

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Efecto de los armónicos en las medidas de magnitudes eléctricas mediante algoritmos digitales

Autor: Jorge Baena Domingo

Tutor: Antonio de la Villa Jaén

Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Efecto de los armónicos en las medidas de magnitudes eléctricas mediante algoritmos digitales

Autor:

Jorge Baena Domingo

Tutor:

Antonio de la Villa Jaén

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2020

Trabajo Fin de Máster: Efecto de los armónicos en las medidas de magnitudes eléctricas mediante algoritmos digitales

Autor: Jorge Baena Domingo

Tutor: Antonio de la Villa Jaén

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigos

A mis profesores

Agradecimientos

En estas líneas quiero dar las gracias a todas las personas que han pasado por mi vida y de una u otra forma me han enseñado algo, contribuyendo a que hoy sea la persona que soy.

Por supuesto el mayor de los agradecimientos a mis padres y mi hermana, por darme todo lo que ha estado en su mano y más, apoyarme incondicionalmente, darme todo su cariño y educarme de la mejor manera posible.

Y por último agradecer a mi profesor y tutor Antonio de la Villa Jaén su inestimable ayuda, así como su dedicación y su carácter cercano y amable.

Muchísimas gracias a todos.

Jorge Baena Domingo

Sevilla, 2020

Resumen

En este trabajo se intentará establecer que efectos provoca la presencia de armónicos en las ondas eléctricas, en la medición de las diferentes magnitudes de potencia. Para ello se implementarán distintos algoritmos digitales de medida encontrados en normativas internacionales y en el mercado. Se compararán las mediciones obtenidas por cada uno de ellos en sistemas con diferentes escenarios de penetración de armónicos.

Se espera conocer si bajo esas condiciones existen diferencias entre el uso de uno u otro algoritmo para la medición de alguna forma de potencia. Y si se puede aconsejar el uso de alguno de ellos frente a los demás

Abstract

In this paper we will try to establish what effects causes the presence of harmonics in electrical waves, in the measurement of the different power magnitudes. For that pupose, different digital measurement algorithms found in international standards and in the market will be implemented. The measurements obtained by each of them will be compared in systems under different cases of harmonic penetration.

It is expected to know if under these conditions there are differences between the use of one or another algorithm for the measurement of some form of power. And if the use of any of them can be advised against the others.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xxi
1 Introducción	1
2 Teoría de Armónicos y normativa	3
2.1. <i>Teoría de armónicos</i>	3
2.1.1 Definición de armónico.	3
2.1.2 Causas	5
2.1.3 Problemas generados por los armónicos	6
2.1.4 Soluciones	6
2.2. <i>Normativa</i>	7
2.2.1 IEEE 519-2014.	7
2.2.2 IEC 61000-2-2	9
3 Análisis de diferentes algoritmos	11
3.1 <i>Algoritmo de medición de energía propuesto por el IEEE</i>	11
3.2 <i>Algoritmo de contadores comerciales</i>	16
3.2.1 Contador A	16
3.2.2 Contador B	17
3.2.3 Contador C	18
3.2.4 Budeanu	18
3.3 <i>Comparaciones de las medidas de los diferentes algoritmos</i>	19
3.3.1 Método comparación	19
3.3.2 Simulaciones sin armónicos	21
3.3.3 Armónicos en Intensidad	33
3.3.4 Armónicos en tensión	46
3.3.5 Armónicos en intensidad y tensión	67
4 CONCLUSIONES	89
Anexo A	91
Anexo B	93
Referencias	99
Glosario	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Límites de los armónicos de tensión según la normativa IEEE 519-2014.	8
Tabla 2-2 Límites de los armónicos de intensidad según la normativa IEEE 519-2014.	9
Tabla 2-3 Límites de armónicos de tensión según la normativa IEC 61000-2-2	10
Tabla 3-1 Ejemplo exposición parámetros de onda introducidas al programa.	20
Tabla 3-2 Ejemplo de exposición de resultados de potencias.	20
Tabla 3-3 Parámetros de onda introducidos en la simulación 1ª sin armónicos.	21
Tabla 3-4 Resultados 1ª simulación sin armónicos.	22
Tabla 3-5 Ondas introducidas 2ª simulación sin armónicos.	23
Tabla 3-6 Resultados 2ª simulación sin armónicos.	23
Tabla 3-7 Ondas introducidas 3ª simulación sin armónicos y con componente de continua en intensidad	25
Tabla 3-8 Resultados 3ª simulación sin armónicos y con componente de continua en intensidad	26
Tabla 3-9 Ondas introducidas 4ª simulación sin armónicos y con componente de continua en tensión	27
Tabla 3-10 Resultados 4ª simulación sin armónicos y con componente de continua en tensión	27
Tabla 3-11 Ondas introducidas 5ª simulación sin armónicos.	29
Tabla 3-12 Resultados 5ª Simulación. Sin armónicos, componente continua en tensión e intensidad	29
Tabla 3-13 Resumen conclusiones sin armónicos y con componentes constantes de continua en las ondas.	31
Tabla 3-14 Límites máximos de armónicos 1ª simulación armónicos en intensidad.	33
Tabla 3-15 Ondas introducidas en la 1ª simulación con armónicos en Intensidad.	34
Tabla 3-16 Resultados 1ª simulación con armónicos en intensidad.	35
Tabla 3-17 Resumen resultados 1ª Simulación con armónicos en intensidad	36
Tabla 3-18 Límites máximos de armónicos 2ª simulación armónicos en intensidad.	37
Tabla 3-19 Ondas introducidas en la 2ª simulación con armónicos en Intensidad.	37
Tabla 3-20 Resultados 2ª simulación con armónicos en intensidad	38
Tabla 3-21 Límites máximos de armónicos 3ª simulación armónicos en intensidad.	39
Tabla 3-22 Ondas introducidas en la 3ª simulación con armónicos en Intensidad.	39
Tabla 3-23 Resultados 3ª simulación con armónicos en intensidad	40
Tabla 3-24 Resumen resultados 3ª Simulación con armónicos en intensidad	41
Tabla 3-25 Límites máximos de armónicos 4ª simulación armónicos en intensidad.	42
Tabla 3-26 Ondas introducidas en la 4ª simulación con armónicos en Intensidad	42
Tabla 3-27 Resultados 4ª simulación con armónicos en intensidad	43
Tabla 3-28 Resumen resultados simulaciones con armónicos en intensidad	45
Tabla 3-29 Límites máximos de armónicos 1ª simulación armónicos en tensión.	46
Tabla 3-30 Ondas introducidas en la 1ª simulación con armónicos en tensión	47

Tabla 3-31 Resultados 1ª simulación con armónicos en tensión	48
Tabla 3-32 Resumen resultados 1ª simulación con armónicos en tensión	49
Tabla 3-33 Límites máximos de armónicos 2ª simulación armónicos en tensión	50
Tabla 3-34 Ondas introducidas en la 2ª simulación con armónicos en tensión	50
Tabla 3-35 Resultados 2ª simulación con armónicos en tensión	51
Tabla 3-36 Límites máximos de armónicos 3ª simulación armónicos en tensión.	52
Tabla 3-37 Ondas introducidas en la 3ª simulación con armónicos en tensión	52
Tabla 3-38 Resultados 3ª simulación con armónicos en tensión	53
Tabla 3-39 Resumen resultados 3ª simulación con armónicos en tensión	54
Tabla 3-40 Límites máximos de armónicos 4ª simulación armónicos en tensión	55
Tabla 3-41 Ondas introducidas en la 4ª simulación con armónicos en tensión	55
Tabla 3-42 Resultados 4ª simulación con armónicos en tensión	56
Tabla 3-43 Resumen resultados 4ª simulación con armónicos en tensión	58
Tabla 3-44 Límites máximos de armónicos 5ª simulación armónicos en tensión	59
Tabla 3-45 Ondas introducidas en la 5ª simulación con armónicos en tensión	60
Tabla 3-46 Límites máximos de armónicos 5ª simulación armónicos en tensión	61
Tabla 3-47 Resumen resultados 5ª simulación con armónicos en tensión	61
Tabla 3-48 Límites máximos de armónicos 6ª simulación armónicos en tensión	62
Tabla 3-49 Ondas introducidas en la 6ª simulación con armónicos en tensión	63
Tabla 3-50 Resultados 6ª simulación con armónicos en tensión	64
Tabla 3-51 Resumen resultados simulaciones con armónicos en tensión	65
Tabla 3-52 Resumen tendencias errores simulaciones con armónicos en tensión	66
Tabla 3-53 Límites máximos de armónicos en tensión 1ª simulación armónicos en intensidad y tensión	67
Tabla 3-54 Límites máximos de armónicos en intensidad 1ª simulación armónicos en intensidad y tensión	67
Tabla 3-55 Ondas introducidas en la 1ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	68
Tabla 3-56 Resultados 1ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	69
Tabla 3-57 Resumen resultados 1ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	70
Tabla 3-58 Límites máximos de armónicos en tensión 2ª simulación armónicos en intensidad y tensión	71
Tabla 3-59 Límites máximos de armónicos en intensidad 2ª simulación armónicos en intensidad y tensión	71
Tabla 3-60 Ondas introducidas en la 2ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	71
Tabla 3-61 Resultados 2ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	73
Tabla 3-62 Límites máximos de armónicos en tensión 3ª simulación armónicos en intensidad y tensión	74
Tabla 3-63 Límites máximos de armónicos en intensidad 3ª simulación armónicos en intensidad y tensión	74
Tabla 3-64 Ondas introducidas en la 3ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	74
Tabla 3-65 Resultados 3ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	76
Tabla 3-66 Resumen resultados 1ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	76
Tabla 3-67 Límites máximos de armónicos en tensión 4ª simulación armónicos en intensidad y tensión	77

Tabla 3-68 Límites máximos de armónicos en intensidad 4ª simulación armónicos en intensidad y tensión	77
Tabla 3-69 Ondas introducidas en la 4ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	78
Tabla 3-70 Resultados 4ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	79
Tabla 3-71 Límites máximos de armónicos en tensión 5ª simulación armónicos en intensidad y tensión	81
Tabla 3-72 Límites máximos de armónicos en intensidad 5ª simulación armónicos en intensidad y tensión	81
Tabla 3-73 Ondas introducidas en la 5ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	82
Tabla 3-74 Resultados 5ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	83
Tabla 3-75 Resumen resultados 5ª simulación con armónicos en tensión, intensidad y componentes constantes de continua	85
Tabla 3-76 Resumen resultados simulaciones con armónicos en intensidad y tensión	86
Tabla 3-77 Resumen tendencias errores simulaciones con armónicos en intensidad y tensión	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Onda intensidad perfecta y onda intensidad contaminada	4
Figura 2-2 Espectro de frecuencias armónicas onda de intensidad	4
Figura 3-1 Onda de intensidad introducida en la 1ª simulación con armónicos en intensidad	34
Figura 3-2 Onda de intensidad introducida en la 2ª simulación con armónicos en intensidad	38
Figura 3-3 Onda de intensidad introducida en la 3ª simulación con armónicos en intensidad	40
Figura 3-4 Onda de intensidad introducida en la 4ª simulación con armónicos en intensidad.	43
Figura 3-5 Onda de tensión introducida en la 1ª simulación con armónicos en tensión	47
Figura 3-6 Onda de tensión introducida en la 2ª simulación con armónicos en tensión	51
Figura 3-7 Onda de tensión introducida en la 3ª simulación con armónicos en tensión	53
Figura 3-8 Onda de tensión introducida en la 4ª simulación con armónicos en tensión	56
Figura 3-9 Onda de tensión introducida en la 5ª simulación con armónicos en tensión	60
Figura 3-10 Onda de tensión introducida en la 6ª simulación con armónicos en tensión	63
Figura 3-11 Onda de tensión introducida en la 1ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	68
Figura 3-12 Onda de intensidad introducida en la 1ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	69
Figura 3-13 Onda de tensión introducida en la 2ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	72
Figura 3-14 Onda de intensidad introducida en la 2ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	72
Figura 3-15 Onda de tensión introducida en la 3ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	75
Figura 3-16 Onda de intensidad introducida en la 3ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	75
Figura 3-17 Onda de tensión introducida en la 4ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	78
Figura 3-18 Onda de intensidad introducida en la 2ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	79
Figura 3-19 Onda de tensión introducida en la 5ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	82
Figura 3-20 Onda de intensidad introducida en la 5ª simulación con armónicos en intensidad y tensión	83

1 INTRODUCCIÓN

En un mundo cada vez más interconectado y más dependiente de la tecnología como el actual, son cada vez más los dispositivos electrónicos que se encuentran tanto en el ámbito del pequeño consumidor como para las grandes instalaciones. Estos dispositivos de una u otra forma provocan en las ondas eléctricas algunas distorsiones que pueden provocar ciertos efectos indeseables para el funcionamiento de los equipos del sistema.

Caracterizar estos efectos e intentar mitigarlos se ha convertido en los últimos tiempos en un factor decisivo a la hora de planificar y operar cualquier sistema.

El objetivo de este trabajo no es otros sino analizar uno de esos efectos.

Se pretende analizar como la presencia de estas distorsiones, en concreto de los armónicos, afecta a las medidas de potencia que obtienen varios algoritmos de medida teóricos e implementados en contadores comerciales. Este análisis se realizará en sistemas con diferentes escenarios de penetración de armónicos y diferentes configuraciones.

Cuantificar este efecto o simplemente describir cómo se comportan las medidas ante la presencia de armónicos resulta muy interesante para poder determinar si la facturación de la energía eléctrica se está efectuando de forma correcta, independientemente de que medidor se utilice. Además se podrá comprobar si el uso de uno u otro contador resulta más idóneo para una medición correcta.

Los contadores que se analizarán son medidores digitales monofásicos.

Para la realización de este trabajo, en una primera fase de documentación se han buscado los algoritmos utilizados por diferentes contadores digitales existentes en el mercado. Por otra parte se han buscado también los algoritmos que el IEEE propone para la medición de la energía eléctrica en diferentes situaciones, estando estos definidos en el Standard 1459-2010 "Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balance, or Unbalance Conditions"

En esta fase también se ha obtenido normativas de varios organismos acerca de los límites de armónicos recomendados para cada instalación. Estas normativas servirán para diseñar los escenarios a analizar con los diferentes medidores. Haciendo la suposición de que por encima de estos límites no hay ningún sistema que opere en la red. Por lo tanto los casos analizados serían los más desfavorables a encontrar.

Una vez encontrados los algoritmos se ha desarrollado un programa en el software de cálculo MATLAB, en el que se han implementado cada uno de ellos para realizar la comparación. En esta

comparación se tomará como valor de referencia de cada magnitud el que obtiene el algoritmo del IEEE para cada escenario. Con lo que será interesante analizar las diferencias entre las medidas obtenidas por los diferentes algoritmos con la de este.

El alcance de este trabajo llega hasta establecer que diferencias se encuentran en las medidas de potencia obtenidas por diferentes algoritmos para diferentes escenarios de penetración de armónicos. Además se pretende analizar si estas diferencias permiten la medición de alguna de las magnitudes independientemente de que algoritmo se utilice para su obtención.

2 TEORÍA DE ARMÓNICOS Y NORMATIVA

Antes de proceder a desarrollar las comparaciones, es fundamental entender algunos conceptos acerca de los armónicos. Por ello en este capítulo se profundizará y se intentará dar una visión global sobre que son los armónicos, que los produce, cuales son los problemas que generan, así como las soluciones que se pueden adoptar para mitigar estos efectos negativos.

Una vez entendido el concepto de armónico, se realizará una breve introducción sobre las normativas más importantes acerca del control de armónicos. Como se ha mencionado, estas servirán de apoyo para el diseño de los diferentes escenarios a analizar, llevando estos escenarios a los límites admitidos por cada normativa.

2.1. Teoría de armónicos

2.1.1 Definición de armónico.

Una onda eléctrica ideal de tensión o intensidad representada frente al tiempo aparece como una senoide de 50 o 60 Hz en función del sistema en el que se encuentren.

En la realidad cuando se realizan mediciones sobre sistemas reales estas ondas no tienen dicha forma perfecta y se presentan en la mayoría de los casos contaminadas con diferentes perturbaciones.

Para el análisis de estas perturbaciones se utiliza el teorema de Fourier, según el cual, toda onda periódica se puede dividir en la suma de varias ondas senoidales de diferentes frecuencias. Esta separación permite diferenciar entre la onda teórica o fundamental y las perturbaciones que se le suman.

Así se obtienen entonces, una onda fundamental y sus ondas armónicas, siendo la frecuencia de estas últimas la de la onda fundamental multiplicada por un factor entero llamado k . Refiriéndonos por tanto al armónico de orden k como a aquella onda cuya frecuencia es k veces la frecuencia de la onda fundamental. Se considerará para este trabajo que k tiene que ser un número natural.

Para una mejor comprensión en la figura 2-1 se muestra un periodo de una onda de intensidad a 50 Hz. En azul aparece la onda fundamental, aquella ideal que encontraríamos sin perturbaciones. Y en rojo se representa esta misma onda pero contaminada con una serie de armónicos de distintos órdenes.

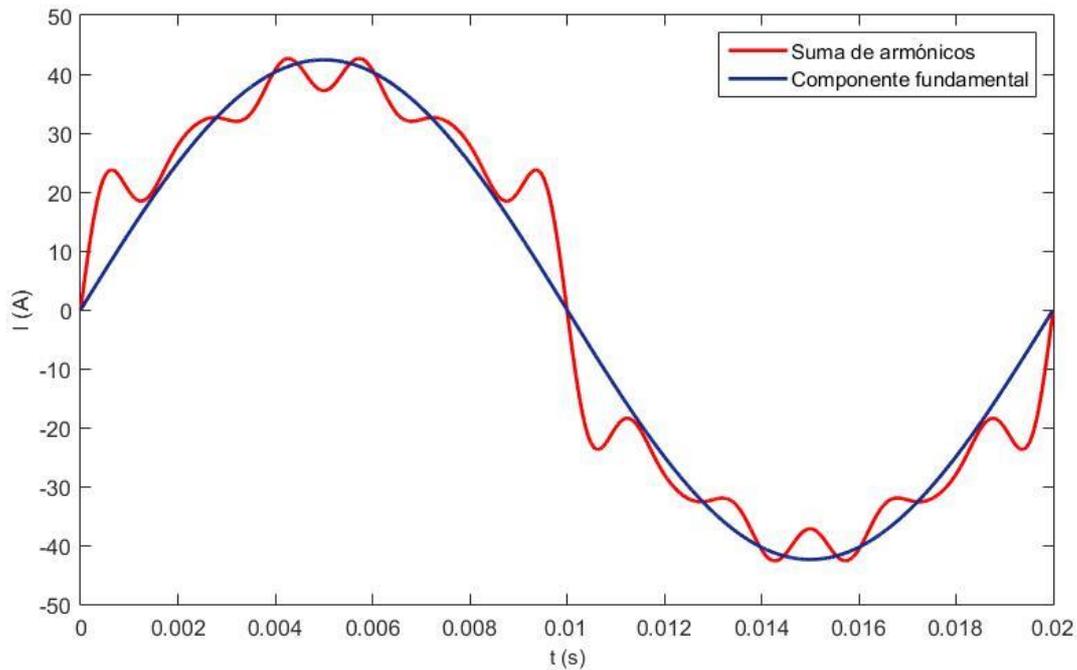


Figura 2-1 Onda intensidad perfecta y onda intensidad contaminada

Una herramienta bastante utilizada y que resulta importante e intuitiva para el análisis de armónicos, es el espectro de frecuencias. Este muestra de una manera más gráfica el orden de los armónicos de la onda y la potencia o amplitud de cada uno de ellos.

Así para la onda anterior se obtendría el espectro de frecuencias que se observa en la figura 2-2.

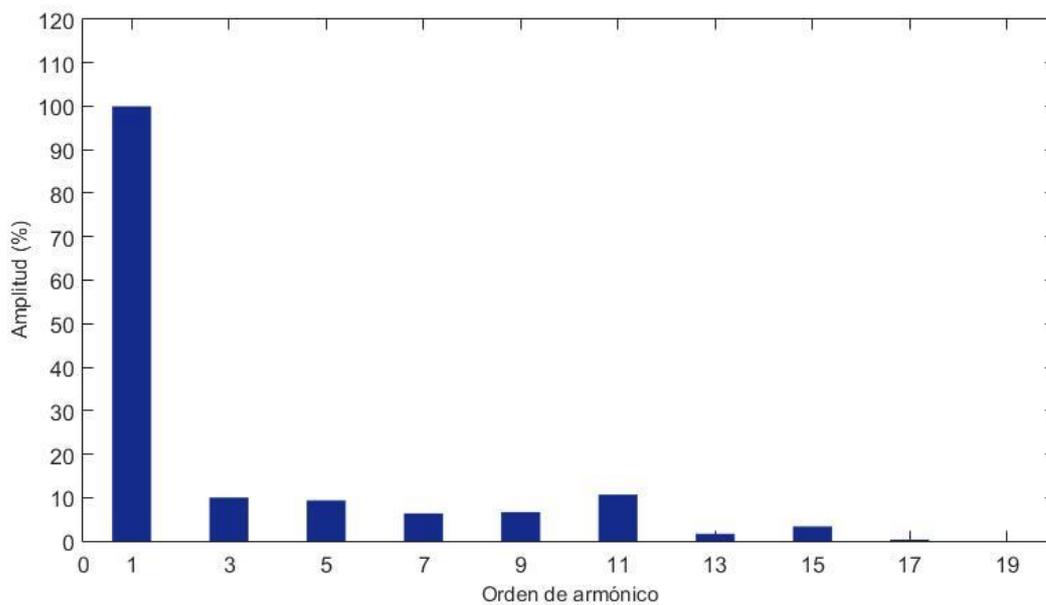


Figura 2-2 Espectro de frecuencias armónicas onda de intensidad

Como se puede ver, esta onda solo contiene armónicos impares, representado cada uno de ellos como un porcentaje del fundamental.

Otra herramienta interesante para la caracterización de una onda distorsionada, y como índice de calidad de onda, es la Distorsión Armónica Total o THD (del inglés Total Harmonic Distortion).

$$THD = \frac{I_H}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2} - 1 \quad (2-1)$$

Siendo I_1 el valor eficaz de la intensidad de la onda fundamental y I_H el valor eficaz del sumatorio de las ondas armónicas.

Mientras más alto sea dicho índice más distorsionada se encontrará la onda y por lo tanto peor calidad de onda se tendrá.

2.1.2 Causas

Los armónicos aparecen en un sistema cuando en él hay instaladas cargas no lineales, estas son aquellas en las que la tensión y la intensidad no siguen una distribución lineal en el tiempo.

$$\left(\frac{U}{I}\right) \neq cte \quad (2-2)$$

En la actualidad este tipo de cargas está cada vez más presente en los sistemas eléctricos debido a la creciente utilización de la electrónica de potencia en todos los ámbitos de la sociedad.

Por ejemplo, en el ámbito doméstico cada vez se disponen de más electrodomésticos que trabajan con corriente continua. Por tanto todos ellos necesitan rectificadores que transforman la onda, produciendo en este cambio los nombrados armónicos.

En entornos industriales también existen cargas no lineales como son los hornos de arco, o producidas por electrónica de potencia como los variadores de velocidad en motores.

Otro incremento en el uso de la electrónica de potencia se produce debido al aumento de la generación de energía renovable que cada vez ocupa más importancia en el pool eléctrico. Por ejemplo, los paneles de las plantas fotovoltaicas generan energía en corriente continua que, a través de convertidores se transforma en corriente alterna. Generando en este cambio los mencionados armónicos.

2.1.3 Problemas generados por los armónicos

La presencia de armónicos en una instalación no es para nada un escenario deseable ya que trae acarreados una serie de problemas en diferentes elementos de la red.

En los conductores se incrementa la intensidad y la resistencia, provocando mayores pérdidas y por lo tanto calentamiento de los conductores que con esto verán reducida su vida útil.

Hay que destacar con un tratamiento especial el conductor neutro, ya que a través de él circulan los armónicos triples en fase, por lo que la intensidad por él se ve incrementada considerablemente. Provocando todos los efectos descritos anteriormente además de poder provocar disparos intempestivos de las protecciones.

En motores y transformadores la circulación de armónicos por sus devanados produce sobrecalentamiento que va aparejado a un aumento de pérdidas y por lo tanto disminución del rendimiento. Con esto también se pierde aislamiento térmico por lo que la vida útil de los equipos se verá reducida.

Además de estos efectos, en el caso particular de los motores, se pueden producir vibraciones en el eje debido a los campos magnéticos producidos por los armónicos lo que provoca una reducción en el par disponible.

Otro efecto a tener en cuenta, y que se trata de cuantificar en este trabajo fin de máster, es el error que se puede cometer en las medidas de los contadores a causa de los armónicos.

En materia económica todos estos problemas técnicos se traducen en una necesidad de sobredimensionamiento de los conductores y de las potencias contratadas para la instalación, una sustitución de los equipos más temprana debido a la disminución de su vida útil, paradas en la producción debido a disparos intempestivos de protecciones, y un sobrecargo o subcarga en la factura eléctrica debido a la mala lectura de los aparatos de medida.

2.1.4 Soluciones

Para mitigar los efectos negativos que se han expuesto anteriormente existen varias estrategias.

Una de ellas es la utilización de filtros pasivos conectados en paralelo. Así proporcionan una ruta de baja impedancia para que los armónicos circulen a tierra. Mientras que para la frecuencia fundamental ofrecen una impedancia elevada. Estos filtros están compuestos por bobinas y condensadores y sirven para el filtrado de un armónico en concreto o un espectro de frecuencias.

Existen también filtros activos que son aquellos que se adaptan a las circunstancias de la instalación generando una corriente que se inyecta para anular la de los armónicos presentes.

Para evitar el paso de armónicos de una red a otra se utilizan transformadores conectados en triángulo generando así un aislamiento entre una red y otra.

Existen también diferenciales “supeinmunizados” calibrados para soportar altas tasas de THD.

Además de todas las estrategias anteriores, si la presencia de armónicos es importante en la instalación, se deben sobredimensionar elementos como motores, transformadores, protecciones y conductores, con especial cuidado para el neutro. De esta forma se evitará que trabajen cercanos a su límite y puedan mantener su vida útil.

2.2. Normativa

En este apartado se expondrán las normativas más importantes a nivel nacional e internacional sobre los límites de armónicos permitidos en cada tipo de instalación.

Dichas normativas, como se ha comentado con anterioridad, servirán de apoyo para el diseño de los escenarios a analizar en este trabajo. Llevando las comparaciones de los algoritmos a los límites permitidos para descubrir el comportamiento de los contadores en los escenarios más desfavorables ante los que se pueden encontrar teóricamente.

2.2.1 IEEE 519-2014.

El IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), es una asociación de ingenieros a nivel mundial que se dedica a la normalización y estandarización de diferentes áreas técnicas.

En lo que respecta a armónicos, esta asociación desarrolló el Standard 519-2014 “Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems”.

En él se establecen los límites máximos de armónicos recomendados en una instalación, tanto para la distorsión de la onda de tensión como para la de intensidad.

Tensión:

En el estándar se definen los siguientes límites para el punto de acoplamiento de la red pública y la instalación particular a analizar.

-Diariamente el 99 por ciento de los valores medidos en un muy corto periodo de tiempo (3s) deben ser menor que 1.5 veces el valor dado en la tabla 2-1.

-Semanalmente el 95 por ciento de los valores medidos en un corto periodo de tiempo (10 min) deben ser menores que los valores expuestos en la tabla 2-1.

Tensión nominal	Tensión de distorsión de un armónico (%)	THDV total (%)
$V \leq 1 \text{ kV}$	5	8
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3	5
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1	1.5

Tabla 2-1 Límites de los armónicos de tensión según la normativa IEEE 519-2014.

Intensidad:

En el caso de la corriente, el estándar divide sus recomendaciones en varias franjas dependiendo de la tensión a la que se encuentra el sistema.

Este trabajo se centrará únicamente en el primer intervalo dado, 120 V a 69 kV, ya que al tratarse de contadores domésticos siempre se encontrarán dentro de estos niveles de tensión.

Como anteriormente las recomendaciones vienen dadas para varios intervalos de tiempo:

-Diariamente el 99 por ciento de los valores de armónicos medidos en un muy corto periodo de tiempo (3s), deben ser menores que 2 veces los valores dados en la tabla 2-2.

-Semanalmente el 99 por ciento de los valores de armónicos medidos en un corto periodo de tiempo (10 min), deben ser menores que 1.5 veces los valores dados en la tabla 2-2.

-Semanalmente el 95 por ciento de los valores de armónicos medidos en un corto periodo de tiempo (10 min), deben ser menores que los valores dados en la tabla 2-2.

I_{sc} / I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
< 20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20 < 50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50 < 100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100 < 1000	12	5.5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2.5	1.4	20

Tabla 2-2 Límites de los armónicos de intensidad según la normativa IEEE 519-2014.

Los armónicos pares se especifica que están limitados al 25% del límite anterior para los armónicos impares.

I_{sc} es la máxima corriente de cortocircuito medida en el punto de conexión e I_L es la corriente máxima demandada de la componente fundamental en el punto de conexión para condiciones normales de operación. TDD es la tasa de distorsión de la demanda y sigue la expresión 2-3.

$$TDD = \frac{1}{I_L} \sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_n^2} \quad (2-3)$$

2.2.2 IEC 61000-2-2

El IEC (International Electrotechnical Commission) es un organismo similar al IEEE pero cuyo radio de acción está centrado en Europa. En su norma IEC 61000 se aborda todo lo relativo a los límites de armónicos en las redes eléctricas.

Este trabajo se centrará en concreto en la IEC 61000-2-2-2003 “Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2-2: Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en baja tensión”, para la que el organismo español AENOR tiene su norma homóloga UNE 61000-2-2.

Estas normas contienen los niveles máximos de compatibilidad para las tensiones armónicas individuales en las redes de baja tensión.

Así como el estándar del IEEE, estas tienen en cuenta si las perturbaciones tiene efectos de larga duración (<10 min) o de muy corta duración (>3s).

Para los efectos de larga duración, que son los que se utilizarán para el objetivo de este proyecto, se

proporciona la tabla 2-3 que establece los porcentajes máximos para cada armónico de tensión respecto al fundamental.

Con estos valores la tasa de distorsión armónica total es TDH=8%.

Armónicos impares no múltiplos de 3		Armónicos impares múltiplos de 3		Armónicos pares	
Orden del armónico	Tensión del armónico	Orden del armónico	Tensión del armónico	Orden del armónico	Tensión del armónico
h	%	h	%	h	%
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	0.5
$17 \leq h \leq 49$	$2.27 \times (17/h) - 0.27$	$21 \leq h \leq 45$	0.2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25 \times (10/h) + 0.25$

Tabla 2-3 Límites de armónicos de tensión según la normativa IEC 61000-2-2

3 ANÁLISIS DE DIFERENTES ALGORITMOS

En este capítulo se realizará un análisis de las medidas de potencia eléctrica obtenidas mediante la implementación de varios algoritmos digitales utilizados por algunos aparatos de medida del mercado. El objetivo de este análisis será conocer las diferencias que se producen entre las medidas de estos equipos y respecto a la medida que obtiene el algoritmo de medida propuesto por el IEEE.

El análisis se realizará para régimen monofásico y en diferentes escenarios con distinta penetración de armónicos diseñados a partir de las normativas expuestas en el capítulo anterior.

Para realizar esta comparación, en un primer momento se expondrá el algoritmo recomendado por el IEEE en el Standard 1459-2010. El resultado de este algoritmo será el que se tomará como referencia para la comparación.

En un segundo apartado se expondrán los algoritmos usados por tres contadores digitales del mercado. Estos han sido encontrados en la búsqueda de información y revisión del estado del arte que ha precedido al desarrollo de este trabajo.

Además en esta búsqueda se ha encontrado el algoritmo de Budeanu. Este algoritmo es bastante conocido y aceptado dentro de la comunidad científica, en lo referente al cálculo de algunas medidas eléctricas, por lo que se ha considerado interesante implementarlo también en este trabajo.

Para terminar este capítulo, se muestran los resultados obtenidos por estos algoritmos en distintas simulaciones realizadas para diferentes escenarios.

Para la realización de estas simulaciones se ha recurrido al software de cálculo MATLAB. En él se ha diseñado un programa que desarrolla todos los algoritmos anteriores. Como datos de entrada el programa recibe de manera manual diferentes ondas de tensión y de intensidad y a partir de ellas se calculan las diferentes magnitudes eléctricas. Más tarde se analizan las diferencias que se producen entre ellas dependiendo del algoritmo de medida utilizado.

El código de este programa se puede consultar en el Anexo B.

3.1 Algoritmo de medición de energía propuesto por el IEEE

Como se ha dicho, en este trabajo se tomará el Standard 1459-2010 como referencia.

Para este capítulo, al tratarse de medida de energía en régimen monofásico, solo se tomarán del

documento del IEEE las definiciones que se corresponden con el régimen monofásico y bajo condiciones no sinusoidales.

Para empezar se define la tensión y la intensidad instantáneas como la suma de las tensiones e intensidades instantáneas de la onda fundamental y las ondas armónicas:

$$v = v_1 + v_H \quad (3-1)$$

$$i = i_1 + i_H \quad (3-2)$$

Como se ha explicado anteriormente, se entiende por onda fundamental la de la frecuencia fundamental, en nuestro caso al tratarse de un sistema eléctrico 50 o 60 Hz. Para su identificación a partir de este momento se le representará en este trabajo con el subíndice uno.

El subíndice H hace referencia a los armónicos, es decir las ondas cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia de la onda fundamental. En este caso al ser H mayúscula se refiere a la suma de todos los armónicos presentes en el sistema.

Cada uno de estos componentes está definido en el documento como:

$$v_1 = \sqrt{2}V_1 \sin(\omega t - \alpha_1) \quad (3-3)$$

$$v_H = V_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} V_h \sin(h\omega t - \alpha_h) \quad (3-4)$$

$$i_1 = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - \beta_1) \quad (3-5)$$

$$i_H = I_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_h \sin(h\omega t - \beta_h) \quad (3-6)$$

Resulta interesante destacar la posibilidad que incluye la formulación de incluir un offset de continua (V_0 e I_0).

El cálculo de los valores eficaces se realiza como:

$$V^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v^2 dt = V_1^2 + V_H^2 \quad (3-7)$$

$$I^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i^2 dt = I_1^2 + I_H^2 \quad (3-8)$$

Siendo:

$$V_H^2 = V_0^2 + \sum_{h \neq 1} V_h^2 = V^2 - V_1^2 \quad (3-9)$$

$$I_H^2 = I_0^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2 = I^2 - I_1^2 \quad (3-10)$$

Con todo lo anterior ya se podría definir las tasas totales de armónicos como:

$$THD_V = \frac{V_H}{V_1} = \sqrt{\left(\frac{V}{V_1}\right)^2 - 1} \quad (3-11)$$

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (3-12)$$

Como se ha comentado esta tasa es una medida de la calidad de onda, siendo peor cuanto más alto es valor de este índice.

Una vez calculada la tensión y la intensidad en sus diferentes formas, se está en disposición de proceder al cálculo de las potencias. Para ellos el estándar hace una diferenciación entre potencia activa de la onda fundamental y las de ondas armónicas,

$$P = P_1 + P_H \quad (3-13)$$

Donde cada uno de estas potencias viene definida como:

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (3-14)$$

$$P_H = V_0 I_0 + \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos \theta_h \quad (3-15)$$

Siendo como hasta ahora 1 el subíndice de la onda fundamental y h el de cada una de las ondas armónicas.

En el estándar se siguen definiendo magnitudes como la potencia instantánea que quedaría:

$$p = vi \quad (3-16)$$

Una vez obtenido todas las formas de potencia activa, el estándar presenta la potencia reactiva, cabe destacar como hecho significativo que en este documento solo nombra y considera como potencia reactiva a la que genera la onda fundamental.

Por lo tanto:

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \theta_1 \quad (3-17)$$

Para la potencia no activa generada por las ondas armónicas se realiza una formulación alternativa que se expone más adelante.

El cálculo de la potencia aparente es el siguiente:

$$S^2 = (VI)^2 = (V_1^2 + V_H^2)(I_1^2 + I_H^2) = (V_1 I_1)^2 + (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 = S_1^2 + S_N^2 \quad (3-18)$$

Siendo la potencia aparente fundamental:

$$S_1 = V_1 I_1 \quad (3-19)$$

$$S_1^2 = P_1^2 + Q_1^2 \quad (3-20)$$

Y la potencia aparente no fundamental estaría definida como:

$$S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2} \quad (3-21)$$

$$S_N^2 = D_I^2 + D_V^2 + S_H^2 \quad (3-22)$$

Donde se define como potencia de distorsión por corriente como:

$$D_I = V_I I_H \quad (3-23)$$

A la potencia de distorsión por voltaje como:

$$D_V = V_H I_1 \quad (3-24)$$

Y siendo la potencia aparente armónica:

$$S_H = V_H I_H \quad (\text{va}) \quad (3-25)$$

$$S_H = \sqrt{P_H^2 + D_H^2} \quad (3-26)$$

Potencia de distorsión armónica:

$$D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2} \quad (3-27)$$

Con todo esto se podría definir como potencia no activa a toda aquella potencia que no es la potencia activa del sistema, como su propio nombre indica. En condiciones ideales esta potencia se llamaría reactiva, pero al estar inmersos en un sistema bajo los efectos de armónicos en esta potencia se aglutinan más términos.

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3-28)$$

Como factor de potencia se definen dos, el de la onda fundamental:

$$PF_1 = \cos \theta_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (3-29)$$

Y el factor de potencia total:

$$PF = \frac{P}{S} \quad (3-30)$$

Quedando así completamente definido como se calcula con el algoritmo propuesto por el IEEE las diferentes potencias.

3.2 Algoritmo de contadores comerciales

Se expondrán aquí los algoritmos que utilizan diferentes contadores digitales del mercado para el cálculo de la potencia. Estos medidores se han encontrado en el trabajo de los autores Gabriel Ordoñez Plata, César Duarte G., Adám Bautista M., «Análisis de la medición de potencia y energía eléctrica en contadores digitales, bajo el efecto de armónicos y cargas desbalanceadas ».

Para la comparación se implementarán contadores digitales en los que se usan diferentes algoritmos de medida. Para hacer una diferenciación entre ellos, en lo que sigue en este trabajo se les pasará a llamar contador A, B y C. Además también se reflejará el algoritmo de Budeanu como se comentó anteriormente.

3.2.1 Contador A

El primer contador analizado obtiene la potencia activa como el sumatorio de la multiplicación de la tensión e intensidad instantánea en cada muestra.

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v_n i_n \quad (3-31)$$

La potencia aparente queda definida con la fórmula ya conocida:

$$S = V_{RMS} I_{RMS} \quad (3-32)$$

Siendo los valores eficaces calculados como

$$V = \sqrt{\sum_k V_k^2} \quad (3-33)$$

$$I = \sqrt{\sum_k I_k^2} \quad (3-34)$$

El cálculo de la potencia reactiva requiere una transformación intermedia en la que la tensión instantánea se retrasa $\pi/2$ radianes con respecto a la frecuencia del sistema.

La demostración matemática de porque retrasando la onda de tensión $\pi/2$ radianes se obtiene la potencia reactiva se puede encontrar en el Anexo A de este trabajo.

$$v_Q(t) = v\left(t - \frac{\pi}{2\omega}\right) \quad (3-35)$$

Una vez realizado esta transformación se calcula la potencia reactiva como la media de la multiplicación de intensidad y tensión transformada.

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v_{Q_n} i_n \quad (3-36)$$

Además de este medidor también se ha obtenido la expresión para el cálculo del factor de potencia:

$$PF = \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{Q}{P}\right)\right) \quad (3-37)$$

3.2.2 Contador B

Para el contador B el cálculo de la potencia activa es exactamente igual que para el anterior:

$$P_a = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v_n i_n \quad (3-38)$$

A la potencia aparente le ocurre exactamente igual:

$$S = V_{RMS} I_{RMS} \quad (3-39)$$

Calculando los valores eficaces según las expresiones 3-33 y 3-34.

En la potencia reactiva es donde se produce la diferencia en el cálculo, ya que este medidor lo hace a través de la potencia activa y la potencia aparente:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3-40)$$

También se ha obtenido su expresión para el cálculo del factor de potencia:

$$PF = \frac{P}{S} \quad (3-41)$$

3.2.3 Contador C

Este último contador encontrado, además de las medidas de potencia nos da información de su procedimiento de cálculo para los valores Rms de la tensión y la intensidad a partir de las tensiones e intensidades instantáneas de cada muestra.

$$V = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} v_n^2} \quad (3-42)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} i_n^2} \quad (3-43)$$

Para la potencia activa utiliza la misma expresión que los otros medidores encontrados:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v_n i_n \quad (3-44)$$

La potencia reactiva a diferencia de los otros contadores se retrasa $\pi/2$ la intensidad en lugar de la tensión. Con lo que la potencia reactiva queda:

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v_n i(90^\circ)_n \quad (3-45)$$

Con esto el factor de potencia queda definido como:

$$PF = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (3-46)$$

3.2.4 Budeanu

El algoritmo de Budeanu es un procedimiento de cálculo bastante extendido en la comunidad científica. Tiene bastantes semejanzas en algunos cálculos con los algoritmos anteriores, pero hay algunas peculiaridades propias de este algoritmo.

La potencia aparente aparece definida a partir de los valores eficaces de tensión e intensidad, y a su vez de tres términos de potencia:

$$S = VI = \sqrt{P^2 + Q_B^2 + D_B^2} \quad (3-47)$$

Para el cálculo de los valores eficaces de las ondas de tensión e intensidad:

$$V = \sqrt{\sum_k V_k^2} \quad (3-48)$$

$$I = \sqrt{\sum_k I_k^2} \quad (3-49)$$

La potencia activa se calcula a través del producto de estos valores en cada armónico

$$P = \sum_{k=1}^N V_k I_k \cos \varphi_k \quad (3-50)$$

La potencia reactiva de cada armónico es:

$$Q_k = V_k I_k \sin \varphi_k \quad (3-51)$$

Y la potencia reactiva del sistema completo sería el sumatorio de la onda fundamental y la de cada uno de los armónicos presentes.

$$Q_B = \sum_{k=1}^N V_k I_k \sin \varphi_k \quad (3-52)$$

Por último solo queda conocer el último término de potencia presente en el cálculo de la potencia aparente. Este aparece definido como potencia de distorsión y se obtiene despejando de la expresión 3-47.

$$D_B = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2} \quad (3-53)$$

3.3 Comparaciones de las medidas de los diferentes algoritmos

3.3.1 Método comparación

Para la realización de las comparaciones entre algoritmos se introducirá en el programa diseñado los

valores eficaces y fases de la onda fundamental y de cada armónico. Estos valores se ajustarán a los límites de armónicos propuestos por las normativas en cada caso. Para la exposición de los datos introducidos al sistema se utilizarán tablas similares a la tabla 3-1.

k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
V (V)																						
φ_V																						
I (A)																						
φ_I																						

Tabla 3-1 Ejemplo exposición parámetros de onda introducidas al programa.

Para la exposición de los resultados se utilizarán tablas semejantes a la tabla 3-2.

	POTENCIA NO ACTIVA	P (W)	S (va)	PF
IEEE	N (var)			
	Q_1 (var)			
CONTADOR A	Q (var)			
CONTADOR B	Q (var)			
CONTADOR C	Q (var)		-	
BUDEANU	Q (var)			-
	D (var)			

Tabla 3-2 Ejemplo de exposición de resultados de potencias.

Como se observa en la tabla 3-2 se compararán los datos de las diferentes potencias y del factor de potencia de cada algoritmo. La potencia no activa se denomina así ya que en cada uno de los algoritmos esta potencia se define de una forma diferente, no definiéndose toda esta potencia como reactiva en algunos algoritmos.

También hay que comentar que en la documentación consultada no se han obtenido referencias sobre

como realizan el cálculo de la potencia aparente del contador C, ni el cálculo del factor de potencia del modelo de Budeanu, por lo que no se han podido incluir en la comparación.

Para realizar la comparación y el análisis se desarrollarán varios subpartados con diferentes características. Estos son:

- Escenarios sin armónicos.
- Escenarios con armónicos únicamente en intensidad.
- Escenarios con armónicos únicamente en tensión.
- Escenarios con armónicos tanto en tensión como en intensidad.

En cada uno de estos subpartados se realizan varias simulaciones. Utilizando para el diseño de los escenarios diferentes intervalos de las normativas de máximos armónicos, fases y añadiendo componentes constantes de continua a las ondas.

3.3.2 Simulaciones sin armónicos

En esta primera sección se realizarán varias simulaciones para escenarios sin armónicos. El objetivo es comprobar si bajo unas condiciones ideales todos los algoritmos son capaces de obtener la misma medición de las diferentes magnitudes de potencia.

3.3.2.1 1ª simulación sin armónicos

Se elige para esta primera simulación una onda de tensión de 240 voltios al ser el valor de tensión rms más común en las instalaciones de baja tensión en España. Los valores eficaces de las ondas elegidas para este ensayo vienen mostrados en la tabla 3-3.

k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
V (V)		240																				
φ_V		0°																				
I (A)		20																				
φ_I		30°																				

Tabla 3-3 Parámetros de onda introducidos en la simulación 1ª sin armónicos.

Se comprueba que el algoritmo de IEEE obtiene unas tasas de distorsión armónica nulas. Esto era una consecuencia esperable al no introducir ondas distorsionadas pero así se consigue comprobar que las expresiones de medida de estas distorsiones son correctas.

$$THDi = 0\% \quad THDv = 0\%$$

En la tabla 3-4, se exponen los resultados obtenidos por cada algoritmo analizado para cada una de las magnitudes de potencia.

	POTENCIA NO ACTIVA		P (W)	S (va)	PF
IEEE	N (var)	2400	4156.9	4800	0.8666
	Q_1 (var)	2400			
CONTADOR A	Q (var)	2400	4156.9	4800	0.8666
CONTADOR B	Q (var)	2400	4156.9	4800	0.8666
CONTADOR C	Q (var)	-2400	4156.9	-	0.8666
BUDEANU	Q (var)	2400	4156.9	4800	-
	D (var)	0			

Tabla 3-4 Resultados 1ª simulación sin armónicos.

En base a los datos obtenidos en esta primera simulación se observa que todas las magnitudes de potencia obtenidas por los contadores comerciales, así como las obtenidas por el algoritmo de Budeanu tienen el mismo valor y además coinciden con las que refleja el algoritmo del IEEE.

Por lo que se está en disposición de decir que los contadores reflejan una correcta medida de la potencia, ya que como se ha explicado se tomará como referencia el resultado del algoritmo presentado por el IEEE.

Bien es cierto que el signo de la potencia reactiva del contador C es negativo, esto es debido a que para su obtención se ha retrasado la onda de intensidad. Provocando entonces que en el resultado el carácter de la potencia cambie al opuesto.

En el documento en el que se ha encontrado el algoritmo de este contador, no especifica como subsanan este problema. En este trabajo se reflejará el resultado de este algoritmo en valor absoluto añadiéndole más tarde el carácter que los demás contadores reflejan del sistema, ya que en realidad el contador C debe de tener algún método para obtener el carácter real de la potencia reactiva.

Otros resultados que cabe destacar son los obtenidos por la potencia no activa del IEEE (N), al ser originada únicamente por la onda fundamental, se encuadra toda dentro de lo que se denomina para este algoritmo como potencia reactiva por lo tanto N y Q_1 tienen el mismo valor en este caso.

Similar es el caso de la potencia de distorsión del algoritmo de Budeanu (D). Esta al no estar el sistema contaminado con armónicos tiene un valor nulo.

3.3.2.2 2ª Simulación sin armónicos.

En este caso se realiza un ensayo similar al anterior pero con valores diferentes para certificar que se extraen las mismas conclusiones y se puede tomar como correctos las conclusiones obtenidas anteriormente. En la tabla 3-5 se muestran los parámetros de las ondas que se introducirán para este escenario.

k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
V (V)		234																				
ϕ_V		60°																				
I (A)		22.8																				
ϕ_I		45°																				

Tabla 3-5 Ondas introducidas 2ª simulación sin armónicos.

Las tasas de distorsión armónica siguen siendo nulas al no haber ningún armónico en el sistema.

$$THDi = 0\% \quad THDv = 0\%$$

	POTENCIA NO ACTIVA		P (W)	S (va)	PF
IEEE	N (var)	1380.9	5153.4	5335.19	0.9659
	Q_1 (var)	-1380.9			
CONTADOR A	Q (var)	-1380.9	5153.4	5335.19	0.9659
CONTADOR B	Q (var)	1380.9	5153.4	5335.19	0.9659
CONTADOR C	Q (var)	-1380.9	5153.4	-	0.9659
BUDEANU	Q (var)	-1380.9	5153.4	5335.19	-
	D	0			

Tabla 3-6 Resultados 2ª simulación sin armónicos.

Con los resultados de la tabla 3-6 se obtienen conclusiones similares a las del anterior ejemplo.

Se obtienen para todas las magnitudes de potencia los mismos resultados por todos los algoritmos y también los mismos valores que el algoritmo que se usa como referencia del IEEE.

En esta simulación se encuentra otro hecho similar a lo que ocurre con el carácter de la potencia reactiva del contador C con la no activa del algoritmo del IEEE (N) y la reactiva del Contador B.

En este caso en un primer momento se han obtenido para estos resultados carácter contrario a los obtenidos por los demás medidores. Analizando el resultado y las expresiones de sus algoritmos se cayó en la cuenta que sus obtenciones vienen de una raíz cuadrada, por lo que el resultado que sería válido en este caso sería el negativo y por tanto tienen el mismo carácter que los demás algoritmos.

A partir de aquí, en este trabajo se reflejará directamente en la tabla de resultados el signo de N y de Q del contador B eligiendo entre el carácter verdadero del sistema.

Con esto se puede concluir que en el caso de medidas sin armónicos todos los medidores y algoritmos definidos en este trabajo obtienen los mismos resultados de potencia activa y potencia aparente. Habiendo alguna discrepancia en el signo del resultado de la potencia reactiva, pero producida por la expresión matemática utilizada para su obtención por cada algoritmo.

Suponiendo que en el contador C existe algún mecanismo para detectar el verdadero carácter de la reactiva. Se puede decir que todos los algoritmos y medidores obtienen los mismos resultados que el algoritmo del IEEE, referencia para este trabajo. Por lo tanto se considera que todos los algoritmos miden la energía y la facturan de forma igualitaria en escenarios con ondas de tensión e intensidad puras.

3.3.2.3 3ª Simulación. Introducción de una componente contante de intensidad continua.

En este ensayo se introduce un nuevo elemento al sistema. Se supondrá que las ondas contienen un componente constante de continua. El objetivo es ver cómo afecta este nuevo efecto a la medida. Para ello se realizarán 3 ejemplos. Uno con componente de continua en tensión, otro en intensidad y en ambos.

Para poder realizar una comparación efectiva de las medidas respecto al escenario sin componente de continua, se introducirán las mismas ondas de tensión e intensidad que en la simulación anterior sumándole la componente de continua, como se puede observar en la tabla 3-7.

En este caso se comprobará la reacción de los algoritmos a la introducción de una componente de continua en la intensidad.

k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
V (V)	0	234																				
ϕ_V	-	60°																				
I (A)	2.3	22.8																				
ϕ_I	-	45°																				

Tabla 3-7 Ondas introducidas 3ª simulación sin armónicos y con componente de continua en intensidad

En este escenario con una componente de continua, al no introducir unas ondas puras en el sistema el algoritmo del IEEE ya no devuelve unas distorsiones armónicas nulas como anteriormente. Sino que la distorsión armónica para la intensidad toma un valor cercano al 10%.

$$THDi = 10.0877\% \quad THDv = 0\%$$

	POTENCIA NO ACTIVA		P (W)	S (va)	PF
IEEE	N (var)	-1482.03	5153.41	5362.28	0.9610
	Q_1 (var)	-1380.85			
CONTADOR A	Q (var)	-1380.85	5153.41	5362.28	0.9659
CONTADOR B	Q (var)	-1482.03	5153.41	5362.28	0.9610
CONTADOR C	Q (var)	-1380.85	5153.41	-	0.9659
BUDEANU	Q (var)	-1380.85	5153.41	5335.20	-
	D	0			

Tabla 3-8 Resultados 3ª simulación sin armónicos y con componente de continua en intensidad

En los resultados reflejados en la tabla 3-8 se puede observar que la potencia activa medida por los algoritmos no varía respecto al caso sin componente de continua. Sin embargo si cambia la potencia aparente y la reactiva medida por algunos de los algoritmos.

En resumen y tomando siempre como referencia los resultados del algoritmo del IEEE:

-El contador B es el único capaz de medir igual que este la reactiva que provoca la introducción de una componente de continua. Es decir el único que arroja como valor de energía no activa el mismo que el valor para energía no activa del IEEE.

$$N = Q_{\text{contadorB}} \quad (3-54)$$

Los otros dos contadores así como el algoritmo de Budeanu no son capaces de reflejar el efecto de la componente de continua en la potencia reactiva y obtienen el mismo valor que en el caso sin componente de continua.

$$Q_1 = Q_{\text{contadorA}} = Q_{\text{contadorC}} = Q_{\text{budeanu}} \quad (3-55)$$

El error cometido en la potencia reactiva con estos algoritmos al no variar su medida con la introducción del offset de continua constante es de 6.87% del valor de N.

En la potencia aparente el algoritmo de Budeanu es el único que no es capaz de recoger el efecto de la componente de continua. Reflejando en su resultado el mismo valor que en la simulación anterior sin componente de continua. Este error representa en este caso un 0.5% del valor de la potencia aparente del algoritmo del IEEE.

$$S_{\text{IEEE}} \neq S_{\text{Budeanu}} \quad (3-56)$$

En resumen, si solo se facturará por potencia activa todos los métodos lo estarían haciendo correctamente, tomando como referencia el algoritmo del IEEE. Sin embargo si se factura también por el término de potencia reactiva o por factor de potencia, el único contador capaz de garantizar una facturación justa es el contador B. Ya que es el único que obtiene unos valores iguales al algoritmo del IEEE.

3.3.2.4 4ª Simulación. Introducción de una componente constante de tensión continua.

Se introduce un offset de continua de 26 V junto con las ondas utilizadas en los ejemplos anteriores como se puede observar en la tabla 3-9.

k	0	1	2	3	4				5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
V (V)	26	234																					
ϕ_V	-	60°																					
I (A)	0	22.8																					
ϕ_I	-	45°																					

Tabla 3-9 Ondas introducidas 4ª simulación sin armónicos y con componente de continua en tensión

Esta onda ofrece unas distorsiones armónicas

$$THDi = 0\% \quad THDv = 11.1112\%$$

	POTENCIA NO ACTIVA		P (W)	S (va)	PF
IEEE	N (var)	-1502.72	5153.41	5368.03	0.9600
	Q_1 (var)	-1380.85			
CONTADOR A	Q (var)	-1380.85	5153.41	5368.03	0.9659
CONTADOR B	Q (var)	-1502.72	5153.41	5368.03	0.9600
CONTADOR C	Q (var)	-1380.85	5153.41	-	0.9659
BUDEANU	Q (var)	-1380.85	5153.41	5335.20	-
	D	0			

Tabla 3-10 Resultados 4ª simulación sin armónicos y con componente de continua en tensión

De los resultados expuestos en la tabla 3-10 se obtienen las mismas conclusiones que en el caso de la componente de continua de intensidad.

El contador B sigue siendo el único que reacciona a la componente de continua en su potencia reactiva.

$$N = Q_{\text{contadorB}} \quad (3-57)$$

La diferencia con los demás algoritmos para la potencia reactiva es de un 8.10%

El algoritmo de Budeanu es el único que no es capaz de reflejar el efecto en la potencia aparente. La diferencia con respecto a los demás algoritmos es de un 0.6%.

$$S_{IEEE} \neq S_{Budeanu} \quad (3-58)$$

Por lo que al igual que en el caso de componente continua en intensidad, para una facturación únicamente de potencia activa, todos los algoritmos obtienen la misma medida que el algoritmo del IEEE.

$$P_{IEEE} = P_{\text{ContA}} = P_{\text{ContB}} = P_{\text{ContC}} = P_{Budeanu} \quad (3-59)$$

3.3.2.5 5ª Simulación. Introducción de componentes continuas constantes de tensión e intensidad.

En este ensayo se analizará la reacción a la suma de los efectos producidos por la introducción de componentes constantes de continua en la onda de intensidad y en la onda de tensión al mismo tiempo.

En la tabla 3-11 se muestran los valores de las magnitudes de onda utilizados para esta simulación. Los valores tomados son los mismos que en las simulaciones anteriores para así poder tener una mayor visión de cómo hace variar el resultado la introducción de estas perturbaciones.

k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
V (V)	26	234																			
ϕ_V	-	60°																			
I (A)	2.3	22.8																			
ϕ_I	-	45°																			

Tabla 3-11 Ondas introducidas 5ª simulación sin armónicos.

Las distorsiones armónicas totales calculadas según el algoritmo del IEEE toman los siguientes valores.

$$THDi = 10.0877\% \quad THDv = 11.1112\%$$

	POTENCIA NO ACTIVA		P (W)	S (va)	PF
IEEE	N (var)	-1389.77	5213.21	5395.28	0.9663
	Q_1 (var)	-1.380.85			
CONTADOR A	Q (var)	-1321.05	5213.21	5395.28	0.9694
CONTADOR B	Q (var)	-1389.77	5213.21	5395.28	0.9663
CONTADOR C	Q (var)	-1440.65	5213.21	-	0.9639
BUDEANU	Q (var)	-1380.85	5153.40	5335.20	-
	D	0			

Tabla 3-12 Resultados 5ª Simulación. Sin armónicos, componente continua en tensión e intensidad

En la Tabla 3-12 se recogen los resultados de la simulación. En esta se observa como las potencias medidas han aumentado con respecto a la simulación sin componentes de continua.

Para el caso de las potencias aparentes todos los algoritmos salvo el algoritmo de Budeanu obtienen el mismo resultado que el algoritmo de referencia del IEEE. Este hecho venía sucediendo en las simulaciones anteriores en las que ya se introducía una componente constante de continua.

Con esto podríamos decir que los contadores A, B y C miden correctamente la potencia aparente. En el caso del algoritmo de Budeanu se estaría cometiendo un error del 1,11% sobre el valor del algoritmo del IEEE.

$$S_{IEEE} = S_{contA} = S_{contB} = S_{contC} \neq S_{Budeanu} \quad (3-60)$$

En las medidas de las potencias activas obtenidas en este escenario se ha notado también un incremento respecto a las medidas en el escenario sin componente continua.

El efecto que se observa es el mismo que para la potencia aparente. Todos los contadores son capaces de medir de la misma forma que el algoritmo del IEEE este aumento. Pero el algoritmo de Budeanu es incapaz de reflejar el efecto de las componentes de continua, ya que obtiene el mismo valor que en el ejemplo sin componente de continua. Así, el algoritmo de Budeanu comete un error en la medida de potencia activa de un 1.15% en esta simulación.

$$P_{IEEE} = P_{contA} = P_{contB} = P_{contC} \neq P_{Budeanu} \quad (3-61)$$

En el caso de la potencia reactiva se encuentran más diferencias entre las medidas de los diferentes algoritmos. En el algoritmo del IEEE la potencia no activa N , incrementa su valor debido a la introducción de la componente de continua. No ocurre así con la reactiva Q_1 que no se ve afectada debido a que para su cálculo solo tiene en cuenta la componente fundamental de las ondas.

En cuanto a los demás algoritmos de medida, los contadores A y C varían el valor de su potencia reactiva por lo que la introducción de la componente de continua sí que ha provocado una variación en su medida. Este efecto se produce en sentido contrario en cada uno de los contadores incrementando el valor de la medida de potencia reactiva en el contador C y decrementándolo en A.

Analizando los resultados se descubre que lo incrementado en un contador es lo decrementado en el otro, en este caso sería de 59.8 var respecto al valor obtenido sin componente de continua. Esto supone un diferencia relativa respecto al valor de N de un 4.95% menos para el contador A y de un 3.66% superior para el contador C.

Evidentemente con estos datos los factores de potencia que obtienen cada algoritmo son diferentes, al diferir sus potencias.

El contador B obtiene el mismo valor en su reactiva que el algoritmo del IEEE. Por lo que se puede decir al tomar este último como referencia que el contador B mide correctamente la reactiva del sistema.

El algoritmo de Budeanu repite los mismos efectos que en la medida de las demás potencias. Es decir no varía su medida al introducir la componente de continua lo que le hace obtener una diferencia

respecto al algoritmo del IEEE, que sí que cuantifica este efecto. En este caso la diferencia es de un 0.64%.

Como resumen de todas las simulaciones anteriores y siempre tomando como referencia los resultados del algoritmo del IEEE. Se pueden obtener varias conclusiones para describir el efecto que provoca la presencia de una componente constante de continua en la medida de los diferentes algoritmos:

-El algoritmo de Budeanu no tiene en cuenta en ningún momento y en ninguna medida de potencia el efecto provocado de la componente de continua.

-La potencia aparente y activa medida por cada uno de los contadores son iguales a las del IEEE, por lo que se considera que se están midiendo de forma adecuada y son capaces de reflejar el efecto de la corriente continua.

-En la potencia reactiva, el contador B refleja en la misma medida la perturbación que el algoritmo del IEEE.

-Los contadores A y C sin embargo, si bien tienen sensibilidad a la introducción de la componente continua no son capaces de medir este efecto como el algoritmo del IEEE. Se incurre en un error por defecto en el contador A y por exceso en el contador C. Estos errores se han estimado alrededor del 4%.

Todo este análisis se resume en la tabla 3-13.

	P	Q
Contador A	Correcto	Diferencia por defecto del 4,94% de N
Contador B	Correcto	Correcto
Contador C	Correcto	Diferencia por exceso del 3,6% de N
Budeanu	No refleja el efecto de la componente continua. (1,15% Diferencia relativa)	No refleja el efecto de la componente continua. (0,64% Diferencia relativa)

Tabla 3-13 Resumen conclusiones sin armónicos y con componentes constantes de continua en las ondas.

3.3.2.6 Conclusiones simulaciones sin armónicos.

Como conclusiones de este capítulo sin armónicos se extrae que ante una situación de ondas perfectas, sin armónicos ni componentes de continua, todos los contadores y algoritmos realizan una medición idéntica.

Con la presencia de componentes constantes de continua en las ondas, el único algoritmo que permite obtener una medida igual a la del algoritmo de referencia en cualquier escenario y en todas sus potencias es el del contador B.

En el caso de facturar únicamente por la potencia activa, los medidores A y C también permitirían una medida equivalente, mientras que el algoritmo de Budeanu no lo permite.

En el caso de facturaciones por reactiva o por factor de potencia los contadores A y C estarían incurriendo en diferencias. En los escenarios con componente de continua solo en tensión o solo en intensidad estos algoritmos no reflejan el efecto de esta componente con lo que abordan una diferencia de 6,87% con respecto al algoritmo del IEEE.

Para el caso con componente constante de continua en tensión e intensidad esta diferencia estaría en torno al 4%. En el caso del contador A por defecto y en el caso de contador C por exceso.

Con componentes constantes de continua el algoritmo de Budeanu no refleja nunca un resultado similar al del IEEE cometiendo un error en torno al 1% en los escenarios analizados.

3.3.3 Armónicos en Intensidad

En este apartado se introducirán como datos de entrada ondas de intensidad contaminadas con armónicos para comprobar cómo reaccionan los algoritmos ante estos estímulos.

Se introducirán solo armónicos impares ya que se supondrá que los armónicos pares quedan anulados completamente por la simetría de onda.

3.3.3.1 1ª Simulación. Armónico en Intensidad

Para esta primera prueba se utilizará el límite de armónicos establecido por el IEEE en su Estándar 519-2014 que ya se ha mencionado en el capítulo 2 de este trabajo.

No se tienen datos de cómo será el cociente entre la intensidad de cortocircuito y la intensidad demandada por lo que se realizarán pruebas con varios intervalos para comprobar la concordancia en los resultados con cualquiera de ellos.

En la Tabla 3-14 se puede observar los intervalos máximos escogidos para este escenario.

I_{SC} / I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
< 20	4	2	1.5	0.6	0.3	5

Tabla 3-14 Límites máximos de armónicos 1ª simulación armónicos en intensidad.

Con estos intervalos quedan para introducir las ondas expuestas en la Tabla 3-15. Se introducen en esta primera simulación todas las ondas armónicas de intensidad en fase para en el próximo ensayo valorar la sensibilidad de los medidores al cambio de fase de las ondas.

k	V (V)	ϕ_V	I (A)	ϕ_I
0				
1	234	0°	20.2	60°
2				
3			0.808	60°
4				
5			0.808	60°
6				
7			0.808	60°
8				
9			0.808	60°
10				

k	V (V)	ϕ_V	I (A)	ϕ_I
11			0.404	60°
12				
13			0.404	60°
14				
15			0.404	60°
16				
17			0.303	60°
18				
19			0.303	60°
20				

Tabla 3-15 Ondas introducidas en la 1ª simulación con armónicos en Intensidad.

La representación de un ciclo de onda de intensidad introducida se puede observar en la Figura 3-1.

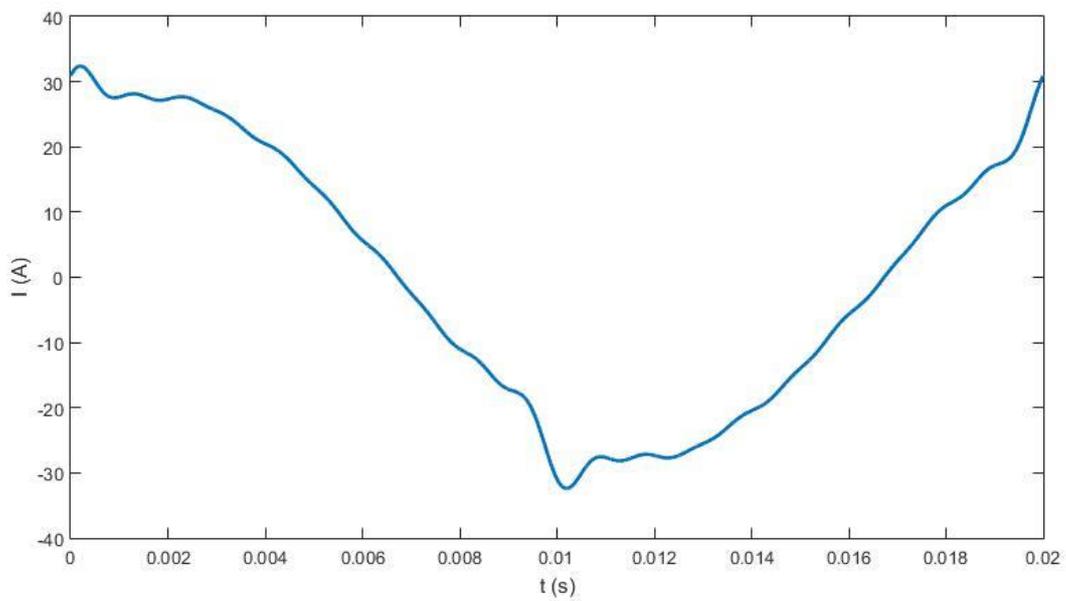


Figura 3-1 Onda de intensidad introducida en la 1ª simulación con armónicos en intensidad

Como era de esperar al introducir una onda de intensidad con armónicos, la tasa de distorsión armónica de intensidad calculada en base al algoritmo del IEEE no es nula. La distorsión de la onda de tensión sí sigue siendo nula.

$$THDi = 8.97\% \quad THDv = 0\%$$

	POTENCIA NO ACTIVA		P (W)	S (va)	PF
IEEE	N (var)	4115.4	2363.4	4745.8	0.4980
	Q_1 (var)	4093.5			
CONTADOR A	Q (var)	4093.5	2363.4	4745.8	0.5000
CONTADOR B	Q (var)	4115.4	2363.4	4745.8	0.4980
CONTADOR C	Q (var)	4093.5	2363.4	-	0.5000
BUDEANU	Q (var)	4093.5	2363.4	4745.8	-
	D	424.1			

Tabla 3-16 Resultados 1ª simulación con armónicos en intensidad.

Analizando los resultados expuestos en la Tabla 3-16 se observa que para todos los algoritmos se obtienen las mismas potencias activas y aparentes.

$$P_{IEEE} = P_{contA} = P_{contB} = P_{contC} = P_{Budeanu} \quad (3-62)$$

$$S_{IEEE} = S_{contA} = S_{contB} = S_{contC} = S_{Budeanu} \quad (3-63)$$

Sin embargo en la potencia no activa sí que se encuentran valores dispares dependiendo de que algoritmo se analice.

En los contadores A y C y en el algoritmo de Budeanu se obtiene una potencia reactiva que coincide con la potencia reactiva de la onda fundamental calculada por el algoritmo del IEEE.

$$Q_{IEEE} = Q_{contB} = Q_{contC} = Q_{Budeanu} \quad (3-64)$$

Dentro de estos tres algoritmos hay que diferenciar los contadores y Budeanu, ya que este resultado parece que viene producido por motivos diferentes.

En los contadores A y C se obtienen los mismos resultados de reactiva que la onda fundamental con lo que podríamos decir que no están sensibilizados en este escenario ante la introducción de una onda de intensidad contaminada con armónicos.

Sin embargo en el algoritmo de Budeanu, sí que este efecto provocado por los armónicos es visible ya que la potencia de distorsión D, en este caso pasa de ser 0 como en las simulaciones anteriores sin armónicos, a tener un valor positivo. Por lo que sí que se vería en este caso el efecto de los armónicos en esta medida.

En el caso del contador B se obtiene el mismo resultado que la potencia no activa (N) definida por el IEEE.

Todo este análisis queda resumido en la Tabla 3-17.

	P	Q
Contador A	Correcto	No refleja el efecto de los armónicos ($Q_{contA} = Q_{IEEE}$). Diferencia del 0.5% de N
Contador B	Correcto	Correcto
Contador C	Correcto	No refleja el efecto de los armónicos ($Q_{contC} = Q_{IEEE}$). Diferencia del 0.5% de N
Budeanu	Correcto	Correcto

Tabla 3-17 Resumen resultados 1ª Simulación con armónicos en intensidad

3.3.3.2 2ª Simulación. Armónicos en Intensidad.

En esta simulación se utilizarán los mismos límites de armónicos usados en la 1ª simulación, pero el ángulo de cada armónico se modificará respecto al ensayo anterior para comprobar si esto produce cambios significativos en las medidas.

I_{SC} / I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
< 20	4	2	1.5	0.6	0.3	5

Tabla 3-18 Límites máximos de armónicos 2ª simulación armónicos en intensidad.

Por lo tanto las ondas introducidas son las de la tabla 3-19.

k	V (V)	ϕ_V	I (A)	ϕ_I
0				
1	234	0°	20.2	60°
2				
3			0.808	25°
4				
5			0.808	37°
6				
7			0.808	18°
8				
9			0.808	54°
10				

k	V (V)	ϕ_V	I (A)	ϕ_I
11			0.404	73°
12				
13			0.404	12°
14				
15			0.404	19°
16				
17			0.303	39°
18				
19			0.303	64°
20				

Tabla 3-19 Ondas introducidas en la 2ª simulación con armónicos en Intensidad.

En la figura 3-2 se representa un periodo de la onda de intensidad introducida.

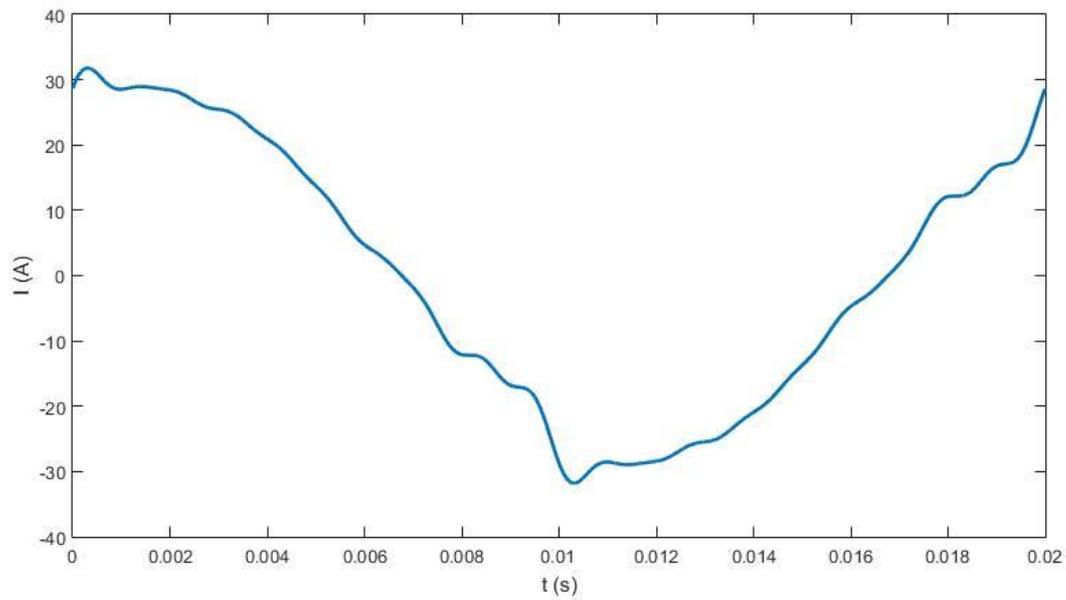


Figura 3-2 Onda de intensidad introducida en la 2ª simulación con armónicos en intensidad

La tasa de armónicos no varía con respecto al ejemplo anterior por lo que podemos deducir que en este caso el ángulo no tiene ningún efecto en este índice.

$$THDi = 8.97\% \quad THDv = 0\%$$

	POTENCIA NO ACTIVA		P (W)	S (va)	PF
IEEE	N (var)	4115.4	2363.4	4745.8	0.4980
	Q_1 (var)	4093.5			
CONTADOR A	Q (var)	4093.5	2363.4	4745.8	0.5000
CONTADOR B	Q (var)	4115.4	2363.4	4745.8	0.4980
CONTADOR C	Q (var)	4093.5	2363.4	-	0.5000
BUDEANU	Q (var)	4093.5	2363.4	4745.8	-
	D	424.1			

Tabla 3-20 Resultados 2ª simulación con armónicos en intensidad

En la tabla 3-20 se observa que no se produce ningún cambio en los resultados obtenidos respecto a la 1ª simulación, por lo que se deduce que la fase de los armónicos no tiene influencia en los resultados, en escenarios en los que solo se introduce armónicos en las ondas de intensidad. Al obtener los mismos resultados se extraen las mismas conclusiones acerca de los algoritmos que en la 1ª simulación con armónicos en la onda de intensidad.

3.3.3.3 3ª Simulación. Armónicos en intensidad

En esta simulación se utilizará un intervalo diferente de I_{cc} / I del Standard 519-2014 para la obtención de los límites de armónicos de este escenario. Estos límites serán los reflejados en la tabla 3-21.

I_{cc} / I	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
$20 < 50$	7	3.5	2.5	1	0.5	8

Tabla 3-21 Límites máximos de armónicos 3ª simulación armónicos en intensidad.

Utilizando los límites anteriores, las ondas introducidas serán las reflejadas en la tabla 3-22.

K	V (V)	ϕ_V	I (A)	ϕ_I
0				
1	248	0°	14.6	-19°
2				
3			1.022	-15°
4				
5			1.022	37°
6				
7			1.022	28°
8				
9			1.022	64°
10				

k	V (V)	ϕ_V	I (A)	ϕ_I
11			0.511	93°
12				
13			0.511	52°
14				
15			0.511	49°
16				
17			0.365	9°
18				
19			0.365	54°
20				

Tabla 3-22 Ondas introducidas en la 3ª simulación con armónicos en Intensidad.

En la figura 3-3 puede observarse un periodo de la onda de intensidad.

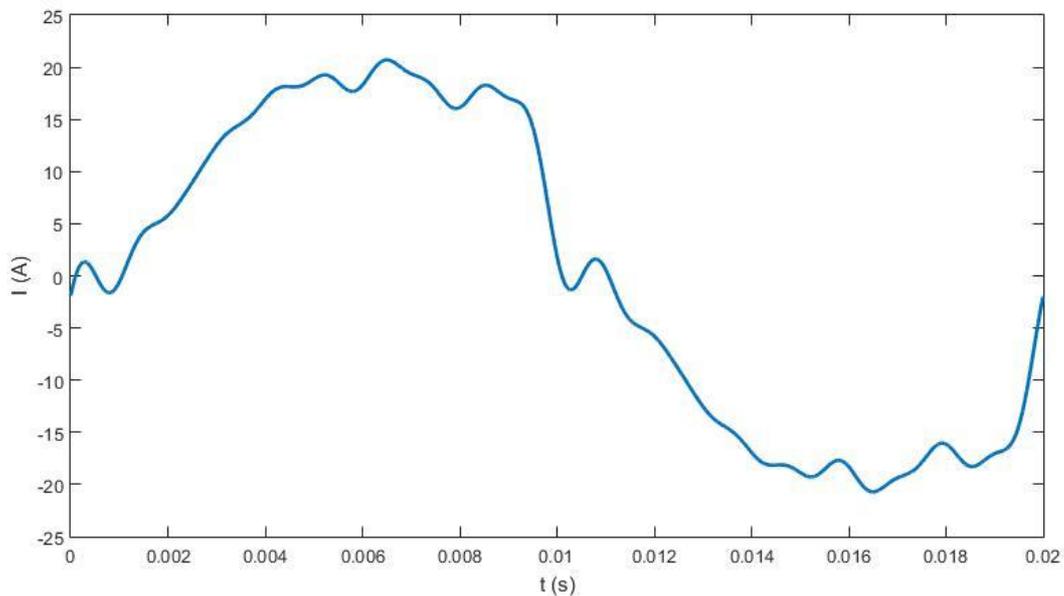


Figura 3-3 Onda de intensidad introducida en la 3ª simulación con armónicos en intensidad

La tasa de distorsión armónica en este caso es mayor llegando hasta el 15%.

$$THDi = 15.66\% \quad THDv = 0\%$$

	POTENCIA NO ACTIVA		P (W)	S (va)	PF
IEEE	N (var)	-1308.1	3423.5	3664.9	0.934
	Q_1 (var)	-1178.8			
CONTADOR A	Q (var)	-1178.8	3423.5	3664.9	0.945
CONTADOR B	Q (var)	-1308.1	3423.5	3664.9	0.934
CONTADOR C	Q (var)	-1178.8	3423.5	-	0.945
BUDEANU	Q (var)	-1178.8	3423.5	3664.9	-
	D	-567.03			

Tabla 3-23 Resultados 3ª simulación con armónicos en intensidad

Los resultados obtenidos en esta 3ª simulación, expuestos en la tabla 3-23, están en concordancia con los ejemplos anteriores, siendo todos los algoritmos capaces de obtener una potencia activa y aparente igual a la obtenida por el algoritmo del IEEE. Por lo tanto se consideran las medidas correctas.

En la potencia reactiva al igual que anteriormente, el contador B obtiene la misma medida que el algoritmo del IEEE.

$$Q_{contB} = N \quad (3-65)$$

Los contadores A y C sin embargo no reflejan la misma medida al no cuantificar el efecto de los armónicos, como se puede suponer al reflejar el mismo valor que la potencia reactiva de la onda fundamental propuesta por el IEEE. Esta diferencia representa un 9,88% del valor de N.

$$Q_{contB} = Q_{contC} = Q_{IEEE} \quad (3-66)$$

El algoritmo de Budeanu si tiene cuantificados los armónicos, no en su medida de potencia reactiva pero si en la potencia de distorsión.

Como resumen de estas conclusiones se introduce la tabla 3-24.

	P	Q
Contador A	Correcto	No refleja el efecto de los armónicos ($Q_{contA} = Q_{IEEE}$). Diferencia $\approx 10\%$ de N
Contador B	Correcto	Correcto
Contador C	Correcto	No refleja el efecto de los armónicos ($Q_{contC} = Q_{IEEE}$). Diferencia $\approx 10\%$ de N
Budeanu	Correcto	Correcto

Tabla 3-24 Resumen resultados 3ª Simulación con armónicos en intensidad

3.3.3.4 4ª Simulación. Armónicos en intensidad y componentes constantes de continua en tensión e intensidad.

En esta simulación además de una onda de intensidad contaminada con armónicos se introducirá una componente constante de continua en tensión e intensidad para poder determinar si los contadores son sensibles a la introducción de las dos perturbaciones a la vez. Se utilizarán los límites recogidos en la tabla 3-25.

I_{cc} / I	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
> 1000	15	7	6	2.5	1.4	20

Tabla 3-25 Límites máximos de armónicos 4ª simulación armónicos en intensidad.

Con estos límites se introducen al programa las ondas expuestas en la tabla 3-26.

k	V (V)	ϕ_V	I (A)	ϕ_I
0	35		8.4	
1	214	0°	35.2	29°
2				
3			5.280	47°
4				
5			5.280	95°
6				
7			5.280	37°
8				
9			5.280	58°
10				

k	V (V)	ϕ_V	I (A)	ϕ_I
11			2.464	120°
12				
13			2.464	15°
14				
15			2.464	48°
16				
17			2.112	79°
18				
19			2.112	32°
20				

Tabla 3-26 Ondas introducidas en la 4ª simulación con armónicos en Intensidad

La onda de intensidad queda muy distorsionada en este caso como se puede observar en la figura 3-4.

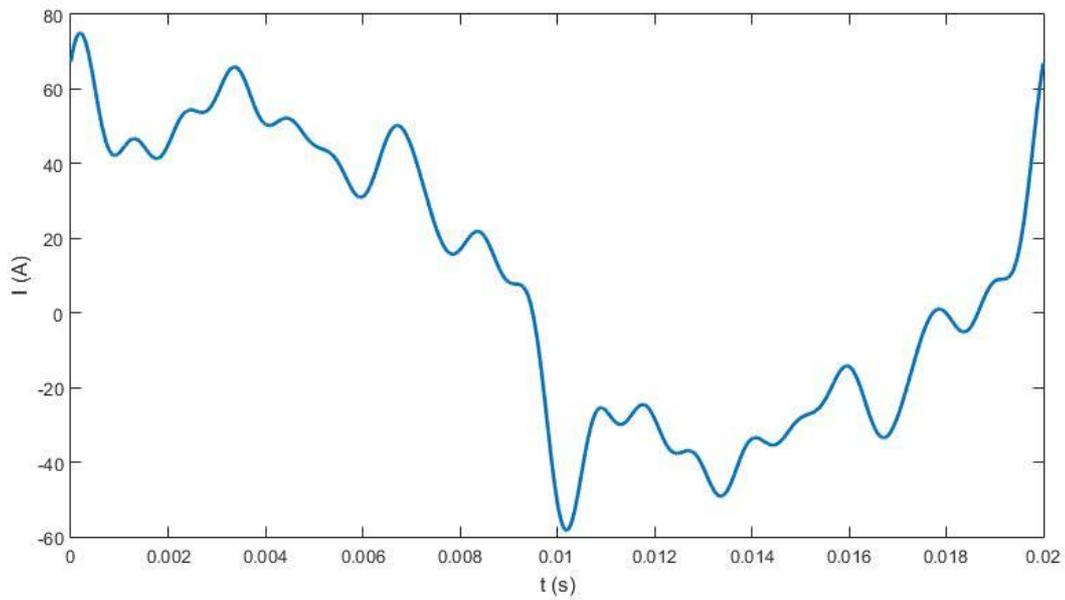


Figura 3-4 Onda de intensidad introducida en la 4ª simulación con armónicos en intensidad.

Las tasas de distorsión armónica son:

$$THDi = 41.09\% \quad THDv = 16.36\%$$

	POTENCIA NO ACTIVA		P (W)	S (va)	PF
IEEE	N (var)	4553.19	6882.34	8252.16	0.8340
	Q_1 (var)	3651.97			
CONTADOR A	Q (var)	3945.97	6882.34	8252.16	0.8675
CONTADOR B	Q (var)	4553.19	6882.34	8252.16	0.8340
CONTADOR C	Q (var)	3357.97	6882.34	-	0.8987
BUDEANU	Q (var)	3651.97	6588.34	7943.08	-
	D	2519.8			

Tabla 3-27 Resultados 4ª simulación con armónicos en intensidad

De los resultados expuestos en la tabla 3-27 se extraen varias conclusiones semejantes a las obtenidas anteriormente.

Para la potencia aparente y activa todos los algoritmos salvo el de Budeanu obtienen el mismo resultado, siendo este el mismo que el del algoritmo de referencia del IEEE.

$$P_{IEEE} = P_{contA} = P_{contB} = P_{contC} \neq P_{Budeanu} \quad (3-67)$$

$$S_{IEEE} = S_{contA} = S_{contB} = S_{contC} \neq S_{Budeanu} \quad (3-68)$$

La medida del algoritmo de Budeanu alcanza una diferencia de un 3,75% para la medida de la potencia aparente y de un 4,27% para la potencia activa.

Para la potencia no activa o reactiva, dependiendo de cómo es definida por cada algoritmo, el contador B es el único capaz de obtener la misma medida que el algoritmo del IEEE.

$$N = Q_{contB} \quad (3-69)$$

Los algoritmos de los contadores A y C como venía sucediendo en las simulaciones con armónicos en intensidad tienen medidas dispares entre sí y con el algoritmo del IEEE.

En las simulaciones anteriores se ha comprobado que la potencia reactiva de los contadores A y C en presencia de armónicos es igual a la obtenía únicamente por onda fundamental. Por tanto la diferencia en la medida encontrada para estos contadores se puede decir que viene por no ser sensibles a la introducción de armónicos en una única onda.

No ocurre así en este caso en el que a los armónicos se le añade unas componentes contantes de continua. Siendo la medida del contador A 294 var mayor que la potencia reactiva de la onda fundamental, y 294 var menor la del contador C.

Esto representa un diferencia relativa respecto al valor de la potencia no activa (N) del algoritmo del IEEE de un 13,33% para el contador A y de un 26,25% para el contador C.

Por otro lado el algoritmo de Budeanu en su potencia reactiva, como en simulaciones anteriores, es capaz de medir la reactiva de la onda fundamental sin tener en cuenta los armónicos ya que el resultado es el mismo que el reflejado por el IEEE en su potencia reactiva de la onda fundamental.

$$Q_{IEEE} = Q_{Budeanu} \quad (3-70)$$

El efecto de la inclusión de armónicos sí que se refleja en el resultado de la potencia de distorsión, no así el efecto de la componente de continua. Este hecho se ha comprobado realizando otra simulación con los mismos datos de entrada sin componentes constantes de continua. En esta simulación se ha comprobado que la potencia de distorsión (D) permanece constante para las dos simulaciones.

3.3.3.5 Conclusiones de los resultados de las simulaciones con armónicos en intensidad.

Con todas las reflexiones sacadas a partir de los resultados de las simulaciones realizadas para sistemas monofásicos con armónicos en intensidad. Se puede concluir, que en el caso de facturación únicamente por potencia activa, todos los algoritmos realizarían una medida ajustada al resultado del algoritmo del IEEE. Con la única excepción del caso de escenarios con componentes constantes de continua en las ondas en el que el algoritmo de Budeanu comienza a cometer errores en las medidas de potencia activa.

Para las situaciones en las que además de por potencia activa se facture por potencia reactiva, el único contador con una medida acorde a la referencia del algoritmo del IEEE, es el contador B.

Incurriendo los demás algoritmos en diferencias para esta medida.

Todas estas conclusiones, teniendo como referencia el algoritmo del IEEE, se resumen en la tabla 3-28.

	Solo armónicos en Intensidad		Armónicos en Intensidad y componentes constantes de continua.	
	P	Q	P	Q
Contador A	Correcto	No refleja el efecto de los armónicos. $Q_{IEEE} = Q_{contA}$ Diferencia en torno al 10%	Correcto	Diferencia por defecto $\approx 13\%$ de N
Contador B	Correcto	Correcto	Correcto	Correcto
Contador C	Correcto	No refleja el efecto de los armónicos $Q_{IEEE} = Q_{contC}$ Diferencia en torno al 10%	Correcto	Diferencia $\approx 26\%$ de N
Budeanu	Correcto	No refleja el efecto de los armónicos en Q pero sí en D	No refleja el efecto de la componente continua	No refleja el efecto de la componente continua

Tabla 3-28 Resumen resultados simulaciones con armónicos en intensidad

3.3.4 Armónicos en tensión

En este apartado se repetirá la serie de simulaciones del apartado anterior pero en este caso introduciendo una onda de tensión contaminada con armónicos en lugar de una de intensidad.

Para las ondas armónicas de tensión se han expuesto en el capítulo 2 de este trabajo dos normativas diferentes. Ambas se utilizarán en diferentes simulaciones.

El objetivo será observar que resultados arrojan los algoritmos ante la presencia de estas ondas contaminadas y hacer una comparación con las conclusiones obtenidas en los ensayos con ondas de intensidad contaminadas.

3.3.4.1 1ª Simulación. Armónicos en tensión

En este primer ensayo se utiliza el Standard 519-2014 del IEEE para el diseño de los límites de armónicos máximos. Se supondrá que el voltaje del sistema es siempre menor que 1 kV. Se elige así ya que, en principio, el ámbito de estudio de este trabajo son contadores de instalaciones de uso doméstico. Por lo tanto se extrae de la normativa los límites de armónicos expuestos en la tabla 3-29.

Tensión nominal	Tensión de distorsión de un armónico (%)	THDV total (%)
$V \leq 1 \text{ kV}$	5	8

Tabla 3-29 Límites máximos de armónicos 1ª simulación armónicos en tensión.

Teniendo en cuenta estos límites, se introducen para la simulación las ondas reflejadas en la tabla 3-30.

k	V (V)	ϕ_V	I (A)	ϕ_I
0				
1	247	19°	34.4	0°
2				
3	10.6	47°		
4				
5	9.4	15°		
6				
7	7.1	-47°		
8				
9	6.6	58°		
10				

k	V (V)	ϕ_V	I (A)	ϕ_I
11	6.3	120°		
12				
13	5.4	15°		
14				
15	2.6	48°		
16				
17	3.8	79°		
18				
19	2.3	32°		
20				

Tabla 3-30 Ondas introducidas en la 1ª simulación con armónicos en tensión

En la figura 3-5 se puede observar un ciclo de la onda de tensión contaminada que se introduce al sistema.

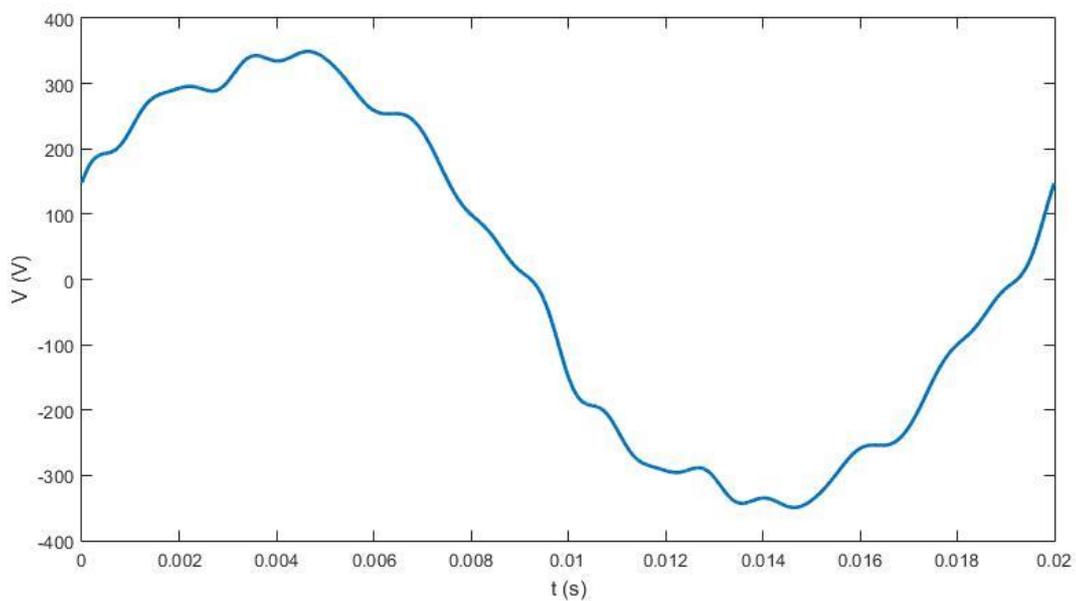


Figura 3-5 Onda de tensión introducida en la 1ª simulación con armónicos en tensión

En este caso la tasa de distorsión armónica de tensión es la que no tiene valor nulo al haber introducido una onda de tensión distorsionada.

$$THDi = 0\% \quad THDv = 7.995\%$$

	POTENCIA NO ACTIVA		P (W)	S (va)	PF
IEEE	N (var)	-2848.48	8033.88	8523.91	0.9425
	Q_1 (var)	-2766.28			
CONTADOR A	Q (var)	-2766.28	8033.88	8523.91	0.9455
CONTADOR B	Q (var)	-2848.48	8033.88	8523.91	0.9425
CONTADOR C	Q (var)	-2766.28	8033.88	-	0.9455
BUDEANU	Q (var)	-2766.28	8033.88	8523.91	-
	D	-679.37			

Tabla 3-31 Resultados 1ª simulación con armónicos en tensión

Analizando los resultados expuestos en la tabla 3-31 se extraen las mismas conclusiones que en el apartado anterior con armónicos en las ondas de intensidad.

Las potencias activas y aparentes medidas resultan iguales para todos los algoritmos, por lo tanto al ser su valor igual al del obtenido por el algoritmo de referencia se puede considerar que todos los contadores obtienen una medida correcta.

$$P_{IEEE} = P_{contA} = P_{contB} = P_{contC} = P_{Budeanu} \quad (3-71)$$

$$S_{IEEE} = S_{contA} = S_{contB} = S_{contC} = S_{Budeanu} \quad (3-72)$$

Respecto a la potencia no activa o reactiva de cada algoritmo, si se encuentran diferencias significativas en los resultados.

El contador B sí que obtiene la misma medida que la obtenida por el algoritmo del IEEE.

$$N = Q_{contB} \quad (3-73)$$

Los contadores A y C obtienen en su potencia reactiva el mismo valor que el obtenido por el algoritmo

del IEEE en su potencia reactiva de la onda fundamental. Por lo que se advierte que estos no tienen en cuenta la presencia de armónicos en la onda de tensión.

$$Q_{IEEE} = Q_{contA} = Q_{contC} \tag{3-74}$$

La diferencia entre estas medidas y la potencia no activa del algoritmo del IEEE es en torno al 3%.

El algoritmo de Budeanu, si bien en lo que se define en este algoritmo como potencia reactiva, solo refleja la potencia generada por la onda fundamental al igual que los contadores mencionados anteriormente.

$$Q_{IEEE} = Q_{Budeanu} \tag{3-75}$$

Los armónicos si vienen reflejados en la potencia de distorsión, que ya no es nula como en el caso sin armónicos.

Todo este análisis queda resumido en la Tabla 3-32.

	P	Q
Contador A	Correcto	No refleja el efecto de los armónicos ($Q_{contA} = Q_{IEEE}$). Diferencia 3% de N
Contador B	Correcto	Correcto
Contador C	Correcto	No refleja el efecto de los armónicos ($Q_{contC} = Q_{IEEE}$). Diferencia 3% de N
Budeanu	Correcto	Correcto

Tabla 3-32 Resumen resultados 1ª simulación con armónicos en tensión

3.3.4.2 2ª Simulación. Armónicos en tensión

En este segundo ensayo se proponen de nuevo los mismos límites que en el escenario anterior. Se realizará otra simulación con datos de entrada diferentes para comprobar la concordancia de las conclusiones obtenidas en el apartado anterior.

Tensión nominal	Tensión de distorsión de un armónico (%)	THDV total (%)
$V \leq 1 \text{ kV}$	5	8

Tabla 3-33 Límites máximos de armónicos 2ª simulación armónicos en tensión

En este caso se apurarán al máximo estos límites para ver cómo reaccionan los algoritmos en un escenario más desfavorable. Por tanto las ondas introducidas son las contenidas en la tabla 3-34.

k	V (V)	ϕ_V	I (A)	ϕ_I
0				
1	252	19°	29.4	0°
2				
3	12.6	47°		
4				
5	12.6	15°		
6				
7	12.6	-47°		
8				
9	12.6	58°		
10				

k	V (V)	ϕ_V	I (A)	ϕ_I
11	12.6	120°		
12				
13	12.6	15°		
14				
15	12.6	48°		
16				
17	12.6	79°		
18				
19	12.6	32°		
20				

Tabla 3-34 Ondas introducidas en la 2ª simulación con armónicos en tensión

En la figura 3-6 se observa como en este caso la onda de tensión aparece más distorsionada que en el apartado anterior.

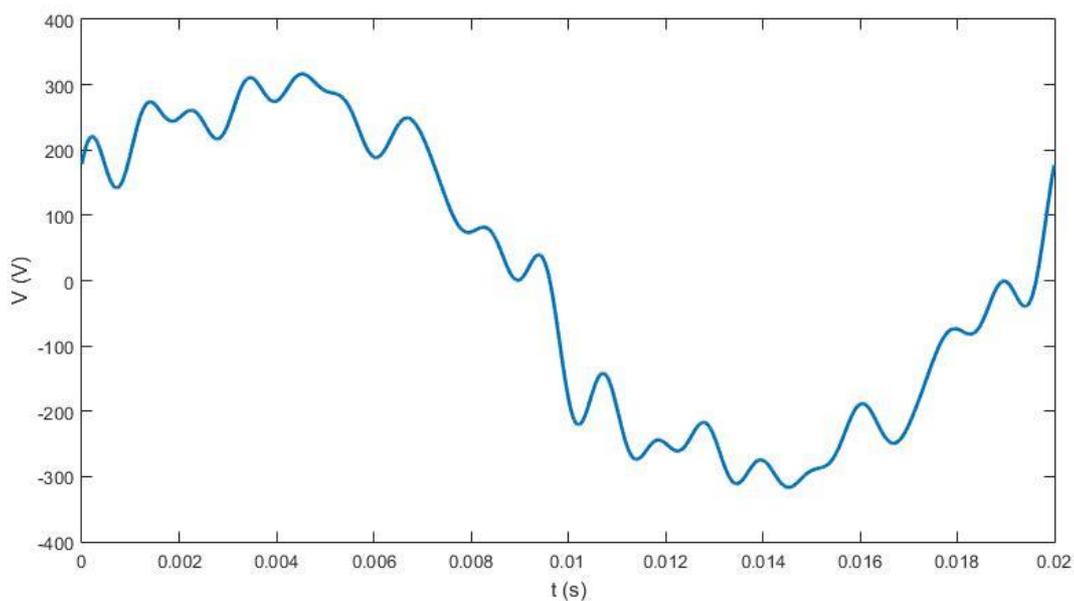


Figura 3-6 Onda de tensión introducida en la 2ª simulación con armónicos en tensión

La mayor distorsión de la onda de tensión observada en la representación se refleja en una tasa de distorsión mayor en este caso.

$$THDi = 0\% \quad THDv = 15\%$$

	POTENCIA NO ACTIVA		P (W)	S (va)	PF
IEEE	N (var)	-2655.77	7005.16	7491.68	0.9351
	Q_1 (var)	-2412.07			
CONTADOR A	Q (var)	-2412.07	7005.16	7491.68	0.9455
CONTADOR B	Q (var)	-2655.77	7005.16	7491.68	0.9351
CONTADOR C	Q (var)	-2412.07	7005.16	-	0.9455
BUDEANU	Q (var)	-2412.07	7005.16	7491.68	-
	D	-1111.32			

Tabla 3-35 Resultados 2ª simulación con armónicos en tensión

Comprobando los resultados reflejados en la tabla 3-35 se obtienen exactamente las mismas conclusiones que en la 1ª simulación de esta sección. En este caso con una diferencia para la potencia

reactiva de los contadores A y C de un 10%.

Este aumento de la diferencia es fruto del mayor peso de los armónicos en esta simulación y por tanto hay mayor porcentaje de la potencia reactiva que estos algoritmos no son capaces de cuantificar. Con lo que podemos concluir que esta diferencia será mayor, cuanto mayor sea la presencia de armónicos en el sistema.

3.3.4.3 3ª Simulación. Armónicos en tensión.

En esta simulación se utilizan los mismos límites que en la anterior, con la única diferencia que aquí todos los armónicos de tensión estarán en fase para detectar si se produce algún cambio significativo en los resultados.

Tensión nominal	Tensión de distorsión de un armónico (%)	THDV total (%)
$V \leq 1 \text{ kV}$	5	8

Tabla 3-36 Límites máximos de armónicos 3ª simulación armónicos en tensión.

Se introducen por tanto las ondas del ensayo anterior pero con los armónicos en fase con la fundamental como se puede constatar en la tabla 3-37.

k	V (V)	ϕ_V	I (A)	ϕ_I
0				
1	252	19°	29.4	0°
2				
3	12.6	19°		
4				
5	12.6	19°		
6				
7	12.6	19°		
8				
9	12.6	19°		
10				

k	V (V)	ϕ_V	I (A)	ϕ_I
11	12.6	19°		
12				
13	12.6	19°		
14				
15	12.6	19°		
16				
17	12.6	19°		
18				
19	12.6	19°		
20				

Tabla 3-37 Ondas introducidas en la 3ª simulación con armónicos en tensión

La representación de la onda de tensión se observa en la figura 3-7.

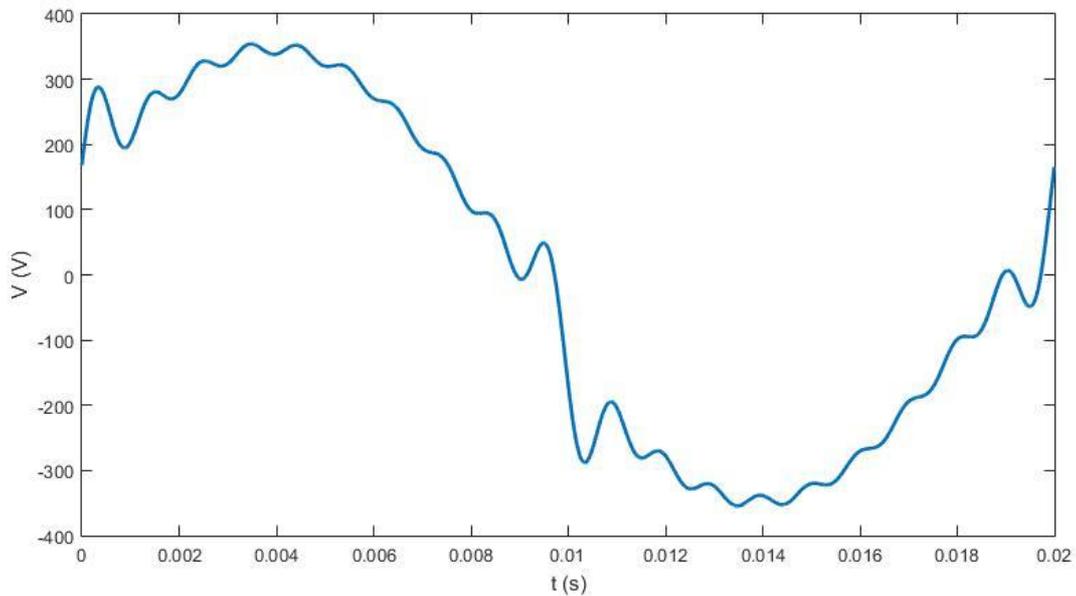


Figura 3-7 Onda de tensión introducida en la 3ª simulación con armónicos en tensión

La tasa de distorsión armónica no cambia al estar definida en función de los valores eficaces de la onda fundamental y los armónicos, que no han cambiado.

$$THDi = 0\% \quad THDv = 15\%$$

	POTENCIA NO ACTIVA		P (W)	S (va)	PF
IEEE	N (var)	-2655.77	7005.16	7491.68	0.9351
	Q_1 (var)	-2412.07			
CONTADOR A	Q (var)	-2412.07	7005.16	7491.68	0.9455
CONTADOR B	Q (var)	-2655.77	7005.16	7491.68	0.9351
CONTADOR C	Q (var)	-2412.07	7005.16	-	0.9455
BUDEANU	Q (var)	-2412.07	7005.16	7491.68	-
	D	-1111.32			

Tabla 3-38 Resultados 3ª simulación con armónicos en tensión

Los resultados obtenidos y reflejados en la tabla 3-38, son exactamente los mismos que se obtuvieron en la 2ª simulación por lo que podemos concluir que la fase de los armónicos en el caso de introducción de una onda de tensión contaminada con armónicos, no tiene efecto en el resultado de las potencias medidas.

Al obtener los mismos valores se siguen manteniendo las mismas conclusiones que el apartado anterior y que se recogen en la tabla 3-39.

	P	Q
Contador A	Correcto	No refleja el efecto de los armónicos ($Q_{contA} = Q_{IEEE}$). Diferencia 10% de N
Contador B	Correcto	Correcto
Contador C	Correcto	No refleja el efecto de los armónicos ($Q_{contC} = Q_{IEEE}$). Diferencia 10% de N
Budeanu	Correcto	Correcto

Tabla 3-39 Resumen resultados 3ª simulación con armónicos en tensión

3.3.4.4 4ª Simulación. Armónicos en tensión y componentes constantes de continua.

Se utilizarán en esta simulación los mismos límites que en las simulaciones anteriores, pero en este caso como se ha hecho ya en otras secciones, se introducirá en las ondas unas componentes constantes de continua. El objetivo será comprobar los efectos que producen en las medidas de los algoritmos las dos distorsiones al mismo tiempo. En la tabla 3-40 recogen los límites a utilizar.

Tensión nominal	Tensión de distorsión de un armónico (%)	THDV total (%)
$V \leq 1 \text{ kV}$	5	8

Tabla 3-40 Límites máximos de armónicos 4ª simulación armónicos en tensión

Las ondas introducidas al sistema teniendo en cuenta los límites de armónicos y la introducción de componentes constantes de continua son las de la tabla 3-41.

k	V (V)	ϕ_V	I (A)	ϕ_I
0	38		4.25	
1	217	0°	18.4	35°
2				
3	10.85	25°		
4				
5	10.85	32°		
6				
7	10.85	11°		
8				
9	10.85	68°		
10				

k	V (V)	ϕ_V	I (A)	ϕ_I
11	10.85	83°		
12				
13	10.85	119°		
14				
15	10.85	220°		
16				
17	10.85	300°		
18				
19	10.85	42°		
20				

Tabla 3-41 Ondas introducidas en la 4ª simulación con armónicos en tensión

La onda de tensión distorsionada se presenta en la figura 3-8.

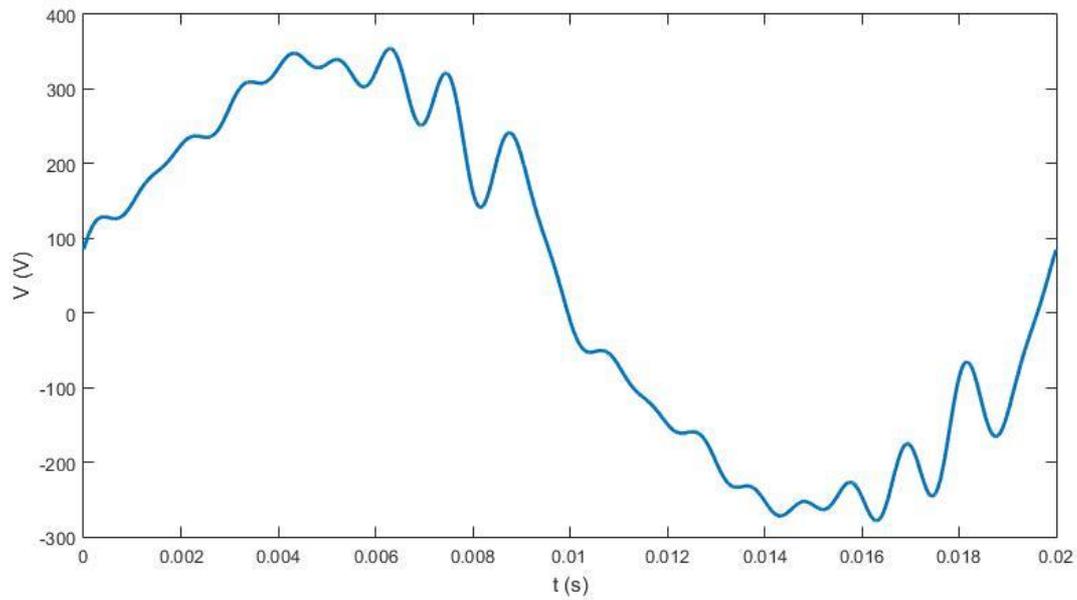


Figura 3-8 Onda de tensión introducida en la 4ª simulación con armónicos en tensión

Debido a la componente de continua se obtienen unas tasas de distorsión armónica altas en ambos indicadores.

$$THDi = 23.06\% \quad THDv = 23.09\%$$

	POTENCIA NO ACTIVA		P (W)	S (va)	PF
IEEE	N (var)	2430.17	3432.21	4205.45	0.8161
	Q_1 (var)	2290.18			
CONTADOR A	Q (var)	2451.67	3432.21	4205.45	0.8137
CONTADOR B	Q (var)	2430.17	3432.21	4205.45	0.8161
CONTADOR C	Q (var)	2128.67	3432.21	-	0.8498
BUDEANU	Q (var)	2290.18	3270.71	4037.47	-
	D	598.92			

Tabla 3-42 Resultados 4ª simulación con armónicos en tensión

De la tabla 3-42 se extraen las mismas conclusiones que se pudieron obtener de la simulación en el escenario con armónicos en intensidad y componentes constantes de continua.

Para la potencia aparente y activa todos los algoritmos, salvo el de Budeanu obtienen resultados iguales al algoritmo de referencia del IEEE.

$$P_{IEEE} = P_{contA} = P_{contB} = P_{contC} \neq P_{Budeanu} \quad (3-76)$$

$$S_{IEEE} = S_{contA} = S_{contB} = S_{contC} \neq S_{Budeanu} \quad (3-77)$$

La medida del algoritmo de Budeanu comete un error de un 4% para la medida de la potencia aparente y de un 4.7% para la potencia activa.

Para la potencia no activa o reactiva dependiendo de cómo la defina cada algoritmo, el contador B es el único capaz de obtener la misma medida que el algoritmo del IEEE.

$$N = Q_{contB} \quad (3-78)$$

Los algoritmos de los contadores A y C como venía sucediendo en las simulaciones con armónicos en tensión comenten si presentan diferentes medidas a la obtenida por el algoritmo del IEEE.

En las simulaciones anteriores se ha comprobado que la potencia reactiva en A y C, en presencia de armónicos, es igual a la obtenida únicamente por las ondas fundamentales.

En este caso, en el que al efecto de los armónicos se le añaden componentes constantes de continua, existe una diferencia para el contador A 161,5 var mayor que la potencia reactiva de la onda fundamental descrita por el IEEE, y 161,5 var menor para el contador C.

Esto representa una diferencia relativa respecto al valor de la potencia no activa (N) del algoritmo del IEEE de un 0,9% para el contador A y de un 12,4% para el contador C.

A tenor de estos resultados parece que hay una tendencia clara en que cuanto mayores son los valores de las componentes de continua, mayor es la diferencia de la medida de estos dos contadores respecto a la del IEEE.

Por otro lado la medida de potencia reactiva del algoritmo de Budeanu, como en simulaciones anteriores, es capaz de medir la reactiva de la onda fundamental sin tener en cuenta los armónicos ya que el resultado es el mismo que el reflejado por el IEEE en su potencia reactiva de la onda fundamental.

$$Q_{IEEE} = Q_{Budeanu} \quad (3-79)$$

El efecto de la inclusión de armónicos sí que se refleja en el resultado de la potencia de distorsión, no así el efecto de la componente de continua. Este hecho se ha comprobado realizando varias simulaciones con los mismos datos de entrada sin componentes constantes de continua. En esta

simulación se ha comprobado que la potencia de distorsión (D) permanece constante para las dos simulaciones.

Todo este análisis queda resumido en la tabla 3-43.

	Armónicos en tensión y componentes constantes de continua.	
	P	Q
Contador A	Correcto	Diferencia por defecto $\approx 0,9\%$ de N
Contador B	Correcto	Correcto
Contador C	Correcto	Diferencia $\approx 12,4\%$ de N
Budeanu	No refleja el efecto de la componente continua. Diferencia del 4,7%	No refleja el efecto de la componente continua. Diferencia del 2,59% de N

Tabla 3-43 Resumen resultados 4ª simulación con armónicos en tensión

3.3.4.5 5ª Simulación. Armónicos en tensión.

En esta simulación se utilizará una normativa diferente para el cálculo de los límites armónicos del escenario a diseñar. Estos serán los límites que establece la norma IEC 6001-2-2. En un primer momento se introducirán solo armónicos impares como hasta ahora.

Se buscará ratificar las conclusiones anteriores con otros límites, para certificar que se pueden dar por válidas sea cual la presencia de armónicos en el sistema.

Los límites utilizados se exponen en la tabla 3-44.

Armónicos impares no múltiplos de 3		Armónicos impares múltiplos de 3		Armónicos pares	
Orden del armónico	Tensión del armónico	Orden del armónico	Tensión del armónico	Orden del armónico	Tensión del armónico
h	%	h	%	h	%
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	0.5
$17 \leq h \leq 49$	$2.27 \times (17/h) - 0.27$	$21 \leq h \leq 45$	0.2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25 \times (10/h) + 0.25$

Tabla 3-44 Límites máximos de armónicos 5ª simulación armónicos en tensión

Con estos límites las ondas introducidas serán las de la tabla 3-45.

k	V (V)	ϕ_V	I (A)	ϕ_I
0				
1	236	0°	28.7	76°
2				
3	11.80	25°		
4				
5	14.16	32°		
6				
7	11.80	11°		
8				
9	3.54	68°		
10				

k	V (V)	ϕ_V	I (A)	ϕ_I
11	8.26	83°		
12				
13	7.08	119°		
14				
15	0.944	220°		
16				
17	3.9108	300°		
18				
19	3.347	42°		
20				

Tabla 3-45 Ondas introducidas en la 5ª simulación con armónicos en tensión

La onda de tensión representada frente al tiempo queda como se observa en la figura 3-9.

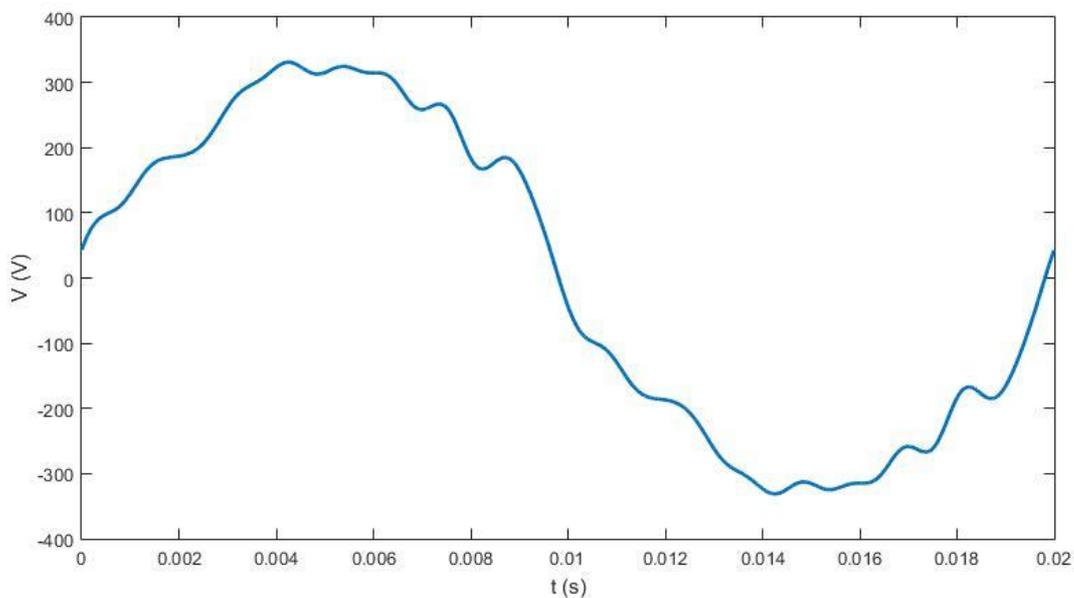


Figura 3-9 Onda de tensión introducida en la 5ª simulación con armónicos en tensión

La tasa de distorsión armónica con estas condiciones es:

$$THDi = 0\% \quad THDv = 10.6966\%$$

	POTENCIA NO ACTIVA		P (W)	S (va)	PF
IEEE	N (var)	6611.82	1638.58	6811.84	0.2405
	Q_1 (var)	6572.00			
CONTADOR A	Q (var)	6572.00	1638.58	6811.84	0.2419
CONTADOR B	Q (var)	6611.82	1638.58	6811.84	0.2405
CONTADOR C	Q (var)	6572.00	1638.58	-	0.2419
BUDEANU	Q (var)	6572.00	1638.58	6811.84	-
	D	724.50			

Tabla 3-46 Límites máximos de armónicos 5ª simulación armónicos en tensión

Observando los resultados de la tabla 3-46 se extraen las mismas tendencias y conclusiones que en las simulaciones anteriores con escenarios de ondas de tensión contaminadas.

En este caso lo único que varía con respecto a simulaciones anteriores, es la magnitud de la diferencia entre los contadores A y C y el algoritmo del IEEE en la medida de potencia reactiva. En este caso esta diferencia es de alrededor del 0,6%, bastante menor que en simulaciones anteriores ya que el peso de los armónicos en este escenario es mucho menor que anteriormente.

En la tabla 3-47 se exponen estas conclusiones.

	P	Q
Contador A	Correcto	No refleja el efecto de los armónicos ($Q_{contA} = Q_{IEEE}$). Diferencia 0,6% de N
Contador B	Correcto	Correcto
Contador C	Correcto	No refleja el efecto de los armónicos ($Q_{contC} = Q_{IEEE}$). Diferencia 0,6% de N
Budeanu	Correcto	Correcto

Tabla 3-47 Resumen resultados 5ª simulación con armónicos en tensión

3.3.4.6 6ª Simulación. Armónicos en tensión.

En esta nueva simulación se utilizarán los mismos límites que la anterior para el diseño de las ondas a introducir. Estos límites son los expuestos en la tabla 3-48.

En este caso se introducirán también armónicos pares, y no solo impares como se venía haciendo hasta ahora. Esto se ha hecho bajo la suposición de que son los únicos que se encuentran en los sistemas de corriente alterna al ser los pares anulados debido a la simetría de onda.

El objetivo será certificar que ante una mayor presencia de armónicos los algoritmos se siguen comportando de la misma forma.

Armónicos impares no múltiplos de 3		Armónicos impares múltiplos de 3		Armónicos pares	
Orden del armónico	Tensión del armónico	Orden del armónico	Tensión del armónico	Orden del armónico	Tensión del armónico
h	%	h	%	h	%
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	0.5
$17 \leq h \leq 49$	$2.27 \times (17/h) - 0.27$	$21 \leq h \leq 45$	0.2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25 \times (10/h) + 0.25$

Tabla 3-48 Límites máximos de armónicos 6ª simulación armónicos en tensión

Con lo que las ondas introducidas son las de la tabla 3-49.

k	V (V)	φ_V	I (A)	φ_I
0				
1	236	0°	28.7	76°
2	4.72	11°		
3	11.80	25°		
4	2.36	150°		
5	14.16	32°		
6	1.18	68°		
7	11.80	11°		
8	1.18	5°		
9	3.54	68°		
10	1.18	280°		

k	V (V)	φ_V	I (A)	φ_I
11	8.26	83°		
12	1.1264	69°		
13	7.08	119°		
14	1.0114	145°		
15	0.944	220°		
16	0.9587	40°		
17	3.9108	300°		
18	0.9177	23°		
19	3.347	42°		
20	0.885	210°		

Tabla 3-49 Ondas introducidas en la 6ª simulación con armónicos en tensión

En la figura 3-10 se puede ver la representación de la onda de tensión introducida.

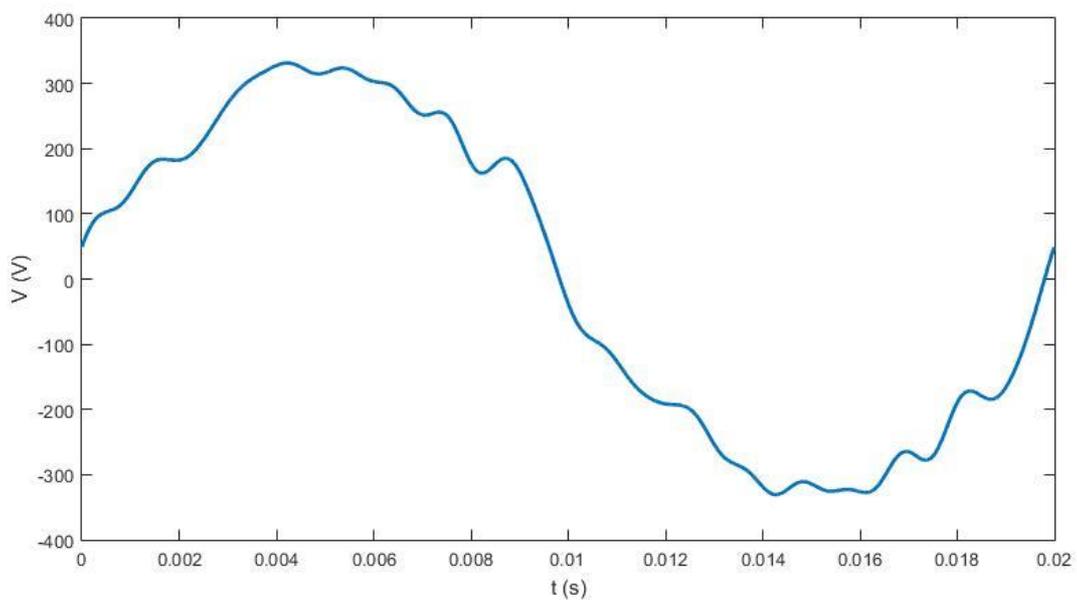


Figura 3-10 Onda de tensión introducida en la 6ª simulación con armónicos en tensión

Con esto la tasa de distorsión armónica que calcula el algoritmo del IEEE es:

$$THDi = 0\% \quad THDv = 11.0016\%$$

	POTENCIA NO ACTIVA		P (W)	S (va)	PF
IEEE	N (var)	6614.12	1638.58	6814.07	0.2405
	Q_1 (var)	6572.01			
CONTADOR A	Q (var)	6572.01	1638.58	6814.07	0.2419
CONTADOR B	Q (var)	6614.12	1638.58	6814.07	0.2405
CONTADOR C	Q (var)	6572.01	1638.58	-	0.2419
BUDEANU	Q (var)	6572.01	1638.58	6814.07	-
	D	745.16			

Tabla 3-50 Resultados 6ª simulación con armónicos en tensión

Los resultados de esta simulación reflejados en la tabla 3-50 ratifican las conclusiones obtenidas en las simulaciones anteriores. Debido a lo cual, se puede concluir que la presencia de armónicos pares no afecta en la forma en la que los contadores reaccionan a estos escenarios con onda de tensión contaminadas.

Como anteriormente, las potencias activas y aparentes son la misma para todos los algoritmos e iguales a la del algoritmo de referencia del IEEE.

Para la reactiva los contadores A y C siguen obteniendo una medida igual a la potencia reactiva de la onda fundamental que obtiene el algoritmo del IEEE. Por lo tanto en este escenario obtiene un diferencia respecto a N del 0.6%.

3.3.4.7 Conclusiones de las simulaciones con armónicos en tensión.

Analizando todas las conclusiones sacadas de los resultados de las simulaciones realizadas, se puede concluir que en el caso de facturación únicamente por potencia activa, todos los algoritmos realizarían una medida ajustada al resultado del algoritmo del IEEE. Con la única excepción de los casos de escenarios con componentes constantes de continua en las ondas, en los que el algoritmo de Budeanu comienza a obtener medidas dispares en las medidas de potencia activa.

Para las situaciones en las que además de por potencia activa se facture por potencia reactiva, el único contador con una medida igual a la tomada como referencia del IEEE, es el contador B. Incurriendo los demás algoritmos en diferentes disparidades en esta medida.

Todas estas conclusiones se resumen en la tabla 3-51.

	Solo armónicos en tensión		Armónicos en tensión y componentes constantes de continua.	
	P	Q	P	Q
Contador A	Correcto	No refleja el efecto de los armónicos. $Q_{IEEE} = Q_{contA}$ Diferencia entre el 0,5% y el 10%	Correcto	Diferencia por defecto $\approx 0,9\%$ de N
Contador B	Correcto	Correcto	Correcto	Correcto
Contador C	Correcto	No refleja el efecto de los armónicos $Q_{IEEE} = Q_{contC}$ Diferencia entre el 0,5% y el 10%	Correcto	Diferencia $\approx 12,4\%$ de N
Budeanu	Correcto	Correcto	No refleja el efecto de la componente continua	No refleja el efecto de la componente continua

Tabla 3-51 Resumen resultados simulaciones con armónicos en tensión

En la tabla 3-52 se expresa la tendencia de los diferencias entre las medidas en función de las variables del escenario.

	Solo armónicos en tensión		Armónicos en tensión y componentes constantes de continua.	
	P	Q	P	Q
Contador A	Correcto	Si $\uparrow THD$ entonces $\uparrow Diferencia$	Correcto	Si $\uparrow V_0, I_0$ entonces $\uparrow Diferencia$
Contador B	Correcto	Correcto	Correcto	Correcto
Contador C	Correcto	Si $\uparrow THD$ entonces $\uparrow Diferencia$	Correcto	Si $\uparrow V_0, I_0$ entonces $\uparrow Diferencia$
Budeanu	Correcto	Correcto	Si $\uparrow V_0, I_0$ entonces $\uparrow Diferencia$	Si $\uparrow V_0, I_0$ entonces $\uparrow Diferencia$

Tabla 3-52 Resumen tendencias errores simulaciones con armónicos en tensión

3.3.5 Armónicos en intensidad y tensión

En este apartado se realizarán simulaciones en las que se introducirán ondas contaminadas con armónicos tanto en tensión como de intensidad. Esto servirá para analizar qué resultados obtienen los algoritmos ante la presencia de ondas contaminadas en ambas magnitudes simultáneamente.

Cabe recordar que en los sistemas reales es complicado encontrar ondas completamente perfectas, por lo que el caso de estudio de este apartado es el que más se ajusta a la realidad que se puede encontrar en cualquier sistema de baja tensión.

Para cada simulación se seguirá el mismo procedimiento que es secciones anteriores. Se respetarán unos límites máximos de armónicos dados por las normativas expuestas en el capítulo 2. A continuación se diseñara la onda a introducir al sistema. Para luego implementarla en el software y extraer los resultados de las magnitudes de potencia que obtiene cada algoritmo analizado.

Una vez obtenidas las medidas de cada algoritmo se comparan con el de referencia para sacar las conclusiones pertinentes.

3.3.5.1 1ª Simulación. Armónicos en intensidad y tensión.

Para esta primera simulación se tomarán como límites de armónicos los propuestos por el Standard 519-2014. Para la tensión estos límites serán los expuestos en la tabla 3-53. Así como para la intensidad los de la tabla 3-54.

Tensión nominal	Tensión de distorsión de un armónico (%)	THDV total (%)
$V \leq 1 \text{ kV}$	5	8

Tabla 3-53 Límites máximos de armónicos en tensión 1ª simulación armónicos en intensidad y tensión

I_{cc} / I	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
$20 < 50$	7	3.5	2.5	1	0.5	8

Tabla 3-54 Límites máximos de armónicos en intensidad 1ª simulación armónicos en intensidad y tensión

En este ensayo las ondas armónicas de tensión e intensidad se supondrán que están en fase con sus ondas fundamentales. Esto servirá para analizar en los siguientes apartados si influye la fase de esos armónicos en los resultados que obtienen los algoritmos. Las ondas introducidas al sistema son las expuestas en la tabla 3-55.

k	V (V)	φ_V	I (A)	φ_I
0				
1	259	0°	42.8	35°
2				
3	12.95	0°	2.996	35°
4				
5	12.95	0°	2.996	35°
6				
7	12.95	0°	2.996	35°
8				
9	12.95	0°	2.996	35°
10				

k	V (V)	φ_V	I (A)	φ_I
11	12.95	0°	1.498	35°
12				
13	12.95	0°	1.498	35°
14				
15	12.95	0°	1.498	35°
16				
17	12.95	0°	1.07	35°
18				
19	12.95	0°	1.07	35°
20				

Tabla 3-55 Ondas introducidas en la 1ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

La representación del sumatorio de la onda fundamental de tensión y todos sus armónicos se puede observar en la figura 3-11.

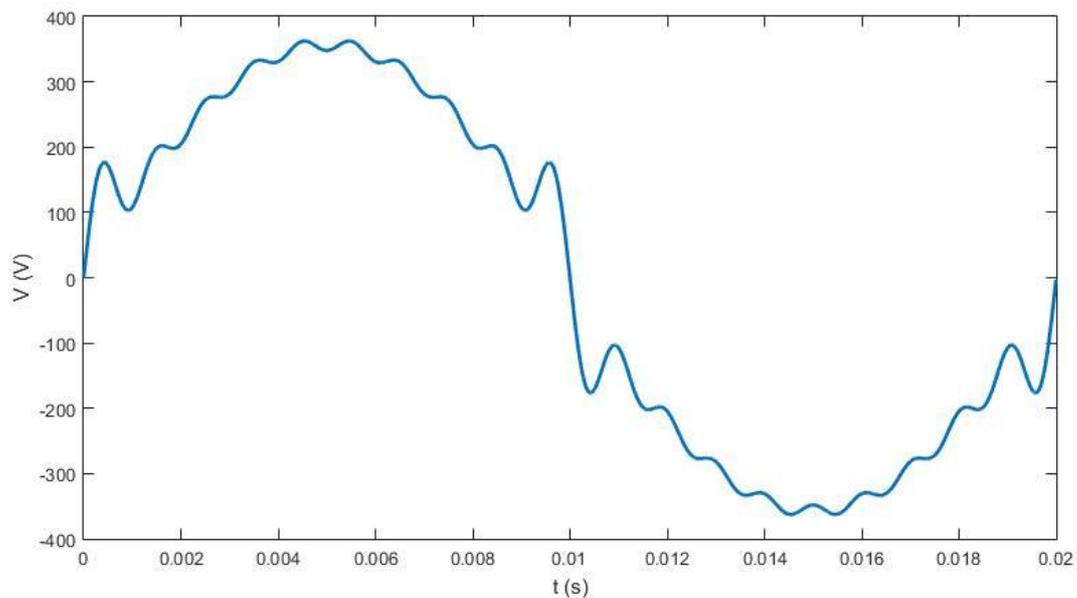


Figura 3-11 Onda de tensión introducida en la 1ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

Quedando el mismo sumatorio para la onda de intensidad como se observa en la figura 3-12.

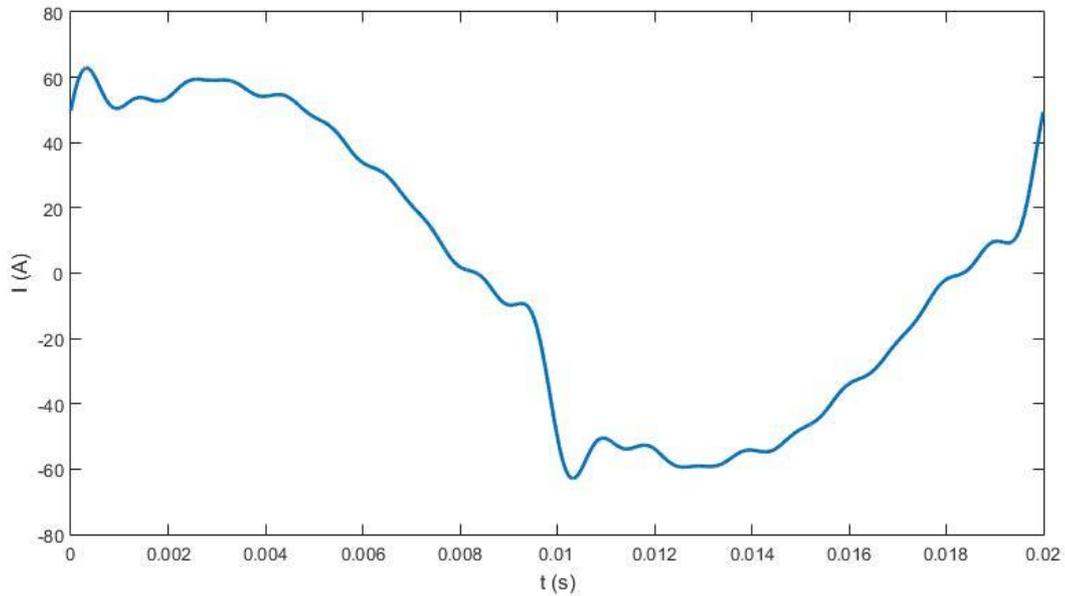


Figura 3-12 Onda de intensidad introducida en la 1ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

Las tasas de distorsión armónica de estas ondas son:

$$THD_I = 15.6605\% \quad THD_V = 15\%$$

	POTENCIA NO ACTIVA		P (W)	S (va)	PF
IEEE	N (var)	6530.49	9277.96	11345.83	0.8177
	Q_1 (var)	6358.21			
CONTADOR A	Q (var)	6347.08	9277.96	11345.83	0.8253
CONTADOR B	Q (var)	6530.49	9277.96	11345.83	0.8177
CONTADOR C	Q (var)	-6347.08	9277.96	-	0.8253
BUDEANU	Q (var)	6496.50	9277.96	11345.83	-
	D	665.46			

Tabla 3-56 Resultados 1ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

Los resultados recogidos en la tabla 3-56 muestran cualitativamente los mismos efectos recogidos en secciones anteriores.

Esto es, en lo referente a la potencia activa y la aparente todos los algoritmos obtienen las mismas medidas que el algoritmo del IEEE.

$$P_{IEEE} = P_{contA} = P_{contB} = P_{contC} = P_{Budeanu} \quad (3-80)$$

$$S_{IEEE} = S_{contA} = S_{contB} = S_{contC} = S_{Budeanu} \quad (3-81)$$

En el caso de la potencia reactiva el único medidor que es capaz de obtener una medición igual a la del IEEE, como ya venía ocurriendo, es el contador B.

$$N = Q_{contB} \quad (3-82)$$

El algoritmo de Budeanu también tiene en cuenta el efecto de los armónicos.

$$N = \sqrt{Q_{Budeanu}^2 + D_{Budeanu}^2} \quad (3-83)$$

Los contadores A y C son sensibles a la introducción de los armónicos en el sistema ya que a diferencia de secciones anteriores su medición difiere de la de la potencia aparente de la onda fundamental.

$$Q_{IEEE} \neq Q_{contA} = Q_{contC} \quad (3-84)$$

Esta sensibilidad sin embargo no llega a materializarse en una medición de la potencia reactiva igual a la del IEEE.

$$N \neq Q_{contA} = Q_{contC} \quad (3-85)$$

La diferencia entre estas medidas es del 2,8% de N.

Como resumen de las conclusiones sacadas de los resultados de esta simulación se presenta la tabla 3-57.

	P	Q
Contador A	Correcto	Diferencia 2,8% de N
Contador B	Correcto	Correcto
Contador C	Correcto	Diferencia 2,8% de N
Budeanu	Correcto	Correcto

Tabla 3-57 Resumen resultados 1ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

3.3.5.2 2ª Simulación. Armónicos en intensidad y tensión.

En esta segunda simulación se propone un escenario para el que se utilizarán las mismas normativas y límites que en la simulación anterior.

En este caso las ondas armónicas de intensidad no se van introducir en fase con la fundamental. Para ver si esto tiene algún efecto en los resultados. Los límites que se utilizarán aparecen en las tablas 3-58 y en la tabla 3-59.

Tensión nominal	Tensión de distorsión de un armónico (%)	THDV total (%)
$V \leq 1 \text{ kV}$	5	8

Tabla 3-58 Límites máximos de armónicos en tensión 2ª simulación armónicos en intensidad y tensión

I_{cc} / I	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
$20 < 50$	7	3.5	2.5	1	0.5	8

Tabla 3-59 Límites máximos de armónicos en intensidad 2ª simulación armónicos en intensidad y tensión

Las ondas introducidas serán las expuestas en la tabla 3-6.

k	V (V)	φ_V	I (A)	φ_I
0				
1	259	0°	42.8	35°
2				
3	12.95	0°	2.996	25°
4				
5	12.95	0°	2.996	150°
6				
7	12.95	0°	2.996	0°
8				
9	12.95	0°	2.996	18°
10				

k	V (V)	φ_V	I (A)	φ_I
11	12.95	0°	1.498	74°
12				
13	12.95	0°	1.498	23°
14				
15	12.95	0°	1.498	251°
16				
17	12.95	0°	1.07	34°
18				
19	12.95	0°	1.07	126°
20				

Tabla 3-60 Ondas introducidas en la 2ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

Las figuras 3-13 y 3-14 muestran las ondas contaminadas de tensión e intensidad que se introducen al sistema.

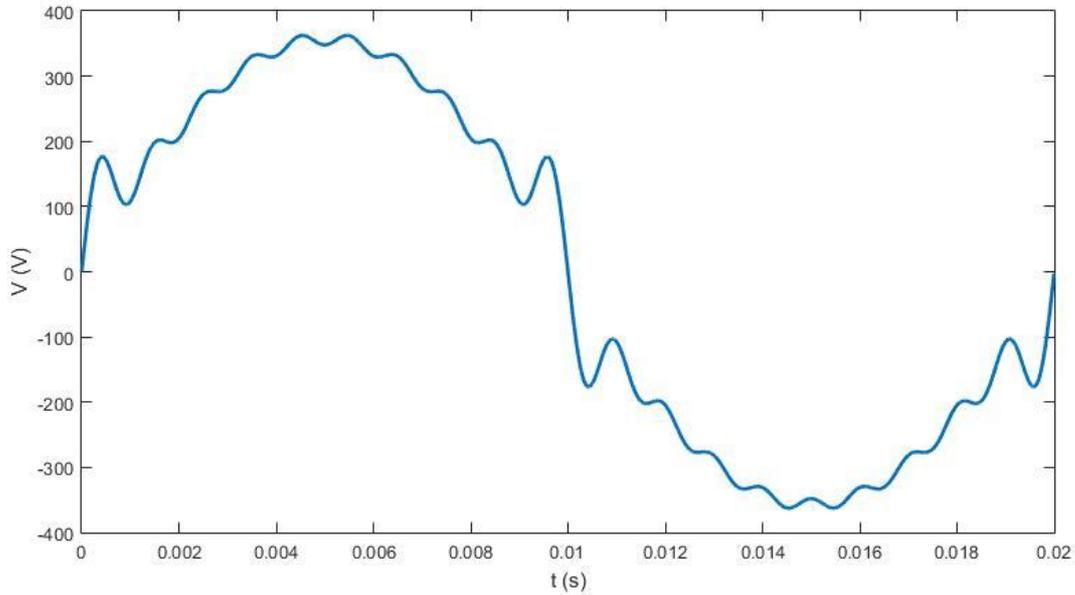


Figura 3-13 Onda de tensión introducida en la 2ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

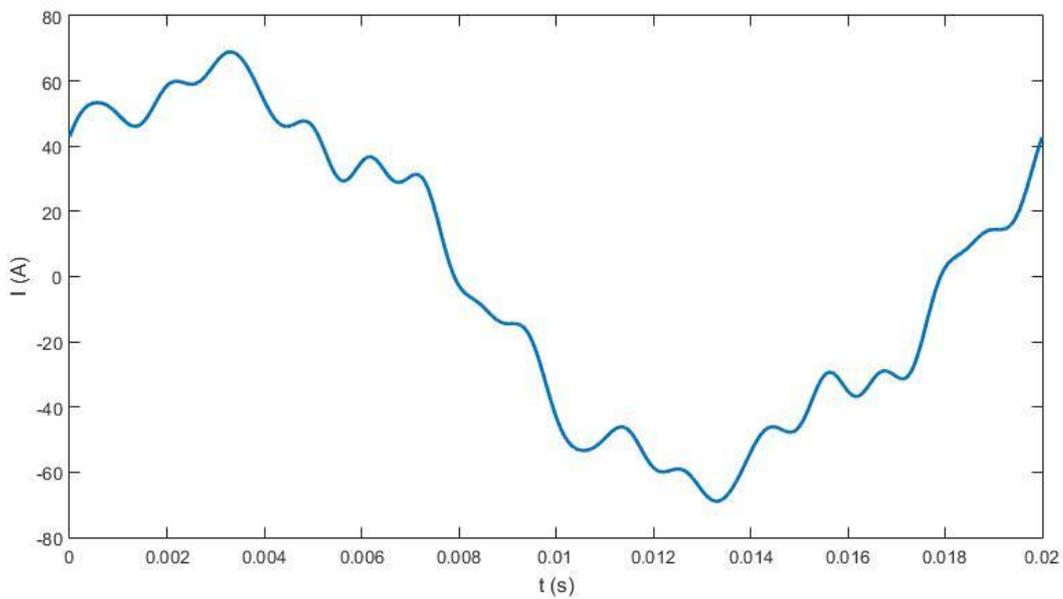


Figura 3-14 Onda de intensidad introducida en la 2ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

Las tasas de distorsión armónica no cambian respecto al ensayo anterior ya que la fase no influye en su obtención.

$$THD_I = 15.6605\% \quad THD_V = 15\%$$

	POTENCIA NO ACTIVA		P (W)	S (va)	PF
IEEE	N (var)	6670.31	9177.95	11345.83	0.8089
	Q_1 (var)	6358.21			
CONTADOR A	Q (var)	6377.01	9177.95	11345.83	0.8212
CONTADOR B	Q (var)	6670.31	9177.95	11345.83	0.8089
CONTADOR C	Q (var)	6377.01	9177.95	-	0.8212
BUDEANU	Q (var)	6432.84	9177.95	11345.83	-
	D	1763.99			

Tabla 3-61 Resultados 2ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

Las conclusiones que se pueden sacar de los resultados expuestos en la tabla 3-61 no varían respecto a las de la simulación anterior.

La potencia aparente no ha variado al tener los dos escenarios los mismos valores eficaces de tensión e intensidad para todos los armónicos.

Lo que cambia es la distribución de dicha potencia entre activa y reactiva.

Todos los algoritmos siguen midiendo correctamente las potencias activa y aparente ya que obtienen la misma medida que el algoritmo del IEEE.

$$P_{IEEE} = P_{contA} = P_{contB} = P_{contC} = P_{Budeanu} \quad (3-86)$$

$$S_{IEEE} = S_{contA} = S_{contB} = S_{contC} = S_{Budeanu} \quad (3-87)$$

Con respecto a la simulación anterior, la diferencia en la medida de la potencia reactiva por los contadores A y C aumenta, llegando hasta el 4,39%. Esto es debido a que el valor de la potencia reactiva de la onda fundamental no varía al no variar las ondas fundamentales introducidas al sistema. Sin embargo el valor de la potencia reactiva total si aumenta debido al cambio de fase de algunos armónicos, de ahí el mayor error cometido.

Se puede concluir que el ángulo afecta al resultado de la potencia activa y reactiva de forma cuantitativa pero no cualitativa.

3.3.5.3 3ª Simulación. Armónicos en intensidad y tensión.

En esta nueva simulación se utilizarán los mismos límites que en las pruebas anteriores y en este caso los ángulos de tensión e intensidad serán totalmente aleatorios. Esta simulación servirá para corroborar el comportamiento en las medidas observado en las simulaciones anteriores.

En las tablas 3-62 y 3-63 se pueden consultar los límites utilizados para el diseño del escenario.

Tensión nominal	Tensión de distorsión de un armónico (%)	THDV total (%)
$V \leq 1 \text{ kV}$	5	8

Tabla 3-62 Límites máximos de armónicos en tensión 3ª simulación armónicos en intensidad y tensión

I_{cc} / I	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
$20 < 50$	7	3.5	2.5	1	0.5	8

Tabla 3-63 Límites máximos de armónicos en intensidad 3ª simulación armónicos en intensidad y tensión

Las ondas diseñadas con estos límites son las expuestas en la tabla 3-64.

k	V (V)	φ_V	I (A)	φ_I
0				
1	259	0°	42.8	35°
2				
3	12.95	48°	2.996	25°
4				
5	12.95	20°	2.996	150°
6				
7	12.95	79°	2.996	0°
8				
9	12.95	300°	2.996	18°
10				

k	V (V)	φ_V	I (A)	φ_I
11	12.95	50°	1.498	74°
12				
13	12.95	85°	1.498	23°
14				
15	12.95	116°	1.498	251°
16				
17	12.95	254°	1.07	34°
18				
19	12.95	40°	1.07	126°
20				

Tabla 3-64 Ondas introducidas en la 3ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

Como anteriormente se muestra gráficamente las ondas de tensión e intensidad introducidas al sistema en las figuras 3-15 y en la figura 3-16 respectivamente.

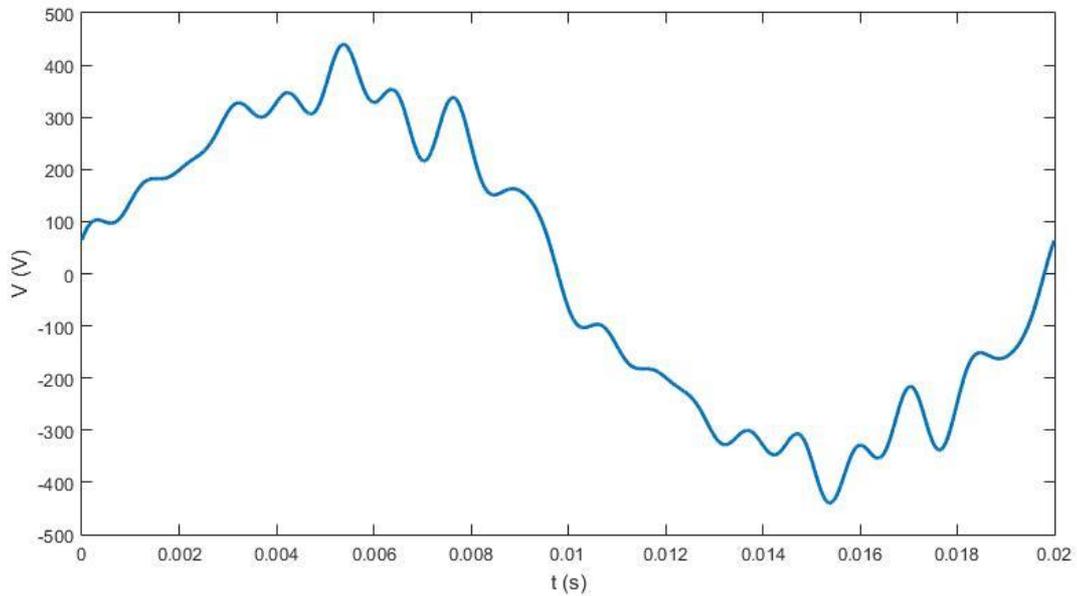


Figura 3-15 Onda de tensión introducida en la 3ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

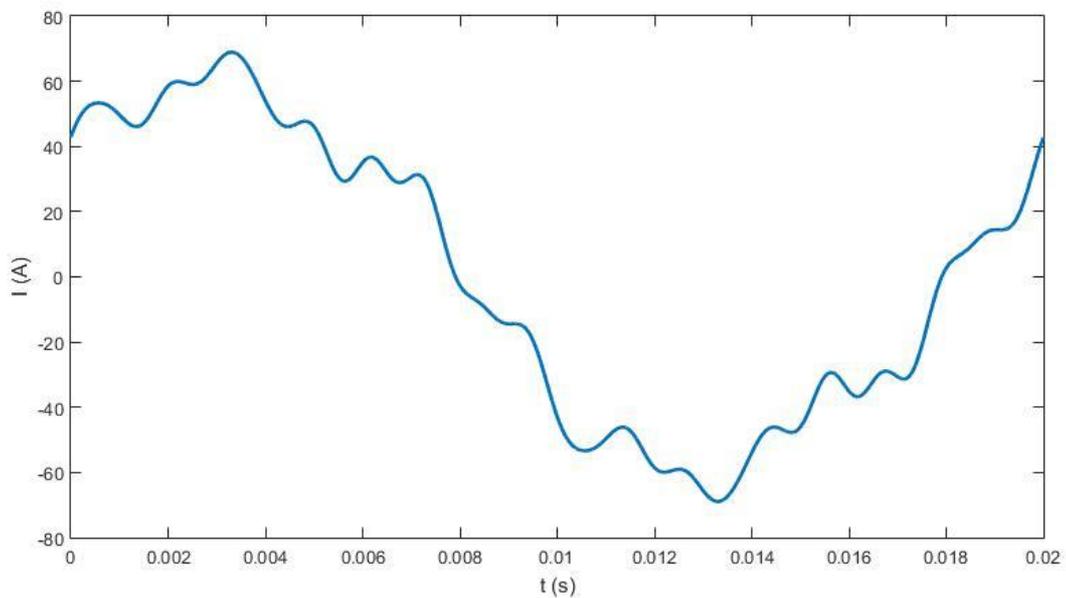


Figura 3-16 Onda de intensidad introducida en la 3ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

Se siguen obteniendo las mismas tasas de distorsión armónica.

$$THD_I = 15.6605\% \quad THD_V = 15\%$$

	POTENCIA NO ACTIVA		P (W)	S (va)	PF
IEEE	N (var)	6762.60	9110.17	11345.83	0.8029
	Q_1 (var)	6358.21			
CONTADOR A	Q (var)	6435.47	9110.17	11345.83	0.8168
CONTADOR B	Q (var)	6762.60	9110.17	11345.83	0.8029
CONTADOR C	Q (var)	6435.47	9110.17	-	0.8168
BUDEANU	Q (var)	6399.84	9110.17	11345.83	-
	D	2185.11			

Tabla 3-65 Resultados 3ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

En la tabla 3-65 se puede ver como se mantienen las tendencias observadas en las simulaciones anteriores. Es decir, los resultados cambian cuantitativamente al haber variado las fases de las ondas, sin embargo los contadores siguen obteniendo diferencias entre sus medida para las mismas magnitudes que en las simulaciones anteriores de esta sección.

Las conclusiones están resumidas en la tabla 3-66.

	P	Q
Contador A	Correcto	Diferencia 4,83% de N
Contador B	Correcto	Correcto
Contador C	Correcto	Diferencia 4,83% de N
Budeanu	Correcto	Correcto

Tabla 3-66 Resumen resultados 1ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

3.3.5.4 4ª Simulación. Armónicos en intensidad y tensión.

En este ejemplo en lugar de utilizar los límites propuestos para la tensión por el IEEE, se utilizarán los de la norma 60001-2-2 del IEC. El objetivo será comprobar que sea cuál sea la normativa que se utilice, las conclusiones que se obtienen son las mismas.

En las tablas 3-67 y 3-68 se pueden consultar los límites máximos de armónicos para intensidad y tensión respectivamente.

I_{cc} / I	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
< 20	4	2	1.5	0.6	0.3	5

Tabla 3-67 Límites máximos de armónicos en tensión 4ª simulación armónicos en intensidad y tensión

Armónicos impares no múltiplos de 3		Armónicos impares múltiplos de 3		Armónicos pares	
Orden del armónico	Tensión del armónico	Orden del armónico	Tensión del armónico	Orden del armónico	Tensión del armónico
h	%	h	%	h	%
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	0.5
$17 \leq h \leq 49$	$2.27 \times (17/h) - 0.27$	$21 \leq h \leq 45$	0.2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25 \times (10/h) + 0.25$

Tabla 3-68 Límites máximos de armónicos en intensidad 4ª simulación armónicos en intensidad y tensión

Con estos límites las ondas propuestas aparecen en la tabla 3-69.

k	V (V)	φ_V	I (A)	φ_I
0				
1	249	0°	18.2	150°
2				
3	12.45	48°	0.728	250°
4				
5	14.94	200°	0.728	15°
6				
7	12.45	79°	0.728	0°
8				
9	3.735	-30°	0.728	98°
10				

k	V (V)	φ_V	I (A)	φ_I
11	8.715	150°	0.364	54°
12				
13	7.47	25°	0.364	43°
14				
15	0.996	16°	0.364	251°
16				
17	4.1262	254°	0.273	34°
18				
19	3.5313	4°	0.273	156°
20				

Tabla 3-69 Ondas introducidas en la 4ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

La representación de la onda de tensión introducida aparece en la figura 3-17 y la onda de intensidad en la figura 3-18.

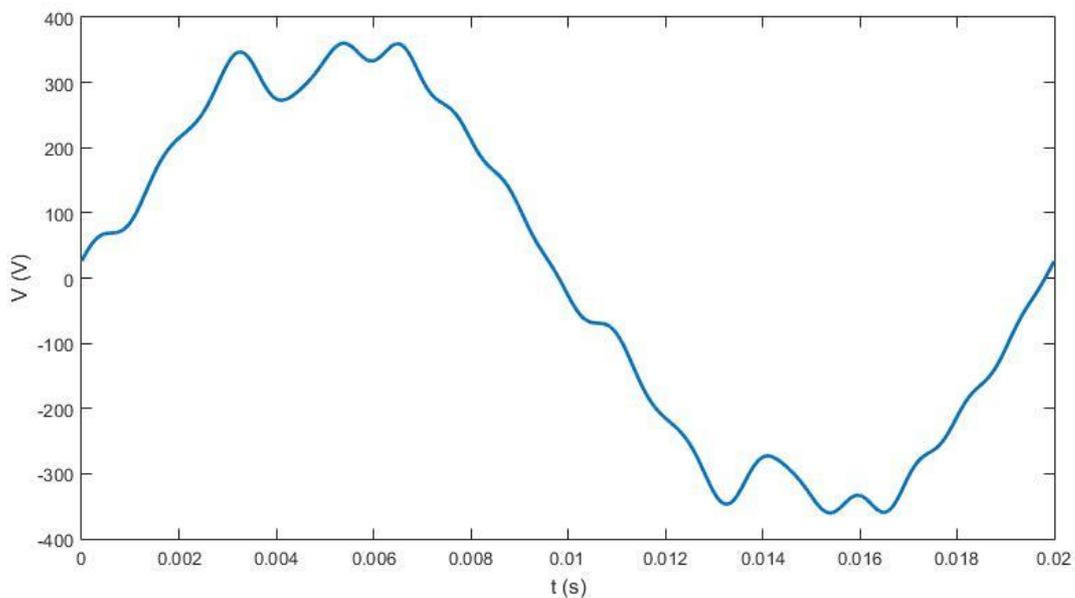


Figura 3-17 Onda de tensión introducida en la 4ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

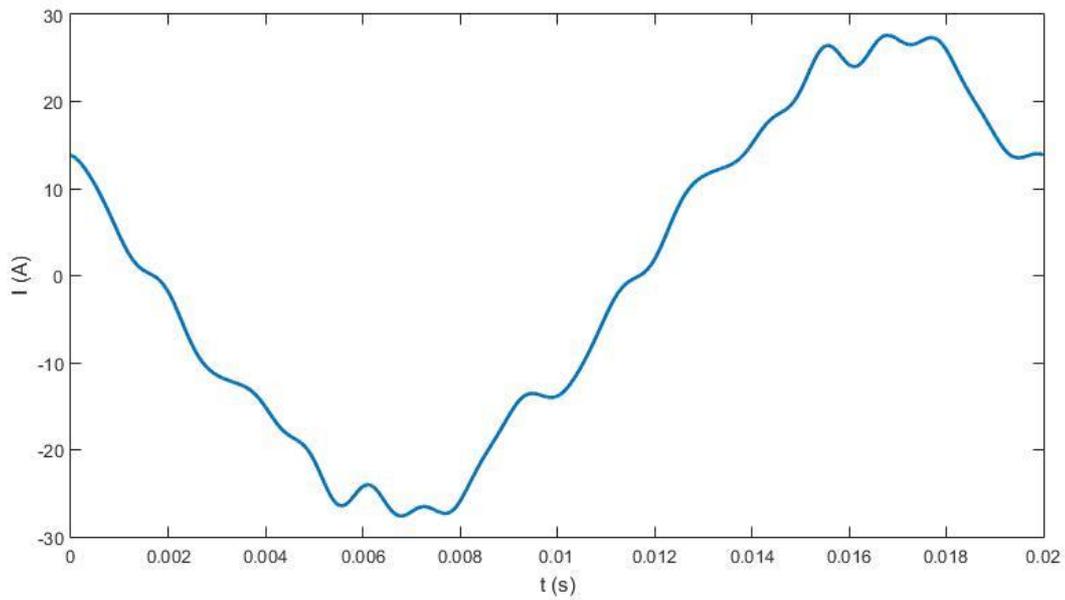


Figura 3-18 Onda de intensidad introducida en la 2ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

Las tasas de distorsión armónica resultan menores que en simulaciones anteriores.

$$THD_I = 8.9722\% \quad THD_V = 10.6966\%$$

	POTENCIA NO ACTIVA		P (W)	S (va)	PF
IEEE	N (var)	2321.26	-3943.50	4575.96	0.8618
	Q_1 (var)	2265.9			
CONTADOR A	Q (var)	2285.85	-3943.50	4575.96	0.8652
CONTADOR B	Q (var)	2321.26	-3943.50	4575.96	0.8618
CONTADOR C	Q (var)	2285.85	-3943.50	-	0.8652
BUDEANU	Q (var)	2255.26	-3943.50	4575.96	-
	D	549.51			

Tabla 3-70 Resultados 4ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

En este caso se puede apreciar en los resultados de la tabla 3-70, que la potencia activa es negativa, es decir que la instalación inyecta potencia a la red. Aun así los algoritmos son capaces de medir correctamente esta potencia activa. Así como la aparente.

$$P_{IEEE} = P_{contA} = P_{contB} = P_{contC} = P_{Budeanu} \quad (3-88)$$

$$S_{IEEE} = S_{contA} = S_{contB} = S_{contC} = S_{Budeanu} \quad (3-89)$$

Mientras que en la potencia reactiva siguen encontrándose diferencias tanto por el contador A como por el C que alcanzan alrededor del 1,5% de N.

De estos resultados se extraen las mismas conclusiones que en las simulaciones anteriores. Por lo que se confirma que el para el caso de facturación por potencia activa todos los algoritmos obtienen medidas equivalentes.

Mientras que si en la facturación interviene la potencia reactiva, el contador y el algoritmo del Budeanu son los únicos que son capaces de obtener la misma medición que el algoritmo del IEEE.

3.3.5.5 5ª Simulación. Armónicos en intensidad y tensión y componentes constantes de continua.

En este caso se propone introducir una componente constante de continua al sistema además de los armónicos en tensión e intensidad, y comprobar como es la respuesta de los algoritmos con la presencia de estas dos perturbaciones. Se utilizarán los mismos límites que en la simulación anterior. Se recogen en la tabla 3-71 y 3-72.

I_{cc} / I	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
< 20	4	2	1.5	0.6	0.3	5

Tabla 3-71 Límites máximos de armónicos en tensión 5ª simulación armónicos en intensidad y tensión

Armónicos impares no múltiplos de 3		Armónicos impares múltiplos de 3		Armónicos pares	
Orden del armónico	Tensión del armónico	Orden del armónico	Tensión del armónico	Orden del armónico	Tensión del armónico
h	%	h	%	h	%
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	0.5
$17 \leq h \leq 49$	$2.27 \times (17/h) - 0.27$	$21 \leq h \leq 45$	0.2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25 \times (10/h) + 0.25$

Tabla 3-72 Límites máximos de armónicos en intensidad 5ª simulación armónicos en intensidad y tensión

Las ondas elegidas para este escenario aparecen en la tabla 3-73.

k	V (V)	φ_V	I (A)	φ_I
0	26		8.3	
1	249	0°	18.2	50°
2				
3	12.45	48°	0.728	250°
4				
5	14.94	200°	0.728	15°
6				
7	12.45	79°	0.728	0°
8				
9	3.735	-30°	0.728	98°
10				

k	V (V)	φ_V	I (A)	φ_I
11	8.715	150°	0.364	54°
12				
13	7.47	25°	0.364	43°
14				
15	0.996	16°	0.364	251°
16				
17	4.1262	254°	0.273	34°
18				
19	3.5313	4°	0.273	156°
20				

Tabla 3-73 Ondas introducidas en la 5ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

Quedan representadas en la figura 3-19 y en la figura 3-20 las ondas de tensión e intensidad introducidas en el sistema.

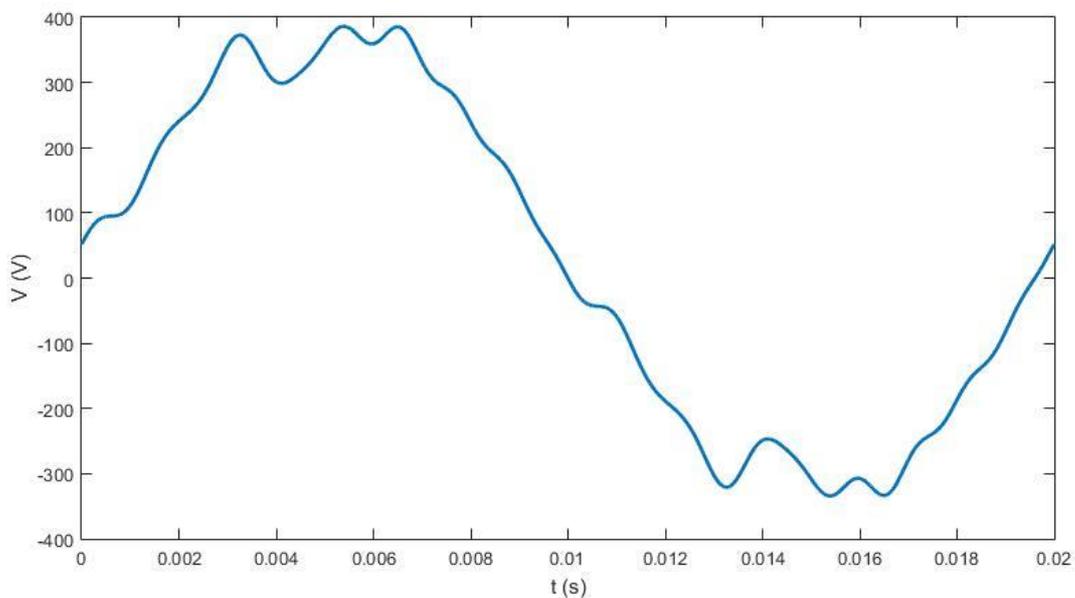


Figura 3-19 Onda de tensión introducida en la 5ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

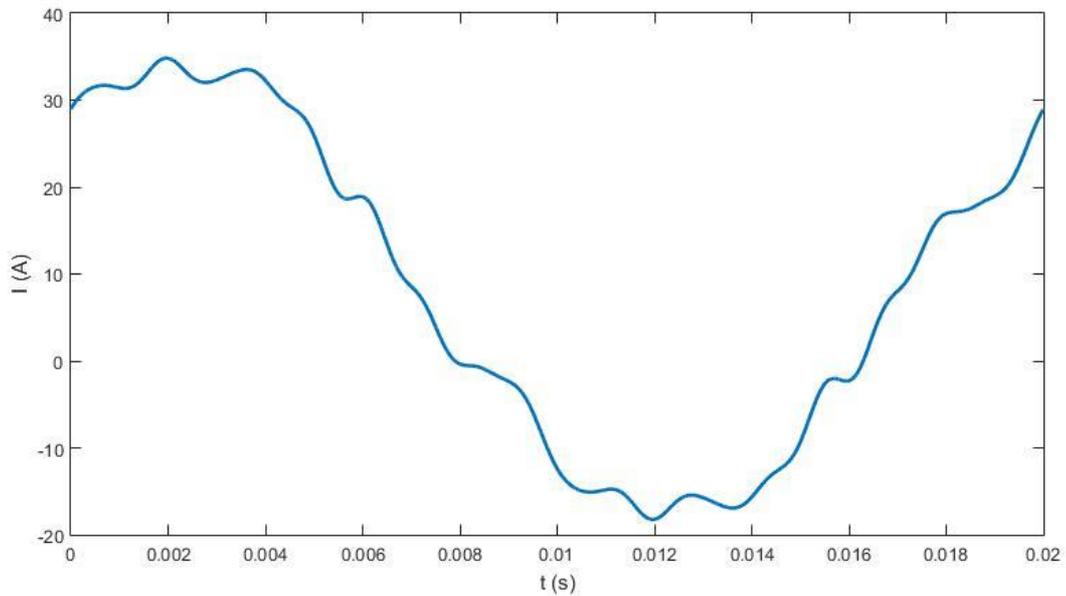


Figura 3-20 Onda de intensidad introducida en la 5ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

Las tasas de armónicos en este caso son más altas debido a la introducción de las componentes continuas.

$$THD_I = 47.4786\% \quad THD_V = 14.9482\%$$

	POTENCIA NO ACTIVA		P (W)	S (va)	PF
	N (var)	Q ₁ (var)			
IEEE		3982.48	3109.93	5052.90	0.6155
	Q ₁ (var)	3471.56			
CONTADOR A	Q (var)	3707.31	3109.93	5052.90	0.6427
CONTADOR B	Q (var)	3982.48	3109.93	5052.90	0.6155
CONTADOR C	Q (var)	-3275.71	3109.93	-	0.6885
BUDEANU	Q (var)	3460.92	2894.13	4575.96	-
	D	765.12			

Tabla 3-74 Resultados 5ª simulación con armónicos en intensidad y tensión

De la tabla 3-74 se extraen las mismas conclusiones que se pudieron obtener de la simulación en el escenario con componentes constantes de continua de las secciones anteriores.

Para la potencia aparente y activa todos los algoritmos salvo el de Budeanu obtienen resultados iguales al algoritmo de referencia del IEEE.

$$P_{IEEE} = P_{contA} = P_{contB} = P_{contC} \neq P_{Budeanu} \quad (3-90)$$

$$S_{IEEE} = S_{contA} = S_{contB} = S_{contC} \neq S_{Budeanu} \quad (3-91)$$

La medida del algoritmo de Budeanu difiere un 9,44% en la medida de la potencia aparente y un 6,94% en la potencia activa.

Para la potencia no activa o reactiva, el contador B es el único capaz de obtener la misma medida que el algoritmo del IEEE. Por ello podemos decir que es el único que realiza una medida correcta.

$$N = Q_{contB} \quad (3-92)$$

Los algoritmos de los contadores A y C, como venía sucediendo en las simulaciones con armónicos, obtienen una medida diferente en la potencia reactiva al del algoritmo del IEEE.

En este caso en el que al efecto de los armónicos se le añade unas componentes constantes de continua el valor de la medida de potencia reactiva de estos dos contadores no es igual.

$$Q_{contA} \neq Q_{contC} \quad (3-93)$$

Con el contador A hay una diferencia de 6,91%, mientras que para el contador C esta es del 17,5%.

Por otro lado la medida de potencia reactiva del algoritmo de Budeanu no es igual para este escenario a la del IEEE.

$$N \neq \sqrt{Q_{Budeanu}^2 + D_{Budeanu}^2} \quad (3-94)$$

Todo este análisis queda resumido en la tabla 3-75.

	Armónicos en intensidad, tensión y componentes constantes de continua.	
	P	Q
Contador A	Correcto	Diferencia $\approx 7\%$ de N
Contador B	Correcto	Correcto
Contador C	Correcto	Diferencia $\approx 18\%$ de N
Budeanu	No refleja el efecto de la componente continua. Diferencia del 6,94%	No refleja el efecto de la componente continua. Diferencia del 11% de N

Tabla 3-75 Resumen resultados 5ª simulación con armónicos en tensión, intensidad y componentes constantes de continua

3.3.5.6 Conclusiones simulaciones con armónicos en intensidad y tensión.

Todas las conclusiones obtenidas de los resultados de estas simulaciones con armónicos en tensión e intensidad se pueden resumir en la tabla 3-76.

	Armónicos en intensidad y tensión		Armónicos en intensidad, tensión y componentes constantes de continua.	
	P	Q	P	Q
Contador A	Correcto	Incorrecto Refleja el efecto de los armónicos pero no adecuadamente. Diferencia 2-10%	Correcto	Diferencia por defecto del $\approx 6,91\%$ de N
Contador B	Correcto	Correcto	Correcto	Correcto
Contador C	Correcto	Incorrecto Refleja el efecto de los armónicos pero no adecuadamente Diferencia 2-10%	Correcto	Diferencia por defecto del $\approx 17,75\%$ de N
Budeanu	Correcto	Correcto	No refleja el efecto de la componente continua Diferencia del 6,94%	No refleja el efecto de la componente continua Diferencia del 11% de N

Tabla 3-76 Resumen resultados simulaciones con armónicos en intensidad y tensión

Con estos resultados se puede concluir que contador B es el único capaz de obtener las mismas medidas, de todas las formas de potencia, activa, reactiva y aparente, que el algoritmo del IEEE en cualquier circunstancia de las analizadas

En el caso de que únicamente se facture por potencia activa los contadores A y C serían también perfectamente válidos para la medición.

El algoritmo de Budeanu obtiene medidas equivalentes a las del algoritmo del IEEE para todas las potencias siempre que no haya componentes de continua en el sistema.

Las diferencias entre las medidas de los diferentes algoritmos se incrementan o decrementan en función de algunas magnitudes, en la tabla 3-77 se hace un resumen de cómo se comportan.

	Armónicos en intensidad y tensión		Armónicos en intensidad, tensión y componentes constantes de continua.	
	P	Q	P	Q
Contador A	Correcto	Si $\uparrow THD$ entonces $\uparrow Diferencia$	Correcto	Si $\uparrow V_0, I_0$ entonces $\uparrow Diferencia$
Contador B	Correcto	Correcto	Correcto	Correcto
Contador C	Correcto	Si $\uparrow THD$ entonces $\uparrow Diferencia$	Correcto	Si $\uparrow V_0, I_0$ entonces $\uparrow Diferencia$
Budeanu	Correcto	Correcto	Si $\uparrow V_0, I_0$ entonces $\uparrow Error$	Si $\uparrow V_0, I_0$ entonces $\uparrow Diferencia$

Tabla 3-77 Resumen tendencias errores simulaciones con armónicos en intensidad y tensión

4 CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo ha sido analizar cómo se comportaban diferentes algoritmos de medida de potencia, tanto teóricos como comerciales, en redes con presencia de armónicos. Para efectuar este análisis en un primer momento se ha realizado una búsqueda de información para obtener los diferentes algoritmos de medida que se iban a analizar.

Una vez que se tenían los algoritmos a analizar, se han implementado en un programa desarrollado para el software MATLAB. Más tarde se ha procedido a la comparación entre ellos bajo diferentes distorsiones de ondas.

Las simulaciones realizadas se pueden dividir en dos grandes grupos para un mejor análisis. Se podría diferenciar así entre los algoritmos utilizados para sistemas monofásicos y los referentes a sistemas trifásicos.

Se ha realizado un completo análisis, con multitud de simulaciones para intentar entender como variaban las mediciones a medida que se cambiaban las condiciones del sistema.

De estos análisis se puede sacar la clara conclusión de que bajo cualquier escenario todos los algoritmos obtienen la misma medida de potencia activa y de potencia aparente (Con la única excepción de la medida del algoritmo de Budeanu en sistemas con componentes constantes de continua).

Estas medidas de potencia activa y aparente además coinciden con las que obtiene el algoritmo propuesto por el IEEE. Y ya que este se toma en este trabajo como el método de referencia, se puede considerar que los algoritmos obtendrían unas medidas correctas de estas potencias.

Por otro lado existen bastantes evidencias de que las medidas de potencia reactiva varían en función de que algoritmo se utilice para su cuantificación. Por lo que no se puede asegurar que ante una facturación por este concepto o por factor de potencia, sea válido el uso de cualquiera de los algoritmos analizados en este trabajo.

Si como se ha comentado, se toman como referencia las medidas obtenidas por el algoritmo del IEEE. El llamado en este trabajo contador B, encontrado en el trabajo de los autores Gabriel Ordoñez Plata, César Duarte G., Adám Bautista M., «Análisis de la medición de potencia y energía eléctrica en contadores digitales, bajo el efecto de armónicos y cargas desbalanceadas», parece el único adecuado para la medida de estas magnitudes, ya que bajo todas las casuísticas analizadas obtiene las mismas mediciones que el algoritmo propuesto por el IEEE en el Standard 1459-2010.

A modo de resumen, parece claro en vista a los datos expuestos, que para una medición de potencia activa todos los algoritmos reflejan las mismas mediciones, incluso ante escenarios con alta penetración de armónicos.

Sin embargo para la facturación por otros conceptos como puede ser por potencia reactiva o factor de potencia, ha quedado demostrado que la medida obtenida está influenciada por el algoritmo que se

utilice para realizarla. Por lo que se recomienda que para este tipo de tarifas se tenga especial precaución sobre que algoritmo utilizar y bajo qué condiciones de la red. Debiéndose hacer un análisis exhaustivo sobre en qué errores se incurriría.

Estas conclusiones pueden tener aplicaciones tanto para el control y la operación de los sistemas de baja y media tensión, para el desarrollo de normativas de tarificación, para la decisión de adquisición de uno u otro medidor e incluso para resolución de casos de disputas entre clientes finales y compañías comercializadoras.

Como futuras líneas de investigación se propone la realización de un análisis cuantitativo de las diferencias económicas que genera la utilización de uno u otro de estos algoritmos de medida aplicando diferentes tarifas comerciales. Además sería interesante llevar estos análisis desde simulaciones informáticas a experimentos en redes reales.

También se deja para futuras investigaciones la realización de un análisis para sistemas trifásicos

ANEXO A

En este anexo se realizará la demostración matemática de como el cálculo de la potencia reactiva se puede realizar mediante el empleo de la tensión desfasada $\pi/2$ en retraso.

La onda de tensión instantánea tiene la siguiente forma:

$$v(t) = \sqrt{2}V\text{sen}(\omega t) \quad (\text{Referencia de fase})$$

La onda de tensión instantánea retrasada tiene es entonces:

$$v_{-\pi/2}(t) = \sqrt{2}V\text{sen}(\omega t - \pi/2)$$

La onda de intensidad es entonces:

$$i(t) = \sqrt{2}I\text{sen}(\omega t - \varphi)$$

Si se realiza el producto de ambas potencias:

$$v_{-\pi/2}(t) \cdot i(t) = 2VI\text{sen}(\omega t - \pi/2)\text{sen}(\omega t - \varphi)$$

Esta expresión puede transformarse en:

$$v_{-\pi/2}(t) \cdot i(t) = 2VI \left[-\frac{\text{sen}(2\omega t)}{2} + \cos^2(\omega t)\text{sen}(\varphi) \right]$$

Si se integra para un periodo de onda:

$$\frac{1}{T} \int_0^T v_{-\pi/2}(t) \cdot i(t) dt = \frac{2VI}{T} \left[-\int_0^T \frac{\text{sen}(2\omega t)}{2} dt + \int_0^T \cos^2(\omega t) \text{sen}(\varphi) dt \right] = \quad (1)$$

$$= \frac{2VI}{T} \left[\frac{\text{sen}(\varphi)}{\omega} \left[\frac{\omega t}{2} + \frac{\text{sen}(2\omega t)}{4} \right]_0^T \right] = VI \text{sen}(\varphi)$$

Con lo que queda demostrado que la integración para un periodo del producto de la tensión retrasada y la intensidad es igual a la potencia reactiva del sistema.

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T v_{-\pi/2}(t) \cdot i(t) dt = VI \text{sen}(\varphi)$$

$$(1) \quad \int \cos^2(x) dx = \frac{x}{2} + \frac{\text{sen}(2x)}{4} + C$$


```

        if m~=1
            vth=vth+vt(:,m);
        end
    end

vttotal=vt(:,1)+vth;
figure(1)
plot(time,vttotal);

Vh=Vo^2;
for n=1:k
    V(n)=sqrt(sum((vt(:,n).^2)/N));
    if n~=1
        Vh=Vh+V(n).^2;
    end
end
Vh=sqrt(Vh);
Vtotal=sqrt(V(1)^2+Vh^2)

%% Cálculo de I eficaz IEEE

ith=Io;
for b=1:k

    for d=0:N-1

        it(d+1,b)=Irms(b)*sqrt(2)*sin(f*2*pi*b*(Ts*d)+tetai(b)*(pi/180))
        ;
    end

    if b~=1
        ith=ith+it(:,b);
    end
end

ittotal=it(:,1)+ith;

figure(2)
hold on
plot(time,ittotal);

Ih=Io^2;
for w=1:k
    I(w)=sqrt(sum((it(:,w).^2)/N));
    if w~=1
        Ih=Ih+I(w).^2;
    end
end
Ih=sqrt(Ih);

```

```

Itotal=sqrt(I(1)^2+Ih^2)

%% Cálculo de potencias IEEE

THDv=(Vh/V(1))*100
THDi=(Ih/I(1))*100

Phieeee=Vo*Io;
for w=1:k
    Pieeee(w)=V(w)*I(w)*cos((tetai(w)-tetav(w))*(pi/180));
    if w~=1
        Phieeee=Phieeee+Pieeee(w);
    end
end

Ptotalieeee=Pieeee(1)+Phieeee;
%Ptotal=P(1)+Ph

Stotal=Vtotal*Itotal

S1=V(1)*I(1)
Q12=sqrt(S1^2-Pieeee(1)^2)
Q1=V(1)*I(1)*sin((tetai(1)-tetav(1))*(pi/180));

Sn=sqrt(Stotal^2-S1^2) %Sn=sqrt(Di^2+Dv^2+Sh^2)

Di=V(1)*Ih;
Dv=Vh*I(1);
Sh=Ih*Vh;

Dh=sqrt(Sh^2-Phieeee^2)

Ntotal=sqrt(Stotal^2-Ptotalieeee^2)

PF=(Ptotalieeee/Stotal)

%% Cálculo de valores con algoritmos comerciales

%% CONTADOR C

Vcontc=Vtotal;
Icontc=Itotal;

Pcontc=sum(vtttotal.*itttotal)/N;

```

```

for r=1:(3*N/4)
    itcontc(r)=itttotal(r+(N/4));
end
for h=((3*N/4)+1):N
    itcontc(h)=itttotal(h-(3*N/4));
end

plot(time,itcontc)

%Qcontc2=sum(vtttotal.*itttotalcontc)/N;
Qcontc=sum(vtttotal.*itcontc')/N;

PFcontc=Pcontc/(sqrt(Pcontc^2+Qcontc^2));

%% Contador A
Vconta=Vtotal;
Iconta=Itotal;

Pconta=Pcontc;

for j=1:(3*N/4)
    vtconta(j)=vtttotal(j+(N/4));
end
for f=((3*N/4)+1):N
    vtconta(f)=vtttotal(f-(3*N/4));
end

figure(3)
hold on
plot(time,vtttotal);
plot(time,vtconta);

Qconta=sum(vtconta.*itttotal')/N;
PFconta=cos(atan(Qconta/Pconta));

```

```
%% Contador B

Scontb=Vconta*Iconta;

Qcontb=sqrt(Scontb^2-Pconta^2);

PFcontb=Pconta/Scontb;

%% Modelo de Budeanu

Vbudeanu=sqrt(sum(V(:).^2));
Ibudeanu=sqrt(sum(I(:).^2));

Pbudeanu=sum(Pieee(:));

for w=1:k
    Qbudeanuk(w)=V(w)*I(w)*sin((tetai(w)-tetav(w))*(pi/180));
end

Qbudeanu=sum(Qbudeanuk(:));

Sbudeanu=Vbudeanu*Ibudeanu;

Dbudeanu=sqrt(Sbudeanu^2-Pbudeanu^2-Qbudeanu^2);
Nbudeanu=sqrt(Qbudeanu^2+Dbudeanu^2);
```


REFERENCIAS

- [1] IEEE, «IEEE Standar Definitions for the Measurement of electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balance, or Unbalance Conditons» *IEEE Std 1459-2010*, 2010.
- [2] IEEE, «Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrill Power Systems» *IEEE Std 519-2014*, 2014.
- [3] Gabriel Ordoñez Plata, César Duarte G., Adám Bautista M., «Análisis de la medición de potencia y energia eléctrica en contadores digitales, bajo el efecto de armonicos y cargas desbalanceadas »
- [4] IEC, «Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2-2: Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en baja tensión.» IEC-UNE 61000-2-2:2003.
- [5] Fernando Fuentes Sevillano, «Estudio experimental del comportamiento de un contador digital en presencia de armónicos» Trabajo fin de grado, ETSI, Sevilla, 2018

GLOSARIO

A: Amperios, unidad de intensidad.

cos: coseno.

f: frecuencia.

Hz: hercio, unidad de frecuencia.

I: Intensidad.

IEC: International Electrotechnical Commission.

IEEE: Institute of Electrical and Electronic Engineers.

ISO: International Organization for Standardization.

va: voltioamperio, unidad de potencia.

var: voltioamperio reactivo, unidad de energía reactiva.

P: Potencia activa.

Q: Potencia reactiva.

S: Potencia aparente.

RMS: valor eficaz.

sen: seno.

T: Tensión.

THDi: Tasa de distorsión armónica de intensidad.

THDv: Tasa de distorsión armónica de tensión.

UNE: Una Norma Española.

V: Voltios, unidad de tensión.

W: Watios, unidad de potencia activa.

φ : desfase entre tensión e intensidad