

**Diego Andrés Cisternas Herrera**

**Armónicas en Sistemas de Baja Tensión  
Trabajo N°2**

**Profesor Sr. Domingo Ruiz Caballero**

**Escuela de Ingeniería Eléctrica**

Resumen

En el presente informe se realiza un detallado estudio armónico a dos sistemas trifásicos desbalanceados dedicados para los cuales se implementan los filtros pasivos necesarios para cumplir con la norma eléctrica chilena y además sacar provecho del comportamiento de los filtros en la frecuencia fundamental y compensar reactivos en el PCC. Las simulaciones son realizadas en el software PSIM en el cual se puede obtener en detalle las formas de onda y las variables eléctricas necesarias para el estudio.

Palabras claves: estudio armónico, PSIM, norma, contaminación armónica, PCC, filtros pasivos.

Índice general

[Introducción 1](#_Toc513502713)

[1 Sistema N°1 2](#_Toc513502714)

[1.1 Simular el Sistema 2](#_Toc513502715)

[1.1.1 Formas de onda y análisis armónico 3](#_Toc513502716)

[1.2 Cálculo con los resultados de la simulación 8](#_Toc513502717)

[1.2.1 Factor de desplazamiento 8](#_Toc513502718)

[1.2.2 Potencia Aparente Fundamental 8](#_Toc513502719)

[1.2.3 Potencia Activa Fundamental 8](#_Toc513502730)

[1.2.4 Potencia Reactiva Fundamental 9](#_Toc513502737)

[1.2.5 Potencia Aparenta Total 9](#_Toc513502744)

[1.2.6 Potencia Armónica 10](#_Toc513502753)

[1.2.7 Factor de Potencia 10](#_Toc513502761)

[1.2.8 Distorsión armónica total THD 11](#_Toc513502763)

[1.2.9 Profundidad de los Notches 11](#_Toc513502781)

[1.2.10 Área de los Notches 13](#_Toc513502784)

[1.3 Evaluación según norma Chilena 14](#_Toc513502786)

[2 Sistema N°2 21](#_Toc513503318)

[2.1 Simular el Sistema 21](#_Toc513503319)

[2.1.1 Formas de onda y análisis armónico 22](#_Toc513503320)

[2.2 Cálculo con los resultados de la simulación 27](#_Toc513503321)

[2.2.1 Factor de desplazamiento 27](#_Toc513503322)

[2.2.2 Potencia Aparente Fundamental 27](#_Toc513503323)

[2.2.3 Potencia Activa Fundamental 27](#_Toc513503334)

[2.2.4 Potencia Reactiva Fundamental 28](#_Toc513503341)

[2.2.5 Potencia Aparente Total 28](#_Toc513503348)

[2.2.6 Potencia Armónica 29](#_Toc513503357)

[2.2.7 Factor de Potencia 29](#_Toc513503365)

[2.2.8 Distorsión Armónica Total THD 30](#_Toc513503367)

[2.3 Evaluación según norma Chilena 30](#_Toc513503382)

[Discusión y conclusiones 38](#_Toc513503914)  
Apéndice A………………………………………………………………………………………………39  
Apéndice B………………………………………………………………………………………………43

# Introducción

Los sistemas eléctricos hoy en día presentan gran número de cargas que tienen implícitas en sí elementos de electrónica de potencia, estas cargas tienen la particularidad de ser no lineales, lo cual trae como resultado deformación en las formas de onda de tensión y corriente. Por lo que se vuelve pertinente realizar estudios del comportamiento de estos fenómenos que afectan el funcionamiento del sistema y tomar las medidas pertinentes si se encuentra en situación de incumplimiento de la norma.

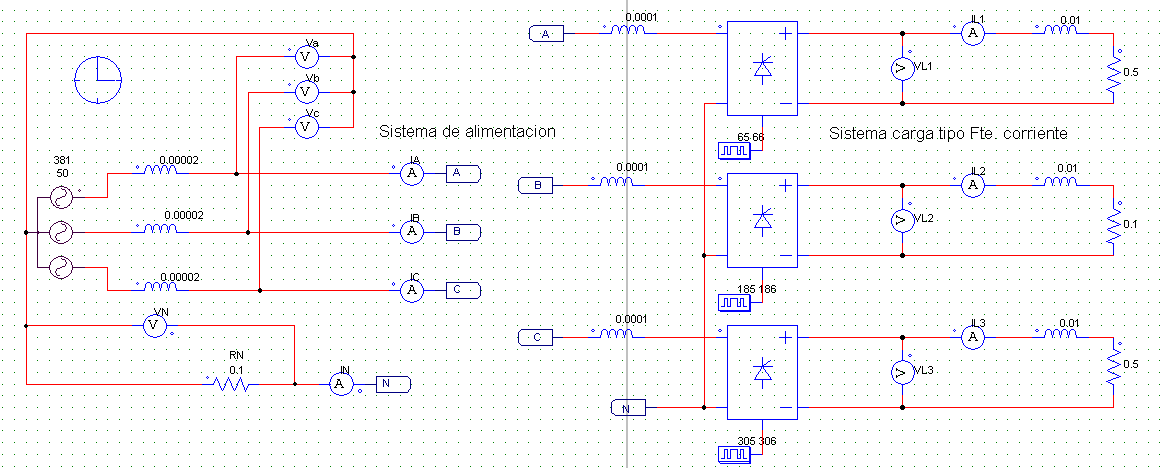
A nivel industrial es muy común encontrarse con dos tipos de comportamientos en las cargas. El primero de estos es que se comporten como fuentes de corriente continua (asociado a rectificación e inductancias de elevado valor) y el segundo corresponde a fuente de tensión continua (asociado a rectificación y condensadores en paralelo que imponen tensión).

En el presente informe se realizará el estudio de dos sistemas desbalanceados, cada uno presenta una carga de naturaleza distinta y se implementarán los filtros pasivos necesarios para cumplir con la norma Chilena.

# Sistema N°1

El primer sistema con frecuencia fundamental 50[Hz], presenta una carga con comportamiento tipo fuente de corriente resultante de la rectificación de tiristores disparados en 65°, para la cual se filtrarán los armónicos haciendo uso de los filtros pasivos serie resonantes de segundo orden conectados entra fase y neutro. El Sistema 1 se muestra a continuación.

Figura 1-1: Simulación en PSIM Sistema 1



De la tarea anterior se obtuvo que en múltiples de las frecuencias se salía de la recomendación de contaminación armónica. Principalmente se buscará atenuar las corrientes armónicas, puesto que la distorsión de voltaje en el PCC es producto de la circulación de corriente armónica por la reactancia de la fuente, lo cual produce tensión distorsionada que afecta la tensión del PCC.

El cálculo de los filtros se realizará mediante el uso de las ecuaciones de proyecto vistas en los apuntes, las cuales son las siguientes:

Las cuales se evaluarán para el orden armónico ‘n’, el dato de proyecto ‘Q’ corresponde a la calidad del filtro (elegido a conveniencia para hacer cumplir la norma en el enésimo armónico), ‘Kn’ es el valor porcentual menor al permitido por la norma para el enésimo armónico (también elegido convenientemente para el filtrado). Las ecuaciones además consideran el valor de (corriente de la fundamental) la cual va cambiando cada vez que se agrega un nuevo filtro y (corriente del enésimo armónico).

La estrategia a considerar para el filtrado será calcular los filtros de la enésima armónica simultáneamente para las 3 fases, implementar el filtro, ver si ha filtrado correctamente y luego seguir con la armónica siguiente que necesite filtrado. Es además importante mencionar que los filtros afectan su ‘vecindad’ de frecuencia, por lo cual en el desarrollo del proceso iterativo es que pueden salir de norma frecuencias que antes estaban dentro de norma. De no resultar exitoso el filtrado del filtro, se aumenta la calidad del filtro ‘Q’ o bien se reduce el valor de ‘Kn’.

Luego de haber implementado todos los filtros, es también necesario adicionar la capacitancia faltante para la compensación de reactivos. La cual se calculará según las ecuaciones:

Se fijará como deseado un valor de 0.98 y la potencia va a depender de la fase del sistema sobre la cual se está trabajando. Así podemos obtener el valor de para cada una de las fases. Luego el será obtenido según:

Teniendo el valor de para cada fase, se hace paso al cálculo de la capacitancia necesaria:

Teniendo el valor de la capacitancia faltante, será adicionada a la capacitancia de los filtros de alta frecuencia y se recalculará la inductancia para dichos filtros (para que resuenen en la frecuencia indicada). Se comprueba nuevamente si con el cambio hay armónicas fuera de la norma y de ser necesario se filtran. Obteniendo de esta forma el sistema dentro de la norma.

## Cálculo de los Filtros

Usando la estrategia descrita anteriormente se presentan los cálculos de los filtros usados para el sistema 1 los cuales fueron obtenidos usando planilla Excel.










Luego de haber implementado todos los filtros, se calculó la capacitancia faltante para compensar:

Tabla 1-1: Cálculo capacitancia necesaria para compensar

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Fase A | Fase B | Fase C |
| P [W] | 12973 | 41594 | 17399 |
| Q Deseado [Var] | 3266.9 | 7108.4 | 3405.4 |
| Q Compensar [Var] | 11779 | 59107 | 10842 |
| C Total [F] | 0.00077777 | 0.003956831 | 0.000715868 |

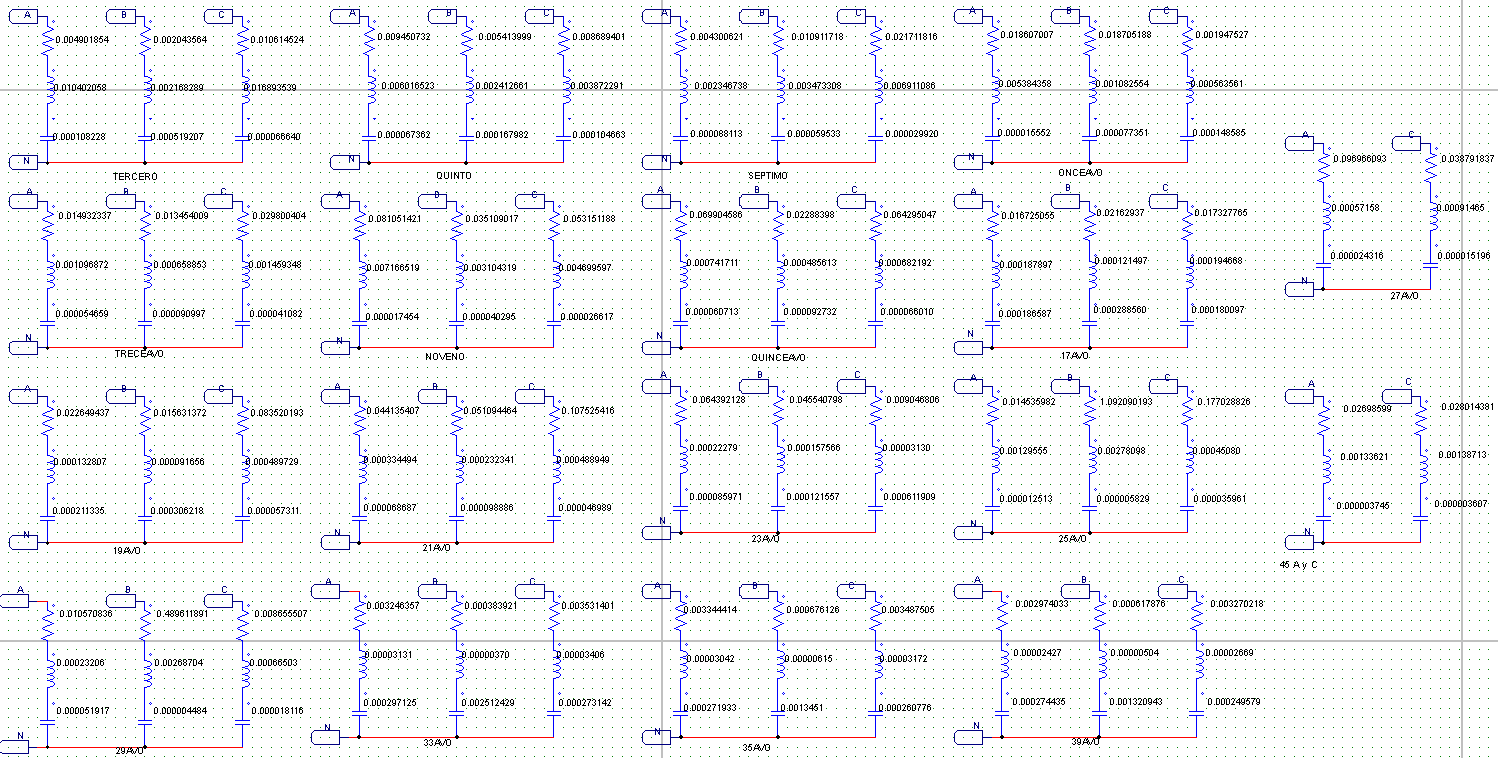
Teniendo los valores de las capacitancias necesarias para corregir el factor de desplazamiento, se hace paso a repartir en partes iguales las capacitancias por fase para los armónicos de orden 39, 33 y 35, puesto que estos son los filtros de más alta frecuencia que están presentes para las 3 fases. Por lo que es necesario calcular ahora la inductancia y la resistencia, como se presenta a continuación:

Obteniendo finalmente:



Posterior a esto se arregló las armónicas que se salían de norma con el adicionamiento de la capacitancia necesaria para la compensación. A continuación se presenta en la Figura 1-2 la disposición de los filtros calculados para el Sistema 1.

Figura 1-2: Disposición de filtros Sistema N°1



### Simulación con Filtros

En las Figuras 1-3, 1-4 y 1-5 se presentan las formas de onda tensión y corriente de las fases A, B y C en el PCC respectivamente, estas son obtenidas en régimen permanente del sistema en el Software PSIM.

Figura 1-3: Formas de onda Fase ‘A’ Sistema N°1

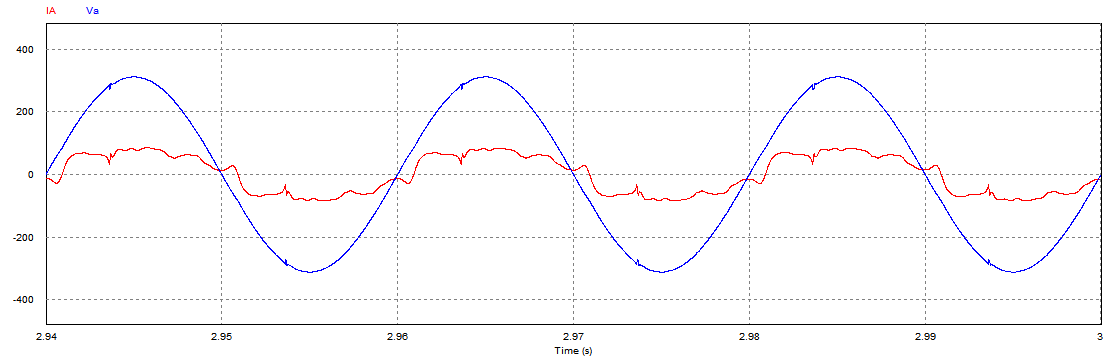


Figura 1-4: Formas de onda Fase ‘B’ Sistema N°1

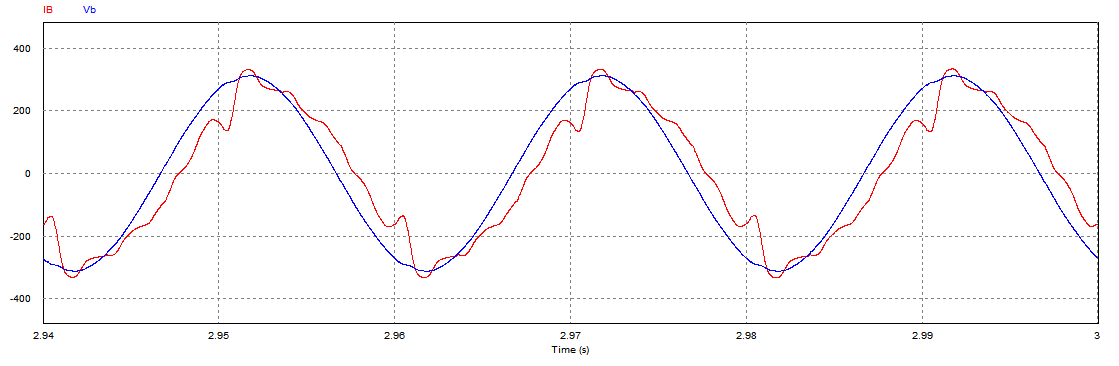
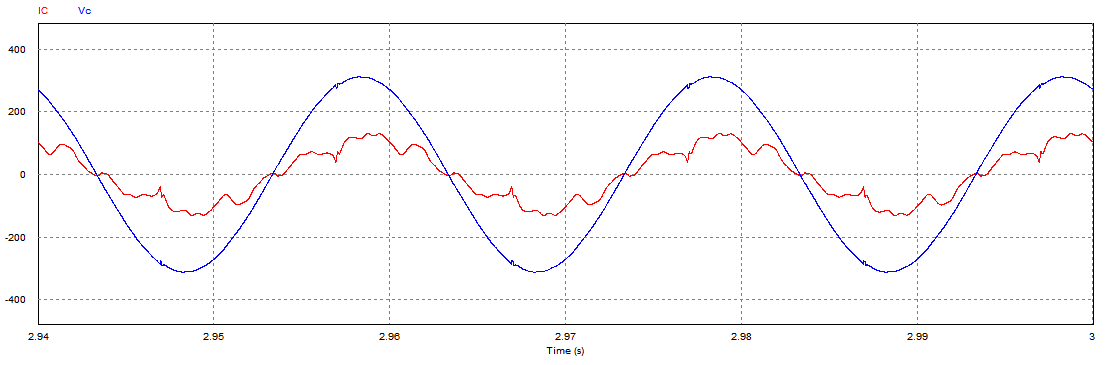


Figura 1-5: Formas de onda Fase ‘C’ Sistema N°1



A simple vista se puede apreciar claramente que el contenido armónico asociado a la corriente circulando por las fases es mucho mayor al de la tensión.

Se presenta la Tabla 1-2 con THD y Factor de Potencia obtenidos de la simulación:

Tabla 1-2: THD y FP obtenidos de PSIM

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Fase A | Fase B | Fase C |
| THD i[%] | 24.6 | 14.6 | 20.8 |
| THD V[%] | 0.5 | 0.7 | 0.56 |
| FP[-] | 0.967 | 0.936 | 0.97 |

En las Figuras 1-6 y 1-7 podemos observar el espectro monolateral para las corrientes y tensiones en el PCC respectivamente.

Figura 1-6: Espectro monolateral de corrientes PCC Sistema N°1

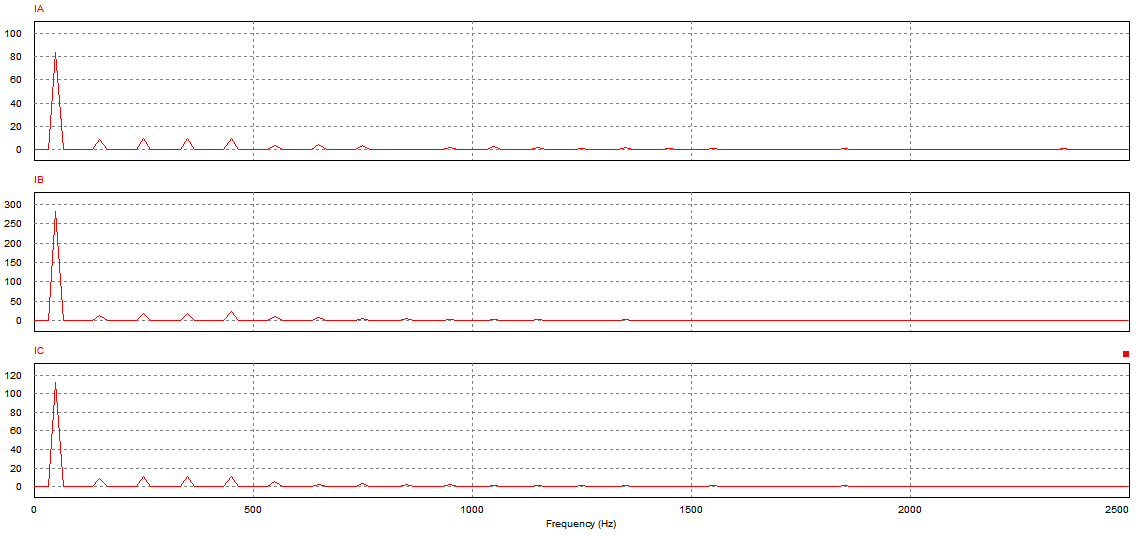
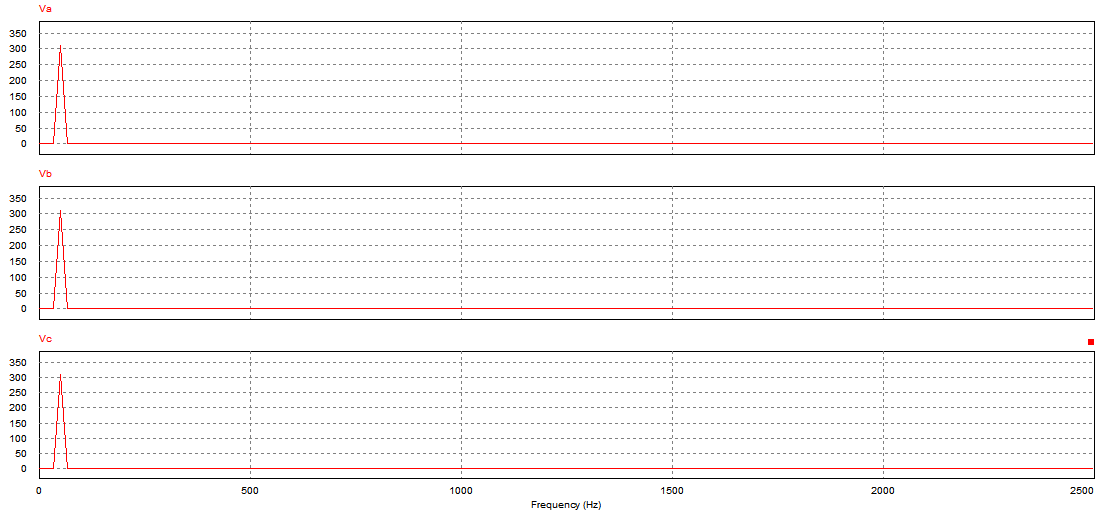


Figura 1-7: Espectro monolateral de tensiones PCC Sistema N°1



El espectro de corrientes de la Figura 1-6 muestra claramente el efecto de los filtros sobre el sistema, atenuando las magnitudes de las armónicas impares para hacer cumplir la norma. La Figura 1-7 muestra que la tensión en el PCC es prácticamente sinusoidal completamente.

## Cálculo con los resultados de la simulación

En esta sección se presentarán los cálculos realizados con los datos obtenidos de PSIM, y trabajados en el software Excel. Estos datos contemplan hasta el armónico de orden 50.

### Factor de desplazamiento

Solamente considera la componente fundamental y se calcula como:

Donde es el ángulo de la tensión fundamental y el ángulo de la corriente fundamental. Usando los resultados de la simulación se obtiene:

Tabla 1-3: Factor desplazamiento Sistema N°1

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Fase A | Fase B | Fase C |
| 0.9951[-] | 0,9458[-] | 0,9941[-] |

### Potencia Aparente Fundamental

### Se calcula con la ecuación:

### Donde son la corriente y tensión de la fundamental. Luego:

### Tabla 1-4: Potencia Aparente fundamental Sistema N°1

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Fase A | Fase B | Fase C |
| 13037[VA] | 43977[VA] | 17503[VA] |

### Potencia Activa Fundamental

Se calcula como:

Se obtiene como resultado:

Tabla 1-5: Potencia Activa fundamental Sistema N°1

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Fase A | Fase B | Fase C |
| 12973[W] | 41594[W] | 17399[W] |

### Potencia Reactiva Fundamental

Se calcula como:

Los resultados obtenidos:

Tabla 1-6: Potencia Reactiva fundamental Sistema N°1

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Fase A | Fase B | Fase C |
| 1288[Var] | 14279[Var] | 1902[Var] |

### Potencia Aparenta Total

### Esta se define:

Luego e , vienen dados por:

### Realizando los cálculos:

Tabla 1-7: Potencia Aparente total Sistema N°1

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Fase A | Fase B | Fase C |
| 13423[VA] | 44518[VA] | 17879[VA] |

Comparando con los valores de la potencia aparente fundamental, podemos observar que estos valores son levemente más grandes, eso se debe a que este cálculo considera las componentes armónicas.

### Potencia Armónica

### Se calcula según la expresión:

Para la cual se obtienen como resultado:

Tabla 1-8: Potencia Armónica Sistema N°1

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Fase A | Fase B | Fase C |
| 3198[VAH] | 6916[VAH] | 3649[VAH] |

### Factor de Potencia

### Se utiliza la ecuación:

Donde:

= Amplitud de la enésima armónica de tensión   
= Amplitud de la enésima armónica de corriente  
= Desfase de la enésima componente de tensión armónica   
= Desfase de la enésima componente de corriente armónica

Para lo cual se obtuvo:

Tabla 1-9: Factor de Potencia Sistema N°1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Fase A | Fase B | Fase C |
| Calculado | 0.966[-] | 0.934[-] | 0.973[-] |
| Simulado | 0.967[-] | 0.936[-] | 0.97[-] |

No se presenta mayor diferencia en lo teórico con lo simulado.

### Distorsión armónica total THD

### Vamos a tener distorsión de corriente y de tensión, lo cuales son calculados como:

### Realizando los calculos correspondientes:

### Tabla 1-10: THD tensión y corriente Sistema N°1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Fase A | Fase B | Fase C |
| THDv cálculo[%] | 0.36 | 0.58 | 0.43 |
| THDv simulado[%] | 0.5 | 0.7 | 0.56 |
| THDi cálculo[%] | 24.52 | 14.58 | 20.8 |
| THDi simulado[%] | 24.6 | 14.6 | 20.8 |

### Se puede ver que los THDi y los THDv se corresponden, presentando diferencia mínima entre cálculos y la simulación.

### Profundidad de los Notches

### El sistema tiene la particularidad de ser un sistema dedicado por lo cual la profundidad de los notches no debe ser superior a un 50%.

### La profundidad se calcula como:

Donde Vmax y Vmin son la tensión más alta del notch y la más baja respectivamente.

A continuación se muestran las Figuras de los Notches por fase y se presenta la Tabla con el cálculo de la profundidad

Figura 1-8: Notch fase A  
  
  
Figura 1-9: Notch fase B  
  
Figura 1-10: Notch fase C

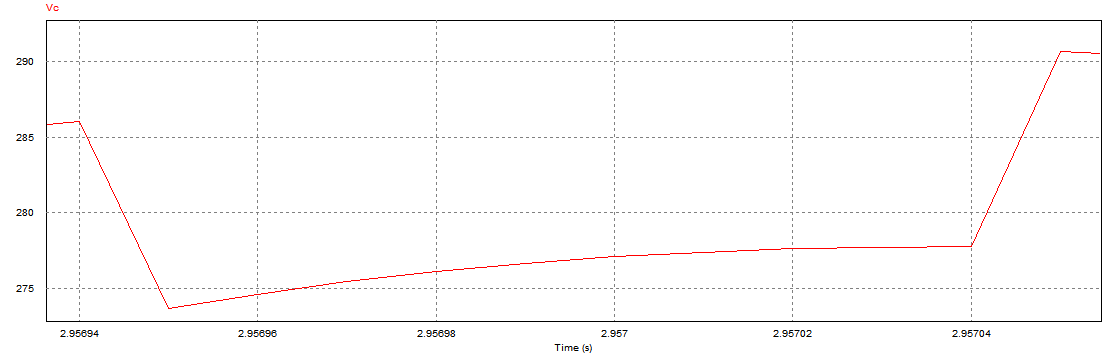
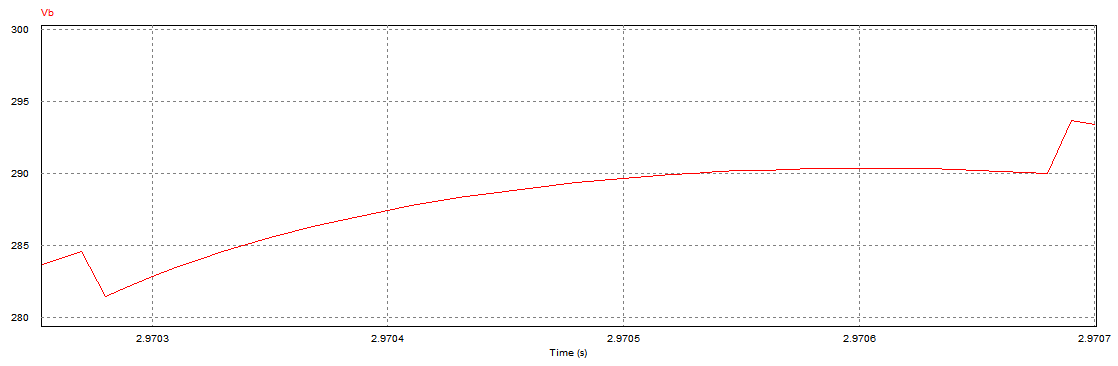
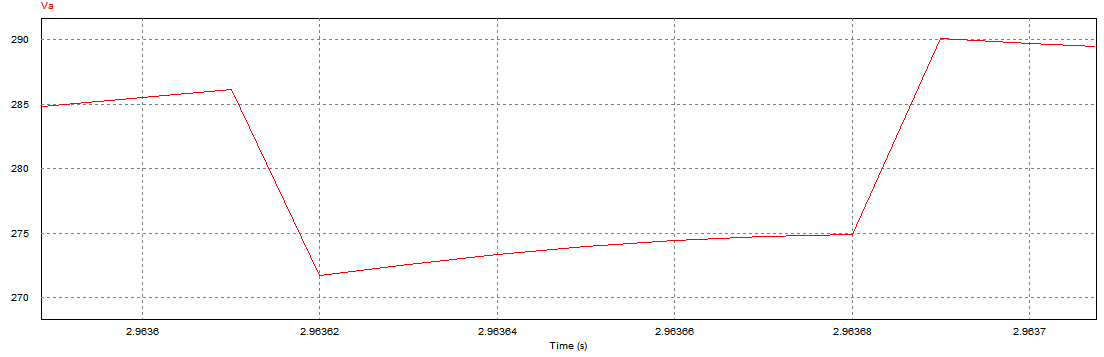


Tabla 1-11: Cálculo de profundidad Notches

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Vmax [V] | Vmin [V] | V1eff [V] | Profundidad% |
| Fase A | 290 | 272 | 220 | 8.2% |
| Fase B | 294 | 282 | 220 | 5.5% |
| Fase C | 291 | 273 | 220 | 8.18% |

Con los resultados obtenidos, podemos indicar que la profundidad de los notches se encuentra dentro de la recomendación.

### Área de los Notches

### La recomendación respecto al Área de los Notches (An) indica que debe ser menor igual a aproximadamente:

Para realizar el cálculo de forma sencilla se aproximará el notch a un rectángulo, entonces el área se obtiene como:

En la Tabla 1-Y, se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 1-12: Área de Notches

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Vmax [V] | Vmin [V] | T ] | An[V] |
| Fase A | 290 | 272 | 80 | 1440 |
| Fase B | 294 | 282 | 450 | 5400 |
| Fase C | 291 | 273 | 100 | 1800 |

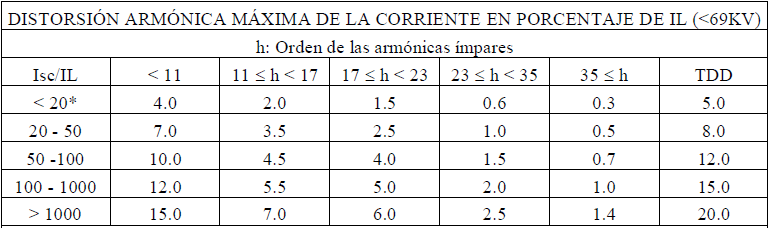
Se puede observar que el An de la fase B es el notoriamente más grande que las otras fases. Pese a esto aparentemente cumplen con la recomendación.

## Evaluación según norma Chilena

Comenzaremos indicando que la norma Chilena respecto al Factor de Potencia exige que este sea mayor igual a 0,93. Para el sistema en las 3 fases nos encontramos con factores de potencia sobre la norma, por lo cual el Sistema N°1 **cumple con la norma de Factor de Potencia**.

La norma respecto a las componentes armónicas de corriente se muestra en la siguiente Figura 1-11:

Figura 1-11: Norma Chilena sobre armónicas de corriente



Para ‘entrar’ a la tabla es necesario saber la razón de Isc/IL. Donde:

Isc: Máxima corriente de cortocircuito en el PCC

IL: Máxima corriente de carga (efectivo) de frecuencia fundamental en el PCC.

Entonces primero se calcula la corriente Isc como:

Ahora tendremos IL para cada una de las fases, este se obtiene de la corriente fundamental, resultando

Tabla 1-13: Razones Isc/IL del Sistema N°1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Fase A | Fase B | Fase C |
| Isc/IL | 590[-] | 175[-] | 440[-] |

### Ahora con esta información podemos usar la tabla para evaluar las armónicas impares de corriente. Tanto la Fase A, B y C caen en la categoría de 100-1000.

### A continuación se presentanrán las Tablas de evaluación de las corrientes armónicas para cada una de las fases del sistema.

Tabla 1-14: Evaluación de la norma de corrientes Fase A Sistema N°1

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Orden Armónico | Ia [pu] | Norma [pu] | ¿cumple? | Orden Armónico | Ia [pu] | Norma [pu] | ¿cumple? |
| 1 | 1 | - | - | 27 | 0.015828 | 0.02 | SI |
| 3 | 0.110395 | 0.12 | SI | 29 | 0.004727 | 0.02 | SI |
| 5 | 0.115785 | 0.12 | SI | 31 | 0.006635 | 0.02 | SI |
| 7 | 0.113071 | 0.12 | SI | 33 | 0.000708 | 0.02 | SI |
| 9 | 0.115105 | 0.12 | SI | 35 | 0.000709 | 0.01 | SI |
| 11 | 0.042919 | 0. 055 | SI | 37 | 0.008292 | 0.01 | SI |
| 13 | 0.052506 | 0. 055 | SI | 39 | 0.000510 | 0.01 | SI |
| 15 | 0.040293 | 0. 055 | SI | 41 | 0.002766 | 0.01 | SI |
| 17 | 0.004184 | 0.05 | SI | 43 | 0.002598 | 0.01 | SI |
| 19 | 0.023922 | 0.05 | SI | 45 | 0.002444 | 0.01 | SI |
| 21 | 0.031176 | 0.05 | SI | 47 | 0.004753 | 0.01 | SI |
| 23 | 0.015233 | 0.02 | SI | 49 | 0.003434 | 0.01 | SI |
| 25 | 0.007465 | 0.02 | SI | - | - | - | - |

Tabla 1-15: Evaluación de la norma de corrientes Fase B Sistema N°1

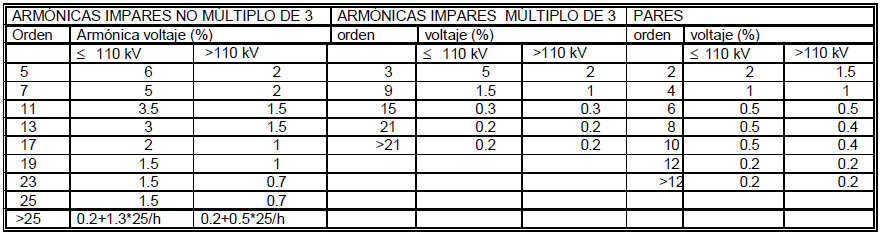
|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Orden Armónico | Ib [pu] | Norma [pu] | ¿cumple? | Orden Armónico | Ib [pu] | Norma [pu] | ¿cumple? |
| 1 | 1 | - | - | 27 | 0.004385 | 0.02 | SI |
| 3 | 0.045465 | 0.12 | SI | 29 | 0.001039 | 0.02 | SI |
| 5 | 0.068981 | 0.12 | SI | 31 | 0.001235 | 0.02 | SI |
| 7 | 0.068254 | 0.12 | SI | 33 | 0.000130 | 0.02 | SI |
| 9 | 0.084077 | 0.12 | SI | 35 | 0.000164 | 0.01 | SI |
| 11 | 0.038325 | 0. 055 | SI | 37 | 0.001458 | 0.01 | SI |
| 13 | 0.022755 | 0. 055 | SI | 39 | 0.000073 | 0.01 | SI |
| 15 | 0.013568 | 0. 055 | SI | 41 | 0.000320 | 0.01 | SI |
| 17 | 0.014783 | 0.05 | SI | 43 | 0.000417 | 0.01 | SI |
| 19 | 0.011799 | 0.05 | SI | 45 | 0.000409 | 0.01 | SI |
| 21 | 0.010087 | 0.05 | SI | 47 | 0.000339 | 0.01 | SI |
| 23 | 0.005378 | 0.02 | SI | 49 | 0.000434 | 0.01 | SI |
| 25 | 0.003529 | 0.02 | SI | - | - | - | - |

Tabla 1-16: Evaluación de la norma de corrientes Fase C Sistema N°1

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Orden Armónico | Ic [pu] | Norma [pu] | ¿cumple? | Orden Armónico | Ic [pu] | Norma [pu] | ¿cumple? |
| 1 | 1 | - | - | 27 | 0.010379 | 0.02 | SI |
| 3 | 0.074812 | 0.12 | SI | 29 | 0.001794 | 0.02 | SI |
| 5 | 0.105159 | 0.12 | SI | 31 | 0.008189 | 0.02 | SI |
| 7 | 0.098714 | 0.12 | SI | 33 | 0.000584 | 0.02 | SI |
| 9 | 0.101637 | 0.12 | SI | 35 | 0.000620 | 0.01 | SI |
| 11 | 0.054455 | 0. 055 | SI | 37 | 0.008069 | 0.01 | SI |
| 13 | 0.023586 | 0. 055 | SI | 39 | 0.000406 | 0.01 | SI |
| 15 | 0.031298 | 0. 055 | SI | 41 | 0.001976 | 0.01 | SI |
| 17 | 0.024556 | 0.05 | SI | 43 | 0.003292 | 0.01 | SI |
| 19 | 0.022313 | 0.05 | SI | 45 | 0.002026 | 0.01 | SI |
| 21 | 0.014962 | 0.05 | SI | 47 | 0.003229 | 0.01 | SI |
| 23 | 0.012098 | 0.02 | SI | 49 | 0.004185 | 0.01 | SI |
| 25 | 0.015795 | 0.02 | SI | - | - | - | - |

Ahora para evaluar la norma Chilena de tensión, se utilizará la siguiente Figura 1-12:

Figura 1-12: Norma para las armónicas de voltaje



El sistema que se está trabajando cae en la categoría de ser inferior a 110kV, además los armónicos pares que presentan las 3 fases son todos inferiores a 0,2%( armónicos pares cumplen), dicho esto se evaluará la norma solo para las armónicas impares de tensión.

Tabla 1-17: Evaluación de la norma de tensión Fase A Sistema N°1

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Orden Armónico | Va [pu] | Norma [pu] | ¿cumple? | Orden Armónico | Va [pu] | Norma [pu] | ¿cumple? |
| 1 | 1 | - | - | 27 | 0.000742 | 0.002 | SI |
| 3 | 0.000551 | 0.05 | SI | 29 | 0.000258 | 0.01321 | SI |
| 5 | 0.000981 | 0.06 | SI | 31 | 0.000335 | 0.01248 | SI |
| 7 | 0.001354 | 0.05 | SI | 33 | 0.000059 | 0.002 | SI |
| 9 | 0.001760 | 0.015 | SI | 35 | 0.000076 | 0.01129 | SI |
| 11 | 0.000803 | 0.035 | SI | 37 | 0.000537 | 0.01078 | SI |
| 13 | 0.001169 | 0.03 | SI | 39 | 0.000058 | 0.002 | SI |
| 15 | 0.001031 | 0.003 | SI | 41 | 0.000199 | 0.00993 | SI |
| 17 | 0.000103 | 0.02 | SI | 43 | 0.000199 | 0.00956 | SI |
| 19 | 0.000773 | 0.015 | SI | 45 | 0.000178 | 0.002 | SI |
| 21 | 0.001119 | 0.002 | SI | 47 | 0.000384 | 0.00891 | SI |
| 23 | 0.000615 | 0.015 | SI | 49 | 0.000287 | 0.00863 | SI |
| 25 | 0.000328 | 0.015 | SI | - | - | - | - |

Tabla 1-18: Evaluación de la norma de tensión Fase B Sistema N°1

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Orden Armónico | Vb [pu] | Norma [pu] | ¿cumple? | Orden Armónico | Vb [pu] | Norma [pu] | ¿cumple? |
| 1 | 1 | - | - | 27 | 0.000684 | 0.002 | SI |
| 3 | 0.000776 | 0.05 | SI | 29 | 0.000158 | 0.01321 | SI |
| 5 | 0.001978 | 0.06 | SI | 31 | 0.000202 | 0.01248 | SI |
| 7 | 0.002740 | 0.05 | SI | 33 | 0.000030 | 0.002 | SI |
| 9 | 0.004340 | 0.015 | SI | 35 | 0.000018 | 0.01129 | SI |
| 11 | 0.002419 | 0.035 | SI | 37 | 0.000308 | 0.01078 | SI |
| 13 | 0.001696 | 0.03 | SI | 39 | 0.000022 | 0.002 | SI |
| 15 | 0.001159 | 0.003 | SI | 41 | 0.000072 | 0.00993 | SI |
| 17 | 0.001433 | 0.02 | SI | 43 | 0.000101 | 0.00956 | SI |
| 19 | 0.001278 | 0.015 | SI | 45 | 0.000108 | 0.002 | SI |
| 21 | 0.001201 | 0.002 | SI | 47 | 0.000084 | 0.00891 | SI |
| 23 | 0.000692 | 0.015 | SI | 49 | 0.000115 | 0.00863 | SI |
| 25 | 0.000497 | 0.015 | SI | - | - | - | - |

Tabla 1-19: Evaluación de la norma de tensión Fase C Sistema N°1

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Orden Armónico | Vc [pu] | Norma [pu] | ¿cumple? | Orden Armónico | Vc [pu] | Norma [pu] | ¿cumple? |
| 1 | 1 | - | - | 27 | 0.000659 | 0.002 | SI |
| 3 | 0.000517 | 0.05 | SI | 29 | 0.000137 | 0.01321 | SI |
| 5 | 0.001215 | 0.06 | SI | 31 | 0.000565 | 0.01248 | SI |
| 7 | 0.001567 | 0.05 | SI | 33 | 0.000067 | 0.002 | SI |
| 9 | 0.002103 | 0.015 | SI | 35 | 0.000067 | 0.01129 | SI |
| 11 | 0.001366 | 0.035 | SI | 37 | 0.000705 | 0.01078 | SI |
| 13 | 0.000696 | 0.03 | SI | 39 | 0.000062 | 0.002 | SI |
| 15 | 0.001087 | 0.003 | SI | 41 | 0.000204 | 0.00993 | SI |
| 17 | 0.000946 | 0.02 | SI | 43 | 0.000341 | 0.00956 | SI |
| 19 | 0.000966 | 0.015 | SI | 45 | 0.000223 | 0.002 | SI |
| 21 | 0.000720 | 0.002 | SI | 47 | 0.000361 | 0.00891 | SI |
| 23 | 0.000612 | 0.015 | SI | 49 | 0.000484 | 0.00863 | SI |
| 25 | 0.000924 | 0.015 | SI | - | - | - | - |

Finalmente, la norma también exige que se cumpla el indicador TDD, para nuestro caso como la demanda es constante usaremos el THDi para comparar y ver si se cumple la norma.

Tabla 1-20: Evaluación TDD Sistema N°1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | THDi% | TDD% normativo | ¿Cumple? |
| Fase A | 24.5% | 15% | NO |
| Fase B | 14.58% | 15% | **SI** |
| Fase C | 20.8% | 15% | NO |

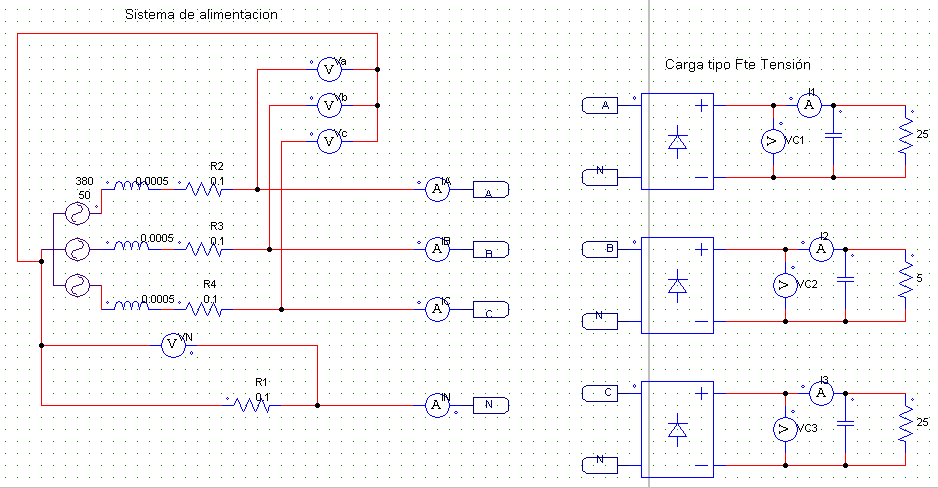
# Sistema N°2

El segundo sistema con frecuencia fundamental 50[Hz], tiene una carga con comportamiento tipo fuente de tensión.

## Simular el Sistema

Al igual que para el Sistema N°1, se realizará la simulación en PSIM y se usará la TFF para obtener las corrientes y tensiones en el PCC con sus ángulos correspondientes. A continuación en la Figura 2-1 se presenta el sistema en el software de simulación.

Figura 2-1: Simulación Sistema N°2



Nuevamente estamos en presencia de un sistema trifásico desbalanceado.

Al igual que en el Sistema 1 las fases A y C presentan los mismos elementos, por lo cual se espera que los resultados a obtener de estas fases, difieran muy poco.

La carga está compuesta por tres unidades monofásicas puentes de diodos, que cumplen función de rectificadores y están conectados a una carga tipo RC paralelo, la capacitancia provoca un efecto de mantener la tensión, resultando en una ondulación de tensión que tiene valor medio positivo.

En la Tabla 2-1 se presentan los detalles de los parámetros que componen el sistema.

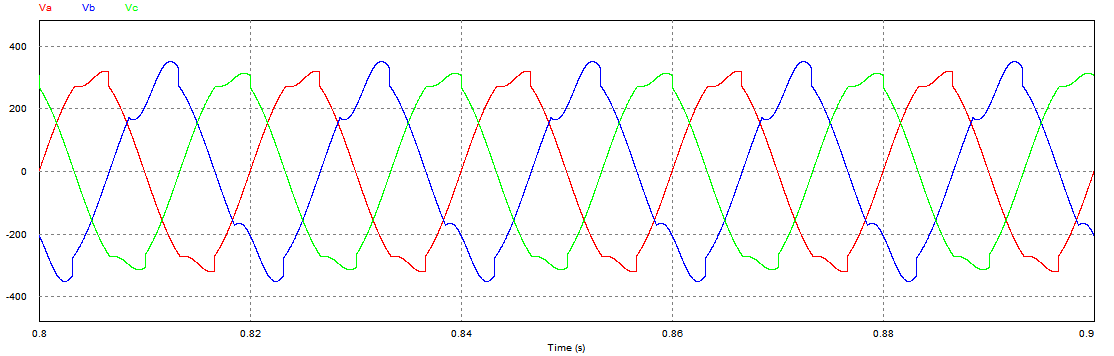
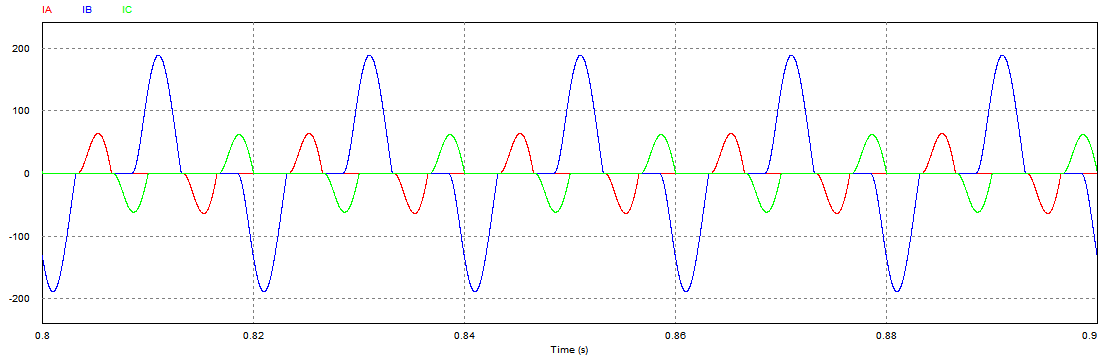
Tabla 2-1: Detalle de parámetros del Sistema N°1

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Fase | Fasor (peak) Alimentación [V] | Resistencia Alimentador [Ohm] | Inductancia Alimentador H] | Carga parte Resistiva [Ohm] | Carga parte Capacitiva [F] |
| A | 311|0° | 0.1 | 500 | 25 | 1700 |
| B | 311|-120° | 0.1 | 500 | 5 | 1700 |
| C | 311|120° | 0.1 | 500 | 25 | 1700 |
| Neutro | - | 0.1 | - | - | - |

### Formas de onda y análisis armónico

El análisis se centra principalmente en el PCC, en las Figuras 2-2 y 2-3 se presentan las formas de onda de corriente y tensión respectivamente.

Figura 2-2: Corrientes en el PCC sistema N°2  
  
  
Figura 2-3: Tensiones en el PCC sistema N°2

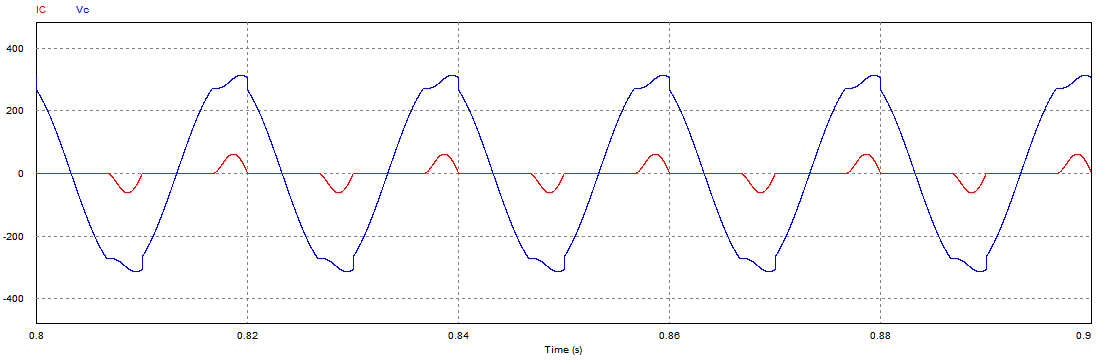
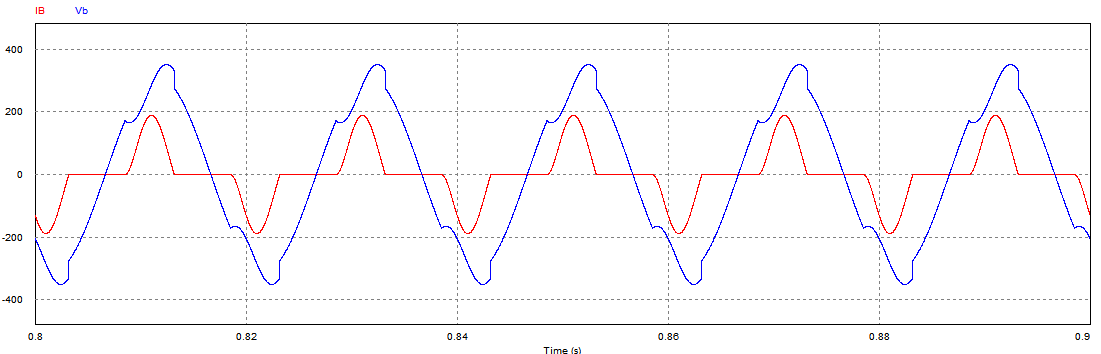
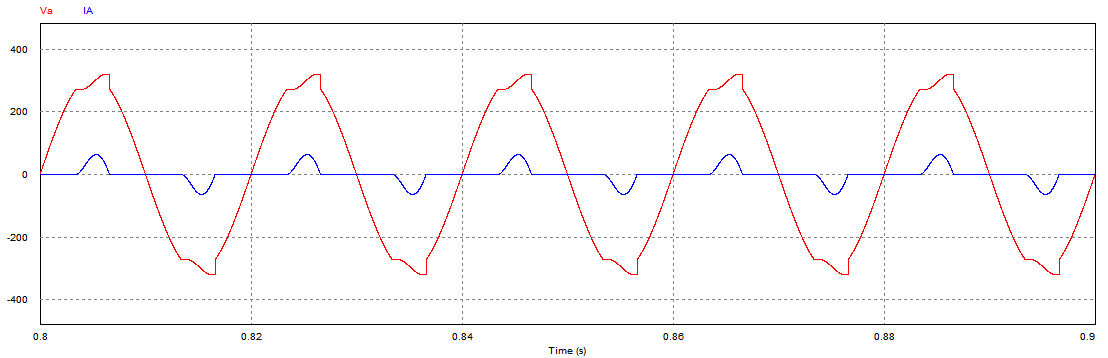


Como se puede observar en la Figura 2-2 las corrientes presentan un formato de onda pulsado, estos pulsos actúan a simple vista sincronizados con sus respectivas tensiones. Se puede observar claramente que la magnitud de corriente de la Fase B es mayor a la de las Fases A y C, esto se atribuye al hecho de que posee una resistencia de menor valor en la carga.

Luego en la Figura 2-3 se puede observar que las tensiones no presentan mayor diferencia de amplitud entre las fases. Además, las formas de ondas parecen ser bastante sinusoidales exceptuando cuando se acercan a sus valores peak, que se ve cómo se deforman, esta deformación ocurre de forma sincronizada con la aparición de los pulsos de corriente. Por último la deformación de tensión de la fase B, es notoriamente mayor.

En las Figuras 2-4, 2-5 y 2-6 se presentan las formas de onda de tensión y corriente de las fases A. B y C en el PCC respectivamente, las cuales son obtenidas en régimen permanente del sistema.

Figura 2-4: Formas de onda Fase A Sistema N°2  
  
  
  
Figura 2-5: Formas de onda Fase B Sistema N°2  
  
  
Figura 2-6: Formas de onda Fase C Sistema N°2



Como se puede apreciar en estas formas de onda, las deformaciones de tensión se producen cuando la corriente pulsa, esto se debe a que la corriente provoca una caída de tensión en la impedancia del alimentador que se ve reflejada en la tensión del PCC.

Se espera que el contenido armónico asociado a la corriente sea mucho mayor que el de la tensión.

En el Apéndice B, se encuentran las tablas de armónicos (magnitud y ángulo de tensión y corriente) obtenidas de la TFF para cada una de las fases del sistema, en ellas se puede ver que las magnitudes de orden par son prácticamente cero, esto se debe a que las formas de onda cumplen en gran parte la simetría de media onda.

En las Figuras 2-7 y 2-8 podemos observar los espectros monolateral para las corrientes y tensiones en el PCC respectivamente.

Figura 2-7: Espectro monolateral de corrientes en el PCC Sistema N°2

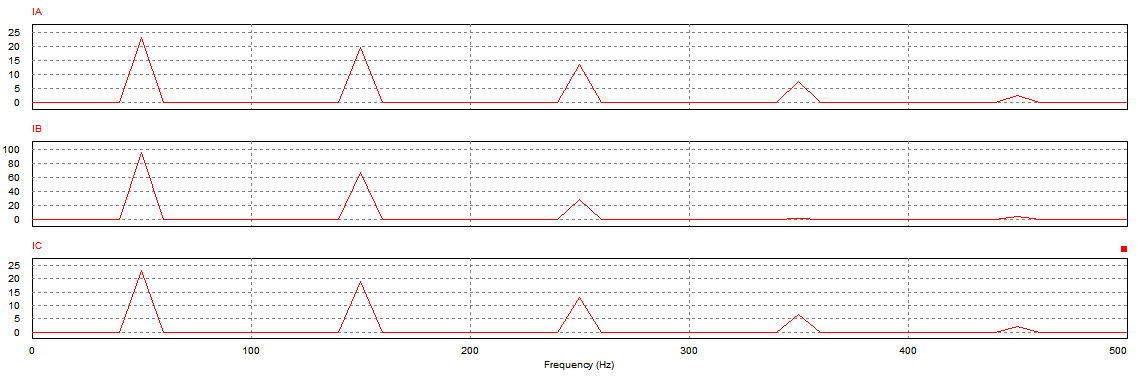
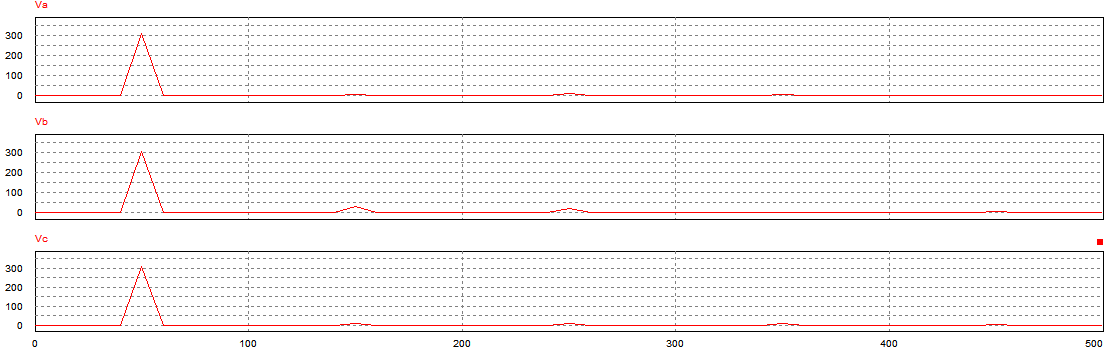


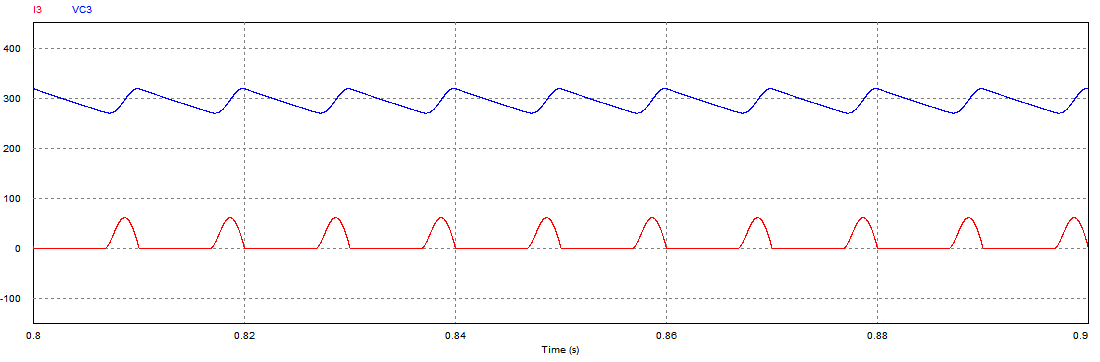
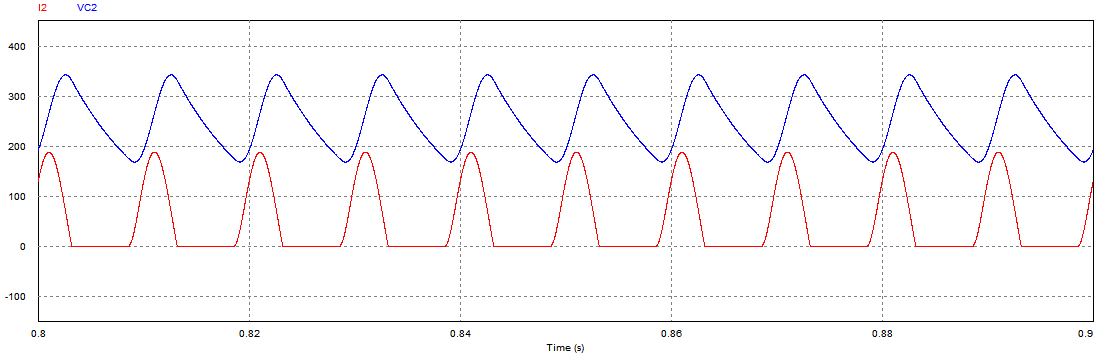
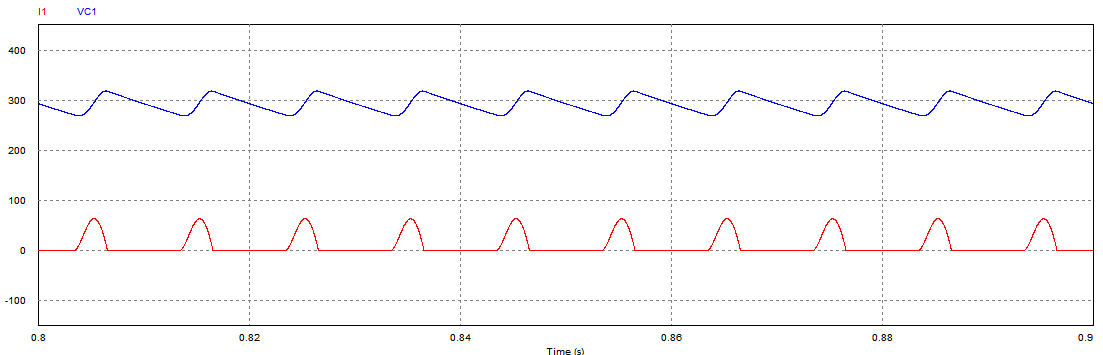
Figura 2-8: Espectro monolateral de tensiones en el PCC Sistema N°2



En ambos espectros se puede apreciar que por efecto de la simetría de media onda, las armónicas de orden par son imperceptibles. En la Figura 2-7 se ve que la fase B tiene menos distorsión de corriente que las fases A y C. Por otro lado en la Figura 2-8 la fase B tiene mayor distorsión de tensión que las fases A y C.

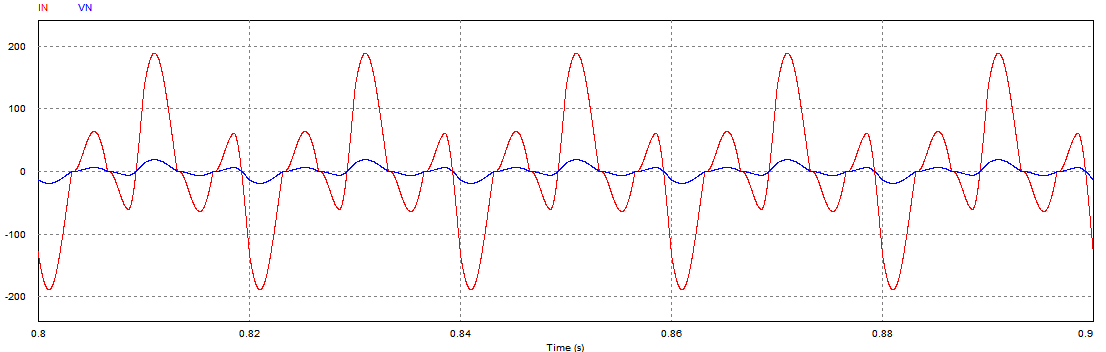
Es de importancia visualizar las formas de onda de la carga y el neutro. En las Figuras 2-9, 2-10, 2-11, y 2-12 se muestran estas formas de onda.

Figura 2-9: Formas de onda Carga A Sistema N°2  
  
  
Figura 2-10: Formas de onda Carga B Sistema N°2  
  
  
Figura 2-11: Formas de onda Carga C Sistema N°2



Las Figuras 2-9, 2-10 y 2-11 dejan en evidencia cómo la presencia del capacitor provoca una ondulación de tensión en torno al valor medio de tensión. Es relevante agregar que la ondulación que presenta la carga de la fase B es muy superior a la de las fases A y C. De las corrientes podemos ver su formato pulsado rectificado que resulta del puente de diodos. Como última observación se puede ver cómo coincide el pulso de corriente con la subida de tensión en la ondulación de la carga.

Figura 2-12: Formas de onda Carga C Sistema N°2



En la Figura 2-12, se puede ver como el sistema N°2 presenta corriente neutro de elevada distorsión armónica, que además alcanza gran amplitud. La tensión en el neutro no es nada más que el efecto de la corriente al circular por la resistencia del neutro, por tanto se ve como ambas están en fase.

## Cálculo con los resultados de la simulación

Se presentarán los cálculos realizados con los datos del Apéndice B. Al igual que el sistema N°1, estos datos fueron obtenidos de PSIM y trabajados con el software Excel. Estos datos comprenden hasta el armónico de orden 50.

### Factor de desplazamiento

Solamente considera la componente fundamental y se calcula como:

Donde es el ángulo de la tensión fundamental y el ángulo de la corriente fundamental. Usando los resultados de la simulación se obtiene:

Tabla 2-2: Factor desplazamiento Sistema N°2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Fase A | Fase B | Fase C |
| 0,99836[-] | 0,96787[-] | 0,99696 [-] |

### Potencia Aparente Fundamental

### Se calcula con la ecuación:

### Donde son la corriente y tensión de la fundamental. Luego:

### Tabla 2-3: Potencia Aparente fundamental Sistema N°2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Fase A | Fase B | Fase C |
| 3529,4 [VA] | 14569,6 [VA] | 3540,1[VA] |

### Potencia Activa Fundamental

Se calcula como:

Se obtiene como resultado:

Tabla 2-4: Potencia Activa fundamental Sistema N°2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Fase A | Fase B | Fase C |
| 3523,6[W] | 14101,5 [W] | 3529,3 [W] |

### Potencia Reactiva Fundamental

Se calcula como:

Los resultados obtenidos:

Tabla 2-5: Potencia Reactiva fundamental Sistema N°2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Fase A | Fase B | Fase C |
| 202,1 [Var] | -3663,5 [Var] | 275,5 [Var] |

### Potencia Aparente Total

### Esta se define:

Luego e , vienen dados por:

### Realizando los cálculos:

Tabla 2-6: Potencia Aparente total Sistema N°2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Fase A | Fase B | Fase C |
| 5236,3 [VA] | 18461,9 [VA] | 5166,9 [VA] |

Comparando con los valores de la potencia aparente fundamental, podemos observar que estos valores son levemente más grandes, eso se debe a que este cálculo considera las componentes armónicas.

### Potencia Armónica

### Se calcula según la expresión:

Para la cual se obtienen como resultado:

Tabla 2-7: Potencia Armónica Sistema N°2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Fase A | Fase B | Fase C |
| 3868,2 [VAH] | 11338,9[VAH] | 3763,6 [VAH] |

### Factor de Potencia

### Se utiliza la ecuación:

Donde:

= Amplitud de la enésima armónica de tensión   
= Amplitud de la enésima armónica de corriente  
= Desfase de la enésima componente de tensión armónica   
= Desfase de la enésima componente de corriente armónica

Para lo cual se obtuvo:

Tabla 2-8: Factor de Potencia Sistema N°2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Fase A | Fase B | Fase C |
| Calculado | 0,66690[-] | 0,74947[-] | 0,67737[-] |
| Simulado | 0,66852[-] | 0,749408[-] | 0,67733[-] |

### Distorsión Armónica Total THD

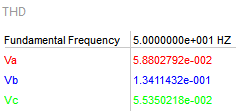
### Vamos a tener distorsión de corriente y de tensión, lo cuales son calculados como:

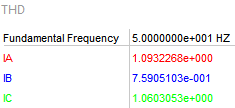
### Realizando los calculos correspondientes:

### Tabla 2-9: THD tensión y corriente Sistema N°2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Fase A | Fase B | Fase C |
| THDv | 5,81% | 13,34% | 5,47% |
| THDi | 109,26% | 75,99% | 106,01% |

En la Figura 2-13 se muestran los THD obtenidos en PSIM:

  
Figura 2-13: THD obtenidos en PSIM Sistema N°2



Los THD tanto simulados como calculados presentan gran similitud.

## Evaluación según norma Chilena

La norma Chilena respecto al Factor de Potencia exige que este sea mayor igual a 0,93. Para el sistema N°2, las 3 fases tiene un factor de potencia bajo la norma, por tanto no cumple la norma del factor de potencia.

La norma respecto a las componentes armónicas de corriente es la misma que se utilizó para el sistema N°1 en la Figura 1-14

Para ‘entrar’ a la tabla es necesario saber la razón de Isc/IL. Donde:

Isc: Máxima corriente de cortocircuito en el PCC

IL: Máxima corriente de carga (efectivo) de frecuencia fundamental en el PCC.

Entonces primero se calcula la corriente Isc como (se desprecia la resistencia):

Ahora tendremos IL para cada una de las fases, este se obtiene de la corriente fundamental efectiva, resultando:

Tabla 2-10: Razones Isc/IL del Sistema N°1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Fase A | Fase B | Fase C |
| Isc/IL | 86,4[-] | 20,7[-] | 86,1[-] |

### Ahora con esta información podemos usar la tabla para evaluar las armónicas impares de corriente. Tanto la Fase A y C caen en la categoría de 50-100 y la Fase B en la categoría 20-50.

### A continuación se presentanrán las Tablas de evaluación de las corrientes armónicas para cada una de las fases del sistema.

Tabla 2-11: Evaluación de la norma de corrientes Fase A Sistema N°2

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Orden Armónico | %Ia | %norma | ¿cumple? | Orden Armónico | %Ia | %norma | ¿cumple? |
| 1 | 100,00 | - | - | 27 | 1,24 | 1,5 | SI |
| 3 | 84,59 | 10 | NO | 29 | 0,86 | 1,5 | SI |
| 5 | 59,20 | 10 | NO | 31 | 0,86 | 1,5 | SI |
| 7 | 32,19 | 10 | NO | 33 | 0,82 | 1,5 | SI |
| 9 | 11,55 | 10 | NO | 35 | 0,61 | 0,7 | SI |
| 11 | 5,18 | 4,5 | NO | 37 | 0,58 | 0,7 | SI |
| 13 | 6,30 | 4,5 | NO | 39 | 0,58 | 0,7 | SI |
| 15 | 4,10 | 4,5 | SI | 41 | 0,46 | 0,7 | SI |
| 17 | 2,26 | 4 | SI | 43 | 0,42 | 0,7 | SI |
| 19 | 2,58 | 4 | SI | 45 | 0,43 | 0,7 | SI |
| 21 | 2,07 | 4 | SI | 47 | 0,36 | 0,7 | SI |
| 23 | 1,30 | 1,5 | SI | 49 | 0,32 | 0,7 | SI |
| 25 | 1,38 | 1,5 | SI | - | - | - | - |

Tabla 2-12: Evaluación de la norma de corrientes Fase B Sistema N°2

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Orden Armónico | %Ib | %norma | ¿cumple? | Orden Armónico | %Ib | %norma | ¿cumple? |
| 1 | 100,00 | - | - | 27 | 0,40 | 1 | SI |
| 3 | 69,68 | 7 | NO | 29 | 0,23 | 1 | SI |
| 5 | 29,63 | 7 | NO | 31 | 0,29 | 1 | SI |
| 7 | 2,51 | 7 | SI | 33 | 0,18 | 1 | SI |
| 9 | 5,08 | 7 | SI | 35 | 0,23 | 0,5 | SI |
| 11 | 1,69 | 3,5 | SI | 37 | 0,15 | 0,5 | SI |
| 13 | 1,83 | 3,5 | SI | 39 | 0,17 | 0,5 | SI |
| 15 | 1,15 | 3,5 | SI | 41 | 0,13 | 0,5 | SI |
| 17 | 0,85 | 2,5 | SI | 43 | 0,14 | 0,5 | SI |
| 19 | 0,75 | 2,5 | SI | 45 | 0,11 | 0,5 | SI |
| 21 | 0,50 | 2,5 | SI | 47 | 0,11 | 0,5 | SI |
| 23 | 0,54 | 1 | SI | 49 | 0,10 | 0,5 | SI |
| 25 | 0,32 | 1 | SI | - | - | - | - |

Tabla 2-13: Evaluación de la norma de corrientes Fase C Sistema N°2

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Orden Armónico | %Ic | %norma | ¿cumple? | Orden Armónico | %Ic | %norma | ¿cumple? |
| 1 | 100 | - | - | 27 | 0,98 | 1,5 | SI |
| 3 | 83,60 | 10 | NO | 29 | 0,74 | 1,5 | SI |
| 5 | 56,92 | 10 | NO | 31 | 0,83 | 1,5 | SI |
| 7 | 29,17 | 10 | NO | 33 | 0,66 | 1,5 | SI |
| 9 | 8,72 | 10 | SI | 35 | 0,52 | 0,7 | SI |
| 11 | 4,59 | 4,5 | NO | 37 | 0,57 | 0,7 | SI |
| 13 | 5,61 | 4,5 | NO | 39 | 0,47 | 0,7 | SI |
| 15 | 3,10 | 4,5 | SI | 41 | 0,38 | 0,7 | SI |
| 17 | 2,08 | 4 | SI | 43 | 0,42 | 0,7 | SI |
| 19 | 2,43 | 4 | SI | 45 | 0,36 | 0,7 | SI |
| 21 | 1,63 | 4 | SI | 47 | 0,30 | 0,7 | SI |
| 23 | 1,14 | 1,5 | SI | 49 | 0,32 | 0,7 | SI |
| 25 | 1,30 | 1,5 | SI | - | - | - | - |

Ahora para evaluar la norma Chilena de tensión, se utilizará la Figura 1-14, la misma norma utilizada para evaluar el Sistema N°1:

El sistema que se está trabajando cae en la categoría de ser inferior a 110kV, además los armónicos pares que presentan las 3 fases son todos inferiores a 0,2% (armónicos pares cumplen), dicho esto se evaluará la norma solo para las armónicas impares de tensión.

Tabla 2-14: Evaluación de la norma de tensión Fase A Sistema N°2

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Orden Armónico | %Va | %norma | ¿cumple? | Orden Armónico | %Va | %norma | ¿cumple? |
| 1 | 100,000 | - | - | 27 | 0,393 | 0,2 | NO |
| 3 | 3,037 | 5 | SI | 29 | 0,292 | 1,321 | SI |
| 5 | 3,488 | 6 | SI | 31 | 0,312 | 1,248 | SI |
| 7 | 2,650 | 5 | SI | 33 | 0,319 | 0,2 | NO |
| 9 | 1,219 | 1,5 | SI | 35 | 0,251 | 1,129 | SI |
| 11 | 0,667 | 3,5 | SI | 37 | 0,253 | 1,078 | SI |
| 13 | 0,960 | 3 | SI | 39 | 0,267 | 0,2 | NO |
| 15 | 0,720 | 0,3 | NO | 41 | 0,220 | 0,993 | SI |
| 17 | 0,450 | 2 | SI | 43 | 0,213 | 0,956 | SI |
| 19 | 0,573 | 1,5 | SI | 45 | 0,229 | 0,2 | NO |
| 21 | 0,510 | 0,2 | NO | 47 | 0,196 | 0,891 | SI |
| 23 | 0,352 | 1,5 | SI | 49 | 0,184 | 0,863 | SI |
| 25 | 0,405 | 1,5 | SI | - | - | - | - |

Tabla 2-15: Evaluación de la norma de tensión Fase B Sistema N°2

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Orden Armónico | %Vb | %norma | ¿cumple? | Orden Armónico | %Vb | %norma | ¿cumple? |
| 1 | 100,000 | - | - | 27 | 0,535 | 0,2 | NO |
| 3 | 10,565 | 5 | NO | 29 | 0,328 | 1,321 | SI |
| 5 | 7,376 | 6 | NO | 31 | 0,450 | 1,248 | SI |
| 7 | 0,861 | 5 | SI | 33 | 0,300 | 0,2 | NO |
| 9 | 2,269 | 1,5 | NO | 35 | 0,393 | 1,129 | SI |
| 11 | 0,912 | 3,5 | SI | 37 | 0,274 | 1,078 | SI |
| 13 | 1,184 | 3 | SI | 39 | 0,340 | 0,2 | NO |
| 15 | 0,851 | 0,3 | NO | 41 | 0,269 | 0,993 | SI |
| 17 | 0,715 | 2 | SI | 43 | 0,289 | 0,956 | SI |
| 19 | 0,703 | 1,5 | SI | 45 | 0,258 | 0,2 | NO |
| 21 | 0,526 | 0,2 | NO | 47 | 0,255 | 0,891 | SI |
| 23 | 0,608 | 1,5 | SI | 49 | 0,246 | 0,863 | SI |
| 25 | 0,391 | 1,5 | SI | - | - | - | - |

Tabla 2-16: Evaluación de la norma de tensión Fase C Sistema N°2

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Orden Armónico | %Vc | %norma | ¿cumple? | Orden Armónico | %Vc | %norma | ¿cumple? |
| 1 | 100,000 | - | - | 27 | 0,310 | 0,2 | NO |
| 3 | 3,007 | 5 | SI | 29 | 0,252 | 1,321 | SI |
| 5 | 3,367 | 6 | SI | 31 | 0,302 | 1,248 | SI |
| 7 | 2,410 | 5 | SI | 33 | 0,256 | 0,2 | NO |
| 9 | 0,928 | 1,5 | SI | 35 | 0,212 | 1,129 | SI |
| 11 | 0,591 | 3,5 | SI | 37 | 0,245 | 1,078 | SI |
| 13 | 0,858 | 3 | SI | 39 | 0,215 | 0,2 | NO |
| 15 | 0,548 | 0,3 | NO | 41 | 0,183 | 0,993 | SI |
| 17 | 0,415 | 2 | SI | 43 | 0,208 | 0,956 | SI |
| 19 | 0,544 | 1,5 | SI | 45 | 0,188 | 0,2 | SI |
| 21 | 0,403 | 0,2 | NO | 47 | 0,162 | 0,891 | SI |
| 23 | 0,308 | 1,5 | SI | 49 | 0,180 | 0,863 | SI |
| 25 | 0,383 | 1,5 | SI | - | - | - | - |

Finalmente, la norma también exige que se cumpla el indicador TDD, para nuestro caso como la demanda es constante usaremos el THDi para comparar y ver si se cumple la norma.

Tabla 2-17: Evaluación TDD Sistema N°2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | THDi% | TDD% normativo | ¿Cumple? |
| Fase A | 109,3% | 12% | NO |
| Fase B | 76% | 8% | NO |
| Fase C | 106% | 12% | NO |

# Discusión y conclusiones

En ambos sistemas se pudo observar que las magnitudes de tensiones en el PCC eran bastante similares entre sí, siendo la fase B la cual presentaba magnitud de tensión más baja que las otras fases, esto se atribuye a que la corriente presente en esta fase era mayor que las otras, lo cual provoca una mayor caída de tensión en la impedancia del alimentador.

Nuevamente en ambos sistemas la parte resistiva de la carga de la fase B era de menor valor, lo cual provocaba notoriamente que la corriente circulando por esta fase, tuviera mayor magnitud.

En el sistema N°1, que la carga era tipo fuente de corriente, se pudo apreciar satisfactoriamente que las formas de onda de corriente en el PCC tendían a ser cuadradas. Y en las tensiones de este mismo, se pudo observar que eran prácticamente sinusoidales, excepto por los hundimientos (notches), que eran producto de la conmutación producida por los puentes a tiristor.

El sistema N°2, con carga tipo fuente de tensión, se pudo observar que la corriente circulando en el PCC tenía el formato de ser pulsada, lo cual provocaba una distorsión en las formas de tensión solo durante la aparición de la corriente. Como la corriente por la fase B era de mayor amplitud, la distorsión de tensión asociada era mayor que en las otras fases.

Respecto a la evaluación de la norma, es muy notorio observar que el desbalance de ambos sistemas provocaba que las armónicas múltiplos de 3 (de secuencia cero) aparecieran, lo cual se observó en la evaluación de norma de tensión, puesto que las armónicas múltiplos de 3 no cumplían con la norma.

Ambos sistemas presentan gran contaminación armónica, esto se ve reflejado en que las normas de factor de potencia, TDD, corrientes y tensiones, no se cumplían. Con respecto a la fase B de ambos sistemas (la cual presentaba el desbalance) se pudo ver que tenía mayor cantidad de armónicos de tensión fuera de la norma, en comparación a las otras fases.

Durante el trabajo con el sistema N°2 se pudo observar como el factor de desplazamiento era cercano a la unidad, pero el factor de potencia llegaba al orden de 0,6-0,7. Esto ejemplifica de forma práctica que la presencia de armónicos en el sistema afecta de forma negativa al factor de potencia.

Si bien el estudio realizado solo consideró hasta el armónico de orden 50, los resultados obtenidos comparado a la simulación son muy representativos, excepto en el THDv del primer sistema, puesto que la diferencia observada se atribuye a que los notches provocan armónicas de alta frecuencia fuera del rango estudiado.

Si bien los elementos de electrónica de potencia permiten manipular la energía de forma rápida y con alto control, la contaminación armónica que provocan es un efecto que no se puede ignorar. Por lo cual para tener un sistema que funcione de mejor forma es necesaria la inminente implementación de filtros para atenuar componentes armónicas que se salgan de la norma.

###### Tablas por Fase Sistema N°1

Se presentan las tablas obtenidas de PSIM con las cuales se trabajó en Excel para sistema N°1.

Tabla A-1: Fase A PCC Sistema N°1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Orden Armónico | Ia[A] | AngIa[°] | Va[V] | AngVa[°] | Orden Armónico | Ia[A] | AngIa[°] | Va[V] | AngVa[°] |
| **0** | 0,021 | 0,0 | 0,000 | 0,0 | **26** | 0,022 | -172,7 | 0,004 | 59,3 |
| **1** | 241,157 | -67,4 | 309,766 | 0,2 | **27** | 5,126 | 31,9 | 0,802 | -58,1 |
| **2** | 0,029 | -41,3 | 0,041 | 0,0 | **28** | 0,022 | 56,0 | 0,005 | -19,8 |
| **3** | 47,148 | 169,8 | 0,821 | 78,7 | **29** | 4,737 | -99,3 | 0,793 | 170,6 |
| **4** | 0,021 | -164,1 | 0,016 | 2,1 | **30** | 0,022 | -74,6 | 0,002 | -150,9 |
| **5** | 27,820 | 34,0 | 0,808 | -55,1 | **31** | 4,415 | 129,5 | 0,795 | 39,3 |
| **6** | 0,022 | 55,0 | 0,011 | -1,6 | **32** | 0,021 | 153,9 | 0,005 | 44,9 |
| **7** | 20,294 | -97,7 | 0,811 | 172,2 | **33** | 4,143 | -1,3 | 0,793 | -91,3 |
| **8** | 0,023 | -71,3 | 0,007 | -1,8 | **34** | 0,022 | 23,0 | 0,005 | -47,5 |
| **9** | 15,719 | 132,5 | 0,822 | 42,3 | **35** | 3,879 | -132,3 | 0,787 | 137,4 |
| **10** | 0,022 | 156,5 | 0,007 | 10,6 | **36** | 0,021 | -107,7 | 0,003 | 149,2 |
| **11** | 12,711 | 0,3 | 0,806 | -89,3 | **37** | 3,649 | 96,5 | 0,786 | 6,3 |
| **12** | 0,022 | 23,5 | 0,006 | -12,5 | **38** | 0,021 | 120,7 | 0,006 | 23,8 |
| **13** | 10,835 | -131,2 | 0,810 | 138,5 | **39** | 3,454 | -34,4 | 0,782 | -124,5 |
| **14** | 0,022 | -105,4 | 0,003 | 12,4 | **40** | 0,021 | -9,9 | 0,005 | -81,8 |
| **15** | 9,387 | 98,6 | 0,817 | 8,6 | **41** | 3,263 | -165,4 | 0,778 | 104,2 |
| **16** | 0,022 | 122,4 | 0,006 | 12,1 | **42** | 0,021 | -140,9 | 0,004 | 112,8 |
| **17** | 8,204 | -33,0 | 0,803 | -122,8 | **43** | 3,091 | 63,5 | 0,775 | -26,7 |
| **18** | 0,022 | -8,9 | 0,004 | -34,7 | **44** | 0,021 | 87,6 | 0,007 | -1,0 |
| **19** | 7,354 | -164,3 | 0,806 | 105,3 | **45** | 2,943 | -67,5 | 0,770 | -157,7 |
| **20** | 0,022 | -139,2 | 0,003 | 54,2 | **46** | 0,021 | -42,9 | 0,005 | -122,0 |
| **21** | 6,656 | 65,2 | 0,811 | -24,8 | **47** | 2,798 | 161,5 | 0,768 | 71,1 |
| **22** | 0,022 | 89,1 | 0,006 | 0,8 | **48** | 0,021 | -174,2 | 0,006 | 82,8 |
| **23** | 6,026 | -66,1 | 0,799 | -156,2 | **49** | 2,664 | 30,4 | 0,763 | -59,8 |
| **24** | 0,022 | -41,7 | 0,002 | -75,1 | **50** | 0,021 | 54,6 | 0,007 | -28,9 |
| **25** | 5,536 | 162,6 | 0,802 | 72,3 | - | - | - | - | - |

Tabla A-2: Fase B PCC Sistema N°1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Orden Armónico | Ib[A] | AngIb[°] | Vb[V] | AngVb[°] | Orden Armónic | Ib[A] | AngIb[°] | Vb[V] | AngVb[°] |
| **0** | 0,040 | 0,0 | 0,027 | 0,0 | **26** | 0,056 | 73,9 | 0,008 | -18,6 |
| **1** | 583,485 | 171,7 | 307,666 | -120,0 | **27** | 12,824 | -24,2 | 2,181 | -112,7 |
| **2** | 0,078 | -113,9 | 0,028 | -140,3 | **28** | 0,053 | 58,8 | 0,008 | -34,8 |
| **3** | 163,353 | 158,8 | 3,070 | 69,1 | **29** | 11,267 | -39,2 | 2,059 | -127,7 |
| **4** | 0,080 | -123,2 | 0,010 | -164,8 | **30** | 0,049 | 43,6 | 0,009 | -50,6 |
| **5** | 97,467 | 142,7 | 3,058 | 53,0 | **31** | 9,876 | -54,3 | 1,930 | -142,6 |
| **6** | 0,079 | -137,0 | 0,007 | 176,7 | **32** | 0,046 | 28,3 | 0,009 | -65,9 |
| **7** | 68,883 | 127,4 | 3,027 | 37,8 | **33** | 8,624 | -69,2 | 1,795 | -157,4 |
| **8** | 0,077 | -151,4 | 0,006 | 157,9 | **34** | 0,042 | 13,2 | 0,009 | -80,7 |
| **9** | 52,741 | 112,3 | 2,981 | 22,8 | **35** | 7,522 | -84,1 | 1,661 | -172,2 |
| **10** | 0,076 | -166,0 | 0,006 | 137,9 | **36** | 0,039 | -1,9 | 0,009 | -95,3 |
| **11** | 42,411 | 96,9 | 2,930 | 7,5 | **37** | 6,523 | -99,0 | 1,523 | 173,0 |
| **12** | 0,074 | 179,2 | 0,006 | 117,0 | **38** | 0,036 | -17,1 | 0,009 | -109,5 |
| **13** | 35,104 | 81,7 | 2,867 | -7,6 | **39** | 5,612 | -113,8 | 1,382 | 158,4 |
| **14** | 0,072 | 164,3 | 0,006 | 95,8 | **40** | 0,032 | -32,0 | 0,009 | -123,4 |
| **15** | 29,607 | 66,6 | 2,791 | -22,6 | **41** | 4,804 | -128,5 | 1,245 | 143,8 |
| **16** | 0,070 | 149,4 | 0,006 | 74,7 | **42** | 0,029 | -46,9 | 0,008 | -137,1 |
| **17** | 25,372 | 51,3 | 2,712 | -37,8 | **43** | 4,067 | -143,0 | 1,106 | 129,4 |
| **18** | 0,067 | 134,4 | 0,006 | 54,3 | **44** | 0,026 | -61,6 | 0,008 | -150,5 |
| **19** | 21,935 | 36,2 | 2,621 | -52,8 | **45** | 3,394 | -157,4 | 0,966 | 115,1 |
| **20** | 0,065 | 119,3 | 0,007 | 34,7 | **46** | 0,022 | -76,0 | 0,007 | -163,3 |
| **21** | 19,069 | 21,1 | 2,519 | -67,7 | **47** | 2,797 | -171,5 | 0,833 | 101,1 |
| **22** | 0,062 | 104,3 | 0,007 | 16,2 | **48** | 0,019 | -90,1 | 0,006 | -175,9 |
| **23** | 16,688 | 6,0 | 2,416 | -82,8 | **49** | 2,254 | 174,8 | 0,700 | 87,5 |
| **24** | 0,059 | 89,1 | 0,008 | -1,6 | **50** | 0,016 | -103,8 | 0,006 | 172,1 |
| **25** | 14,629 | -9,1 | 2,303 | -97,8 | - | - | - | - | - |

Tabla A-3: Fase C PCC Sistema N°1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Orden Armónico | Ic[A] | AngIc[°] | Vc[V] | AngVc[°] | Orden Armónico | Ic[A] | AngIc[°] | Vc[V] | AngVc[°] |
| **0** | 0,017 | 0,0 | 0,027 | 0,0 | **26** | 0,023 | -118,1 | 0,005 | 158,2 |
| **1** | 232,586 | 52,2 | 309,744 | 120,2 | **27** | 5,397 | 25,6 | 0,894 | -64,0 |
| **2** | 0,033 | 24,2 | 0,027 | 139,8 | **28** | 0,023 | -9,9 | 0,004 | -114,8 |
| **3** | 50,417 | 168,9 | 0,931 | 79,9 | **29** | 4,981 | 133,8 | 0,886 | 44,3 |
| **4** | 0,022 | 123,0 | 0,009 | 153,8 | **30** | 0,023 | 97,6 | 0,003 | 11,9 |
| **5** | 30,536 | -87,4 | 0,941 | -177,5 | **31** | 4,627 | -117,5 | 0,882 | 153,0 |
| **6** | 0,023 | -119,0 | 0,006 | 162,3 | **32** | 0,022 | -153,0 | 0,005 | 127,4 |
| **7** | 21,339 | 21,0 | 0,912 | -69,1 | **33** | 4,327 | -8,9 | 0,878 | -98,5 |
| **8** | 0,025 | -13,8 | 0,004 | -175,5 | **34** | 0,022 | -44,1 | 0,005 | -141,1 |
| **9** | 16,784 | 130,3 | 0,923 | 40,7 | **35** | 4,040 | 99,3 | 0,868 | 9,9 |
| **10** | 0,023 | 91,4 | 0,002 | 161,2 | **36** | 0,022 | 63,3 | 0,004 | -30,9 |
| **11** | 13,712 | -122,6 | 0,927 | 147,7 | **37** | 3,792 | -152,0 | 0,864 | 118,7 |
| **12** | 0,023 | -157,1 | 0,004 | 149,6 | **38** | 0,022 | 172,2 | 0,005 | 92,1 |
| **13** | 11,472 | -13,9 | 0,914 | -103,8 | **39** | 3,573 | -43,4 | 0,858 | -132,8 |
| **14** | 0,024 | -48,5 | 0,004 | -163,9 | **40** | 0,022 | -78,5 | 0,006 | -169,7 |
| **15** | 9,992 | 95,1 | 0,916 | 5,4 | **41** | 3,362 | 64,9 | 0,848 | -24,4 |
| **16** | 0,024 | 57,8 | 0,001 | -90,2 | **42** | 0,022 | 29,1 | 0,005 | -67,1 |
| **17** | 8,772 | -157,2 | 0,915 | 113,1 | **43** | 3,178 | 173,5 | 0,842 | 84,3 |
| **18** | 0,023 | 167,1 | 0,003 | 114,4 | **44** | 0,021 | 137,5 | 0,005 | 54,2 |
| **19** | 7,785 | -48,5 | 0,908 | -138,2 | **45** | 3,009 | -77,9 | 0,836 | -167,2 |
| **20** | 0,023 | -83,2 | 0,004 | -177,2 | **46** | 0,021 | -113,0 | 0,007 | 159,7 |
| **21** | 7,052 | 60,3 | 0,907 | -29,4 | **47** | 2,848 | 30,5 | 0,825 | -58,8 |
| **22** | 0,023 | 24,1 | 0,003 | -92,5 | **48** | 0,021 | -5,0 | 0,006 | -100,2 |
| **23** | 6,393 | 168,2 | 0,902 | 78,7 | **49** | 2,704 | 139,1 | 0,818 | 49,9 |
| **24** | 0,023 | 132,1 | 0,003 | 63,8 | **50** | 0,021 | 103,0 | 0,006 | 15,6 |
| **25** | 5,839 | -83,0 | 0,897 | -172,6 | - | - | - | - | - |

###### Tablas por Fase Sistema N°2

Se presentan las tablas obtenidas de PSIM con las cuales se trabajó en Excel para sistema N°2.

Tabla B-1: Fase A PCC Sistema N°2

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Orden Armónico | Ia[A] | AngIa[°] | Va[V] | AngVa[°] | Orden Armónico | Ia[A] | AngIa[°] | Va[V] | AngVa[°] |
| **0** | 0,000 | 0,0 | 0,000 | 0,0 | **26** | 0,001 | 154,8 | 0,007 | 45,8 |
| **1** | 22,936 | -3,7 | 307,759 | -0,4 | **27** | 0,285 | -46,8 | 1,210 | -137,6 |
| **2** | 0,007 | -7,4 | 0,040 | -2,6 | **28** | 0,001 | -72,2 | 0,002 | -150,0 |
| **3** | 19,401 | 168,7 | 9,347 | 66,6 | **29** | 0,197 | 75,0 | 0,899 | -15,6 |
| **4** | 0,010 | 164,5 | 0,020 | 17,7 | **30** | 0,001 | 38,9 | 0,006 | -34,2 |
| **5** | 13,577 | -20,3 | 10,735 | -117,4 | **31** | 0,197 | -171,9 | 0,959 | 97,4 |
| **6** | 0,010 | -25,8 | 0,010 | -53,6 | **32** | 0,001 | 163,6 | 0,006 | 55,4 |
| **7** | 7,384 | 147,1 | 8,157 | 52,0 | **33** | 0,189 | -39,1 | 0,981 | -129,5 |
| **8** | 0,006 | 137,1 | 0,014 | 21,2 | **34** | 0,001 | -63,9 | 0,003 | -141,1 |
| **9** | 2,650 | -60,2 | 3,752 | -154,0 | **35** | 0,140 | 85,4 | 0,772 | -4,8 |
| **10** | 0,002 | -98,1 | 0,003 | 14,7 | **36** | 0,001 | 50,8 | 0,006 | -27,2 |
| **11** | 1,188 | 25,4 | 2,054 | -67,5 | **37** | 0,134 | -161,1 | 0,778 | 108,5 |
| **12** | 0,003 | -6,5 | 0,007 | -47,9 | **38** | 0,001 | 172,6 | 0,005 | 65,4 |
| **13** | 1,445 | 155,2 | 2,955 | 62,5 | **39** | 0,134 | -31,0 | 0,821 | -121,2 |
| **14** | 0,003 | 139,5 | 0,010 | 27,9 | **40** | 0,001 | -55,6 | 0,004 | -132,7 |
| **15** | 0,941 | -59,5 | 2,217 | -151,6 | **41** | 0,105 | 95,3 | 0,677 | 5,3 |
| **16** | 0,002 | -88,6 | 0,000 | 145,7 | **42** | 0,001 | 62,1 | 0,006 | -19,8 |
| **17** | 0,517 | 48,8 | 1,384 | -42,8 | **43** | 0,097 | -150,5 | 0,656 | 119,4 |
| **18** | 0,002 | 11,3 | 0,006 | -45,3 | **44** | 0,001 | -178,1 | 0,005 | 75,7 |
| **19** | 0,591 | 166,2 | 1,763 | 74,5 | **45** | 0,099 | -22,7 | 0,703 | -112,6 |
| **20** | 0,002 | 146,6 | 0,008 | 36,6 | **46** | 0,001 | -47,3 | 0,004 | -124,5 |
| **21** | 0,476 | -53,9 | 1,569 | -145,2 | **47** | 0,082 | 104,7 | 0,605 | 14,9 |
| **22** | 0,001 | -80,4 | 0,002 | -160,3 | **48** | 0,001 | 72,8 | 0,005 | -12,0 |
| **23** | 0,299 | 63,3 | 1,083 | -27,7 | **49** | 0,074 | -139,9 | 0,567 | 130,2 |
| **24** | 0,001 | 26,0 | 0,006 | -40,4 | **50** | 0,001 | -168,6 | 0,005 | 86,5 |
| **25** | 0,317 | 177,2 | 1,245 | 86,1 | - | - | - | - | - |

Tabla B-2: Fase B PCC Sistema N°2

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Orden Armónico | Ib[A] | AngIb[°] | Vb[V] | AngVb[°] | Orden Armónico | Ib[A] | AngIb[°] | Vb[V] | AngVb[°] |
| **0** | 0,013 | 0,0 | 0,020 | 0,0 | **26** | 0,004 | 172,4 | 0,004 | 68,1 |
| **1** | 95,746 | -108,3 | 304,340 | -122,9 | **27** | 0,381 | -13,1 | 1,628 | -105,1 |
| **2** | 0,014 | 33,1 | 0,038 | -120,4 | **28** | 0,001 | -171,3 | 0,006 | -101,8 |
| **3** | 66,720 | -145,2 | 32,154 | 112,9 | **29** | 0,221 | -135,0 | 0,999 | 132,9 |
| **4** | 0,014 | -124,1 | 0,017 | -151,3 | **30** | 0,003 | -146,6 | 0,007 | 179,4 |
| **5** | 28,370 | 176,8 | 22,449 | 79,5 | **31** | 0,282 | 113,3 | 1,370 | 20,8 |
| **6** | 0,023 | -174,5 | 0,011 | 115,8 | **32** | 0,003 | 168,6 | 0,005 | 53,7 |
| **7** | 2,400 | 122,5 | 2,621 | 27,0 | **33** | 0,174 | -0,5 | 0,914 | -93,0 |
| **8** | 0,014 | 161,4 | 0,006 | 57,4 | **34** | 0,001 | 155,0 | 0,005 | -63,9 |
| **9** | 4,864 | -75,5 | 6,905 | -169,7 | **35** | 0,218 | -119,5 | 1,195 | 148,8 |
| **10** | 0,008 | -149,0 | 0,008 | -177,6 | **36** | 0,002 | -148,9 | 0,007 | 175,7 |
| **11** | 1,615 | -139,4 | 2,776 | 127,1 | **37** | 0,145 | 134,3 | 0,833 | 41,4 |
| **12** | 0,010 | -154,8 | 0,012 | 143,6 | **38** | 0,003 | 179,1 | 0,006 | 85,6 |
| **13** | 1,756 | 46,4 | 3,604 | -46,9 | **39** | 0,167 | 7,7 | 1,036 | -84,6 |
| **14** | 0,005 | 171,5 | 0,000 | 55,3 | **40** | 0,001 | 162,0 | 0,005 | -64,1 |
| **15** | 1,098 | -24,0 | 2,591 | -116,8 | **41** | 0,128 | -94,2 | 0,818 | 174,1 |
| **16** | 0,002 | -131,9 | 0,009 | -125,1 | **42** | 0,002 | -138,0 | 0,007 | -160,4 |
| **17** | 0,815 | 178,4 | 2,175 | 85,7 | **43** | 0,131 | 137,5 | 0,879 | 44,7 |
| **18** | 0,005 | -160,3 | 0,006 | 155,0 | **44** | 0,002 | -177,6 | 0,005 | 92,9 |
| **19** | 0,719 | 97,2 | 2,141 | 4,4 | **45** | 0,110 | 36,2 | 0,785 | -56,6 |
| **20** | 0,005 | 157,1 | 0,005 | 26,4 | **46** | 0,001 | 148,8 | 0,006 | -35,7 |
| **21** | 0,481 | -48,0 | 1,599 | -140,3 | **47** | 0,105 | -93,2 | 0,777 | 175,1 |
| **22** | 0,002 | -176,2 | 0,005 | -107,2 | **48** | 0,001 | -144,8 | 0,006 | -149,8 |
| **23** | 0,514 | -137,2 | 1,849 | 130,8 | **49** | 0,099 | 166,4 | 0,749 | 73,8 |
| **24** | 0,004 | -154,3 | 0,008 | 151,2 | **50** | 0,002 | -172,1 | 0,006 | 105,6 |
| **25** | 0,302 | 86,9 | 1,190 | -6,1 | - | - | - | - | - |

Tabla B-3: Fase C PCC Sistema N°2

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Orden Armónico | Ic[A] | AngIc[°] | Vc[V] | AngVc[°] | Orden Armónico | Ic[A] | AngIc[°] | Vc[V] | AngVc[°] |
| **0** | 0,000 | 0,0 | 0,031 | 0,0 | **26** | 0,001 | -160,1 | 0,004 | -131,5 |
| **1** | 23,014 | 115,2 | 307,646 | 119,6 | **27** | 0,225 | -109,5 | 0,952 | 160,5 |
| **2** | 0,006 | 44,6 | 0,022 | 157,6 | **28** | 0,001 | -149,1 | 0,005 | -128,5 |
| **3** | 19,240 | 165,2 | 9,250 | 63,3 | **29** | 0,171 | -125,3 | 0,775 | 145,0 |
| **4** | 0,009 | 100,8 | 0,005 | -119,5 | **30** | 0,001 | -159,5 | 0,004 | -119,0 |
| **5** | 13,100 | -145,8 | 10,358 | 117,0 | **31** | 0,192 | -125,1 | 0,928 | 145,0 |
| **6** | 0,009 | 152,5 | 0,001 | 134,7 | **32** | 0,001 | -156,9 | 0,004 | -132,7 |
| **7** | 6,715 | -100,2 | 7,415 | 164,7 | **33** | 0,152 | -115,9 | 0,788 | 154,5 |
| **8** | 0,005 | -161,9 | 0,005 | -175,5 | **34** | 0,001 | -147,1 | 0,005 | -132,2 |
| **9** | 2,007 | -70,8 | 2,856 | -164,5 | **35** | 0,120 | -128,4 | 0,653 | 142,3 |
| **10** | 0,002 | -151,6 | 0,006 | -129,7 | **36** | 0,001 | -153,5 | 0,004 | -124,2 |
| **11** | 1,057 | -129,8 | 1,818 | 137,5 | **37** | 0,131 | -129,8 | 0,755 | 140,7 |
| **12** | 0,002 | 165,0 | 0,004 | -108,3 | **38** | 0,001 | -153,6 | 0,004 | -135,1 |
| **13** | 1,293 | -112,3 | 2,640 | 155,4 | **39** | 0,108 | -122,5 | 0,662 | 148,5 |
| **14** | 0,002 | -167,7 | 0,004 | -141,5 | **40** | 0,001 | -145,6 | 0,005 | -135,6 |
| **15** | 0,714 | -93,6 | 1,687 | 174,7 | **41** | 0,088 | -133,3 | 0,563 | 137,8 |
| **16** | 0,001 | -155,6 | 0,005 | -125,0 | **42** | 0,001 | -149,9 | 0,004 | -128,7 |
| **17** | 0,480 | -122,9 | 1,276 | 145,9 | **43** | 0,096 | -135,1 | 0,641 | 135,8 |
| **18** | 0,001 | -179,4 | 0,004 | -110,3 | **44** | 0,001 | -151,4 | 0,004 | -138,3 |
| **19** | 0,561 | -115,8 | 1,672 | 153,1 | **45** | 0,082 | -128,6 | 0,577 | 142,6 |
| **20** | 0,002 | -164,2 | 0,004 | -134,5 | **46** | 0,001 | -144,7 | 0,005 | -139,9 |
| **21** | 0,375 | -101,2 | 1,240 | 168,1 | **47** | 0,068 | -137,7 | 0,498 | 133,7 |
| **22** | 0,001 | -151,2 | 0,005 | -127,1 | **48** | 0,001 | -147,2 | 0,004 | -134,0 |
| **23** | 0,264 | -121,5 | 0,949 | 148,2 | **49** | 0,073 | -140,0 | 0,555 | 131,2 |
| **24** | 0,001 | -166,6 | 0,004 | -115,1 | **50** | 0,001 | -149,4 | 0,004 | -142,2 |
| **25** | 0,301 | -120,2 | 1,177 | 149,4 | - | - | - | - | - |