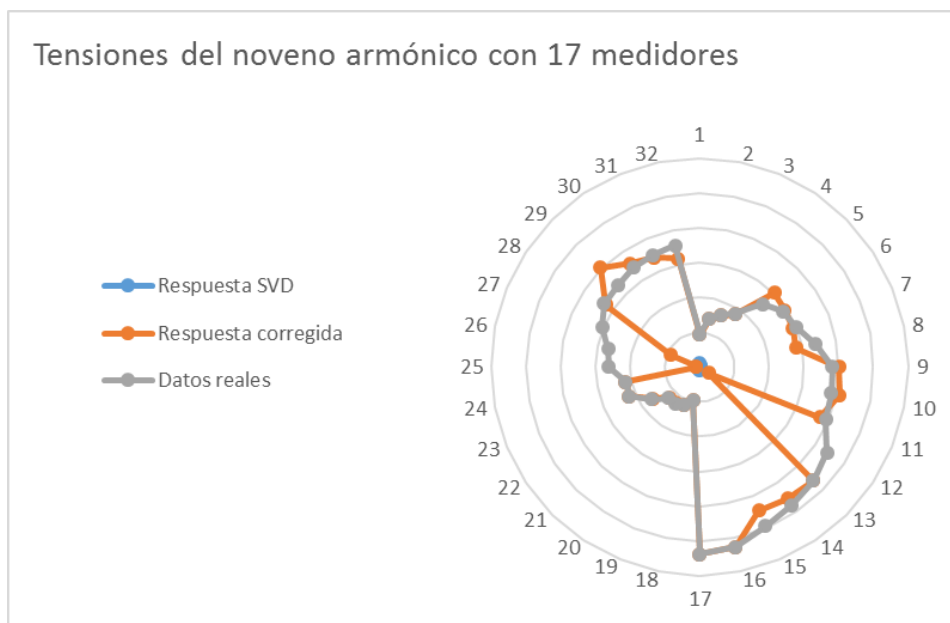
**Figura 82 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el noveno orden armónico con 15 medidores**



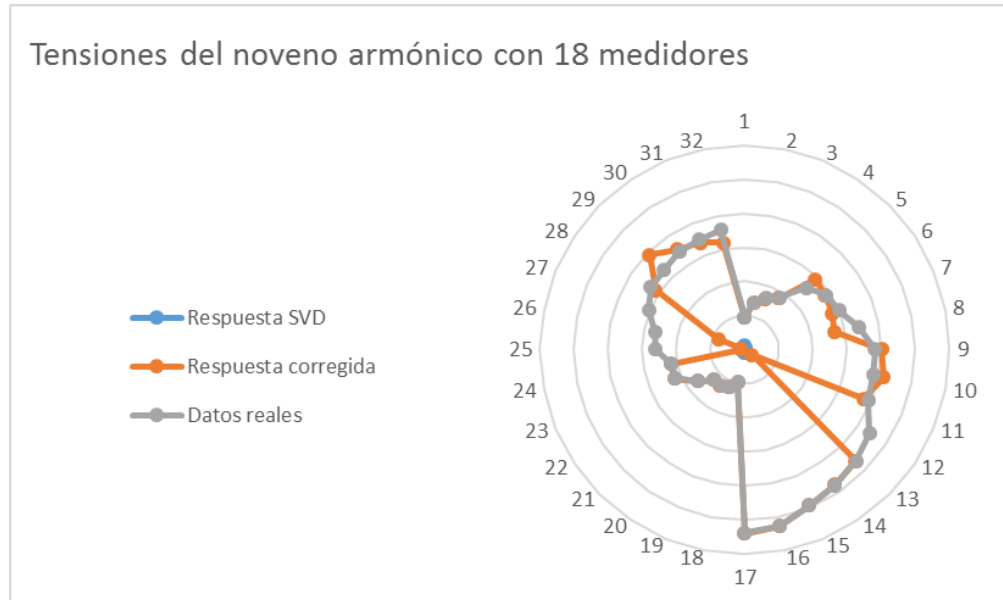
**Figura 83 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el noveno orden armónico con 16 medidores**



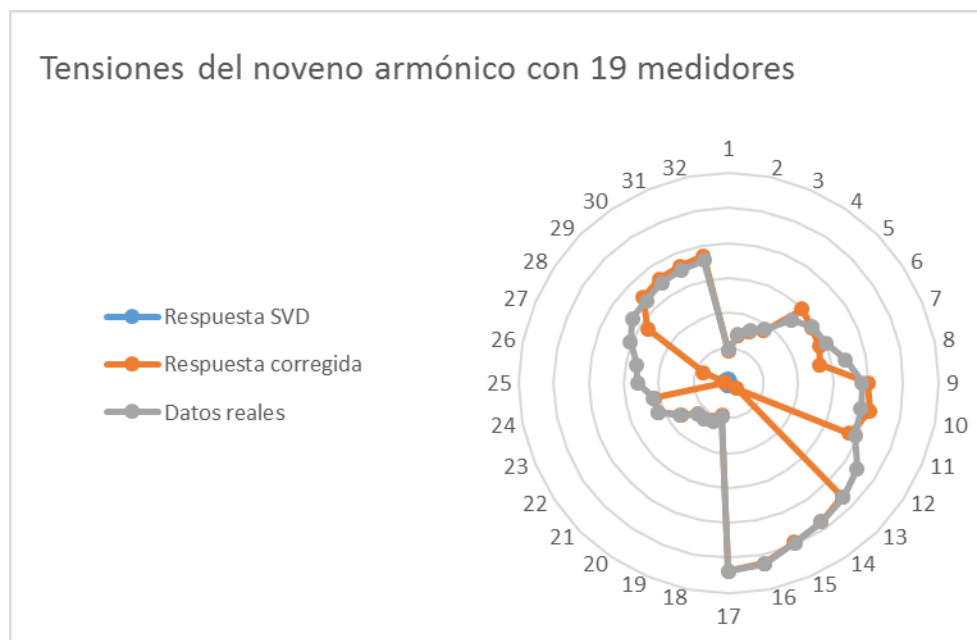
**Figura 84 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el noveno orden armónico con 17 medidores**



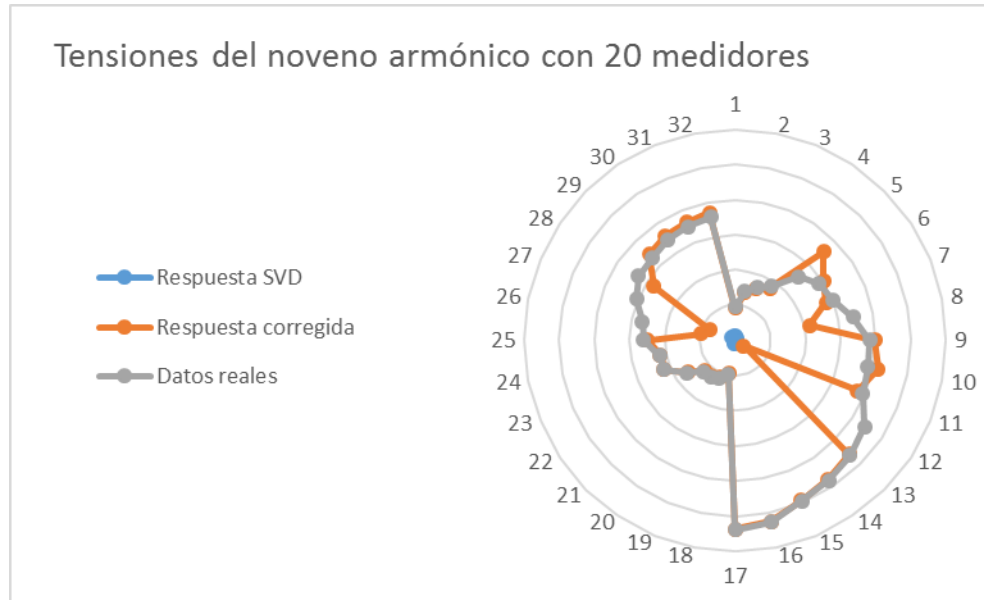
**Figura 85 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el noveno orden armónico con 18 medidores**



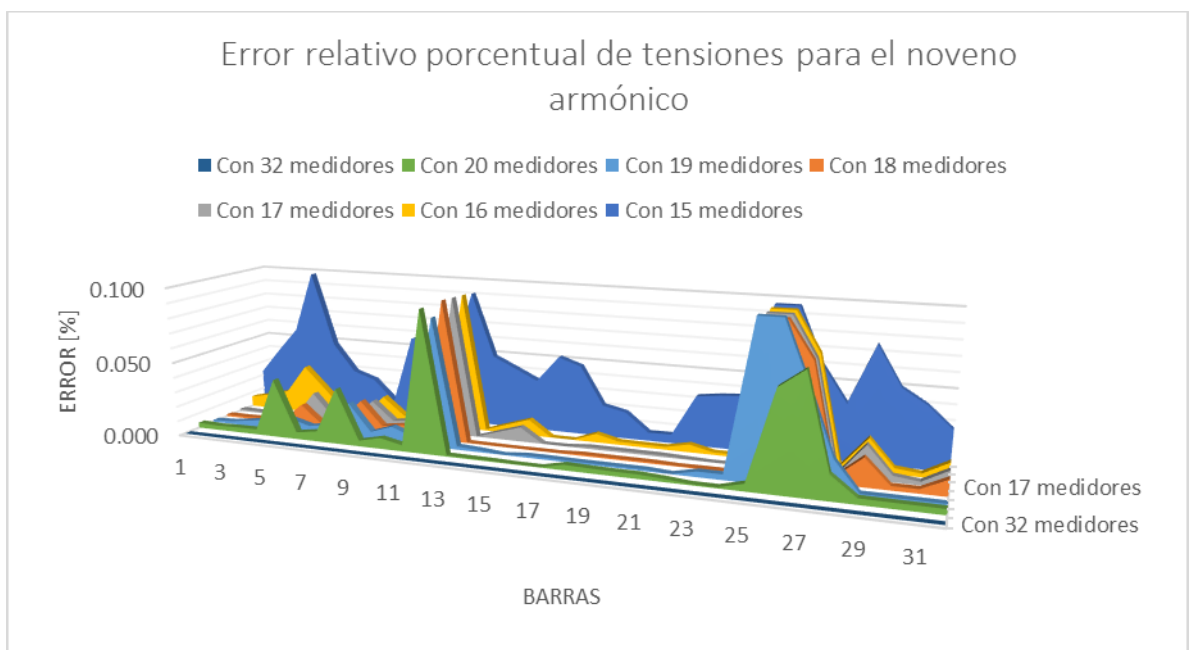
**Figura 86 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el noveno orden armónico con 19 medidores**



**Figura 87 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el noveno orden armónico con 20 medidores**



**Figura 88 Grafica de errores relativo porcentual en las magnitudes de las tensiones estimadas para el séptimo orden armónico con diferentes medidores**



**4.1.6.2. Conclusión al análisis de los resultados** Se puede observar que hay datos para los cuales la metodología aplicada arroja valores unitarios en algunas barras. Estos valores no dan ninguna información del estado armónico en las barras, pero el último análisis realizado para veinte medidores erradica esta falencia bajando los porcentajes de error en los resultados generales de la estimación; haciendo que veinte medidores sea el número mínimo de medidores a instalar en un sistema de treinta y dos barras y sea el número de medidores base para el estudio en este trabajo.

## **4.2 ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO SUB-DETERMINADO PARA UN SISTEMA DE TREINTA Y DOS BARRAS CON 20 MEDIDORES.**

Para el ejemplo de la figura 43 tenemos las siguientes variables de estado:

- Treinta y dos tensiones de barra trifásicas lo cual nos da un total de 96 variables
- Treinta y dos corrientes inyectadas trifásicas que son otras 96 variables
- Y treinta y dos corrientes de rama trifásicas que son otras 96 variables
- Para un total de 288 variables de estado de las cuales al tomar 20 medidores en el sistema se tienen 120 entre las cuales están
- las sesenta corrientes inyectadas en la fase a, de algunas las barras del sistema para la estimación de estado
- y sesenta tensiones de la fase a, en las mismas barras que las corrientes inyectadas y estas tensiones del sistema también se usaron para fines de comparación de resultados.

Los medidores para el sistema de 32 barras (figura 43) se ubicaron en forma aleatoria en las barras 1, 2, 3, 6, 7, 9, 11, 14, 15, 17, 18, 20, 21, 22, 24, 25, 28, 30, 31 y 32. Los resultados de este análisis están mostrados en las tablas en el anexo 2.

**4.2.1 Selección de la sub-matriz  $\bar{Y}_{\text{barra}}$  para el sistema de 32 barras sub-determinado** Por el método de simple inspección y las impedancias de línea según los datos del sistema reportado por la IEEE, se modifican las matrices  $[\bar{Y}_{\text{barra}}]^{(1)}$ ,  $[\bar{Y}_{\text{barra}}]^{(3)}$ ,  $[\bar{Y}_{\text{barra}}]^{(5)}$ ,  $[\bar{Y}_{\text{barra}}]^{(7)}$ ,  $[\bar{Y}_{\text{barra}}]^{(9)}$  mostradas en el Anexo 1.

Se seleccionaron los armónicos de primer, tercer, quinto, séptimo y noveno orden para este caso de estudio. Las matrices  $[\bar{Y}_{\text{barra-sub}}]^{(1)}$ ,  $[\bar{Y}_{\text{barra-sub}}]^{(3)}$ ,  $[\bar{Y}_{\text{barra-sub}}]^{(5)}$ ,  $[\bar{Y}_{\text{barra-sub}}]^{(7)}$  y  $[\bar{Y}_{\text{barra-sub}}]^{(9)}$  se pueden ver en el Anexo 2.

**4.2.2 Aplicación de SVD a las matrices de  $\bar{Y}_{\text{barra}}$**  Teniendo las matrices  $\bar{Y}_{\text{barra-sub}}$  se aplica el método de descomposición de valores singulares para hallar de cada matriz, las matrices que la componen, y como método alternativo para encontrar su matriz inversa y apreciar los valores y vectores de espacio nulo.

Las matrices  $[\bar{U}_{\text{sub}}]^{(1)}$ ,  $[\bar{V}_{\text{sub}}]^{(1)}$ ,  $[\bar{W}_{\text{sub}}]^{(1)}$  se pueden ver en el Anexo 2

Las matrices  $[\bar{U}_{\text{sub}}]^{(3)}$ ,  $[\bar{V}_{\text{sub}}]^{(3)}$ ,  $[\bar{W}_{\text{sub}}]^{(3)}$  se pueden ver en el Anexo 2

Las matrices  $[\bar{U}_{\text{sub}}]^{(5)}$ ,  $[\bar{V}_{\text{sub}}]^{(5)}$ ,  $[\bar{W}_{\text{sub}}]^{(5)}$  se pueden ver en el Anexo 2

Las matrices  $[\bar{U}_{\text{sub}}]^{(7)}$ ,  $[\bar{V}_{\text{sub}}]^{(7)}$ ,  $[\bar{W}_{\text{sub}}]^{(7)}$  se pueden ver en el Anexo 2

Las matrices  $[\bar{U}_{\text{sub}}]^{(9)}$ ,  $[\bar{V}_{\text{sub}}]^{(9)}$ ,  $[\bar{W}_{\text{sub}}]^{(9)}$  se pueden ver en el Anexo 2

**4.2.3 Cálculo de  $\bar{Z}_{\text{barra-sub}}$**  Para hallar  $[\bar{Z}_{\text{barra-sub}}]$  se utiliza la ecuación (11) en el cual partiendo de las matrices de la descomposición de valores singulares se reubican estas matrices para hallar la matriz inversa de  $[\bar{Y}_{\text{barra-sub}}]$ .

Las matrices  $[\bar{Z}_{\text{barra-sub}}]^{(1)}$ ,  $[\bar{Z}_{\text{barra-sub}}]^{(3)}$ ,  $[\bar{Z}_{\text{barra-sub}}]^{(5)}$ ,  $[\bar{Z}_{\text{barra-sub}}]^{(7)}$  y  $[\bar{Z}_{\text{barra-sub}}]^{(9)}$  se encuentran en el anexo 2

**4.2.4 Corrientes inyectadas** En este caso las corrientes mostradas en la tabla 23 son extraídas del simulador de ATP, las corrientes en el primer nodo son grandes debido a que se trabaja con el modelo fuentes de corrientes de inyección.

**4.2.4.1**  $[\bar{I}_{inyectadas}]$

**Tabla 23 Vectores**  $[\bar{I}_{inyectadas}]$

Corrientes Inyectadas [A]					
Nodo	Primer	Tercero	Quinto	Séptimo	Noveno
	Armónico	Armónico	Armónico	Armónico	Armónico
1	-14197.196-19289.908j	-2.516-7.774j	-0.463-2.516j	-0.14-1.253j	-0.049-0.747j
2	-1.256+5.735j	-0.007-0.006j	0.006+0.003j	-0.006j	0.001+0.001j
3	-0.425+8.716j	-0.018-0.002j	0.008+0.006j	-0.005-0.001j	0.002+0.002j
6	-2.543+14.066j	-0.064-0.016j	0.022+0.03j	-0.014-0.012j	0.005+0.012j
7	-2.594+14.165j	-0.058-0.027j	0.034+0.02j	-0.017-0.015j	0.008+0.008j
9	-1.336+3.929j	-0.03-0.013j	0.007+0.014j	0.004-0.015j	0.002+0.007j
11	4.859+0.453j	0.95+0.27j	-0.43-0.229j	0.235+0.178j	-0.095-0.112j
14	-1.915+3.592j	-0.023-0.036j	0.015+0.03j	-0.007-0.022j	0.003+0.012j
15	4.536+0.423j	0.876+0.253j	-0.406-0.21j	0.216+0.169j	-0.09-0.103j
17	7.111+0.666j	1.379+0.399j	-0.636-0.328j	0.341+0.262j	-0.14-0.161j
18	-1.192+5.6j	-0.006-0.001j	0.002+0.004j	-0.001-0.002j	0.001+0.002j
20	5.804+0.542j	1.125+0.326j	-0.519-0.267j	0.277+0.216j	-0.114-0.131j
21	-1.201+5.634j	-0.008-0.004j	0.004+0.005j	-0.002-0.002j	0.001+0.002j
22	-0.787+6.119j	-0.011-0.004j	0.007+0.005j	-0.004-0.002j	0.002+0.002j
24	-5.414+27.725j	-0.083-0.032j	0.04+0.036j	-0.022-0.019j	0.009+0.014j
25	-1.034+4.033j	-0.016-0.008j	0.008+0.006j	-0.011j	0.001+0.002j
28	10.137+0.953j	1.958+0.573j	-0.908-0.464j	0.48+0.381j	-0.2-0.228j
30	-2.515+11.213j	-0.059-0.027j	0.029+0.024j	-0.016-0.015j	0.007+0.01j
31	-3.414+15.802j	-0.086-0.037j	0.041+0.032j	-0.024-0.018j	0.009+0.014j

Corrientes Inyectadas [A]					
Nodo	Primer	Tercero	Quinto	Séptimo	Noveno
	Armónico	Armónico	Armónico	Armónico	Armónico
32	5.413+0.506j	1.05+0.304j	-0.484-0.249j	0.259+0.2j	-0.107-0.122j

**4.2.5 Coeficientes de corrección k(j) para análisis de estimación** Como se mostró en el numeral 2.12. es necesario el cálculo de las constantes k para cada armónico con el fin de hallar una respuesta cercana a los valores reales de tensión, los valores en la tabla 24 muestran los valores obtenidos de estas constantes.

**Tabla 24 Variables k para el sistema sub-determinado de 32 barras con 20 medidores**

	Armónico 1	Armónico 3	Armónico 5	Armónico 7	Armónico 9
k (1)	3418,08-9283,58i	-15,44+43,98i	48,25-31,8i	-6,74-31,15i	-6,46-9,61i
k (2)	10489,07-17835,94i	-8,03-23,37i	-106,63-93,09i	1,58+14,64i	4,8-66,67i
k (3)	-2009,2-7270,78i	65,14+17,71i	17,06-53,3i	31,72+74,23i	3,39+10,06i
k (4)	12153,45-3104,79i	-61,25+113,32i	66,54-3,41i	-58,44-21,32i	36,06-16,2i
k (5)	12614,81+842,72i	3,21-87,42i	-3,25+60,85i	74,27+67,83i	-30,41-50,52i
k (6)	-776,47-6100,19i	7,3+79,7i	12,15-58,79i	-43,55-1,36i	27,17+7i
k (7)	8408,18-3229,36i	30,31+39,41i	6,9-35,51i	-12,61+29,31i	12,46-17,68i
k (8)	-12431,54-159,53i	-89,38-1,55i	18,95+39,2i	4,34-19,6i	-1,58+28,95i
k (9)	-1381,06-10481,72i	4,64+52,65i	16,16-107,23i	-31,4+43,39i	54,98-74,6i
k (10)	1305,69-21547,43i	21,06+272,66i	-67,91-79,75i	-64,48+127,74i	-12,05-47,05i
k (11)	18124,47+754,67i	45,79-74,91i	160,76-43,51i	-49,65-35,97i	82,07-11,24i
k (12)	11946,06-1047,28i	73,19+100,42i	-30,74-99,57i	45,38+99,23i	-10,53-5,98i

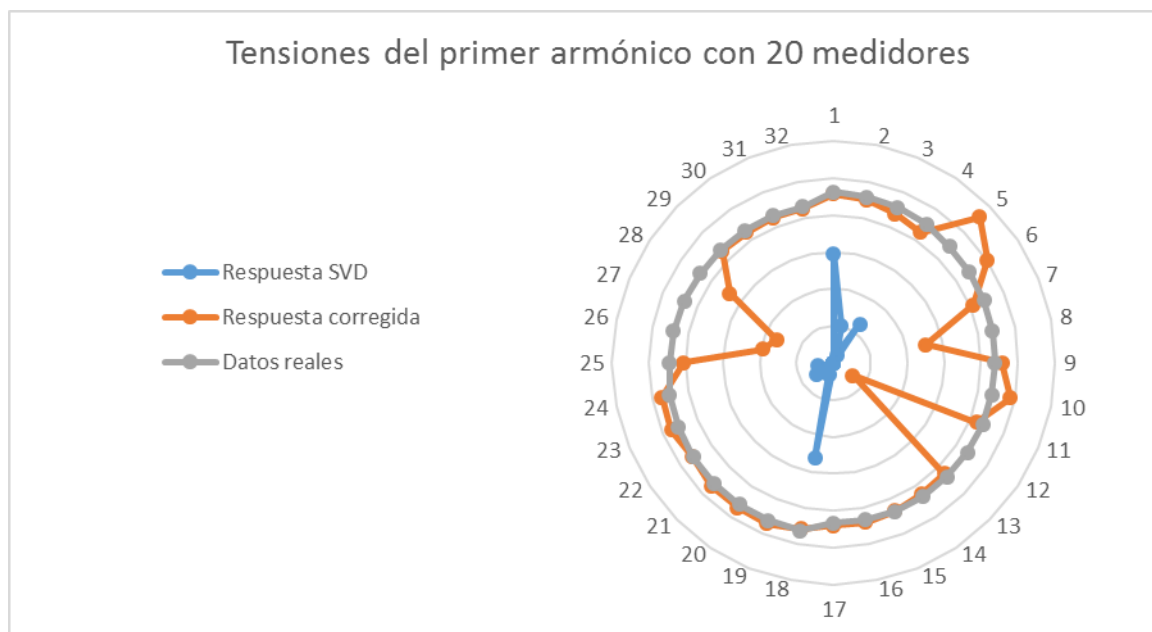
**4.2.6 Estimación de las tensiones armónicas** Para el cálculo de las tensiones armónicas se hace uso de la  $[\bar{Z}_{\text{barra-sub}}]$  calculada en el numeral 3.1.9., la cual se

multiplica por las corrientes que se extrajeron del software de ATP en el numeral 3.1.10. obteniendo así las tensiones en las barras del sistema.

Las tensiones en las tablas mostradas en el anexo 2 son comparadas con los datos de tensión reales mediante un cálculo de error relativo llevado a cabo en cada barra del sistema y para cada armónico. Estos errores se registraron en las mismas tablas en el anexo 2 y se graficaron para una mejor interpretación. (Figuras 89-98). Todos los cálculos realizados para la obtención de las tensiones armónicas se realizaron en el código de MATLAB “estimación para el sistema de 32 barras ANEXO 7”.

#### 4.2.6.1 Grafica de $[\bar{V}_{barra-sub}]^{(1)}$

**Figura 89 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el primer orden armónico con 20 medidores**

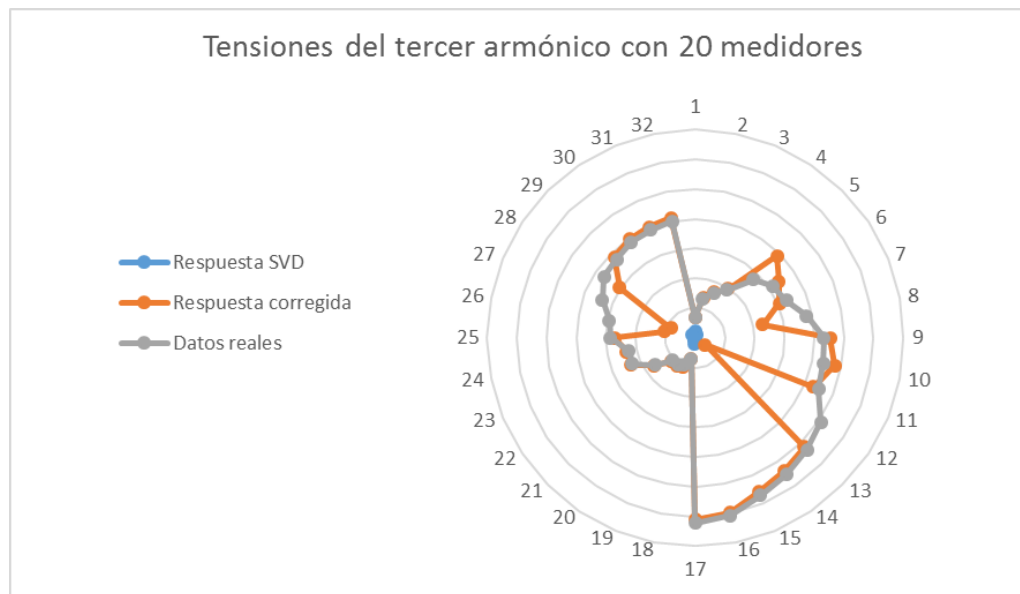


**Figura 90 Errores del primer armónico para un sistema sub-determinado de 32 barras**



**4.2.6.2 Grafica de  $[\bar{V}_{barra-sub}]^{(3)}$**

**Figura 91 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el tercer orden armónico con 20 medidores**

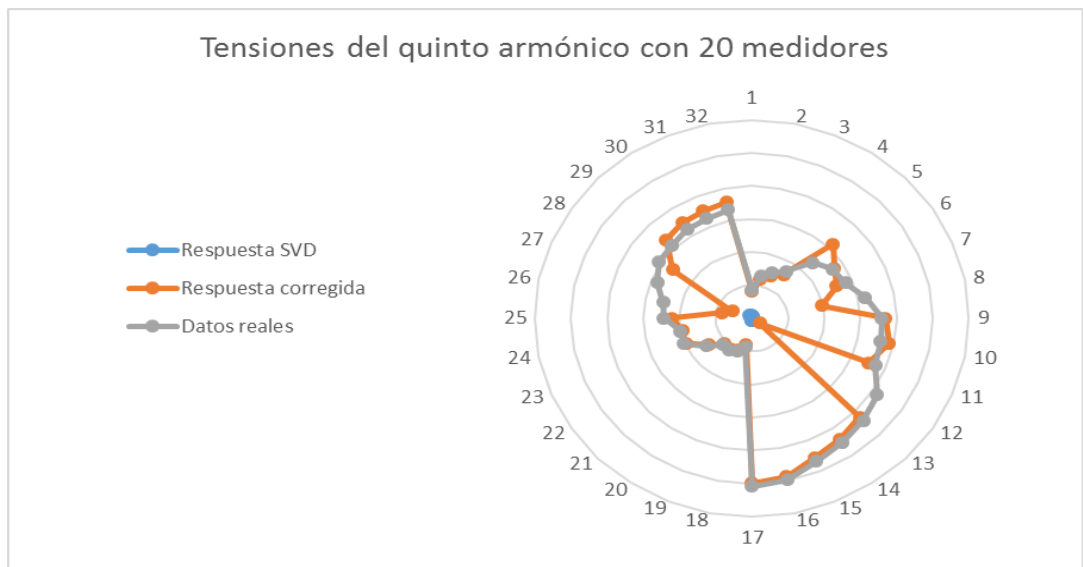


**Figura 92 Errores del tercer armónico para un sistema sub-determinado de 32 barras**

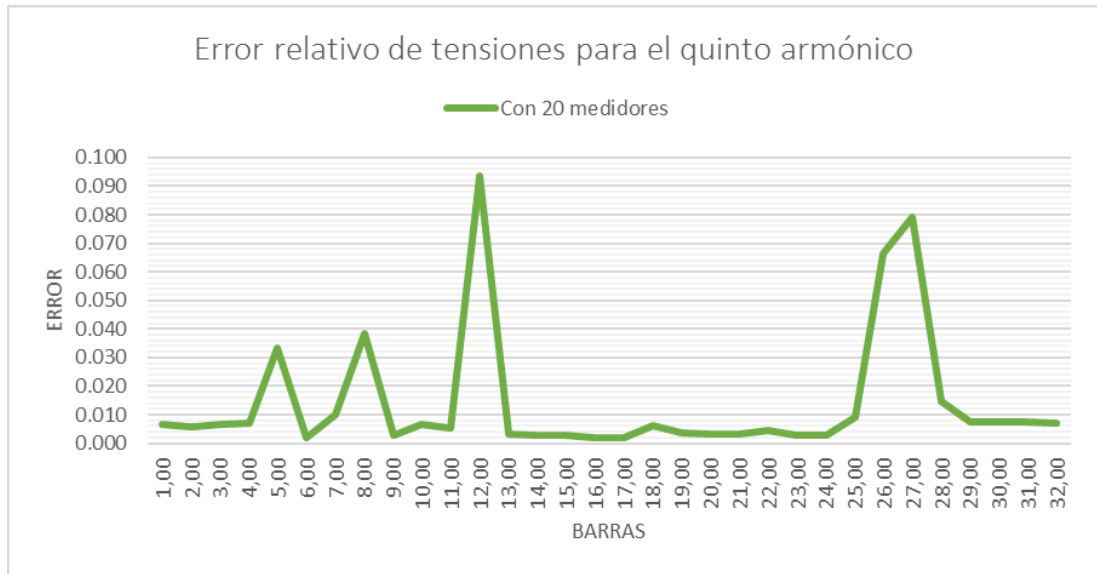


**4.2.6.3 Cálculo de  $[\bar{V}_{barra-sub}]^{(5)}$**

**Figura 93 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el quinto orden armónico con 20 medidores**

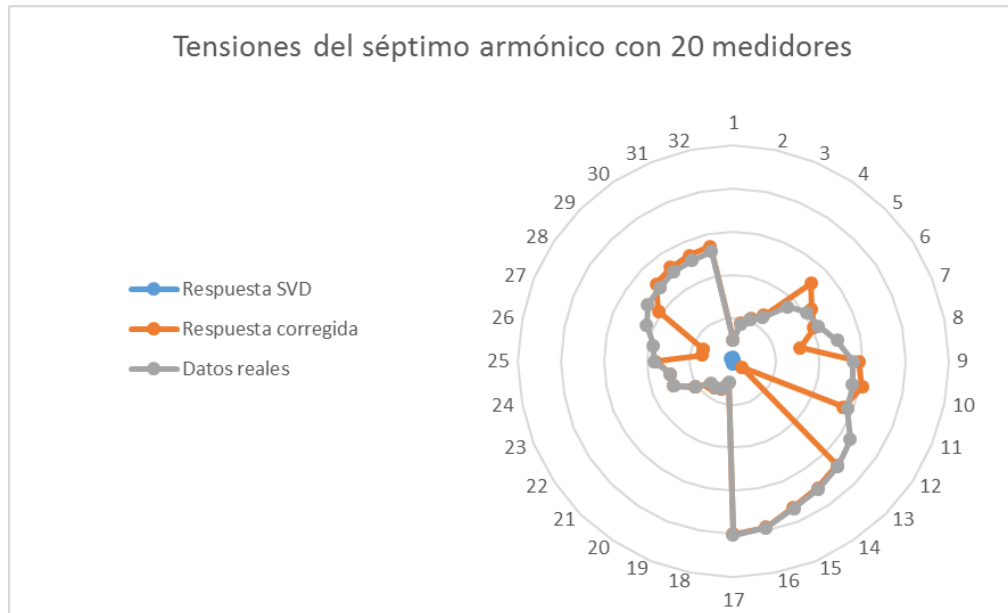


**Figura 94 Errores del quinto armónico para un sistema sub-determinado de 32 barras**



#### 4.2.6.4 Cálculo de $[\bar{V}_{barra-sub}]^{(7)}$

**Figura 95 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el séptimo orden armónico con 20 medidores**

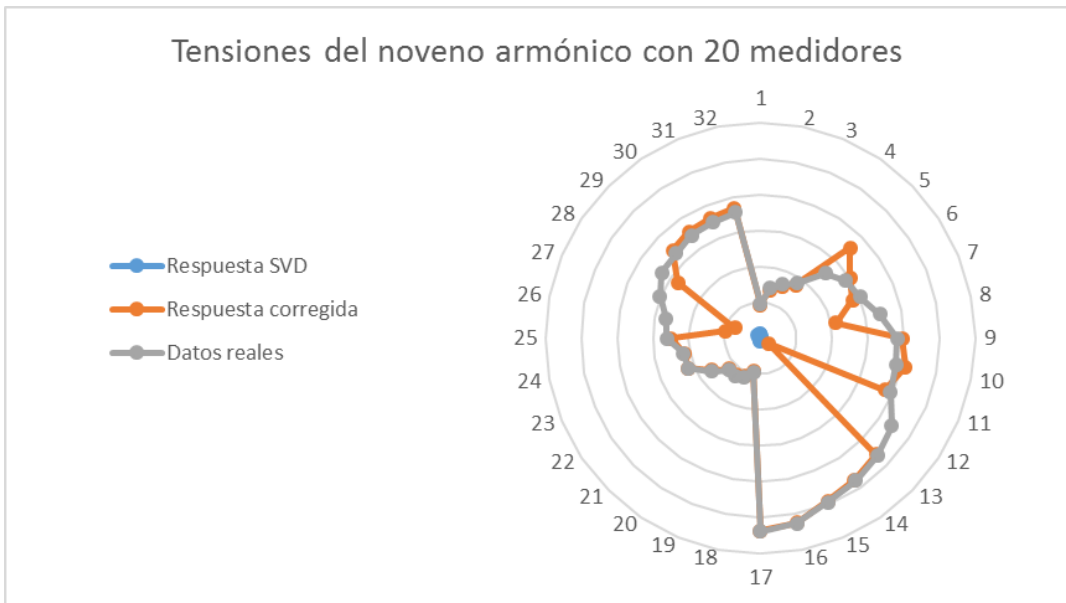


**Figura 96 Errores del séptimo armónico para un sistema sub-determinado de 32 barras**

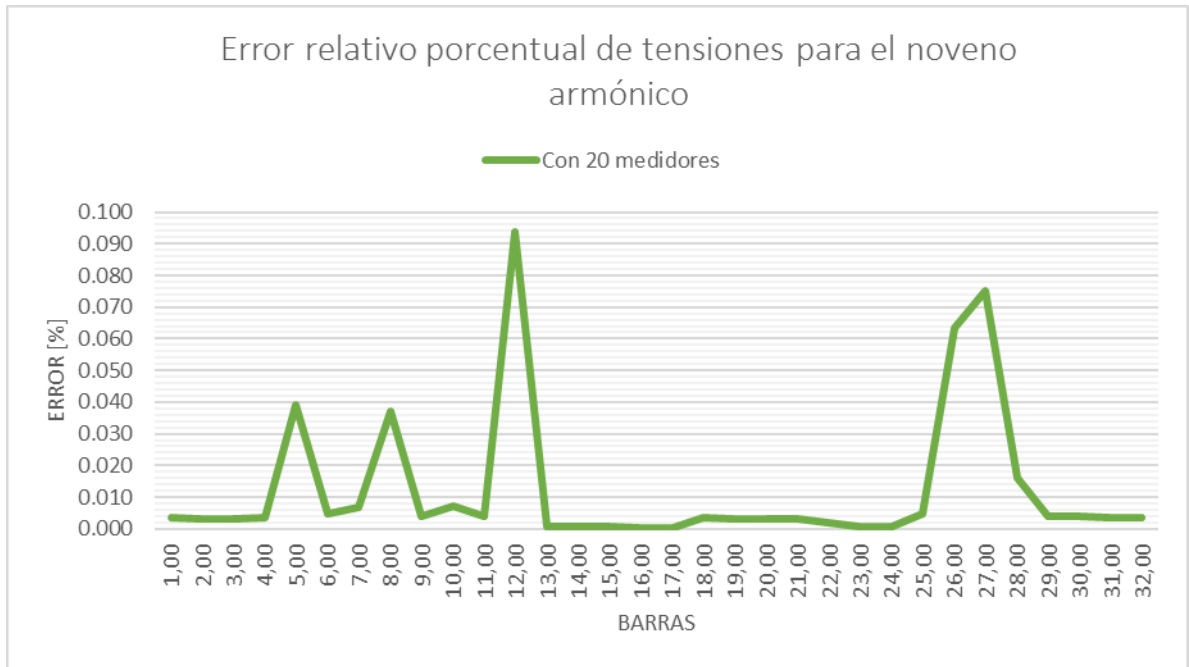


**4.2.6.5 Cálculo de  $[\bar{V}_{barra-sub}]^{(9)}$**

**Figura 97 Grafica comparativa de las tensiones estimadas por SVD, los datos corregidos y los datos reales extraídos de ATP para el noveno orden armónico con 20 medidores**



**Figura 98 Errores del noveno armónico para un sistema sub-determinado de 32 barras**



**4.2.7 Análisis general de los resultados de los casos de estudio** Con la aplicación de la metodología desarrollada, se concluyen algunos resultados importantes para los casos de estudio:

Con 20 medidores y la suposición de un sistema equilibrado-balanceado, es posible hallar de un sistema sub-determinado una estimación de tensiones aceptable, es decir con valores estimados muy cercanos a los valores reales de tensión.

Se debe tener en cuenta que debido a la cantidad de variables de estado los resultados no son exactamente los valores medidos, pues los valores estimados variarían y se aumentaría su precisión según aumenten las variables escogidas.

Para el sistema de 6 barras, se obtuvo un resultado admisible en los valores de tensión con medidores en la mitad de las barras del sistema, es decir que del caso

base es posible concluir que el número de medidores requeridos para realizar una estimación de estado armónico aceptable debe ser mayor a la mitad del número de barras del sistema.

Los resultados obtenidos en el sistema de 32 barras reportado por la IEEE, cumplen exitosamente con la restricción anterior, esto comprueba que la metodología se adapta hacia las diferentes topologías que se pueden presentar en las redes eléctricas. Cabe resaltar que el número de medidores aumenta conforme aumenta el número de barras en el sistema.

Mediante un método estadístico de optimización se ajustaron los valores de las constantes  $k(j)$ , para el sistema de 32 barras reportado por la IEEE. Estos valores  $k(j)$  junto con los vectores de espacio nulo establecieron una corrección a la respuesta cercana a los valores reales del sistema como se observan en las gráficas 89-98, y a su vez se puede establecer un punto de comparación con los valores de tensión en los medidores del sistema.

Del proceso de estimación de estado armónico en este trabajo se determinó que parte esencial de la metodología, está en el método de optimización; a menos que el sistema sea completamente determinado es decir que haya instalado un medidor en cada barra del sistema. En el análisis de error realizado con las tensiones estimadas fue calculado a partir de las magnitudes debido a que estas ayudan a dimensionar de forma ideal las características armónicas de la red.

En general, la metodología presentada permite realizar una estimación de estado armónico en cualquier sistema si previamente se identificó la localización y el número óptimo de los monitores a instalar dentro del sistema de distribución. En la cual, el número óptimo de medidores aporta uno de los primeros análisis a realizarse dentro de lo que es la implementación del sistema de monitorización del

estado del espectro de las señales de tensión y corriente dentro del sistema, para vigilancia y mitigación de los problemas relacionados con armónicos.

## 5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un procedimiento para la estimación de estado de las componentes armónicas en sistemas de distribución de energía eléctrica, basándose principalmente en la necesidad de mejorar la calidad de la energía eléctrica en los sistemas de distribución.

- Los resultados obtenidos por la teoría implementada fueron comparados con los extraídos por el simulador ATP, en donde se dan resultados óptimos teniendo en cuenta el número de medidores usados para la estimación, se concluye que la herramienta es una ayuda prometedora en cuanto a la estimación de estado armónico en los sistemas de energía en los cuales no es posible acceder a cada nodo.
- Se cumplió de manera satisfactoria con todos los objetivos propuestos en la tesis de grado, demostrado con los resultados obtenidos en el sistema de 32 barras de la IEEE.
- Con la implementación de esta herramienta se estima directamente la contaminación armónica dada en sistemas de distribución, pero indirectamente es posible encontrar las fuentes principales de contaminación sin saber antes el estado de cargas de la red.
- La metodología desarrollada puede ser utilizada por las entidades encargadas de las redes de distribución como por centros de control en los cuales se estudie la calidad de la energía eléctrica, estudio de cargas y estudio de pérdidas de energía.

- La descomposición de valores singulares proporcionó las herramientas necesarias para el desarrollo de un problema de estimación de estado armónico que generalmente se resuelve por métodos numéricos e iterativos, arrojando resultados óptimos dentro de un conjunto de datos limitado, reduciendo así de manera considerable la búsqueda de la respuesta ideal por medio de herramientas de optimización.
- La propuesta de corrección de datos pos aplicación de SVD se convirtió en parte vital del proceso de estimación de estado armónico debido a que con este paso se obtienen resultados con mayor precisión, logrando así un paso adelante en el proceso de identificación de la contaminación armónica en redes de distribución con características sub-determinadas.
- Uno de los puntos clave en la ingeniería de diseño para sistemas de potencia, es la contaminación armónica ya que este factor afecta elementos claves como calibre de conductores, bancos de condensadores, filtros activos y ubicación de medidores; con el desarrollo logrado en este proyecto investigativo se tiene una fuente confiable de información real de este problema, de manera eficaz y con características óptimas de estimación.

## **TRABAJOS FUTUROS**

- Se propone realizar la estimación de estado armónico teniendo en cuenta el error involucrado en la mala obtención de datos, ya que debido a estos se obtiene una incertidumbre en la medida que de ser tenida en cuenta disminuiría el error obtenido en la estimación de las componentes armónicas de tensión.
- Es posible fomentar una aplicación para la introducción de filtros armónicos y así evitar todos los efectos secundarios que produce este fenómeno en instalaciones eléctricas de uso final, principalmente industriales.

- Iniciar una investigación sobre filtros armónicos en las redes de distribución, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en esta tesis de grado, es posible tener un punto de inicio para una correcta organización de estos filtros, los cuales se encargarían de eliminar la contaminación en las fuentes armónicas detectadas por la estimación hecha en la red.
- Hacer ajustes a la metodología propuesta para que la herramienta tenga más alcance no solo analizando datos de redes trifásicas equilibradas y balanceadas, sino un análisis con mayor complejidad al observar el comportamiento armónico en redes desbalanceadas y con cargas monofásicas y bifásicas en diferentes niveles de tensión.
- Complementar esta herramienta con la expuesta en la tesis de grado: “LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE MONITORES DE CALIDAD DE POTENCIA PARA LA ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.” [XX] Para que la estimación de estado en las componentes armónicas no sea hecha con medidores aleatorios, sino, que tengan una ubicación estratégica dentro de la red eléctrica, esperando así obtener una mejor estimación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Diego Armando Pinto Argüello, Luis Antonio Rivera Pinzon, «Evaluación de modelos de carga para la estimación de estado de la calidad de la potencia en sistemas de distribución de energía eléctrica», Bucaramanga Colombia, 2015.

[2] Diego Martin Ferreyra, «Implementación de técnicas de estimación de estado armónico en sistemas eléctricos de distribución», Provincia de Córdoba Argentina, Septiembre 2014, Disponible en: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/tesis/estimacion\\_estado\\_armonico.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/tesis/estimacion_estado_armonico.pdf), Ultimo acceso: 06/07/2016.

[3] Dayan Giovanni Hernández Decanini, «Simulación de la evolución dinámica de armónicos y su estimación en tiempo real utilizando un filtro de kalman», Guadalajara Jalisco, Septiembre

2005, Disponible en: [http://www.gdl.cinvestav.mx/abner/uploads/tesis\\_giov.pdf](http://www.gdl.cinvestav.mx/abner/uploads/tesis_giov.pdf), Ultimo acceso: 06/07/2016.

[4] Carlo Muscas, Fabrizio Pilo, Giuditta Pisano, Sara Sulis, «Optimal measurement devices allocation for harmonic state estimation considering parameters uncertainty in net woks», Italia, Noviembre 2007 Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/4307738\\_Optimal\\_measurement\\_devices\\_allocation\\_for\\_harmonic\\_state\\_estimation\\_considering\\_parameters\\_uncertainty\\_in\\_distribution\\_networks](https://www.researchgate.net/publication/4307738_Optimal_measurement_devices_allocation_for_harmonic_state_estimation_considering_parameters_uncertainty_in_distribution_networks), Ultimo acceso: 10/07/2016.

[5] Kent K.C Yu B.E (Hons), «Harmonic state estimation and transient state estimation», New Zealand, 2005, Disponible en: <http://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/1108>, Ultimo acceso: 10/07/2016.

[6] Kent K. C Yu, Watson, and J. Arrillaga, «An adaptative kalman filter for dynamic harmonic state estimation and harmonic injection tracking», New Zealand, 2005.

[7] Hsiung Cheng Lin, «Intelligent neural network-based fast power system harmonic detection», Taiwan, Febrero 2007.

[8] A. Arefi, M. R. Haghifam, S. H. Fathi, T. Niknam, J. Olamaei, «A novel algorithm based on honey bee mating optimization for distribution harmonic state estimation including distributed generators», Iran- Bucharest Romania, Julio 2009.

[9] S. S. Matar, N. R. Watson, K. P. Wong, V. L. Pham, J. Arrillaga, «Harmonic state estimation: a method for remote harmonic assessment in a deregulated utility network», Australia – London, Abril 2000.

[10] Hussam M. M. Alhaj, Nursyarizal Mohd, Vijanth S. Asirvadam, M. F. Abdullah, «Power system harmonics estimation using lms, lmf and lms/lmf», Malaysia, 2014.

[1] Kent K. C. Yu, Neville R. Watson, Jos Arrillaga, «Error Analysis in static harmonic state estimation: A statistical approach», New Zealand, Abril 2005.

[12] Carlo Muscas, Fabrizio Pilo, Giuditta Pisano, Sara Sulis, «Optimal number and location of measurement instruments in distributed system for harmonic state estimation», Italy, 2007.

- [13] Huaiwei Liao, «Power system harmonic state estimation and observability analysis via sparsity maximization», USA, 2007.
- [14] Marjan Shafiee Rad, Hossein Mokhtari, Houshang Karimi, «A new algorithm for optimal measurement placement, observability analysis and harmonic state estimation in power systems», Tehran Iran, 2013.
- [15] Yiquan Zhang, Yonghai Xu, Yuanyuan Xu, «Research on power system harmonic state estimation», Baijing China, 2011.
- [16] K.K.C. Yu, «Three phase harmonic state estimation using SVD for partially observable systems», Singapore, Noviembre 2004. IEEE proceedings of international conference on Power system technology, vol.1, pp 0-7803-8610.
- [17] Manolis I.A. Lourakis, «A brief description of the Levenberg-Marquard algorithm implemened», Heraklion, Crete, Greece, 2005, Disponible en: <http://cpansearch.perl.org/src/JLAPEYRE/PDL-Fit-Levmar-0.0091/doc/levmar.pdf>, Ultimo acceso 06/07/2016.

## BIBLIOGRAFIA

A. AREFI, M. R. HAGHIFAM, S. H. FATHI, T. NIKNAM, J. OLAMAEI, «A novel algorithm based on honey bee mating optimization for distribution harmonic state estimation including distributed generators», Iran- Bucharest Romania, Julio 2009.

FERREYRA Diego Martin, «Implementación de técnicas de estimación de estado armónico en sistemas eléctricos de distribución», Provincia de Córdoba Argentina, Septiembre 2014, Disponible en: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/tesis/estimacion\\_estado\\_armonico.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/tesis/estimacion_estado_armonico.pdf), Ultimo acceso: 06/07/2016.

HERNÁNDEZ DECANINI Dayan Giovanni, «Simulación de la evolución dinámica de armónicos y su estimación en tiempo real utilizando un filtro de kalman», Guadalajara Jalisco, Septie

HSIUNG Cheng Lin, «Intelligent neural network-based fast power sistem harmonic detection», Taiwan, Febrero 2007.

HUAIWEI Liao, «Power system harmonic state estimation and observability analysis via sparsity maximization», USA, 2007.

HUSSAM M. M. ALHAJ, Nursyarizal Mohd, Vijanth S. Asirvadam, M. F. Abdullah, «Power system harmonics estimation using lms, lmf and lms/lmf», Malaysia, 2014.

K.K.C. YU, «Three phase harmonic state estimation using SVD for partially observable systems», Singapure, Noviembre 2004. IEEE proceedings of international conference on Power system technology, vol.1, pp 0-7803-8610.

KENT K. C Yu, Watson, and J. Arrillaga, «An adaptative kalman filter for dynamic harmonic state estimation and harmonic injection tracking», New Zealand, 2005.

KENT K. C. Yu, Neville R. Watson, Jos Arrillaga, «Error Analysis in static harmonic state estimation: A statistical approach», New Zealand, Abril 2005.

KENT K.C Yu B.E (Hons), «Harmonic state estimation and transient state estimation», New Zealand, 2005, Disponible en: <http://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/1108>, Ultimo acceso: 10/07/2016.

MANOLIS I.A. LOURAKIS, «A brief description of the Levenberg-Marquard algorithm implemened», Heraklion, Crete, Greece, 2005, Disponible en: <http://cpansearch.perl.org/src/JLAPEYRE/PDL-Fit-Levmar-0.0091/doc/levmar.pdf>, Ultimo acceso 06/07/2016.

MARJAN Shafiee Rad, HOSSEIN Mokhtari, HOUSHANG Karimi, «A new algorithm for optimal measurement placement, observability analysis and harmonic state estimation in power systems», Tehran Iran, 2013.

MBRE 2005, Disponible en: [http://www.gdl.cinvestav.mx/abner/uploads/tesis\\_giov.pdf](http://www.gdl.cinvestav.mx/abner/uploads/tesis_giov.pdf), Ultimo acceso: 06/07/2016.

MUSCAS Carlo, PILO Fabrizio, PISANO Giuditta, SULIS Sara, «Optimal measurement devices allocation for harmonic state estimation considering parameters uncertainty in net woks», Italia, Noviembre 2007 Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/4307738\\_Optimal\\_measurement\\_devices\\_allocation\\_for\\_harmonic\\_state\\_estimation\\_considering\\_parameters\\_uncertainty\\_in\\_distribution\\_networks](https://www.researchgate.net/publication/4307738_Optimal_measurement_devices_allocation_for_harmonic_state_estimation_considering_parameters_uncertainty_in_distribution_networks), Ultimo acceso: 10/07/2016.

MUSCAS Carlo, PILO Fabrizio, PISANO Giuditta, SULIS Sara, «Optimal number and location of measurement instruments in distributed system for harmonic state estimation», Italy, 2007.

PINTO ARGÜELLO Diego Armando, RIVERA PINZON Luis Antonio, «Evaluacion de modelos de carga para la estimación de estado de la calidad de la potencia en sistemas de distribución de energía eléctrica», Bucaramanga Colombia, 2015.

S. S. MATAIR, N. R. WATSON, K. P. WONG, V. L. Pham, J. Arrillaga, «Harmonic state estimation: a method for remote harmonic assessment in a deregulated utility network», Australia – London, Abril 2000.

YIQUAN Zhang, YONGHAI Xu, YUANYUAN Xu, «Research on power system harmonic state estimation», Baijing China, 2011.

# **ANEXOS**

(ver documentos adjuntos)