



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA ELÉCTRICA

**DISEÑO DE FILTROS DE CORRIENTES ARMÓNICAS AL PARQUE  
EÓLICO INGENIO.**

**T E S I N A**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**ESPECIALISTA EN ENERGIA ELECTRICA**

PRESENTA:

**ING. EFRAIN CASTRO FRIAS**

DIRECTOR DE TESINA: ING. FRANCISCO CUEVAS ARTEAGA

MÉXICO, D.F. SEPTIEMBRE 2017



# Agradecimientos.

A mi madre Laura, por ser mi fuente de inspiración y fuerza aun cuando ya no esté a mi lado, lo logramos mamá.

A mi padre Abimael, porque me has demostrado que rendirse jamás será una opción, gracias por convertirme en lo que soy, estoy orgulloso de ser tu hijo.

A mis hermanos, Xochitl y Gabriel, por su cariño, su comprensión y por siempre estar juntos aun en los momentos más difíciles, mis victorias son tuyas, son los mejores.

A mi querida Paty, gracias por todo el apoyo que me has brindado, por tu amor y por demostrarme que la vida es mejor si tengo con quien compartirla.

A mis familiares y amigos, por todos esos momentos de alegría, consejos, apoyos y palabras de ánimo que me brindaron.

A mi asesor Ing. Francisco Cuevas, por su importante papel en este logro, por todo su apoyo y compromiso.

A mi Universidad, mi facultad y mis profesores, por darme la oportunidad de cumplir mis sueños.

# CONTENIDO

---

1	ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	4
2	ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	5
3	ÍNDICE DE TABLAS.....	5
	INTRODUCCIÓN.....	6
	CAPÍTULO I EL PARQUE EOLICO INGENIO .....	9
	1.1. Armónicos el en parque eólico Ingenio.....	11
	1.2. Distorsiones armónicas permisibles para el parque eólico.....	13
	CAPÍTULO 2 DISEÑO DE FILTROS ELECTRICOS .....	20
	2.1. Filtros eléctricos pasivos.....	20
	2.1.1. Filtro de una sintonía.....	20
	2.1.2. Filtro de segundo orden.....	21
	2.2. Cálculo de los filtros eléctricos.....	24
	2.3. Método de resolución del problema.....	25
	CAPÍTULO 3 OBTENCION DE RESULTADOS.....	27
	3.1. Simulaciones: Análisis armónico y gráficos de impedancia contra frecuencia.....	27
	3.2. Filtro de segundo orden de 7 MVAR, h=7 y filtro notch de 5 MVAR h=5.....	57
	Conclusiones.....	60
	Referencias.....	61
	Anexo A.....	62

# 1 ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.

---

<i>Ilustración 1. Diagrama unifilar del P.E. Ingenio. ....</i>	<i>10</i>
<i>Ilustración 2. Señal deformada a causa de un armónico. ....</i>	<i>12</i>
<i>Ilustración 3. Estudio de flujos de potencia con generación máxima. ....</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 4. Corrientes de corto circuito trifásico. ....</i>	<i>16</i>
<i>Ilustración 5. Análisis armónico con bancos de capacitores fuera de operación. ....</i>	<i>17</i>
<i>Ilustración 6. Análisis armónico con ambos bancos de capacitores conectados. ....</i>	<i>19</i>
<i>Ilustración 7. Comportamiento de un filtro notch [6]. ....</i>	<i>20</i>
<i>Ilustración 8. Comportamiento de un filtro de segundo orden. ....</i>	<i>22</i>
<i>Ilustración 9. Respuesta de un filtro de segundo orden al variar Q. ....</i>	<i>22</i>
<i>Ilustración 10. Análisis armónico con filtro notch de 5 MVAR, h=5. ....</i>	<i>28</i>
<i>Ilustración 11. Análisis armónico con filtro notch de 5 MVAR, h=7. ....</i>	<i>29</i>
<i>Ilustración 12. Análisis armónico con filtro notch de 5 MVAR, h=11. ....</i>	<i>30</i>
<i>Ilustración 13. Análisis armónico con filtro notch de 7 MVAR, h=5. ....</i>	<i>31</i>
<i>Ilustración 14. Análisis armónico con filtro notch de 7 MVAR, h=7. ....</i>	<i>31</i>
<i>Ilustración 15. Análisis armónico con filtro notch de 7 MVAR, h=11. ....</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 16. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 5 MVAR, h=5. ....</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 17. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 5 MVAR, h=7. ....</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 18. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 5 MVAR, h=11. ....</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 19. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR, h=5. ....</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 20. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR, h=7. ....</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 21. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR, h=11. ....</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 22. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 5 MVAR, h=5 y filtro notch de 7 MVAR, h=7. ....</i>	<i>39</i>
<i>Ilustración 23. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 5 MVAR, h=11 y filtro notch de 7 MVAR, h=7. ....</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 24. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 5 MVAR, h=5 y filtro notch de 7 MVAR, h=11. ....</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 25. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 5 MVAR, h=7 y filtro notch de 7 MVAR, h=5. ....</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 26. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 5 MVAR, h=11 y filtro notch de 7 MVAR, h=5. ....</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 27. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 5 MVAR, h=7 y filtro notch de 7 MVAR, h=11. ....</i>	<i>45</i>
<i>Ilustración 28. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR, h=5 y filtro notch de 5 MVAR, h=7. ....</i>	<i>46</i>
<i>Ilustración 29. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR, h=11 y filtro notch de 5 MVAR, h=7. ....</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 30. Análisis armónico con filtro de 2do orden, 7 MVAR, h=5 y filtro notch de 5 MVAR, h=11. ....</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 31. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR, h=7 y filtro notch de 5 MVAR, h=5. ....</i>	<i>49</i>
<i>Ilustración 32. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR, h=11 y filtro notch de 5 MVAR, h=5. ....</i>	<i>50</i>
<i>Ilustración 33. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR, h=7 y filtro notch de 5 MVAR, h=11. ....</i>	<i>51</i>

<i>Ilustración 34. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 5 MVAR, h=7 y filtro notch de 7 MVAR, h=5, generación media.</i>	54
<i>Ilustración 35. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR, h=5 y filtro notch de 5 MVAR, h=7, generación media.</i>	55
<i>Ilustración 36. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR, h=7 y filtro notch de 5 MVAR, h=5, generación media.</i>	56
<i>Ilustración 37. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR, h=7 y filtro notch de 5 MVAR, h=5, generación baja.</i>	57
<i>Ilustración 38. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR, h=7 y filtro notch de 5 MVAR, h=5, generación de 10 MW.</i>	58
<i>Ilustración 39. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR, h=7 y filtro notch de 5 MVAR, h=5, generación de 34 MW.</i>	59

## 2 ÍNDICE DE GRÁFICOS.

---

<i>Gráfico 1. Impedancia contra frecuencia en bus principal con ambos bancos de capacitores conectados.</i>	18
<i>Gráfico 2. Impedancia contra frecuencia en bus principal con filtro notch de 5 MVAR, h=5.</i>	28
<i>Gráfico 3. Impedancia contra frecuencia en bus principal con filtro notch de 5 MVAR, h=7.</i>	29
<i>Gráfico 4. Impedancia contra frecuencia en bus principal con filtro notch de 7 MVAR, h=7.</i>	32
<i>Gráfico 5. Impedancia contra frecuencia en bus principal con filtro de 2do orden de 7 MVAR, h=7.</i>	36
<i>Gráfico 6. Impedancia contra frecuencia en bus principal con filtro de 2do orden de 5 MVAR, h=5 y filtro notch de 7 MVAR, h=7.</i>	40
<i>Gráfico 7. Impedancia contra frecuencia en bus principal con filtro de 2do orden de 5 MVAR, h=11 y filtro notch de 7 MVAR, h=7.</i>	41
<i>Gráfico 8. Impedancia contra frecuencia en bus principal con filtro de 2do orden de 5 MVAR, h=7 y filtro notch de 7 MVAR, h=5.</i>	43

## 3 ÍNDICE DE TABLAS

---

<i>Tabla 1. Valores del transformador</i>	11
<i>Tabla 2. Valores de la red de suministro</i>	11
<i>Tabla 3. Distorsión individual de corriente de armónicos presentes en el parque eólico.</i>	17
<i>Tabla 4. Diseño inicial de filtros, un solo banco de capacitores modificado.</i>	27
<i>Tabla 5. Valores de distorsión obtenidos para el diseño inicial de filtros.</i>	37
<i>Tabla 6. Valores de distorsión obtenidos para diseño con ambos bancos de capacitores modificados.</i>	52
<i>Tabla 7. Valores de distorsión obtenidos para los diseños seleccionados.</i>	56

## INTRODUCCIÓN

---

El uso de energías renovables ha tenido un fuerte auge debido a la constante preocupación de la contaminación y los cambios climáticos que generan las energías convencionales (no renovables).

En México estas preocupaciones han recaído en la necesidad de fomentar el uso y mejor aprovechamiento de energías renovables. CFE promueve el uso de energías renovables y pone a disposición sus instalaciones para poder hacer uso de éstas como medio de transmisión de la energía eléctrica generada. <sup>[1]</sup>

Además de exigir que las instalaciones del productor de energía cumplan con las Normas Oficiales Mexicanas, CFE y la SENER tienen a su disposición el código de red mexicano y especificaciones necesarias para cumplir con los requisitos de interconexión.

El código de red establece como criterio de seguridad y confiabilidad estudios para mantener un margen de potencia reactiva con el objetivo de mantener niveles adecuados de tensión y capacidad de transferencia de la potencia reactiva. Para lo cual hace mención del uso de dispositivos de la potencia reactiva en forma continua o discreta de entre los cuales están los capacitores.

La conexión de bancos de capacitores, ocasionan cambios que afectan directamente la calidad de energía y los componentes del sistema de generación.

Un problema relacionado con la conexión de bancos de capacitores es la presencia de resonancias paralelo de éstos con el sistema de potencia y la consecuente amplificación de las corrientes y voltajes armónicos generando problemas al sistema e incumpliendo con el código de red mexicano.

En el caso particular del parque eólico Ingenio, se cuentan con dos bancos de capacitores, los cuales fueron calculados y aprobados para cumplir con lo establecido en el código de red.



El propósito de esta tesina es el de evitar los problemas que pueden ocasionarse con la conexión de bancos de capacitores en el parque eólico y el flujo de armónicos en éste.

## **OBJETIVO GENERAL**

Proporcionar una solución que logre reducir lo mejor posible los daños que la generación de armónicos le ocasiona a los elementos del parque eólico y evitar problemas como la amplificación de armónicos que provoca la conexión de capacitores en el sistema.

La solución adecuada permitirá al parque eólico cumplir con las normas y especificaciones del código de red para la interconexión al sistema eléctrico, enfocado de forma particular en los armónicos, para los distintos tipos de operación del sistema.

Se pretende hacer uso de los capacitores disponibles en el sistema, logrando con esto reducir los costos que se generen.

## **JUSTIFICACIÓN**

La mejora continua en la calidad de energía es un objetivo principal para los productores de energía, ya que esto conlleva a mejores beneficios económicos.

Reducir los armónicos presentes, incluso cuando no sea necesario para cumplir con lo establecido por el código de red, es una inversión necesaria que a largo plazo termina por remunerar lo invertido y genera mejores resultados de los que a veces se prevén.

Los estudios de análisis armónico son necesarios e imprescindibles en parques eólicos y sistemas fotovoltaicos ya que en ambos se tienen generación de corrientes armónicas e interarmónicas que se amplifican en caso de resonancias paralelo (debido a la conexión de bancos de capacitores), pudiendo evitar la conexión de los parques a la red eléctrica.

## CAPÍTULO I EL PARQUE EOLICO INGENIO

---

El parque eólico Ingenio, ubicado en Santo Domingo Ingenio, Oaxaca, cuenta con 33 aerogeneradores de la marca Acciona con una capacidad de 1.5 MW cada uno, a una tensión de 12 kV.

Se recolecta la energía de los aerogeneradores por medio de 7 alimentadores los cuales llegan a un tablero y salen a un transformador de potencia de 40/53.33 MVA elevando el potencial de 12 kV a 230 kV, esta energía se transmite a la subestación Maniobras Ingenio de la red de CFE, tal como se muestra en la ilustración 1.

Posee dos bancos de capacitores de potencia nominal de 5 y 7 MVAR, los cuales fueron calculados para cumplir con lo requerido en el código de red.

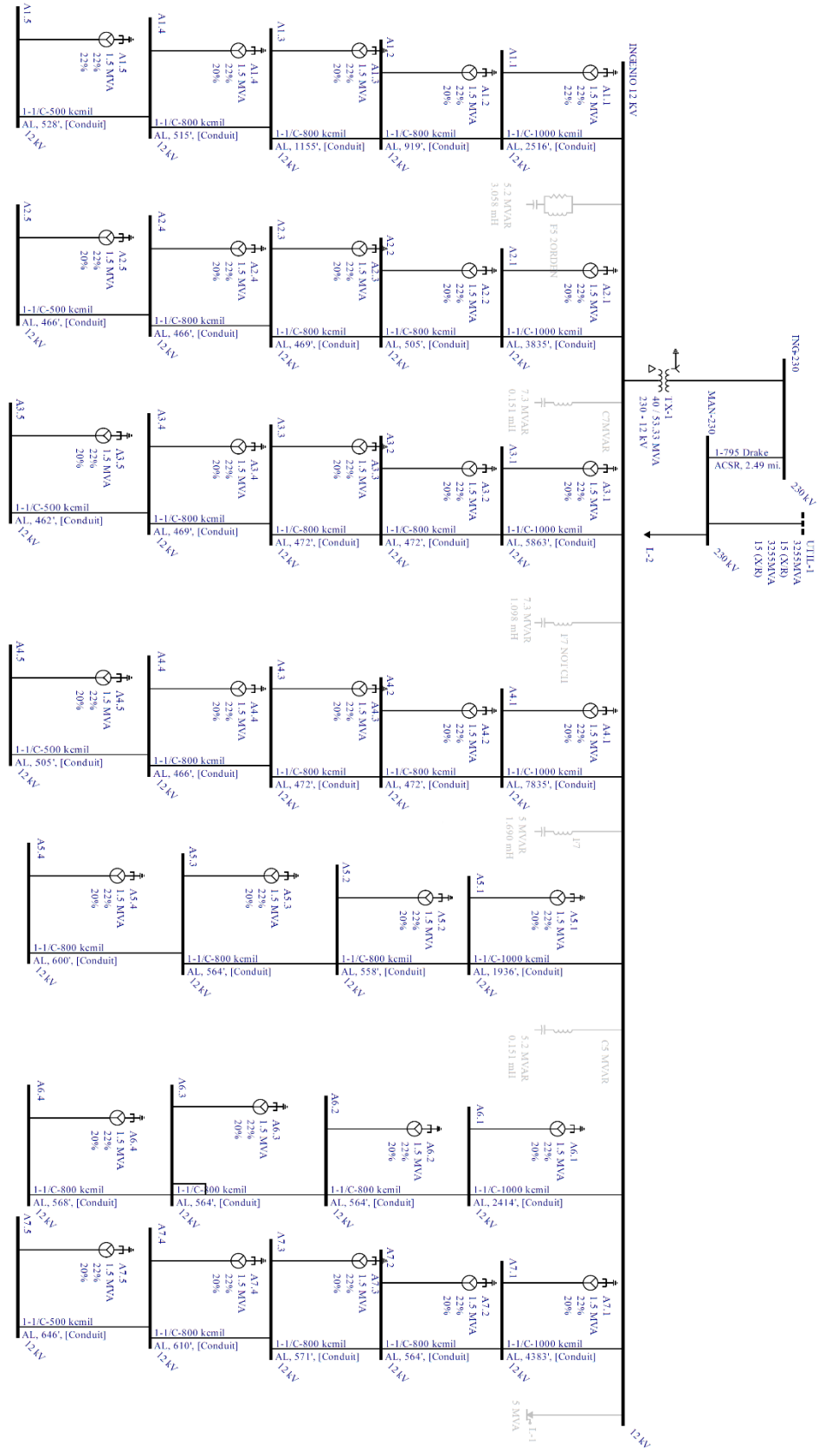



Ilustración 1. Diagrama unifilar del P.E. Ingenio.

Tabla 1. Valores del transformador

Transformador 

<b>MVA</b>	<b>40/53.33</b>
<b>Z%</b>	<b>12</b>
<b>Z0%</b>	<b>12</b>
<b>X/R</b>	<b>47</b>

Tabla 2. Valores de la red de suministro

Red de suministro CFE

<b>3Ø</b>	<b>MVA</b>	<b>3255</b>
	<b>X/R</b>	<b>15</b>
<b>1Ø</b>	<b>MVA</b>	<b>3255</b>
	<b>X/R</b>	<b>15</b>

### 1.1. ARMÓNICOS EL EN PARQUE EÓLICO INGENIO.

La conexión de un banco de capacitores, conlleva a ocasionar problemas si el sistema eléctrico de generación se encuentra bajo la presencia de armónicos.

Se define un armónico como una señal sinusoidal ya sea de tensión o corriente, que posee una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental. <sup>[2]</sup> La Ilustración 2 muestra una señal deformada por un armónico. <sup>[3]</sup>

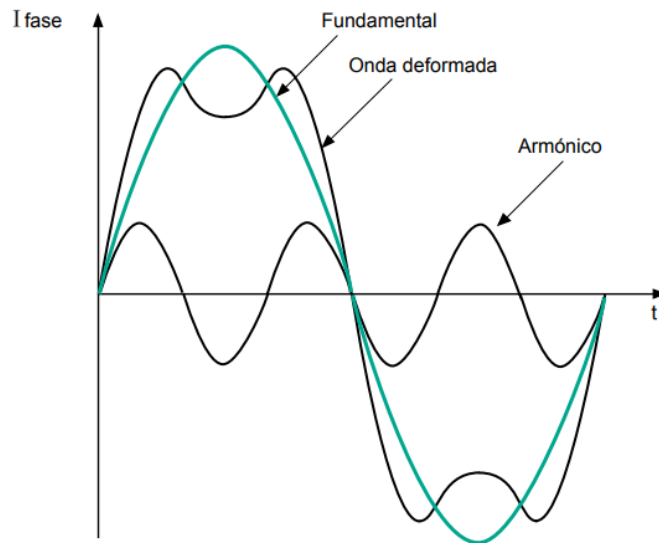


Ilustración 2. Señal deformada a causa de un armónico.

Un armónico se representa generalmente en forma de porcentaje mediante el valor de distorsión armónica individual, en inglés Harmonic Distortion (HD), cuya ecuación es <sup>[4]</sup>:

$$HD_n \% = \frac{I_n}{I_1} \times 100 \quad (Ec. a)$$

$I_n$  es el valor de corriente para el armónico de orden  $n$ .

$I_1$  es valor de la corriente a la frecuencia fundamental.

Esta misma expresión aplica para el caso de armónicos de tensión:

$$HD_n \% = \frac{V_n}{V_1} \times 100 \quad (Ec. b)$$

$V_n$  es el valor de tensión para el armónico de orden  $n$ .

$V_1$  es valor de tensión a la frecuencia fundamental.

El flujo de corrientes armónicas en un sistema afecta la calidad de energía que este produce al deformar la señal de salida, además de provocar otros problemas como:

- Mal funcionamiento de equipos de medición y protección.
- Aumentos de pérdidas de efecto joule.
- Envejecimiento y deterioro prematuro del aislamiento de los materiales conductores.
- Reducción del factor de potencia.

Una forma de medir la cantidad de armónicos y el impacto que generan en el sistema son mediante el cálculo de la distorsión armónica total, en inglés Total Harmonic Distortion (THD).

El THD de corriente se obtiene mediante la siguiente ecuación [4]:

$$THD_I\% = \frac{\sqrt{\sum_2^n I_n^2}}{I_1} \times 100 \quad (Ec. c)$$

$I_n$  es el valor de corriente para el armónico de orden  $n$ .

$I_1$  es valor de la corriente a la frecuencia fundamental.

El valor de THD para tensión se obtiene utilizando la expresión anterior.

Valores de THD altos provocan daños tanto al sistema de generación como a la red de transmisión y finalmente al consumidor.

El valor TDD (distorsión de demanda) se obtiene utilizando el valor de corriente de demanda a la frecuencia fundamental.

## 1.2. DISTORSIONES ARMÓNICAS PERMISIBLES PARA EL PARQUE EÓLICO.

Debido a que los aerogeneradores que posee el parque eólico, por su propia naturaleza generan armónicos, los valores de distorsión armónica deben cumplir con las especificaciones del código de red mexicano para poder realizar la interconexión.

Los parques eólicos, sistemas fotovoltaicos, productores independientes y usuarios, pueden inyectar (en el punto de acoplamiento común o de interconexión) las magnitudes de corrientes armónicas tales que no distorsionen las tensiones arriba de los límites permitidos por el código de red.

En el documento “Reglas Generales de Interconexión al Sistema Eléctrico Nacional para generadores o permisionarios con fuentes de energías renovables o cogeneración eficiente” expedido por la Comisión Reguladora de Energía.

## Anexo 2. Requerimientos técnicos de interconexión al sistema eléctrico nacional.

### Sección 3. Requerimientos para alta tensión (AT)

#### 3.5. Calidad de energía.

##### 3.5.1. Niveles de armónicos.

Se menciona que el nivel de distorsión armónica permitido en el punto de interconexión, es decir, en el bus de 230 kV es **THD=3%**. Mismo valor que se menciona en el código de red para centrales tipo D (con capacidad mayor a 30 MW).

Una solución eficiente ante los armónicos presentes en el parque eólico, debe cumplir con lo establecido en el código de red, es decir, mantener los niveles de THD abajo del 3%.

Para esto se evaluarán las magnitudes de armónicos en corriente, puesto que el código de red no establece dichos límites se tomarán como base las tablas descritas en la especificación *CFE L-000045 Desviaciones Permisibles en las Formas de Onda de Tensión y Corriente en el Suministro y Consumo de Energía Eléctrica, ANEXO A*.

En esta especificación se establece un nivel de THD en tensión de 3% para (AT) y menciona los límites de distorsión en demanda necesarios para cumplir con lo anterior. Cabe aclarar que estos valores solo se tomarán como un guía para discernir entre un resultado y otro para lograr el objetivo deseado.

Los datos se encuentran divididos en tablas por nivel de tensión y valor de impedancia relativa que posee el sistema, entiéndase por valor de impedancia relativa al resultante de la siguiente expresión:

$$\frac{I_{sc}}{I_L} \quad (Ec. d)$$

Donde:

$I_{sc}$  Corriente de corto circuito en el punto de medición.

$I_L$  Corriente máxima de carga.

La ilustración 3 presenta el estudio de flujos de potencia del parque eólico con generación máxima (49 MW), el estudio de corto circuito se muestra en la ilustración 4.

Nota: Por cuestiones de practicidad y con el fin de observar más a detalle los resultados obtenidos, se presentan las simulaciones enfocadas en el bus principal.

El programa utilizado para la simulación del sistema eléctrico del parque eólico es EasyPower V9.8 (realizando los cálculos con sus módulos de flujo de carga, corto circuito y análisis armónico).

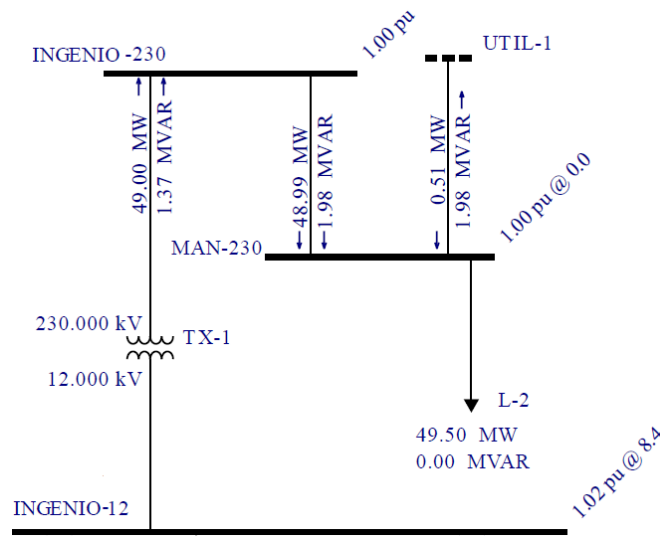


Ilustración 3. Estudio de flujos de potencia con generación máxima.

Con base en los resultados obtenidos se calculó la corriente de carga conforme a la siguiente ecuación:

$$I_L = \frac{MVA \times 10^3}{\sqrt{3} \times V_{LL}} \quad (Ec. e)$$

Donde los MVA indican la potencia total que estarán entregando los aerogeneradores hacia la carga.

$$I_L = \frac{\sqrt{(49 \times 10^3)^2 + (1.37 \times 10^3)^2}}{\sqrt{3} (230)} = 123.05 A$$



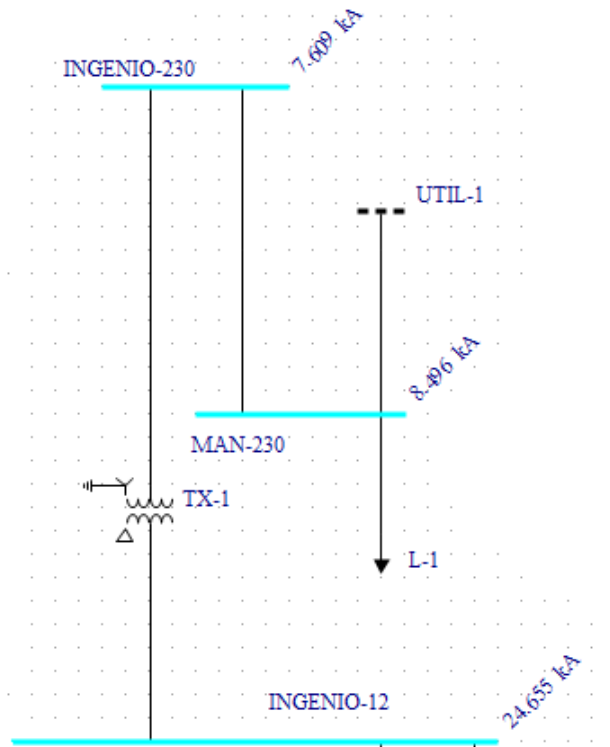


Ilustración 4. Corrientes de corto circuito trifásico.

Con los datos obtenidos la impedancia relativa del sistema, obtenida de la Ec.d resulta en:

$$I_{CC} = 7.609 \text{ kA}$$

$$I_L = 123.05 \text{ A}$$

$$\frac{I_{CC}}{I_L} = 61.83 \geq 50$$

Por lo anterior se utilizarán los siguientes valores de referencia:

**Tabla 6. Límites máximos de distorsión armónica de demanda para alta tensión.**

Impedancia relativa	Distorsión armónica individual de corriente para armónicas impares (%)					Distorsión Total de Demanda (%)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
$(I_{sc} / I_L) \geq 50$	3	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Los armónicos presentes en el parque eólico son los siguientes:

Tabla 3. Distorsión individual de corriente de armónicos presentes en el parque eólico.

Orden (h)	HD (%)	Angulo (°)
3	1	0
5	20	0
7	5	0
8.8	5	0
9	2	0
10	5	0
11	2	0
38.5	0.5	0

El estudio de flujos de análisis armónico del parque eólico, sin conectar los bancos de capacitores se muestra en la ilustración 5.

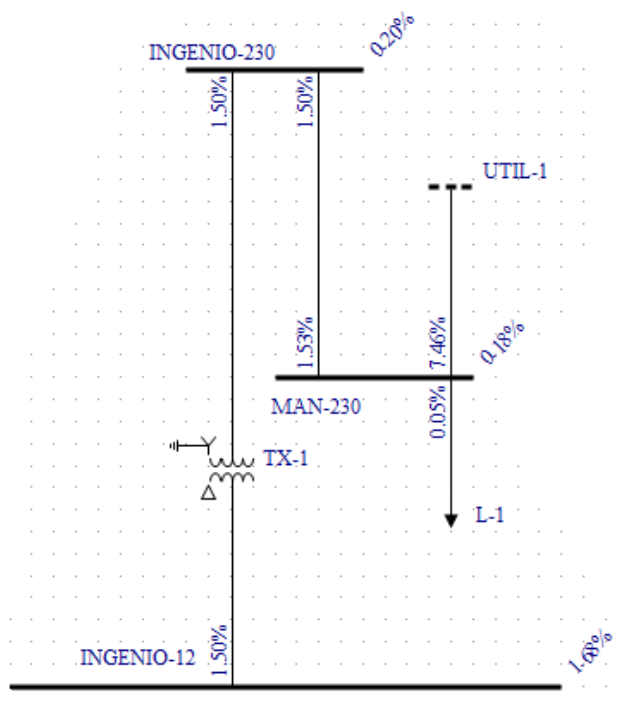


Ilustración 5. Análisis armónico con bancos de capacitores fuera de operación.

Los valores de distorsión armónica para demanda y tensión, son:

$$\text{TDD} = 1.50 \%$$

$$\text{THD}_V = 0.2 \%$$

Los valores de distorsión armónica se encuentran dentro de los límites permitidos, sin embargo, como se mencionó anteriormente, es necesaria la conexión de los bancos de capacitores para la corrección de factor de potencia.

La conexión de un banco de capacitores en paralelo, modifica la impedancia del sistema, provocando que para una frecuencia dada, la impedancia obtenga un valor máximo en un fenómeno conocido como resonancia en paralelo. A esta frecuencia se le llama frecuencia de resonancia.

Si los armónicos que posee el sistema son de frecuencias cercanas o coinciden con el valor de frecuencia de resonancia, provocará la amplificación de los armónicos. Estos aumentos se ven reflejados directamente en los valores de distorsión armónica.

La simulación del sistema con la conexión de ambos bancos de capacitores, arrojó los siguientes resultados.

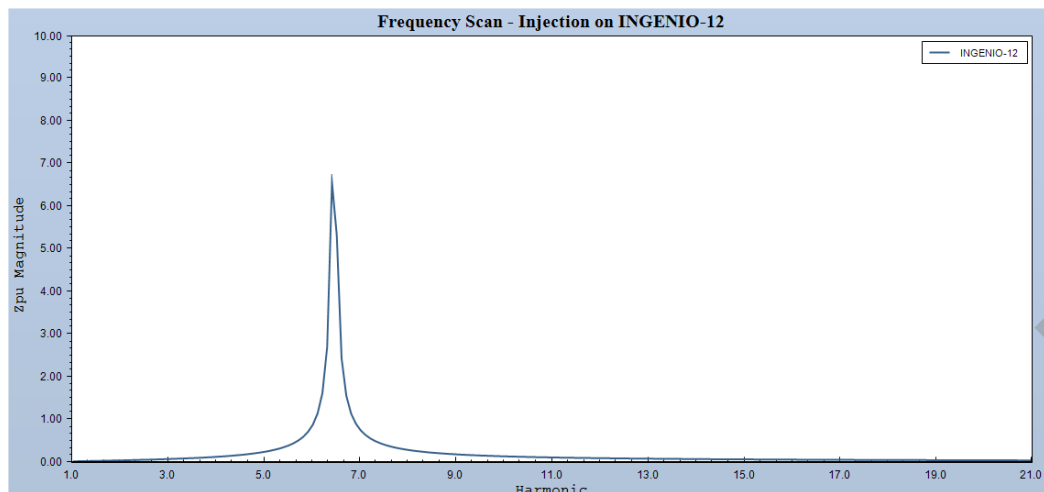


Gráfico 1. Impedancia contra frecuencia en bus principal con ambos bancos de capacitores conectados.

Como se puede apreciar en el gráfico 1, la conexión de los bancos de capacitores provoca una resonancia en paralelo y debido a que los armónicos de orden 5 y 7 son cercanos a esta resonancia provocara una amplificación de éstos.

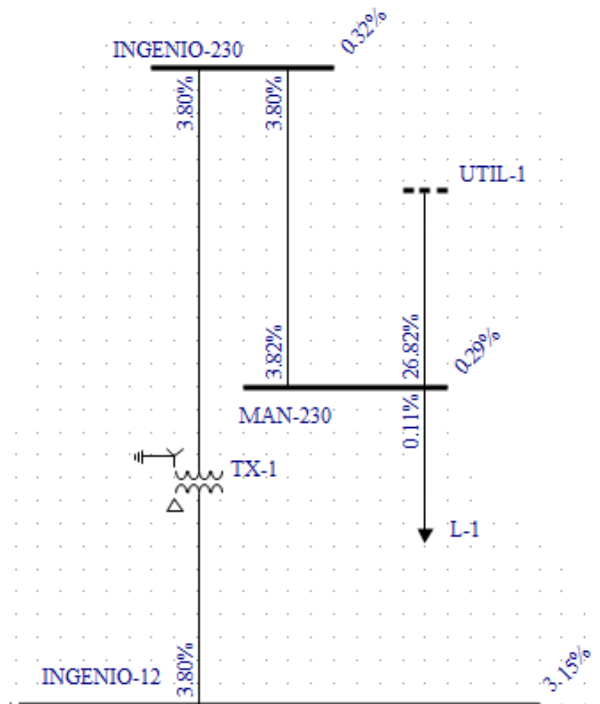


Ilustración 6. Análisis armónico con ambos bancos de capacitores conectados.

Los valores de distorsión obtenidos son:

TDD: 3.8 %

THD<sub>v</sub>: 0.32%

La impedancia de resonancia y los armónicos cercanos a la resonancia en paralelo provocan cambios en los valores iniciales. La ilustración 6 muestra un aumento de aproximadamente el doble del valor de distorsión armónica de demanda y del 50% para la distorsión en tensión.

Como se puede apreciar, aunque el valor de distorsión aumentó con la conexión de ambos bancos, aun entra dentro de lo permitido por el código de red. Para cumplir con el objetivo de este trabajo el cual es proporcionar la mejor solución para la reducción de armónicos se realizarán configuraciones para ambos bancos de capacitores evaluando en todo momento los valores de distorsión armónica.

## CAPÍTULO 2 DISEÑO DE FILTROS ELECTRICOS

---

### 2.1. FILTROS ELÉCTRICOS PASIVOS.

Para reducir los valores de distorsión ocasionados por los armónicos, se realizara el uso de filtros pasivos.

Los filtros pasivos son elementos de inductancias, capacitancias y resistencias, configurados y sintonizados para el control de armónicos. [5]

Se les denomina filtros en derivación (Shunt) a los filtros que se conectan en paralelo con el sistema.

Por las cualidades que poseen, los filtros shunt utilizados en este trabajo serán:

- Filtro de una sintonía.
- Filtro de segundo orden.

#### 2.1.1. FILTRO DE UNA SINTONÍA.

El filtro de una sintonía, también llamado filtro “notch” posee para su frecuencia de diseño, reactancias capacitiva e inductiva iguales, provocando una impedancia mínima para los armónicos que se desean mitigar. De esta forma las corrientes armónicas son desviadas de su recorrido de flujo normal a través del filtro. [5]

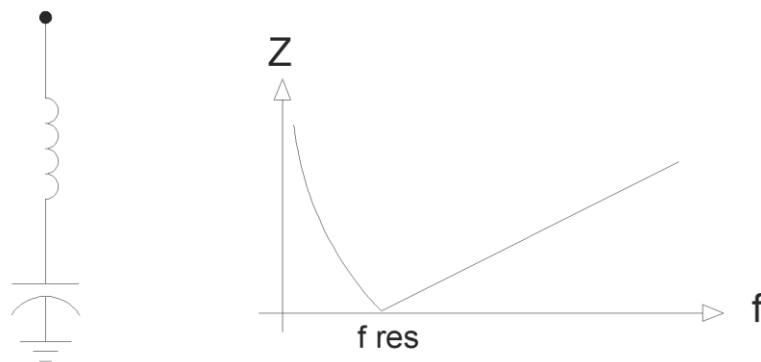


Ilustración 7. Comportamiento de un filtro notch [6].

Un filtro notch tiene como base la siguiente ecuación. [3]

$$h = \sqrt{\frac{X_{c1}}{X_{L1}}} \quad (Ec. f)$$

Debido a que siempre serán conocidos el valor de  $h$  y  $X_c$  sólo es necesaria esta ecuación para obtener el valor del inductor.

Despejando  $X_L$  de la ecuación 6:

$$X_{L1} = \frac{X_{C1}}{h^2} \quad (Ec. g)$$

Y sabiendo que:

$$L = \frac{X_{L1}}{2\pi f} \quad (Ec. h)$$

El valor de las inductancias para los filtros notch se obtiene de la siguiente forma:

$$L = \frac{X_{c1}}{(2\pi f)(h^2)} \quad (Ec. i)$$

### 2.1.2. FILTRO DE SEGUNDO ORDEN.

Al igual que un filtro notch, desvían la corriente armónica para la cual fueron diseñados, la diferencia es que este filtro no presenta una impedancia tan baja como lo es el caso de un filtro notch, la principal ventaja que este filtro posee es el de permanecer con una impedancia baja para las frecuencias mayores a su frecuencia de resonancia como se muestra en la ilustración 8, se les conoce también como filtro paso altas. [3]

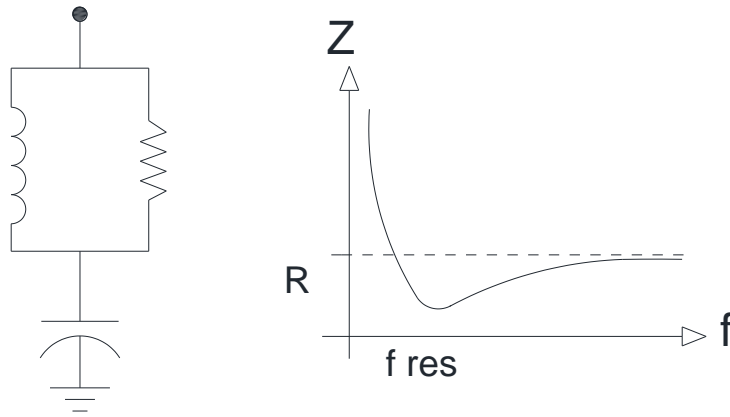


Ilustración 8. Comportamiento de un filtro de segundo orden.

La impedancia mínima a la frecuencia para la cual fue diseñado depende de un valor llamado  $Q$ , para filtros de segundo orden este valor varía entre 2 y 10 generalmente <sup>[5]</sup>, llegando a tomar valores tan grandes como 20. <sup>[3]</sup>

Mientras más bajo sea  $Q$  el filtro presenta una impedancia más baja a la frecuencia de sintonía y una impedancia alta para las frecuencias posteriores, al ir aumentando  $Q$  también lo hará el valor de impedancia en la frecuencia de sintonía.

La ilustración 9 muestra el comportamiento típico del filtro al variar el factor  $Q$ .

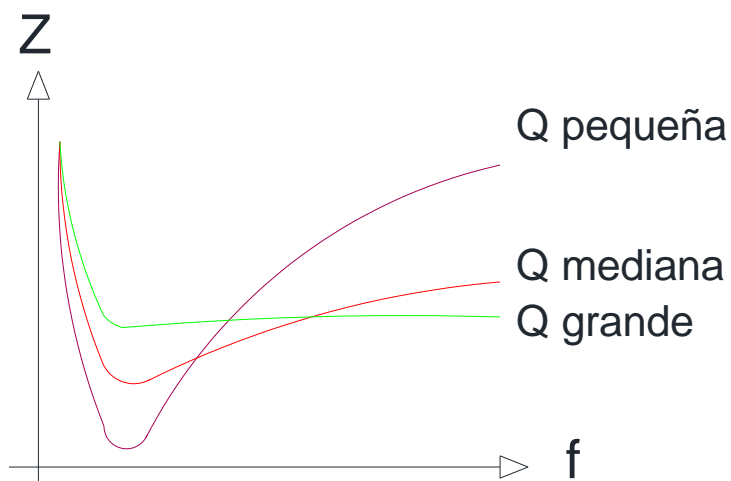


Ilustración 9. Respuesta de un filtro de segundo orden al variar  $Q$ .

Para propósitos de este trabajo se espera que el filtro pueda atenuar lo mayor posible el valor del armónico al cual este sintonizado y se mantenga en un valor de impedancia bajo considerable, tomando en cuenta lo anterior se escogerá un valor  $Q$  de 3.

Los parámetros para este tipo de filtro son  $X_L$ ,  $X_C$ , y  $R$ , de los cuales  $X_C$  será conocido.

El valor de  $X_L$  se obtendrá de la misma forma que para un filtro notch, utilizando la *Ec. g*

El valor de la resistencia  $R$  se obtendrá con el factor  $Q$ , el cual para este filtro se calcula como: <sup>[3]</sup>

$$Q = \frac{R}{X_0} \quad (\text{Ec. j})$$

Donde  $X_0$  es el valor de la reactancia a la frecuencia de resonancia:

$$X_0 = \frac{X_C}{h} = h X_L \quad (\text{Ec. k})$$

Con el valor seleccionado  $Q=3$  y despejando de la *Ec. 11* finalmente el valor de  $R$  se obtendrá como:

$$R = 3h X_L \quad (\text{Ec. l})$$



## 2.2. CÁLCULO DE LOS FILTROS ELÉCTRICOS.

Se decidió utilizar filtros para armónicos 5, 7 y 11, ya que aparte de coincidir con armónicos presentes en el parque eólico, los armónicos presentes son cercanos a estos valores. Buscando obtener mejores resultados para mitigar dichos armónicos.

El valor de la reactancia capacitiva se obtiene de la siguiente ecuación:

$$X_c = \frac{kV_{ll}^2}{MVAR_{cap}} \quad (Ec. 13)$$

Banco de 5 MVAR

$$X_c = \frac{12^2}{5} = 28.8$$

Banco de 7 MVAR

$$X_c = \frac{12^2}{7} = 20.57$$

Un requerimiento para los filtros es no calcularlos exactamente al orden del armónico a mitigar, sino a un orden ligeramente menor, esto se hace con el fin de obtener un margen de seguridad en caso de que cambien los parámetros del sistema, elevando la frecuencia de la muesca. [5]

Por lo anterior, los órdenes de sintonía se calcularon para  $h=4.9$ ,  $h=6.9$  y  $h=10.9$  utilizando las *Ec. g*, *Ec. i* y *Ec. l*.

*Banco de capacitores de 5 MVAR*

Para quinto armónico

$$X_l = \mathbf{1.19 \Omega} \quad L = \frac{28.8}{(2\pi 60)(4.9^2)} = \mathbf{3.182 mH} \quad R = 3(4.9)(1.19) = \mathbf{17.4 \Omega}$$

Para séptimo armónico.

$$X_l = \mathbf{0.603 \Omega} \quad L = \frac{28.8}{(2\pi 60)(6.9^2)} = \mathbf{1.6 mH} \quad R = 3(6.9)(0.603) = \mathbf{12.48 \Omega}$$

Para onceavo armónico.

$$X_l = \mathbf{0.24 \Omega} \quad L = \frac{28.8}{(2\pi 60)(10.9^2)} = \mathbf{0.643 mH} \quad R = 3(10.9)(0.24) = \mathbf{7.84 \Omega}$$

*Banco de capacitores de 7 MVAR*

Para quinto armónico

$$X_l = \mathbf{0.856 \Omega} \quad L = \frac{20.57}{(2\pi 60)(4.9^2)} = \mathbf{2.27 mH} \quad R = 3(4.9)(0.856) = \mathbf{12.58 \Omega}$$

Para séptimo armónico.

$$X_l = \mathbf{0.432 \Omega} \quad L = \frac{20.57}{(2\pi 60)(6.9^2)} = \mathbf{1.146 mH} \quad R = 3(6.9)(0.432) = \mathbf{8.94 \Omega}$$

Para onceavo armónico.

$$X_l = \mathbf{0.173 \Omega} \quad L = \frac{20.57}{(2\pi 60)(10.9^2)} = \mathbf{0.459 mH} \quad R = 3(10.9)(0.24) = \mathbf{5.65 \Omega}$$

### 2.3. MÉTODO DE RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA.

No se pretende reducir en su totalidad todos los armónicos que circulan por el sistema ya que esto implicaría crear filtros sintonizados para cada armónico, una opción no válida tomando en cuenta los costos excesivos que esto requiere.

Así pues, el objetivo esencial es lograr atenuar la distorsión armónica a los valores más bajos posible y utilizando ambos bancos de capacitores para sus posibles diseños como filtros.

La forma en que se planteó llegar a la mejor solución fue mediante la eliminación de opciones, de las posibles y múltiples configuraciones que se pueden realizar; se descartaron aquellas que, en primera instancia, no presentaron resultados dentro de los límites que se han seleccionado (3% para distorsión en tensión y 3.75% para distorsión en demanda).

Un buen diseño de filtro(s) implica que los valores de distorsión armónica se mantendrán dentro de los límites permitidos para las condiciones en las que el sistema del parque eólico puede operar; éstas son:

- *Demanda máxima.* Considerando que todos los aerogeneradores operen a su capacidad nominal.
- *Demanda media.* Considerando algunos aerogeneradores fuera de servicio (mantenimiento o fallas) u operando al 60% de su capacidad nominal.
- *Demanda mínima.* Considerando algunos aerogeneradores fuera de servicio y/o con los aerogeneradores operando al 33% de su capacidad nominal.

Ya que el parque eólico está diseñado para operar en demanda máxima y se espera que la mayor parte del tiempo opere en esta forma, se contempló primordialmente esta situación.

Una vez encontrada la configuración que mejores resultados ofreció, se analizó bajo las condiciones restantes, asegurando que los valores se encontraran dentro de los límites permitidos independientemente de la condición de operación del parque eólico.

## CAPÍTULO 3 OBTENCION DE RESULTADOS

---

### 3.1. SIMULACIONES: ANÁLISIS ARMÓNICO Y GRÁFICOS DE IMPEDANCIA CONTRA FRECUENCIA.

Inicialmente se realizaron las simulaciones con ambos bancos de capacitores conectados y solo uno de estos modificado como filtro.

*Tabla 4. Diseño inicial de filtros, un solo banco de capacitores modificado.*

<b>Tipo de filtro</b>	<b>MVAR</b>	<b>armónico</b>
<b>Notch</b>	5	5
<b>Notch</b>	5	7
<b>Notch</b>	5	11
<b>Notch</b>	7	5
<b>Notch</b>	7	7
<b>Notch</b>	7	11
<b>Segundo orden</b>	5	5
<b>Segundo orden</b>	5	7
<b>Segundo orden</b>	5	11
<b>Segundo orden</b>	7	5
<b>Segundo orden</b>	7	7
<b>Segundo orden</b>	7	11

Se analizaron los casos más relevantes, agregando su gráfico de impedancia contra frecuencia.

Filtro notch de 5 MVAR sintonizado para 5º armónico.

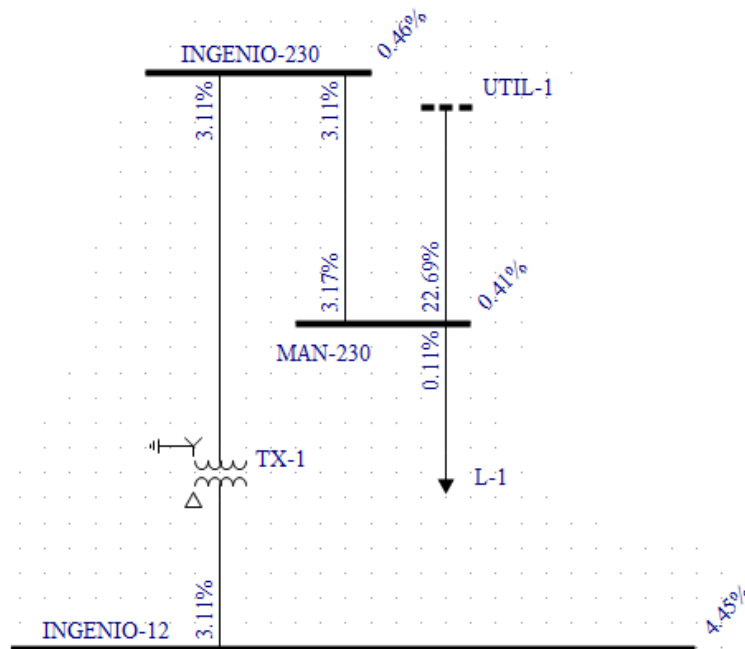


Ilustración 10. Análisis armónico con filtro notch de 5 MVAR,  $h=5$ .

En la ilustración 10 se observa que aun cuando el filtro diseñado fue sintonizado para el armónico con mayor distorsión individual, éste no redujo notablemente el valor de distorsión de demanda y en el caso de la tensión, el valor aumentó. Observando el gráfico 2 se aprecia que la causa de esto es una amplificación del 10º armónico.

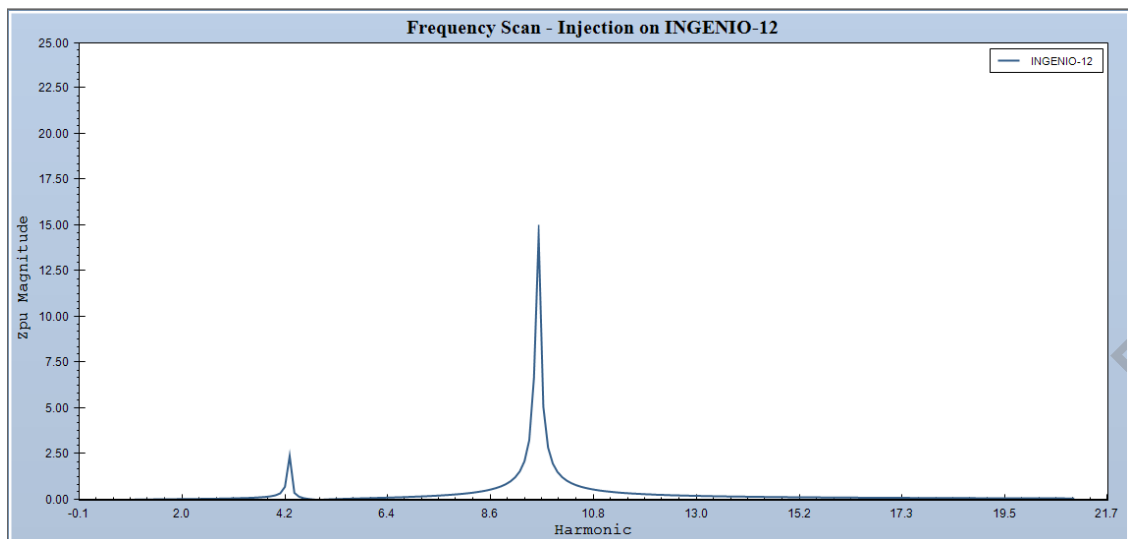


Gráfico 2. Impedancia contra frecuencia en bus principal con filtro notch de 5 MVAR,  $h=5$ .

Filtro Notch de 5 MVAR sintonizado para 7<sup>o</sup> armónico.

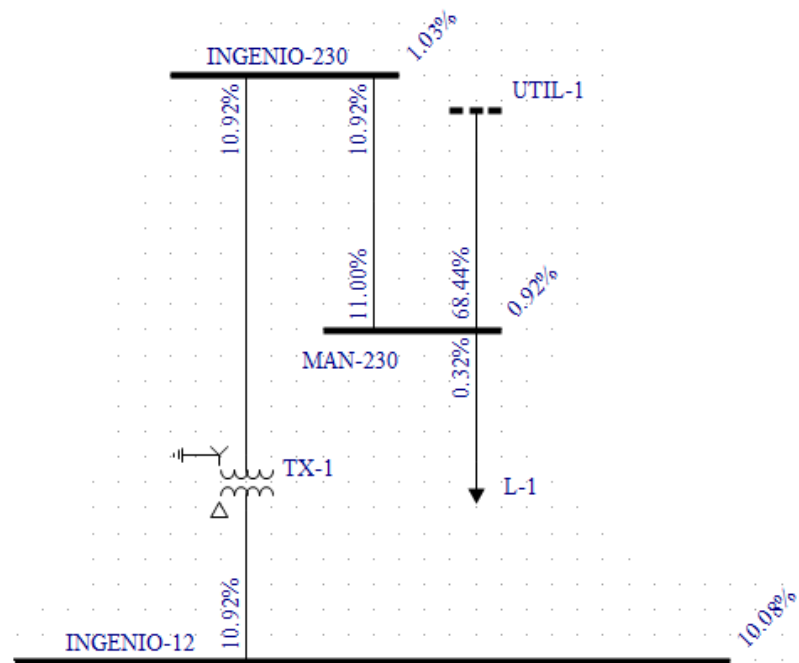


Ilustración 11. Análisis armónico con filtro notch de 5 MVAR,  $h=7$ .

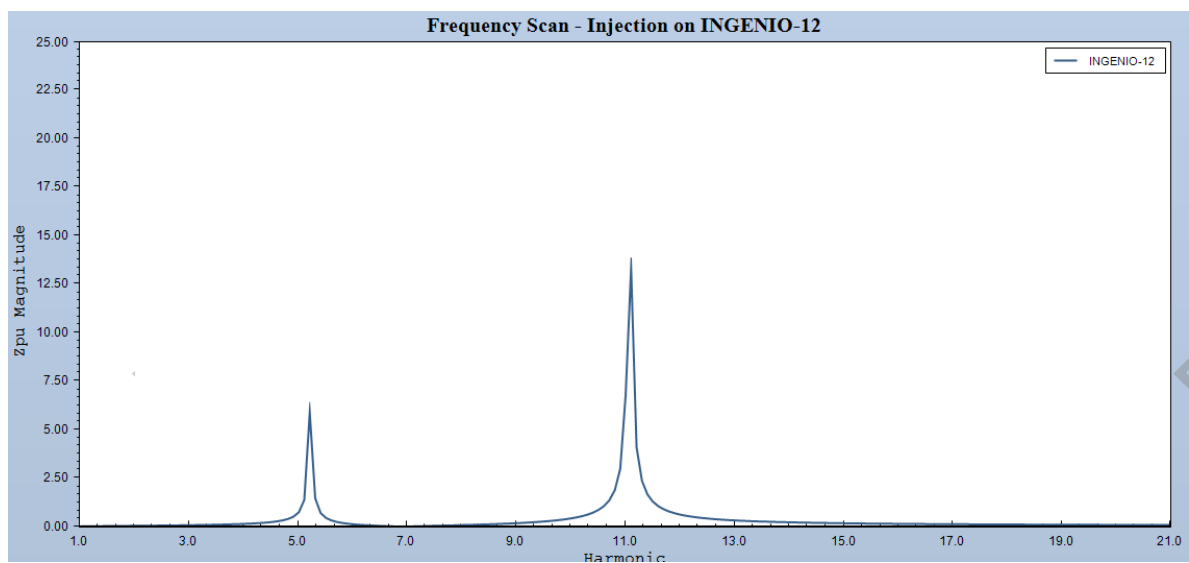


Gráfico 3. Impedancia contra frecuencia en bus principal con filtro notch de 5 MVAR,  $h=7$ .

Los valores mostrados en la ilustración 11 indican distorsiones altas aplicando el criterio para la distorsión de demanda, no se utilizó como una solución válida, el gráfico 3 indica resonancia en la frecuencia de orden 11.1, lo anterior demuestra que aunque el 11<sup>o</sup>

armónico es el de distorsión individual más baja, si el orden de resonancia coincide o está cercano a la onceava armónica, puede repercutir en grandes amplificaciones.

Filtro Notch de 5 MVAR sintonizado para 11<sup>o</sup> armónico, mostrado en la ilustración 12.

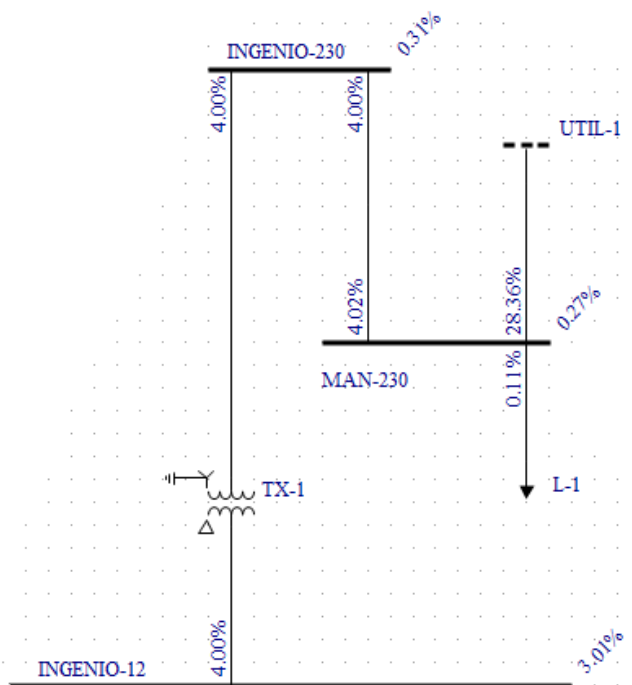


Ilustración 12. Análisis armónico con filtro notch de 5 MVAR,  $h=11$ .

Filtro Notch de 7 MVAR sintonizado para 5º armónico, mostrado en la ilustración 13.

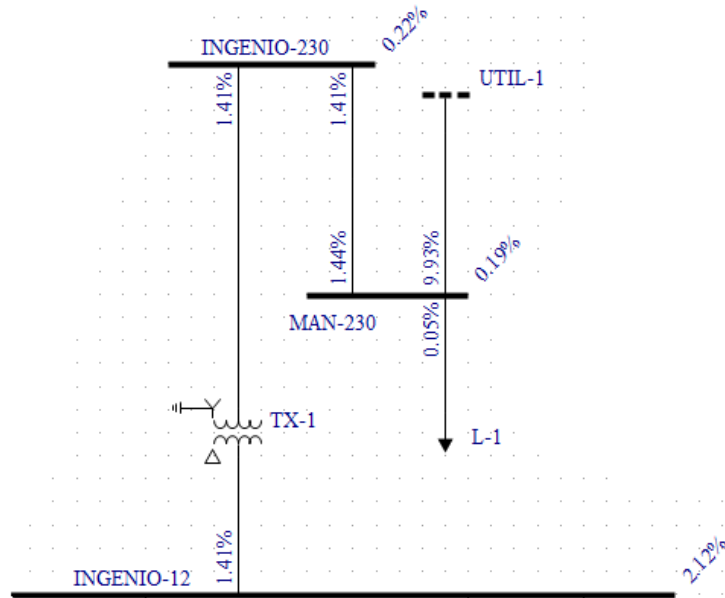


Ilustración 13. Análisis armónico con filtro notch de 7 MVAR,  $h=5$ .

Para este diseño se observa una disminución en los valores de distorsión.

Filtro Notch de 7 MVAR sintonizado para 7º armónico, mostrado en la ilustración 14.

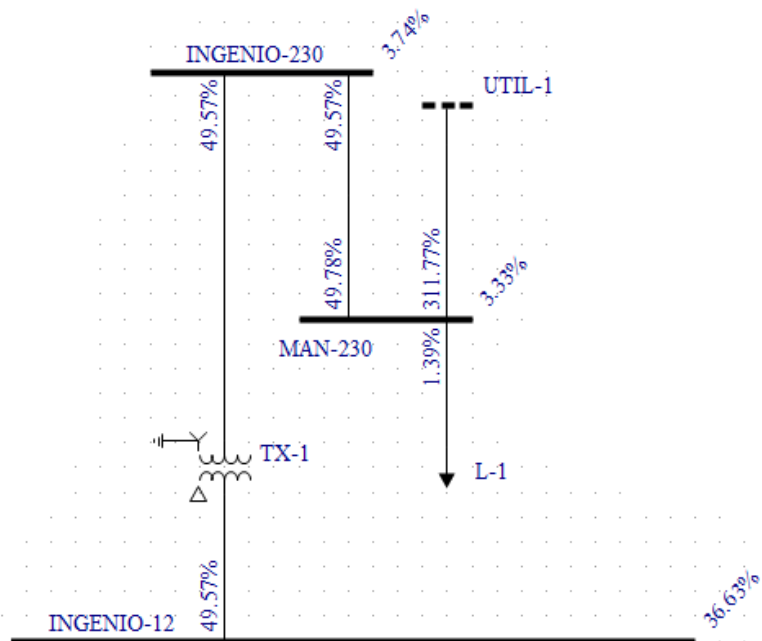


Ilustración 14. Análisis armónico con filtro notch de 7 MVAR,  $h=7$ .



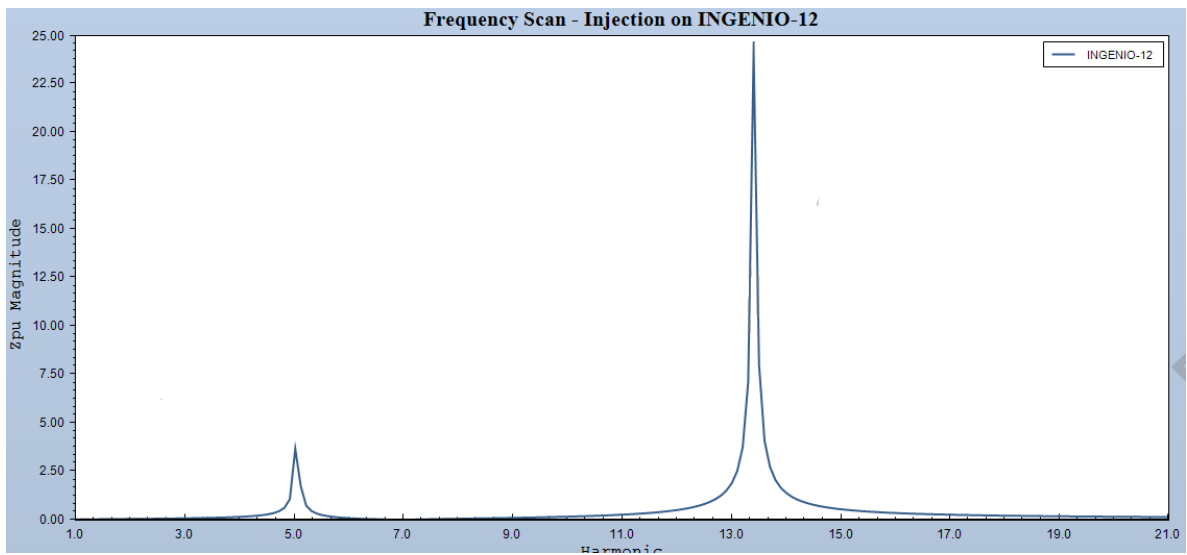


Gráfico 4. Impedancia contra frecuencia en bus principal con filtro notch de 7 MVAR,  $h=7$ .

De todas las simulaciones realizadas, esta configuración presentó los valores más altos de distorsión en tensión y demanda, observando el gráfico 4, se hace evidente que aunque se presenta resonancia en la frecuencia de orden 13.5 y el valor de impedancia en esta es muy alta, no es el causante del gran aumento de amplificación, debido a que no existen armónicos cercanos a esta frecuencia, el aumento de los valores de distorsión es debido a la resonancia en la frecuencia de orden 5, coincidente con el 5º armónico, el valor de la impedancia es notoriamente más bajo que para la resonancia en 13.5, sin embargo la elevación de valores se debe al valor de distorsión individual tan alto que presenta el 5º armónico.

Filtro Notch de 7 MVAR sintonizado para 11<sup>o</sup> armónico, mostrado en la ilustración 15 y filtro de segundo orden de 5 MVAR sintonizado para 5<sup>o</sup> armónico en la ilustración 16.

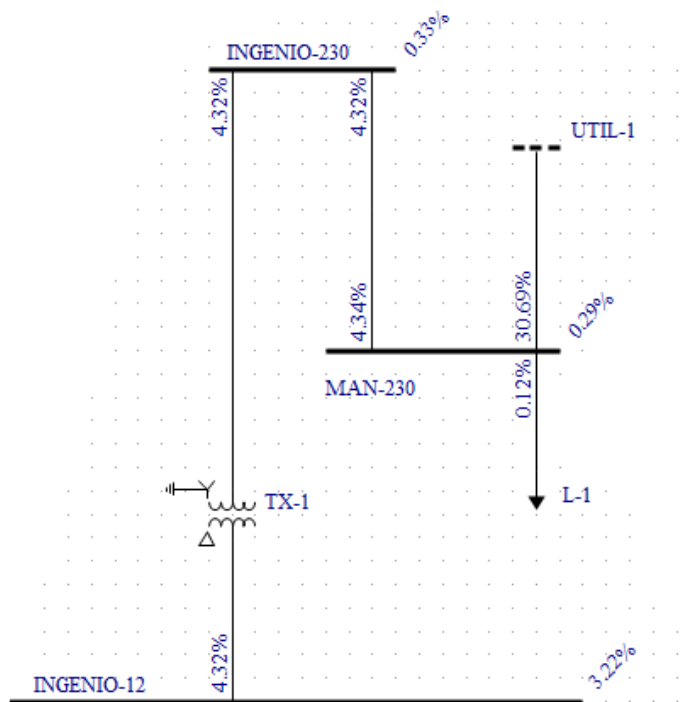


Ilustración 15. Análisis armónico con filtro notch de 7 MVAR,  $h=11$ .

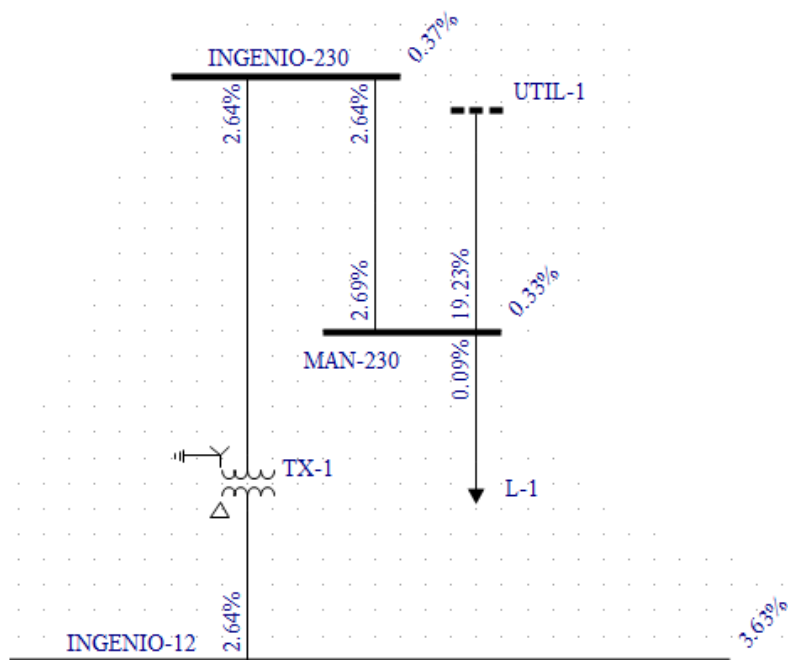


Ilustración 16. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 5 MVAR,  $h=5$ .

Filtro de segundo orden de 5 MVAR sintonizado para 7<sup>o</sup> armónico mostrado en la ilustración 17 y filtro de segundo orden de 5 MVAR sintonizado para 11<sup>o</sup> armónico mostrado en la ilustración 18.

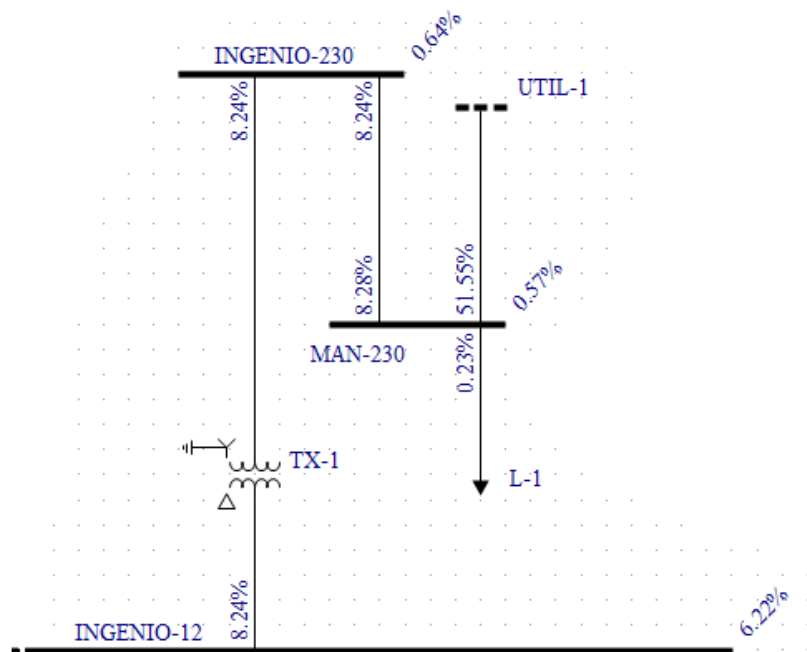


Ilustración 17. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 5 MVAR,  $h=7$ .

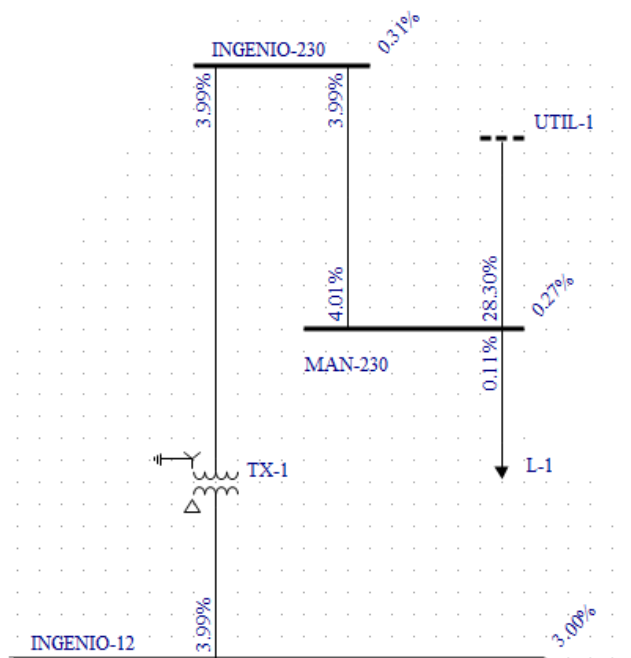


Ilustración 18. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 5 MVAR,  $h=11$ .

Filtro de segundo orden de 7 MVAR sintonizado para 5<sup>o</sup> armónico.

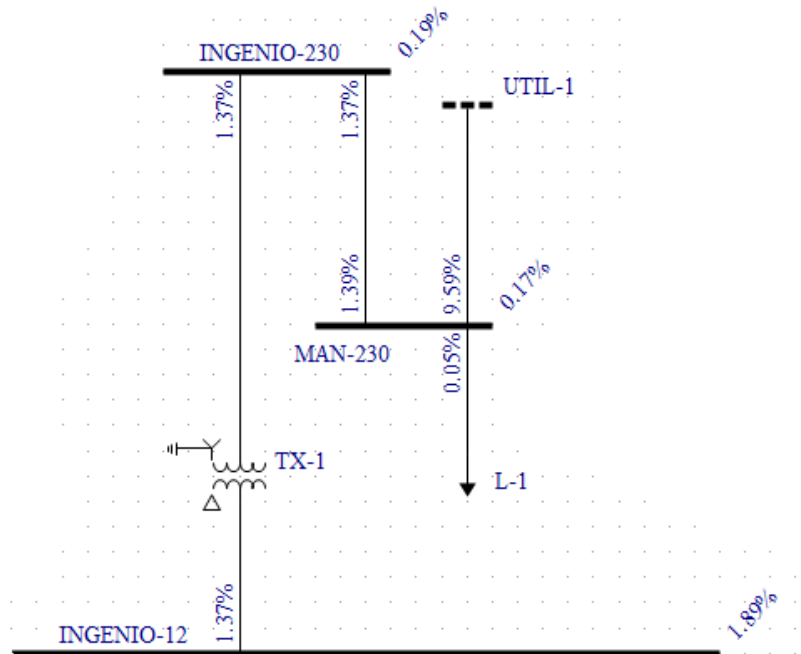


Ilustración 19. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR,  $h=5$ .

De nuevo se observa una disminución notoria comparada con las demás configuraciones, valores dentro de los límites permitidos por CFE.

Filtro de segundo orden de 7 MVAR sintonizado para 7<sup>o</sup> armónico.

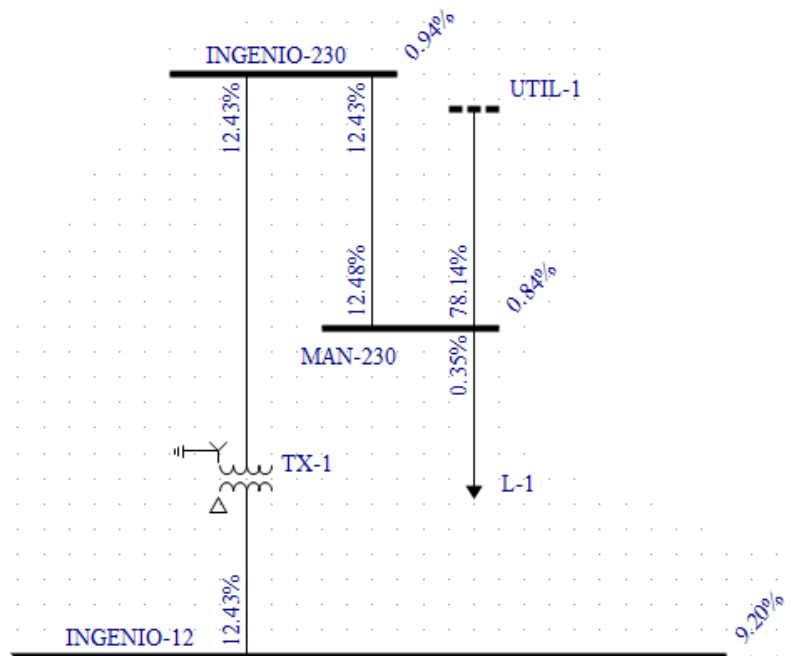


Ilustración 20. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR,  $h=7$ .

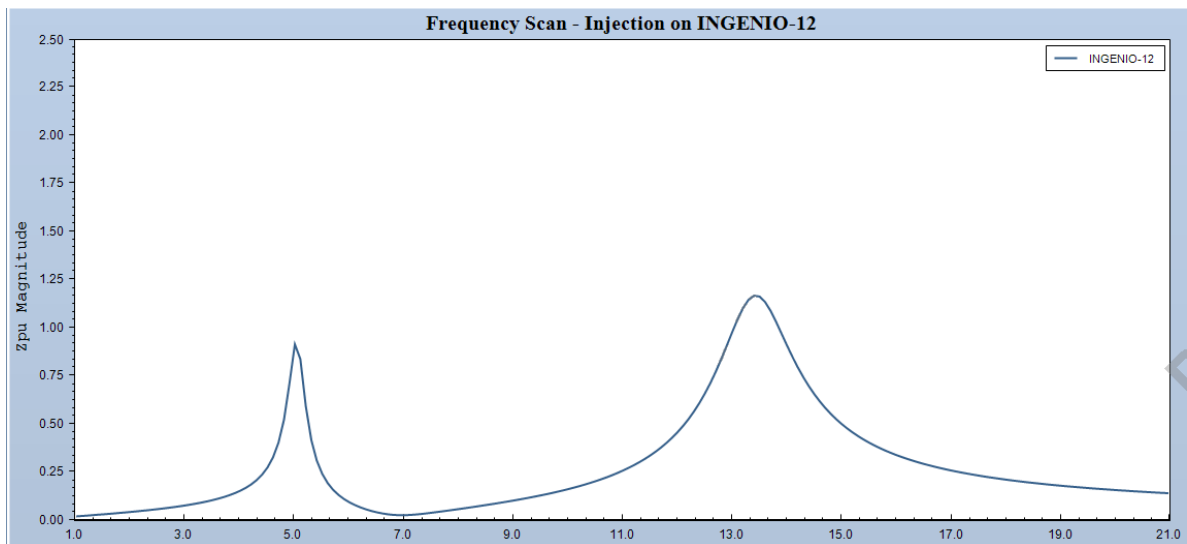


Gráfico 5. Impedancia contra frecuencia en bus principal con filtro de 2do orden de 7 MVAR,  $h=7$ .

Se presenta la configuración en la cual se obtuvieron los valores de distorsión más altos (filtro de 7 MVAR de 7<sup>o</sup> armónico y capacitor de 5 MVAR) con la única diferencia en que el filtro utilizado es de segundo orden, de nuevo se observa una resonancia en la frecuencia de orden 5, sin embargo el valor de la impedancia de resonancia se redujo casi 1/3 debido al filtro de segundo orden, derivado de esto los valores de distorsión también se han reducido en alrededor de 1/3, aunque el valor de distorsión en tensión es válido por el código de red, el criterio utilizado para el valor de distorsión en demanda imposibilita el uso de esta configuración.

Filtro de segundo orden de 7 MVAR sintonizado para 11<sup>o</sup> armónico.

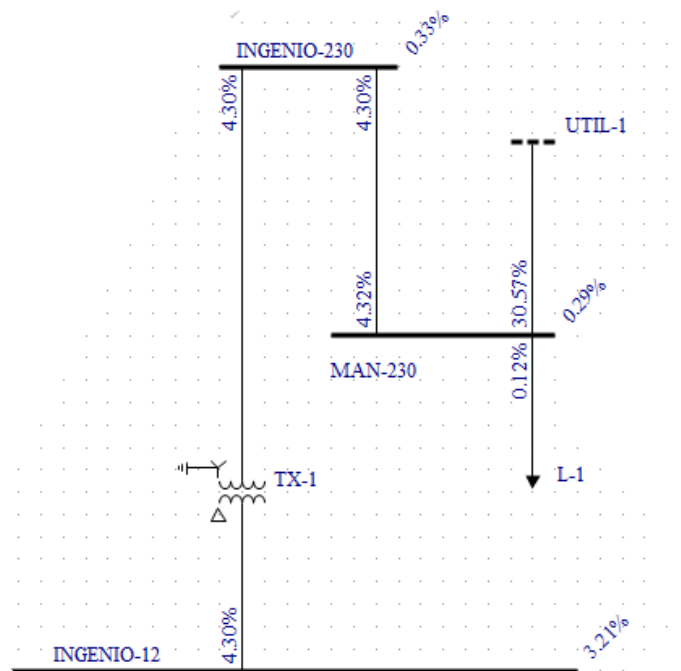


Ilustración 21. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR, h=11.

Los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas se resumen a continuación.

Tabla 5. Valores de distorsión obtenidos para el diseño inicial de filtros.

Filtro	TDD	THD V
Notch ,5 MVAR, h=5	3.11%	0.46%
Notch ,5 MVAR, h=7	10.92%	1.03%
Notch, 5 MVAR , h=11	4%	0.31%
Notch, 7 MVAR, h=5	1.41%	0.22%
Notch, 7 MVAR, h=7	49.57%	3.74%
Notch, 7 MVAR h=11	4.32%	0.33%
2do orden 5 MVAR h=5	2.64%	0.37%
2do orden 5 MVAR h=7	8.24%	0.64%
2do orden 5 MVAR h=11	3.99%	0.31%
2do orden 7 MVAR h=5	1.37%	0.19%
2do orden 7 MVAR h=7	12.43%	0.94%
2do orden 7 MVAR h=11	4.30%	0.33%

Se puede apreciar que los resultados obtenidos a excepción de uno, cumplen en su totalidad con lo requerido por el código de red, sin embargo los valores de distorsión armónica en demanda en la mayoría de los casos es demasiado alta y mayor al valor de distorsión armónica inicial con ambos capacitores conectados sin configurarlos como filtros.

Se descartan aquellas configuraciones en las cuales los valores de distorsión no cumplen con lo especificado por el código de red, con el criterio utilizado en base a la especificación L000045 y además, se descartan también las configuraciones en las cuales los valores no se hayan logrado reducir o lo hayan hecho muy poco.

De esta forma, de las configuraciones iniciales preservan:

- Filtro de Notch de 7 MVAR sintonizado para 5ta armónica.
- Filtro de segundo orden de 7 MVAR sintonizado para 5ta armónica

Se procederá ahora a modificar como filtros ambos bancos de capacitores.

Se harán las configuraciones combinando un filtro de segundo orden y un filtro notch, de esta forma se asegura que se puedan disminuir los armónicos en gran medida con el filtro notch, y el filtro de segundo orden mantenga la impedancia del sistema en valores bajos, evitando posibles amplificaciones.

Las configuraciones son:

- Filtro de segundo orden, 5 MVAR,  $h=5$  y filtro notch, 7 MVAR,  $h=7$
- Filtro de segundo orden, 5 MVAR,  $h=11$  y filtro notch, 7 MVAR,  $h=7$
- Filtro de segundo orden, 5 MVAR,  $h=5$  y filtro notch, 7 MVAR,  $h=11$
- Filtro de segundo orden, 5 MVAR,  $h=7$  y filtro notch, 7 MVAR,  $h=5$
- Filtro de segundo orden, 5 MVAR,  $h=11$  y filtro notch, 7 MVAR,  $h=5$
- Filtro de segundo orden, 5 MVAR,  $h=7$  y filtro notch, 7 MVAR,  $h=11$

- Filtro de segundo orden, 7 MVAR,  $h=5$  y filtro notch, 5 MVAR,  $h=7$
- Filtro de segundo orden, 7 MVAR,  $h=11$  y filtro notch, 5 MVAR,  $h=7$
- Filtro de segundo orden, 7 MVAR,  $h=5$  y filtro notch, 5 MVAR,  $h=11$
- Filtro de segundo orden, 7 MVAR,  $h=7$  y filtro notch, 5 MVAR,  $h=5$
- Filtro de segundo orden, 7 MVAR,  $h=11$  y filtro notch, 5 MVAR,  $h=5$
- Filtro de segundo orden, 7 MVAR,  $h=7$  y filtro notch, 5 MVAR,  $h=11$

Filtro de segundo orden de 5 MVAR sintonizado para 5<sup>o</sup> armónico y filtro notch de 7 MVAR sintonizado para 7<sup>o</sup> armónico.

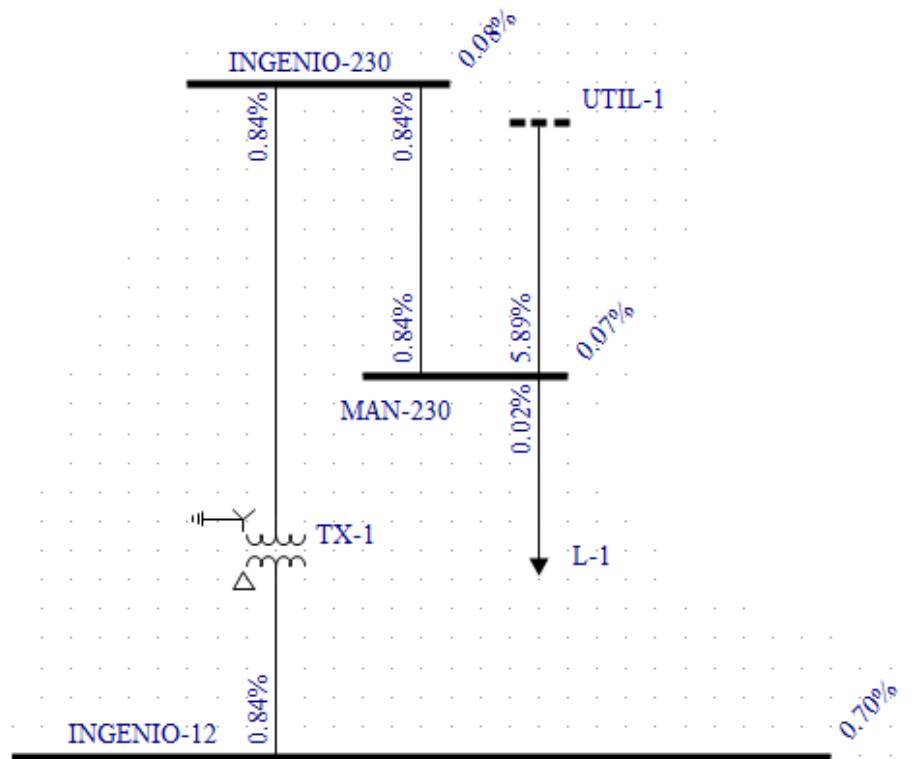


Ilustración 22. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 5 MVAR,  $h=5$  y filtro notch de 7 MVAR,  $h=7$ .



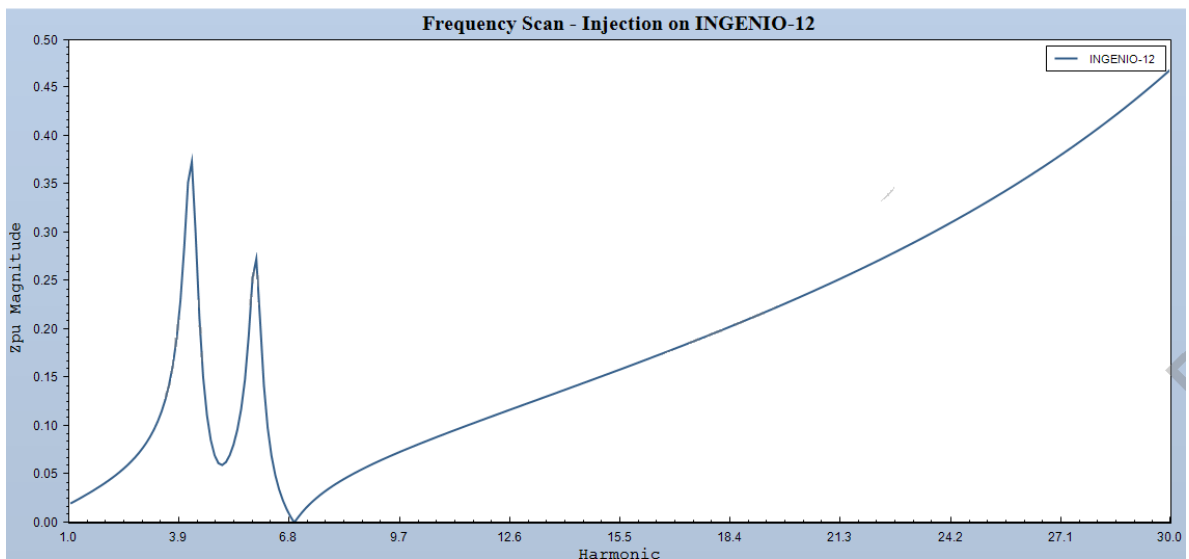


Gráfico 6. Impedancia contra frecuencia en bus principal con filtro de 2do orden de 5 MVAR,  $h=5$  y filtro notch de 7 MVAR,  $h=7$ .

La simulación con un filtro notch y uno de segundo orden se muestra en la ilustración 22, se presenta una gran disminución en los valores de distorsión comparada con los resultados anteriores, el gráfico 6 comprueba que la combinación de filtros provoca que los valores de impedancia en las resonancias disminuyan notoriamente.

Filtro de segundo orden de 5 MVAR sintonizado para 11<sup>o</sup> armónico y filtro notch de 7 MVAR sintonizado para 7<sup>o</sup> armónico.

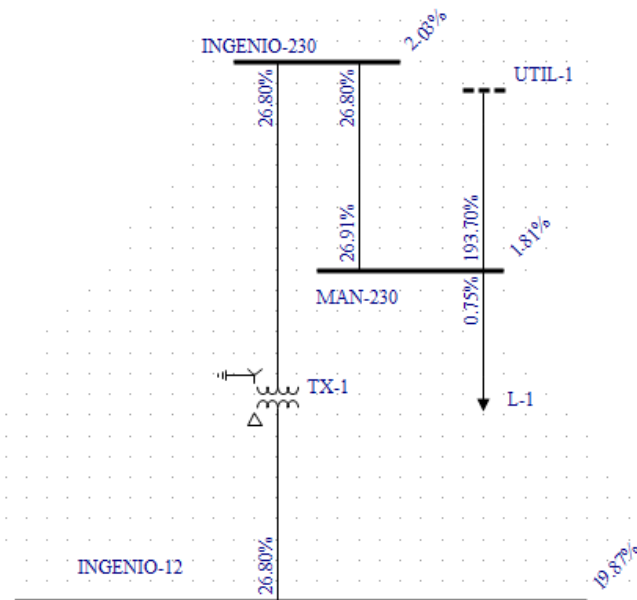


Ilustración 23. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 5 MVAR,  $h=11$  y filtro notch de 7 MVAR,  $h=7$ .

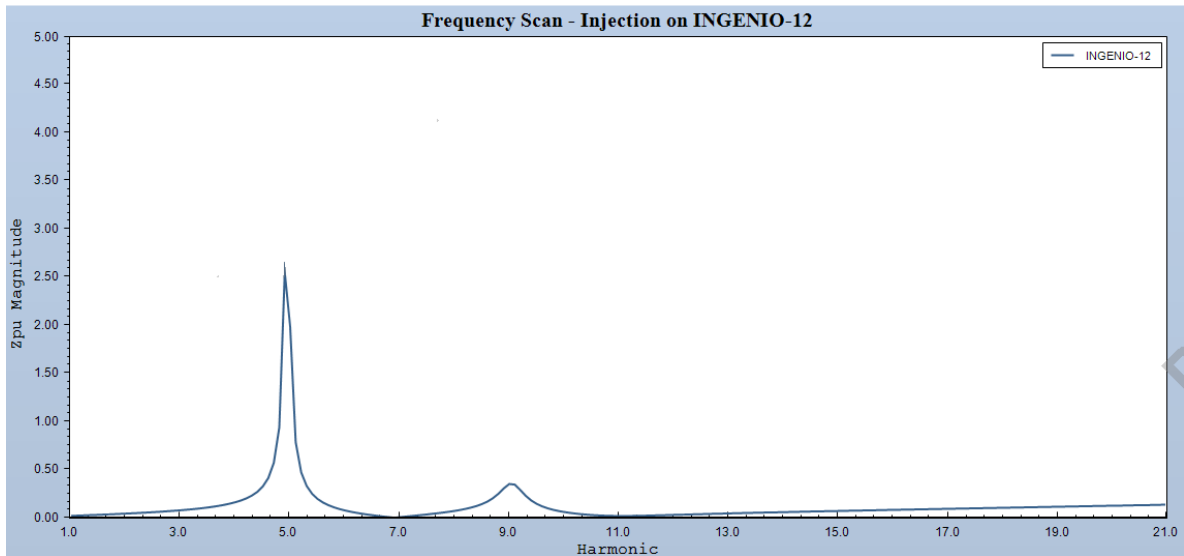


Gráfico 7. Impedancia contra frecuencia en bus principal con filtro de 2do orden de 5 MVAR,  $h=11$  y filtro notch de 7 MVAR,  $h=7$ .

De nuevo se observa en la ilustración 23 un valor de distorsión alto en demanda y no valido de acuerdo al criterio utilizado, esto debido al filtro para 7<sup>o</sup> armónico que provoca la resonancia en la frecuencia de orden 5 como se observa en el gráfico 7, como la impedancia en la resonancia no es muy alta, no se alcanzan valores de distorsión tan grandes como en los casos anteriores.

Filtro de segundo orden de 5 MVAR sintonizado para 5<sup>o</sup> armónico y filtro notch de 7 MVAR sintonizado para 11<sup>o</sup> armónico, mostrado en la ilustración 24.

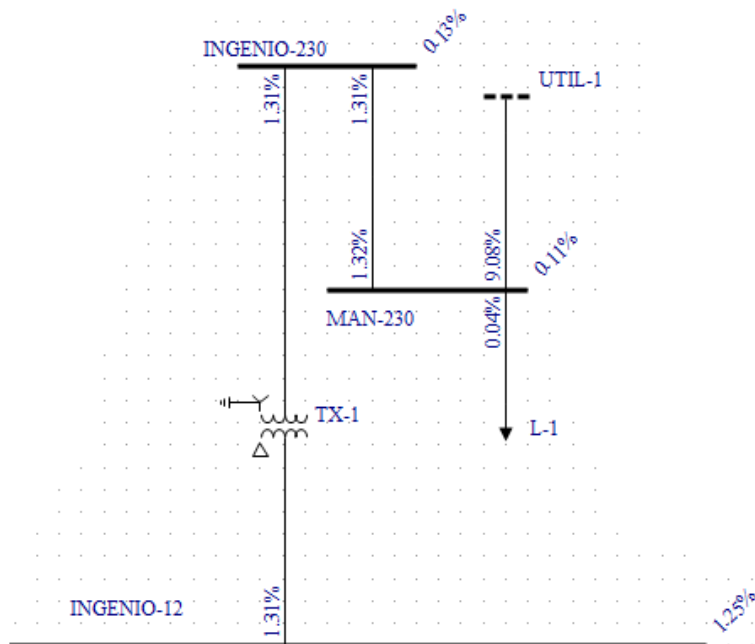


Ilustración 24. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 5 MVAR,  $h=5$  y filtro notch de 7 MVAR,  $h=11$ .

Filtro de segundo orden de 5 MVAR sintonizado para 7<sup>o</sup> armónico y filtro notch de 7 MVAR sintonizado para 5<sup>o</sup> armónico, mostrado en la ilustración 25.

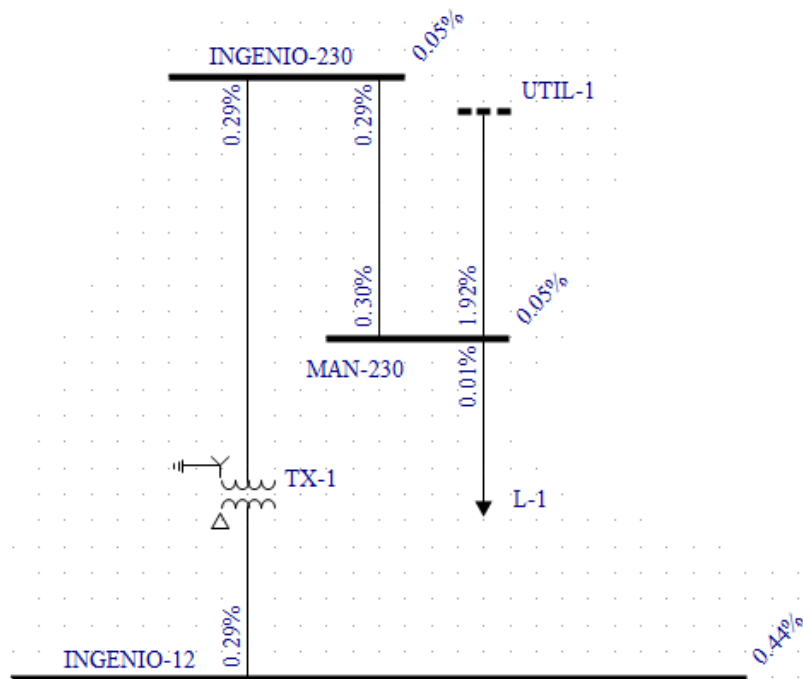


Ilustración 25. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 5 MVAR,  $h=7$  y filtro notch de 7 MVAR,  $h=5$ .

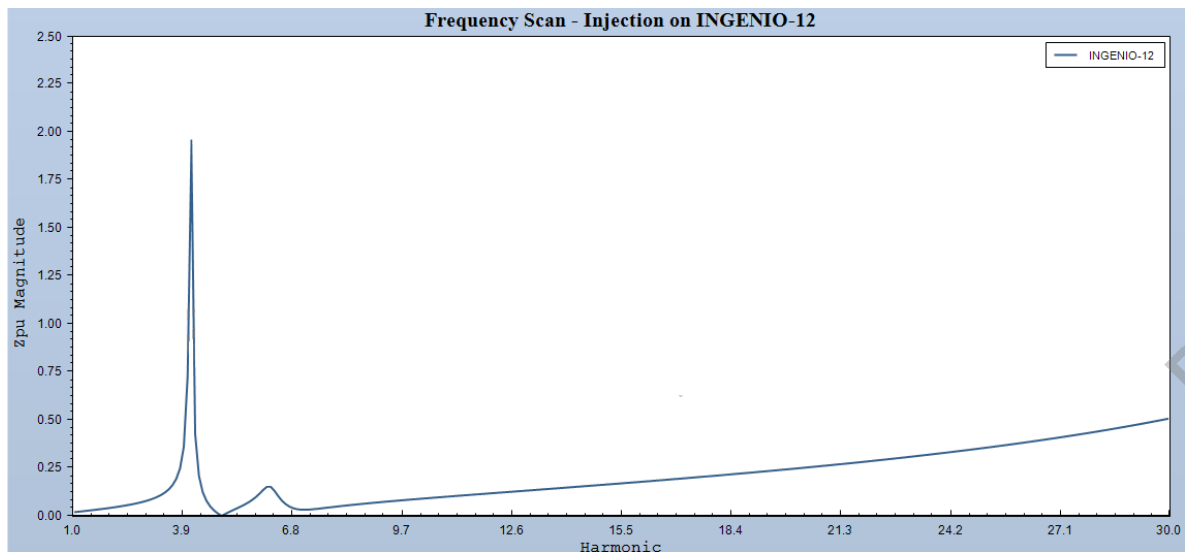


Gráfico 8. Impedancia contra frecuencia en bus principal con filtro de 2do orden de 5 MVAR,  $h=7$  y filtro notch de 7 MVAR,  $h=5$ .

Valores de distorsión dentro de los límites especificados por el criterio utilizado y el código de red, se presentan unos de los valores más bajos en distorsión.

El gráfico 8 muestra que los valores de impedancia en las resonancias alcanzan valores bajos comparados con resultados anteriores.

Se observa también, que a no ser que se tenga un filtro para atenuar la resonancia provocada por el filtro diseñado para 7<sup>o</sup> armónico los valores de distorsión crecerán en gran medida.

Filtro de segundo orden de 5 MVAR sintonizado para 11<sup>o</sup> armónico y filtro notch de 7 MVAR sintonizado para 5<sup>o</sup> armónico, mostrado en la ilustración 26.

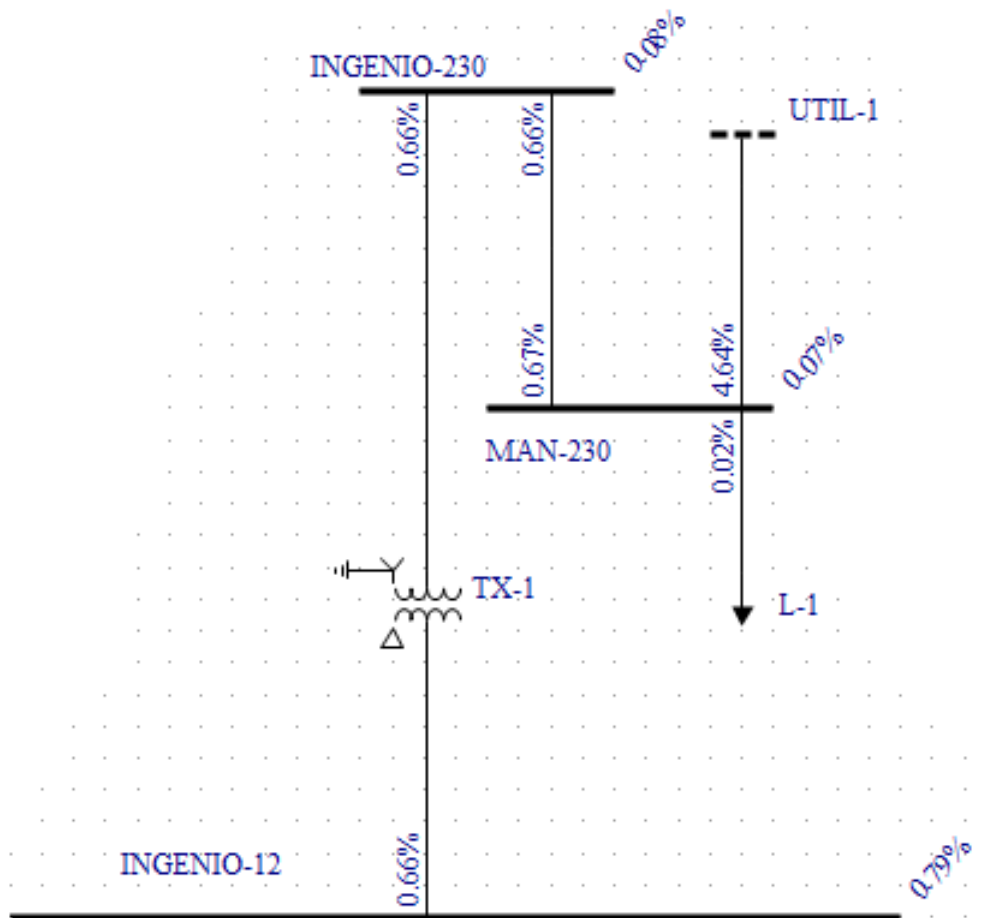


Ilustración 26. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 5 MVAR,  $h=11$  y filtro notch de 7 MVAR,  $h=5$ .

Filtro de segundo orden de 5 MVAR sintonizado para 7<sup>o</sup> armónico y filtro notch de 7 MVAR sintonizado para 11<sup>o</sup> armónico, mostrado en la ilustración 27.

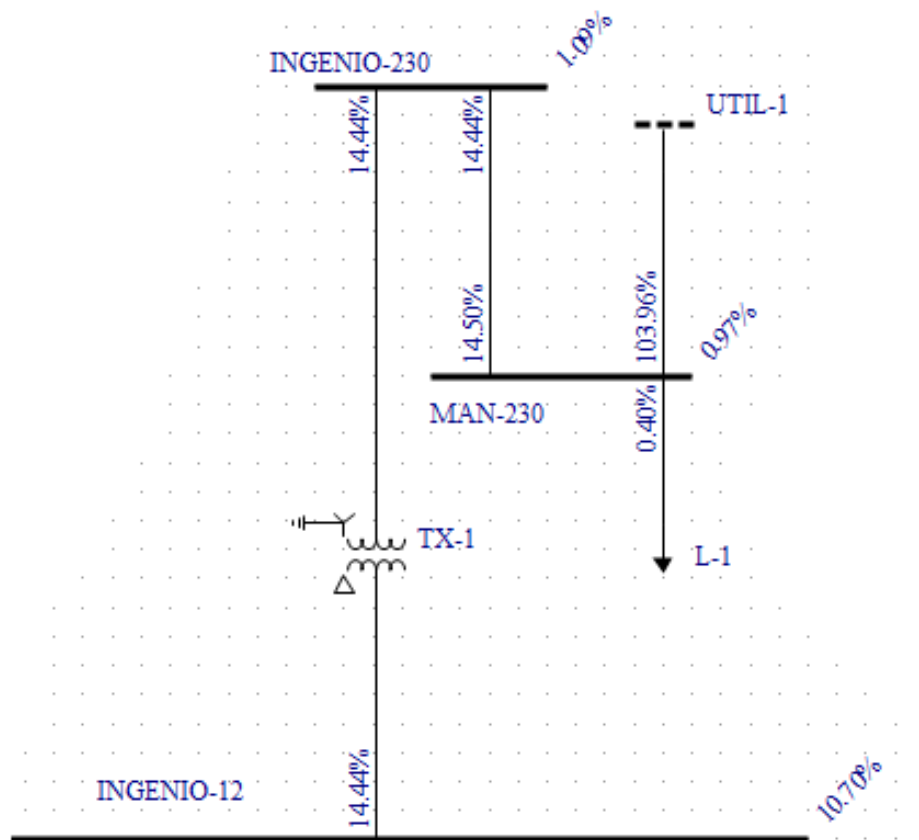


Ilustración 27. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 5 MVAR,  $h=7$  y filtro notch de 7 MVAR,  $h=11$ .

Se presenta un valor fuera del límite establecido por el criterio utilizado para la distorsión de demanda, el filtro para el 7<sup>o</sup> armónico, provoca el aumento del 5<sup>o</sup> armónico.

Filtro de segundo orden de 7 MVAR sintonizado para 5<sup>o</sup> armónico y filtro notch de 5 MVAR sintonizado para 7<sup>o</sup> armónico, mostrado en la ilustración 28.

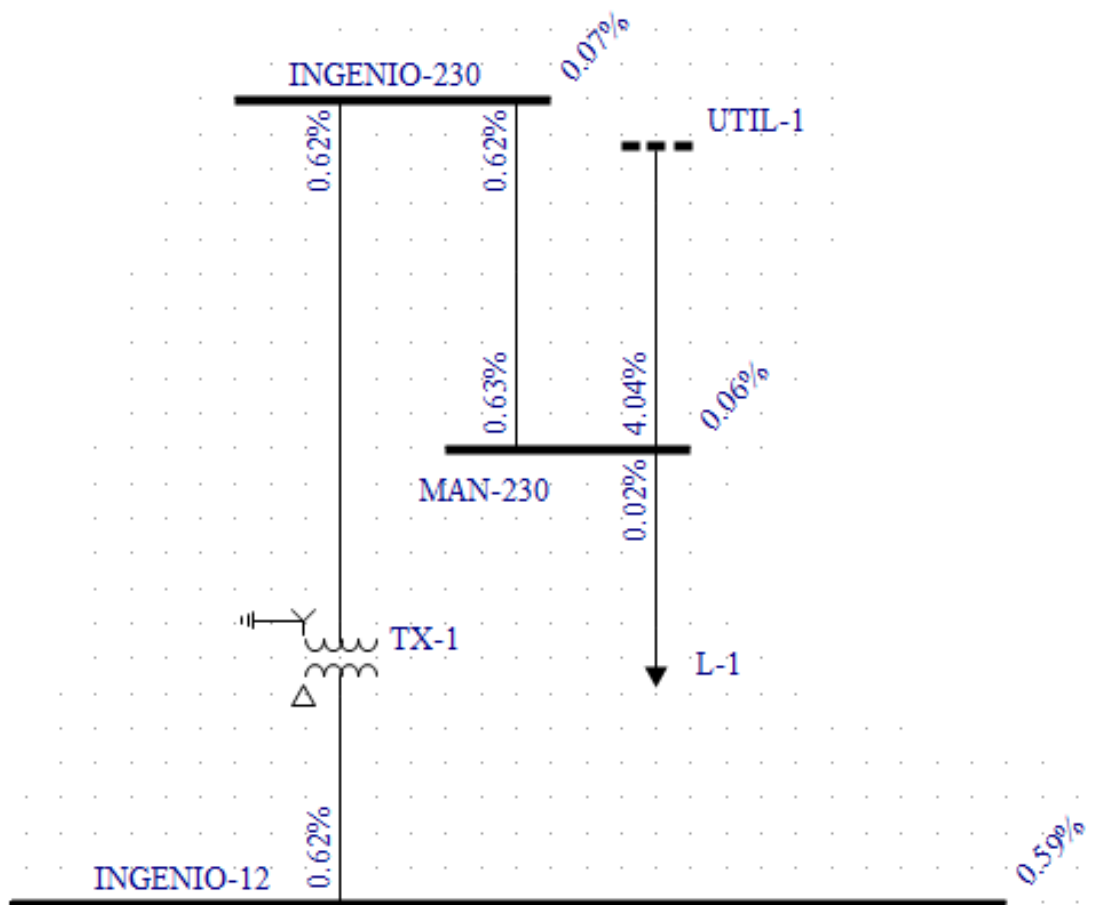


Ilustración 28. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR,  $h=5$  y filtro notch de 5 MVAR,  $h=7$ .

Filtro de segundo orden de 7 MVAR sintonizado para 11<sup>o</sup> armónico y filtro notch de 5 MVAR sintonizado para 7<sup>o</sup> armónico, mostrado en la ilustración 29.

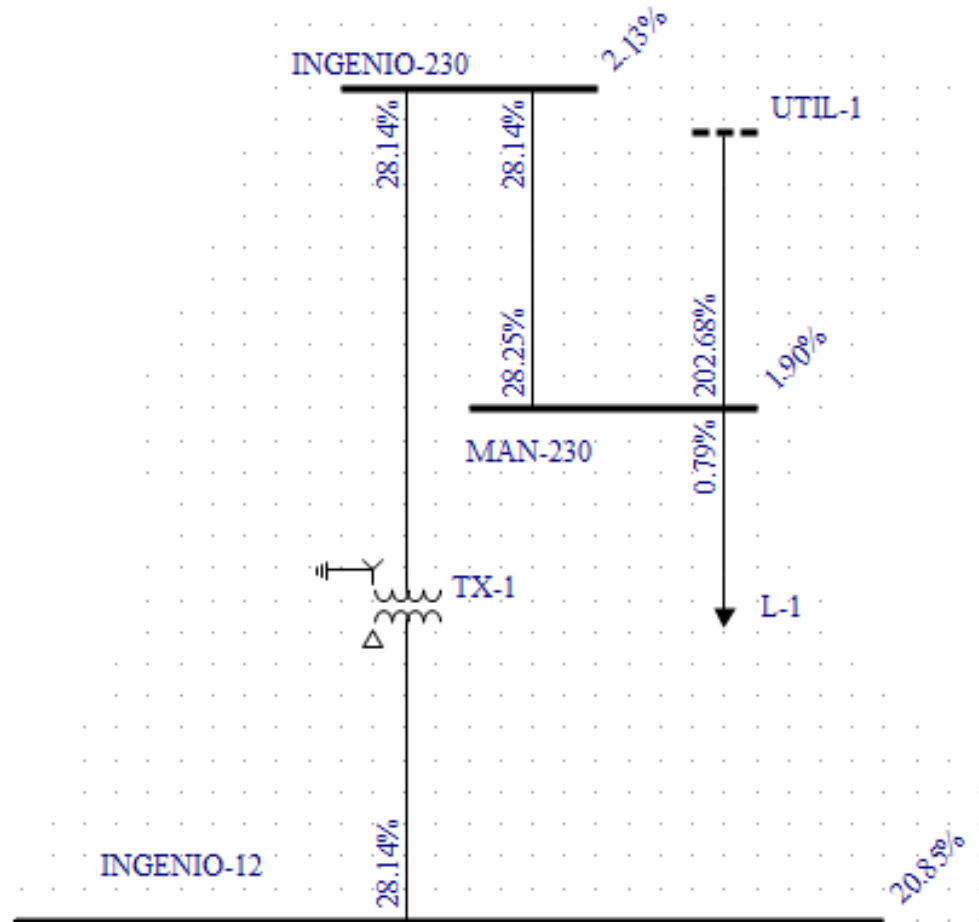


Ilustración 29. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR,  $h=11$  y filtro notch de 5 MVAR,  $h=7$ .

De nueva forma el filtro de 7<sup>o</sup> armónico provoca resonancia en la frecuencia de orden 5, al no ser atenuada, recae en la amplificación del 5<sup>o</sup> armónico provocando un valor alto para la distorsión de demanda.



Filtro de segundo orden de 7 MVAR sintonizado para 5<sup>o</sup> armónico y filtro notch de 5 MVAR sintonizado para 11<sup>o</sup> armónico, mostrado en la ilustración 30.

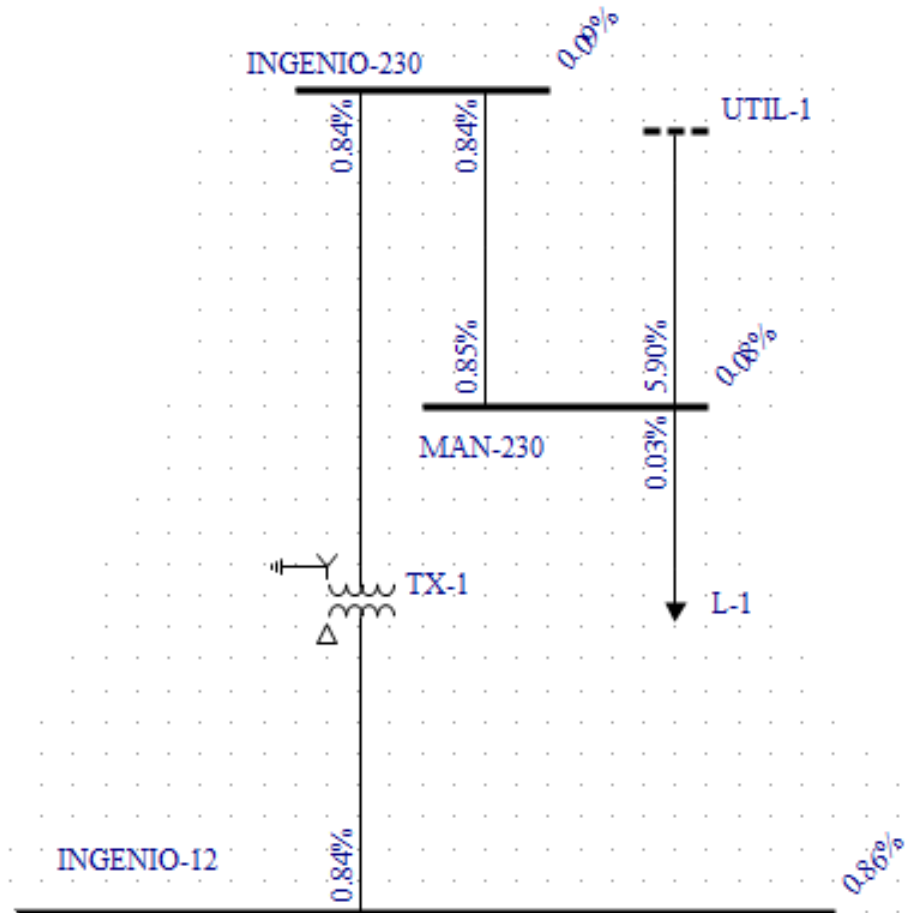


Ilustración 30. Análisis armónico con filtro de 2do orden, 7 MVAR,  $h=5$  y filtro notch de 5 MVAR,  $h=11$ .

Filtro de segundo orden de 7 MVAR sintonizado para 7<sup>o</sup> armónico y filtro notch de 5 MVAR sintonizado para 5<sup>o</sup> armónico, mostrado en la ilustración 31.

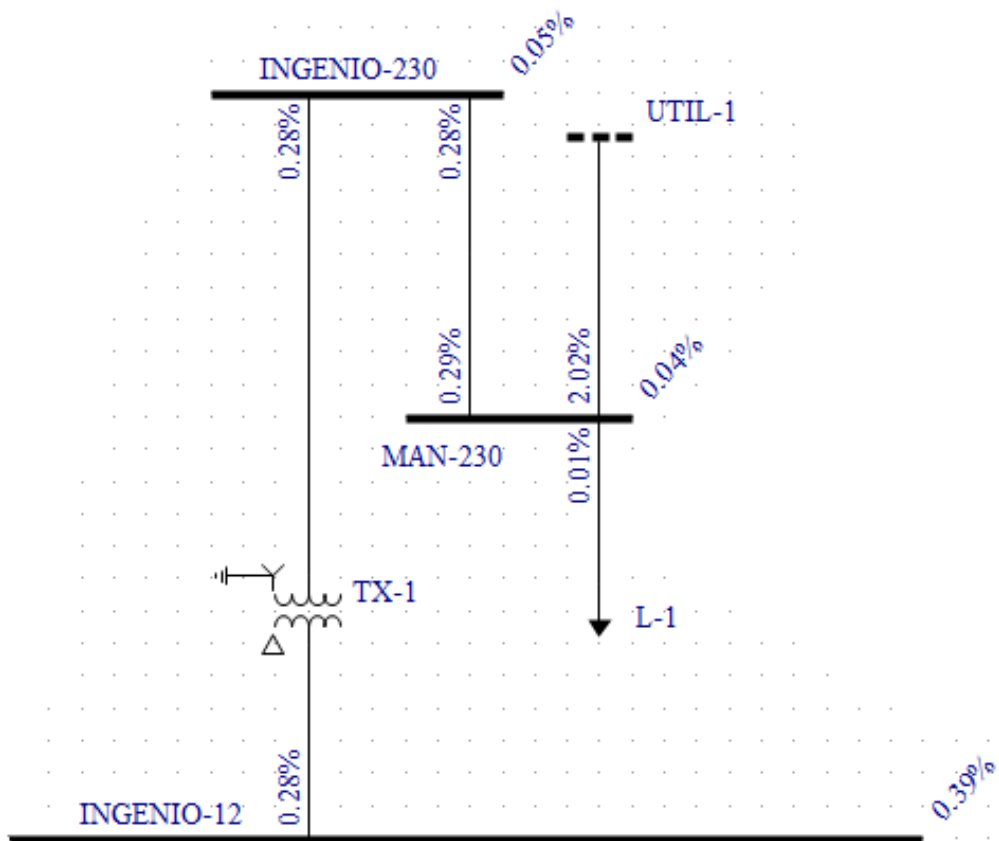


Ilustración 31. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR,  $h=7$  y filtro notch de 5 MVAR,  $h=5$ .

Filtro de segundo orden de 7 MVAR sintonizado para 11<sup>o</sup> armónico y filtro notch de 5 MVAR sintonizado para 5<sup>o</sup> armónico, mostrado en la ilustración 32.

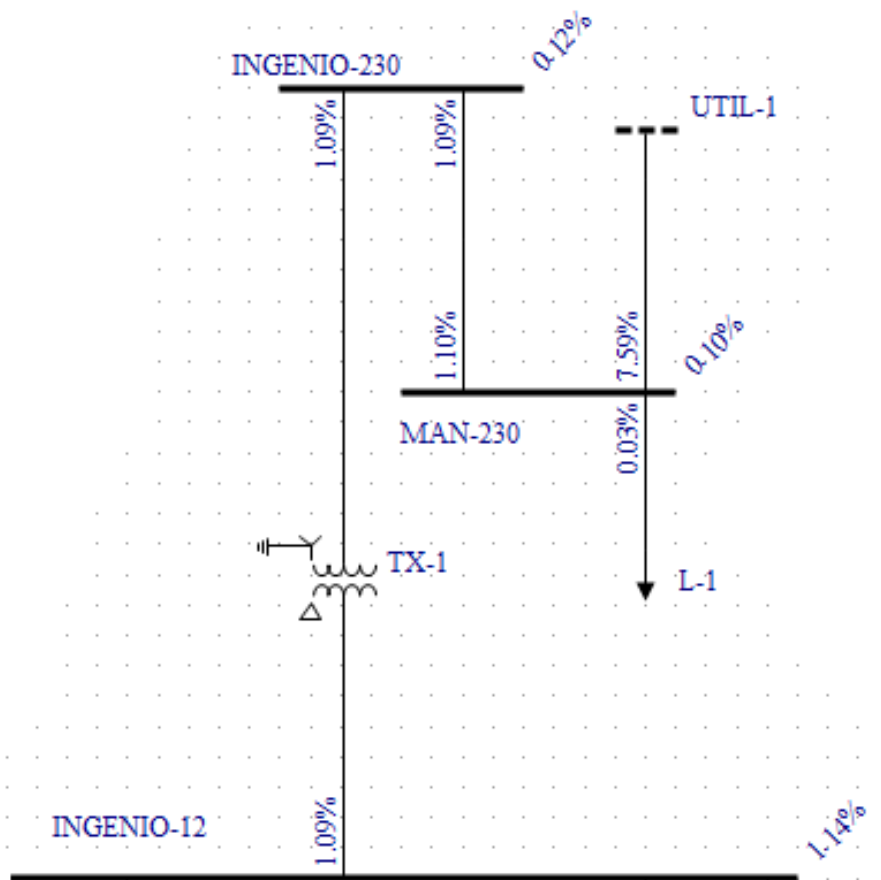


Ilustración 32. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR,  $h=11$  y filtro notch de 5 MVAR,  $h=5$ .

Se presentan valores dentro de los límites, sin embargo, se encuentran demasiado altos comparados con los valores más bajos obtenidos.

Filtro de segundo orden de 7 MVAR sintonizado para 7<sup>o</sup> armónico y filtro notch de 5 MVAR sintonizado para 11<sup>o</sup> armónico, mostrado en la ilustración 33.

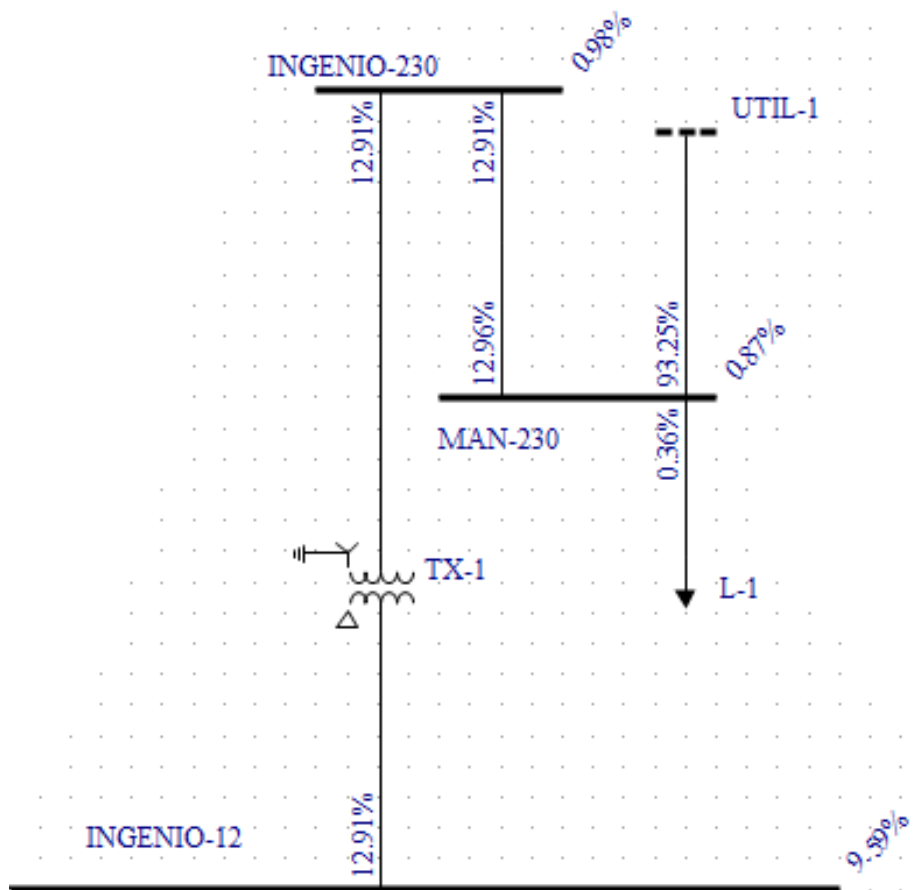


Ilustración 33. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR,  $h=7$  y filtro notch de 5 MVAR,  $h=11$ .

El filtro de 7<sup>o</sup> armónico provoca el aumento en el valor de distorsión de demanda.

Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

*Tabla 6. Valores de distorsión obtenidos para diseño con ambos bancos de capacitores modificados.*

<b>Configuración</b>	<b>TDD</b>	<b>THD V</b>
<b>2do orden Q=5 h=5 y Notch Q=7 h=7</b>	0.84%	0.08%
<b>2do orden Q=5 h=11 y Notch Q=7 h=7</b>	26.8%	2.03%
<b>2do orden Q=5 h=5 y Notch Q=7 h=11</b>	1.31%	0.13%
<b>2do orden Q=5 h=7 y Notch Q=7 h=5</b>	0.29%	0.05%
<b>2do orden Q=5 h=11 y Notch Q=7 h=5</b>	0.66%	0.08%
<b>2do orden Q=5 h=7 y Notch Q=7 h=11</b>	14.44%	1.09%
<b>2do orden Q=7 h=5 y Notch Q=5 h=7</b>	0.62%	0.07%
<b>2do orden Q=7 h=11 y Notch Q=5 h=7</b>	28.14%	2.13%
<b>2do orden Q=7 h=5 y Notch Q=5 h=11</b>	0.84%	0.09%
<b>2do orden Q=7 h=7 y Notch Q=5 h=5</b>	0.28%	0.05%
<b>2do orden Q=7 h=11 y Notch Q=5 h=5</b>	1.09%	0.12%
<b>2do orden Q=7 h=7 y Notch Q=5 h=11</b>	12.91%	0.98%

Se hace notoria la diferencia de resultados entre las configuraciones con un solo banco de capacitores convertido en filtro y ambos bancos convertidos en filtros.

De los resultados obtenidos y buscando la mejor opción para mejorar la eficiencia del sistema y la calidad de energía, se concluye lo siguiente:

-Se descartan las configuraciones para un solo banco de capacitores modificado.

Debido a que todas las configuraciones cumplen con lo establecido en el código de red.

-Se descartan aquellas configuraciones que no cumplan con el criterio para distorsión de demanda utilizado y además sean altas comparadas con el valor más bajo.

De esta forma se preservan las siguientes configuraciones.

- Filtro de segundo orden, 5MVAR,  $h=7$  y filtro notch, 7MVAR,  $h=5$
- Filtro de segundo orden, 7MVAR,  $h=5$  y filtro notch, 5MVAR,  $h=7$
- Filtro de segundo orden, 7MVAR,  $h=7$  y filtro notch, 5MVAR,  $h=5$

Se modela el sistema en las configuraciones anteriores, para generación de potencia media.

Filtro de segundo orden de 5 MVAR sintonizado para 7<sup>o</sup> armónico y filtro notch de 7 MVAR sintonizado para 5<sup>o</sup> armónico, todos los aerogeneradores conectados y operando al 66% de su capacidad nominal, mostrado en la ilustración 34.

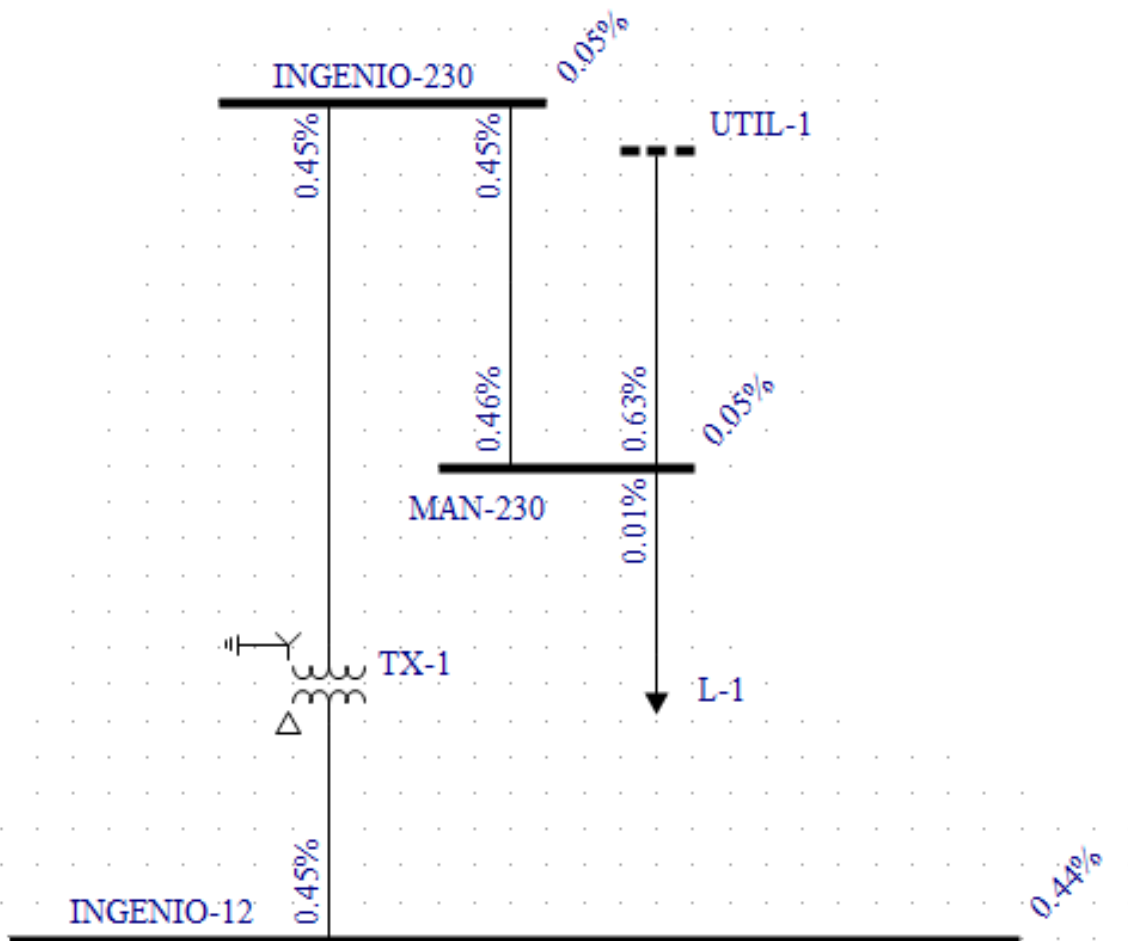


Ilustración 34. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 5 MVAR,  $h=7$  y filtro notch de 7 MVAR,  $h=5$ , generación media.

Filtro de segundo orden de 7 MVAR sintonizado para 5<sup>o</sup> armónico y filtro notch de 5 MVAR sintonizado para 7<sup>o</sup> armónico, todos los aerogeneradores conectados y operando al 66% de su capacidad nominal, mostrado en la ilustración 35.

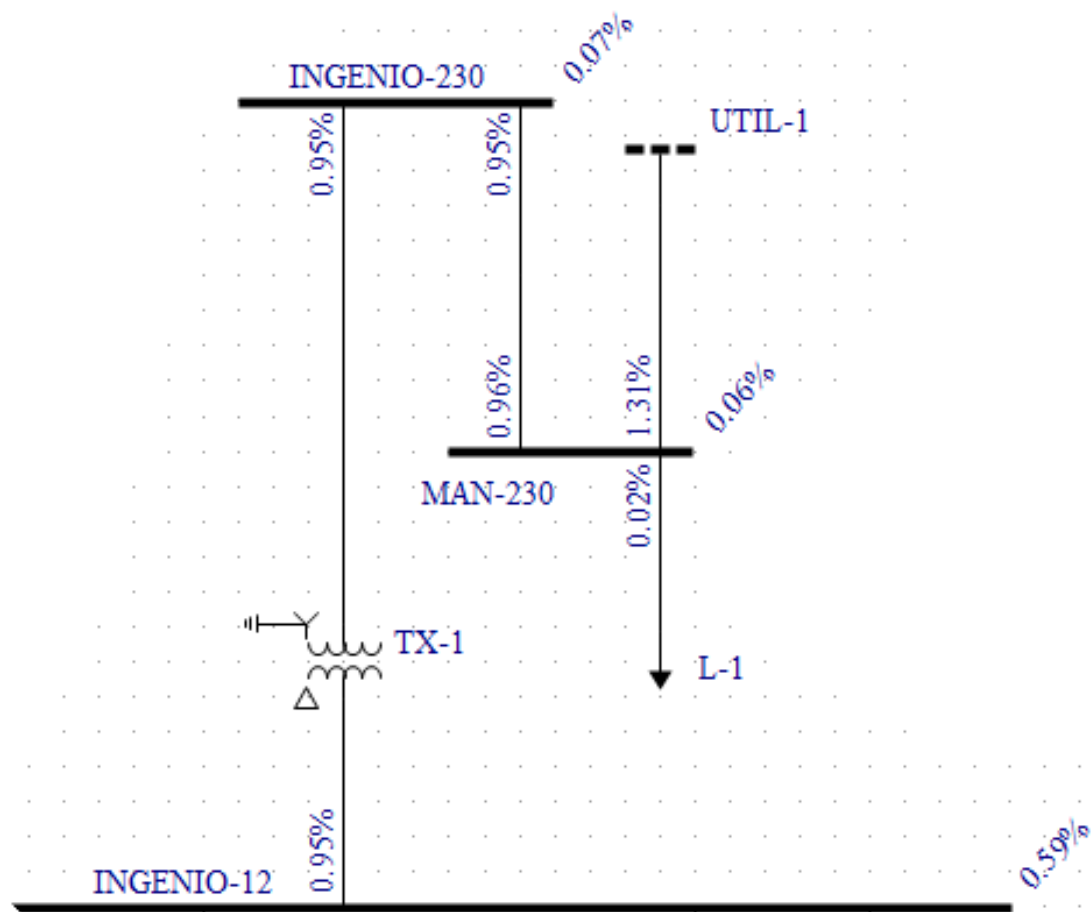


Ilustración 35. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR,  $h=5$  y filtro notch de 5 MVAR,  $h=7$ , generación media.



Filtro de segundo orden de 7 MVAR sintonizado para 7<sup>o</sup> armónico y filtro notch de 5 MVAR sintonizado para 5<sup>o</sup> armónico, todos los aerogeneradores conectados y operando al 66% de su capacidad nominal, mostrado en la ilustración 36.

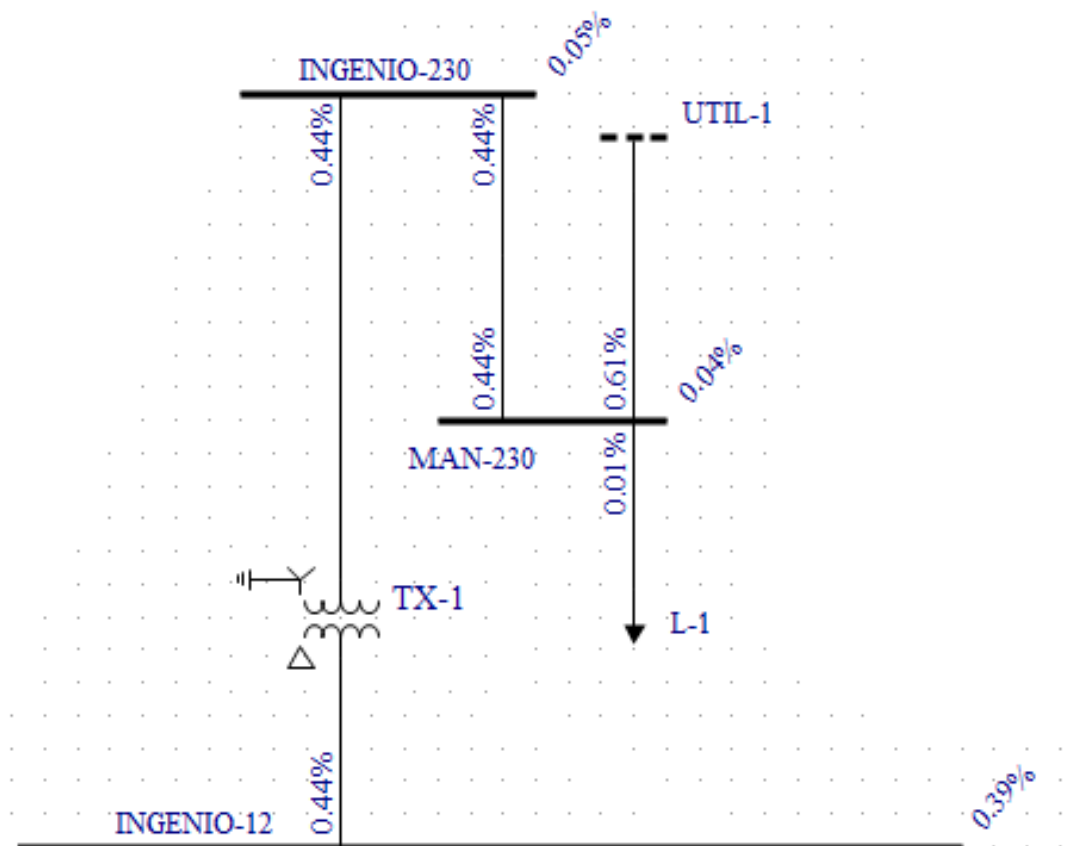


Ilustración 36. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR,  $h=7$  y filtro notch de 5 MVAR,  $h=5$ , generación media.

Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 7. Valores de distorsión obtenidos para los diseños seleccionados.

Configuración	TDD	THD V
2do orden $Q=5$ $h=7$ y Notch $Q=7$ $h=5$	0.45%	0.05%
2do orden $Q=7$ $h=5$ y Notch $Q=5$ $h=7$	0.95%	0.07%
2do orden $Q=7$ $h=7$ y Notch $Q=5$ $h=5$	0.44%	0.05%

Con los resultados mostrados en la tabla se puede observar que prevalece el valor más bajo con la configuración de filtro de segundo orden de 7 MVAR para 7<sup>o</sup> armónico y filtro notch de 5<sup>o</sup> armónico de 5 MVAR.

De lo anterior se decide por esta configuración como la mejor opción.

### 3.2. FILTRO DE SEGUNDO ORDEN DE 7 MVAR, H=7 Y FILTRO NOTCH DE 5 MVAR H=5

Se simula el sistema para la condición de generación baja.

Filtro de segundo orden de 7 MVAR sintonizado para 7<sup>o</sup> armónico y filtro notch de 5 MVAR sintonizado para 5<sup>o</sup> armónico, todos los aerogeneradores conectados y operando al 33% de su capacidad nominal, mostrado en la ilustración 37.

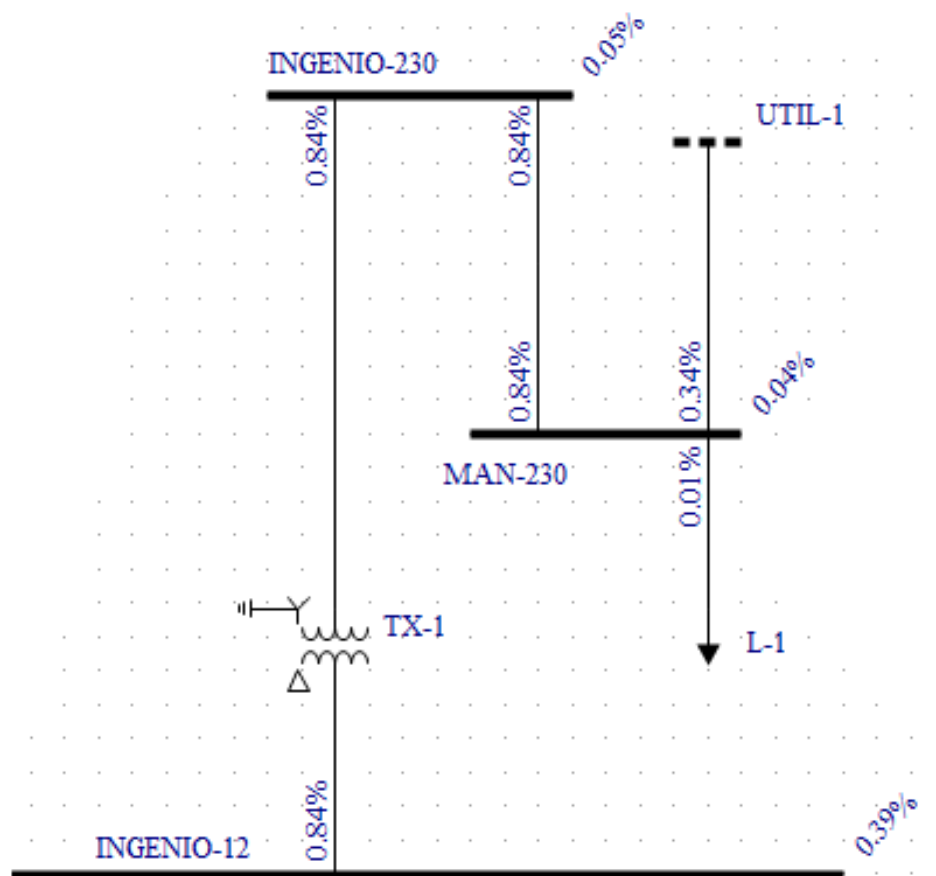


Ilustración 37. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR, h=7 y filtro notch de 5 MVAR, h=5, generación baja.

Filtro de segundo orden de 7 MVAR sintonizado para 7<sup>o</sup> armónico y filtro notch de 5 MVAR sintonizado para 5<sup>o</sup> armónico, algunos aerogeneradores desconectados y operando al 33% de su capacidad nominal. Generación de 10 MW, mostrado en la ilustración 38.

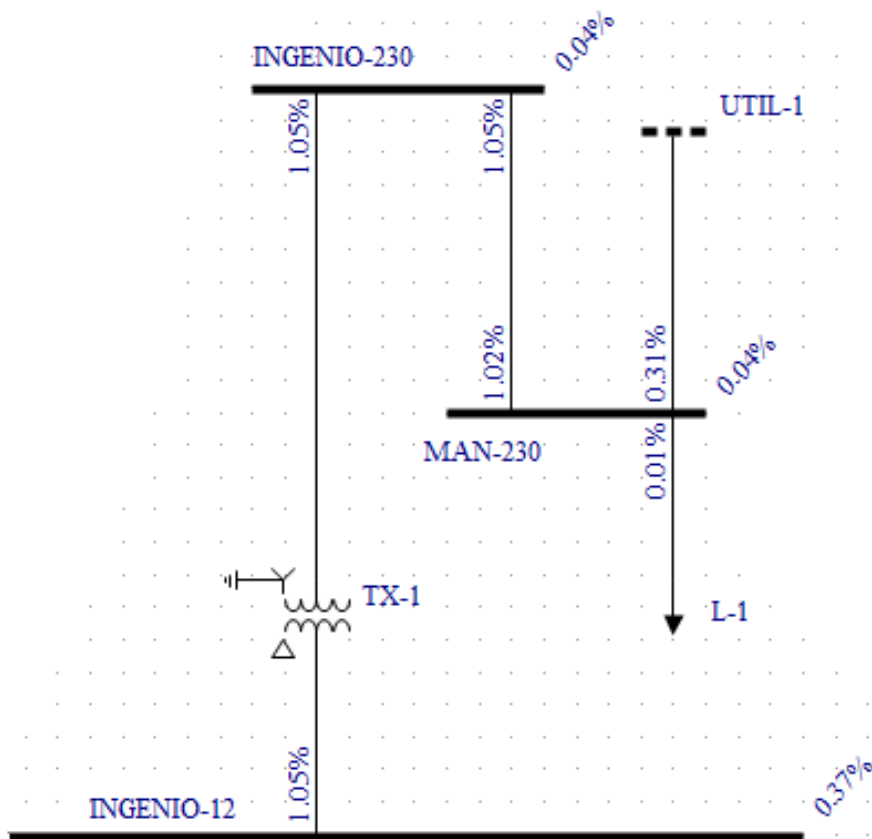


Ilustración 38. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR,  $h=7$  y filtro notch de 5 MVAR,  $h=5$ , generación de 10 MW.

Aunque se tiene un aumento en los valores de distorsión estos cumplen con el criterio utilizado y con el código de red y continúan bajos comparados con los que se obtuvieron en las simulaciones de las distintas configuraciones.

Filtro de segundo orden de 7 MVAR sintonizado para 7<sup>o</sup> armónico y filtro notch de 5 MVAR sintonizado para 5<sup>o</sup> armónico, algunos aerogeneradores desconectados y operando al 100% de su capacidad nominal. Generación de 34 MW, mostrado en la ilustración 39.

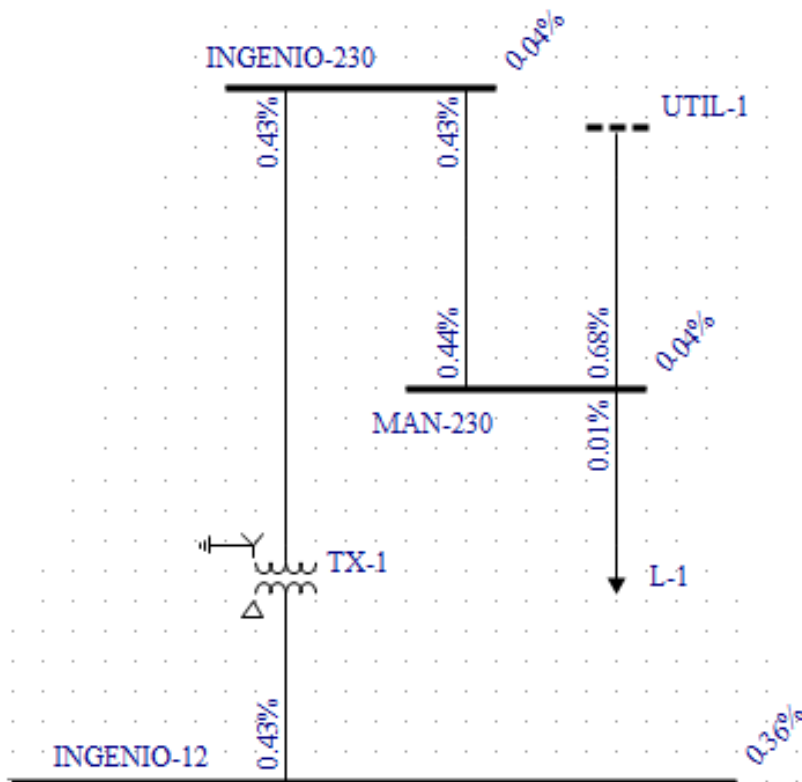


Ilustración 39. Análisis armónico con filtro de 2do orden de 7 MVAR,  $h=7$  y filtro notch de 5 MVAR,  $h=5$ , generación de 34 MW.

Se observan valores de distorsión armónica con cumplimiento con el código de red en las condiciones de operación del parque eólico, estos valores prevalecen bajos, asegurando los resultados más óptimos.

## CONCLUSIONES.

### Enfoque al parque eólico.

Con base en las simulaciones y con los resultados obtenidos se recomienda la configuración de:

-Filtro de segundo orden de 7 MVAR para 7ma armónico y filtro notch de 5 MVAR para 5ta armónico.

Con la configuración mencionada se obtiene la mejor opción para mitigar los armónicos de la forma más eficiente, logrando con esto disminuir en gran medida con los problemas que éstos generan.

Se asegura que los valores de distorsión armónica se mantendrán dentro de los límites establecidos por el código de red para cualquier modo de operación del parque eólico.

### Enfoque general.

Con el desarrollo de este trabajo se ha observado el papel importante que representa un filtro armónico, y más aún, la selección y la correcta configuración de este.

Aunque el principal objetivo de un filtro es atenuar un armónico de tal forma que no presente problemas para el sistema, si no se diseña adecuadamente puede hacer todo lo contrario. Se observó como una mala selección de filtros puede elevar los valores de distorsión a niveles muy altos, provocando que se incumplan con las normas de interconexión y que se generen problemas dentro del sistema, del parque eólico en particular.

Cabe destacar que estar dentro de los límites permitidos en materia de armónicos, no significa que se deba hacer caso omiso al control y disminución de los armónicos que se generen, es necesario el correcto manejo de éstos si se desea tener un sistema confiable y con la calidad de energía deseada.

## REFERENCIAS

- [1] Comisión Federal de Electricidad.  
[http://www.cfe.gob.mx/conocecfe/desarrollo\\_sustentable/paginas/energia-renovable.aspx](http://www.cfe.gob.mx/conocecfe/desarrollo_sustentable/paginas/energia-renovable.aspx)
- [2] Guía CFE L-000070. Calidad de energía: *Características y límites de las perturbaciones de los parámetros de la energía eléctrica*. México. Agosto de 2009.
- [3] Schneider Electric (1999). *Los armónicos en sus redes perturbadas y su tratamiento*. (Cuaderno técnico n° 152). Francia: Collombet, C., Lupin, J. M. y Schonek, J.
- [4] Especificación CFE L-000045. *Desviaciones permisibles en la forma de onda de tensión y corriente en el consumo de energía eléctrica*. México. Enero de 2005
- [5] Dugan, R., McGranaghan, M. F., Santoso, S. y Wayne, H. (1996). *Electrical power systems quality [Calidad en sistemas eléctricos de potencia]* (2ª ed.). USA: McGraw Hill
- [6] Sandoval, G., Houdek, J. (2005). *A Review of Harmonic Mitigation Techniques [Revisión de técnicas de mitigación armónica]*
- [7] Reglas Generales de Interconexión al Sistema Eléctrico Nacional para generadores o permisionarios con fuentes de energías renovables o cogeneración eficiente. México. Diciembre de 2011.
- [8] Código de Red. Disposiciones Administrativas de carácter general que contienen los criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del Sistema Eléctrico Nacional. México. Abril de 2016.

## ANEXO A.

Tablas contenidas en la especificación CFE L- 000045

Contenido armónico.

Las siguientes tablas muestran las desviaciones máximas permisibles en distorsión armónica, tanto para tensión como para corriente.

Estas tablas son aplicables tanto al suministrador como al consumidor que se conecten a la red eléctrica de CFE.

**Tabla 2 Límites máximos de distorsión armónica total en tensión y de CAIMT en el punto de acometida**

Tensión (kV)	Distorsión Armónica Individual en % (CAIMT)	Distorsión Armónica Total de Tensión en % (DAT)
Menor de 1	6,0	8,0
de 1 a 35	5,0	6,5
Mayor de 35	2,0	3,0

**Tabla 4 Límites máximos de distorsión armónica total de demanda y de CAIMC para baja, media y alta tensión hasta 69 kV**

Impedancia Relativa ( $I_{cc} / I_L$ )	Armónicas Impares en % (CAIMI)					Distorsión Armónica Total de Demanda en % (DTD)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
$(I_{cc} / I_L) < 20$	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
$20 \leq (I_{cc} / I_L) < 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
$50 \leq (I_{cc} / I_L) < 100$	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
$100 \leq (I_{cc} / I_L) < 1000$	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
$(I_{cc} / I_L) \geq 1000$	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

**Tabla 5 Límites máximos de distorsión armónica total de demanda y de CAIMI para alta tensión (mayor de 69 kV y hasta 161 kV)**

Impedancia Relativa ( $I_{cc} / I_L$ )	para Armónicas Impares en % (CAIMI)					Distorsión Armónica Total de Demanda en % (DTD)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
$(I_{cc} / I_L) < 20$	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
$20 \leq (I_{cc} / I_L) < 50$	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
$50 \leq (I_{cc} / I_L) < 100$	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
$100 \leq (I_{cc} / I_L) < 1000$	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
$(I_{cc} / I_L) \geq 1000$	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0

**Tabla 6 Límites máximos de distorsión armónica total de demanda y de CAIMC para alta tensión (mayor de 161 kV)**

Impedancia Relativa ( $I_{cc} / I_L$ )	Para Armónicas Impares en % (CAIMC)					Distorsión Armónica Total de Demanda en % (DTC)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
$(I_{cc} / I_L) < 50$	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
$(I_{cc} / I_L) \geq 50$	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

**NOTAS:**

- 1) En el caso de armónicas pares los límites se reducen al 25% de los correspondientes a armónicas impares.
- 2) Los límites mostrados en la tabla 4, 5 y 6 deben ser utilizados como el caso más desfavorable de operación normal. Para arranque de hornos eléctricos de arco, que toman un tiempo máximo de un minuto, se permite exceder los límites de la tabla en 50%.
- 3) En ningún caso se permiten corrientes de carga con componentes de corriente directa.
- 4)  $I_{cc}$  = Corriente de Corto Circuito.
- 5)  $I_L$  = Corriente de Carga