

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

DISEÑO DE CARGADOR DE BATERÍAS SECAS, CON ALIMENTACIÓN TRIFÁSICA Y MÚLTIPLES SALIDAS DE CORRIENTE CONTINUA.

ANDRÉS GIOVANNY TUBERQUIA QUINTERO

HÉCTOR ALEJANDRO PÉREZ CANO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electromecánico

Director

ELKIN EDILBERTO HENAO BRAVO

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

MEDELLÍN-COLOMBIA

2018

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

RESUMEN

El sistema de energía del túnel Fernando Gómez Martínez, cuenta con 12 UPS para los equipos de supervisión y control y alumbrado de emergencia, éstos a su vez tienen conectado un banco de baterías secas compuesto por 36 baterías VRLA de 75 Ah, estas baterías presentan alteraciones en sus niveles de carga, bien sea por la descarga en la utilización de éstas o en el proceso de auto descarga que éstas sufren aún en circuito abierto, problemas que reducen la vida útil de la batería, su capacidad de utilización y la confiabilidad en la operación de las UPS en los cortes de la red eléctrica.

Con este proyecto se pretende dar solución al problema de la descarga de las baterías mediante el diseño de un cargador de baterías secas, con alimentación trifásica y múltiples salidas de corriente continua, con el cual se mantendrán las baterías cargadas constantemente y así evitar daños ocasionados por falta de uso, haciendo más confiable los sistemas ininterrumpidos de potencia, sin trastornos en cortes de energía para garantizar una excelente operación del túnel.

Para desarrollar el proyecto se diseñó un cargador de baterías con alimentación trifásica conformado por un rectificador PFC que se obtuvo de la bibliografía, se diseñó un convertidor DC/DC tipo buck cuadrático que permite variar el voltaje y la corriente para cargar las baterías, controladores tipo PI que controlan los valores de voltaje y corriente para garantizar una carga eficiente de la batería y se implementa el modelo de batería simplificado de Thévenin, para posibilitar, con el simulador, la supervisión de las variables eléctricas de la batería durante el proceso de carga; ya que el elemento batería, del simulador, se comporta como una fuente de voltaje fija e imposibilita la medición del comportamiento de la batería.

Palabras clave: Rectificador PFC, sistema ininterrumpido de potencia, convertidor DC/DC tipo Buck cuadrático, controladores PI, cargador de baterías.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

RECONOCIMIENTOS

Primero que todo damos gracias a Dios, por brindarnos: vida, salud y educación. Además, a la institución que intervino en el desarrollo de este trabajo: Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) donde estamos desarrollando nuestros estudios. A nuestro asesor por su dedicación, compromiso, paciencia, dirección, orientación y correcciones en el momento oportuno. A nuestras familias por el apoyo y comprensión en el desarrollo de todas nuestras actividades académicas.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

ACRÓNIMOS

AC (Corriente Alterna)

AGM (Absorbent glass material o Fibra de vidrio absorbente)

Ah (Amperios/ hora)

DC (Corriente directa)

PFC (Power Factor Correction o Corrección del factor de potencia)
por válvula)

PWM (Pulse-width modulation o Modulación por ancho de pulsos)

SOC (State of Charge o Estado de carga de la batería)

SOH (State of Health o Estado de salud de la batería)

UPS (Sistema ininterrumpido de potencia)

VAC (Voltaje de Corriente Alterna)

VDC (Voltaje de Corriente Directa)

VRLA (Valve regulated lead acido o batería de ácido-plomo regulada)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. OBJETIVOS	11
1.1.1. Objetivo general	11
1.1.2. Objetivos específicos	11
1.2. ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO.....	12
2. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	13
2.2. CARGADORES DE BATERÍAS	16
2.2.1. Funcionamiento de la batería.	18
2.2.2. ¿Qué es una batería?	19
2.3. METODOS DE CARGA	22
2.3.1. Voltaje constante	22
2.3.2. Corriente constante	23
2.3.3. Combinación entre corriente constante y voltaje constante:	23
2.3.4. Disminución gradual de corriente	24
2.3.5. Corriente por impulsos	24
2.4. RECTIFICADOR TRIFÁSICO PFC	24
2.5. CONVERTIDOR DC-DC	26
2.6. MODELADO DE BATERIAS	28
2.7. CONTROLADOR PI	29
3. METODOLOGÍA.....	31
3.1. RECTIFICADOR	34
3.2. CONVERTIDOR DC-DC.....	35
3.3. MODELADO DE BATERIA	40
3.4. CONTROLADORES DE CORRIENTE Y VOLTAJE:	42
3.4.1. Controlador de voltaje	43
3.4.2. Controlador de Corriente	46
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	50

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

4.1 CÁLCULOS Y DIAGRAMAS ELÉCTRICOS.	50
4.1.1. Rectificador.	50
4.1.2. Convertidor DC/DC.....	52
4.1.3. Modelado de batería.....	55
4.1.4. Controlador de corriente	59
4.1.5. Controlador de voltaje	61
4.1.6. Diseño de montaje final	63
4.2. SIMULACIÓN.....	64
4.2.1. Rectificador.	65
4.2.2. Convertidor DC/DC.....	66
4.2.3. Controladores de corriente y voltaje	67
4.2.4. Comportamiento de la batería.....	73
4.2.5. Alteraciones de la red eléctrica de alimentación.....	75
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	77
REFERENCIAS	79
Apéndice A	82
Apendice B	84
Apendice C.....	88

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema eléctrico de la red. Elaboración propia.....	14
Figura 2. Conexión del sistema paralelo redundante. Elaboración propia.....	15
Figura 3. <i>Celda Electroquímica. (Campos & Ronyver, 2015)</i>	20
Figura 4. Sistema electroquímico de la batería VRLA. (Berndt, 2006).....	21
Figura 5. Voltaje constante. (Nelson, 2004).....	22
Figura 6. Combinación entre corriente constante y voltaje constante. (Nelson, 2004).....	23
Figura 7. Corriente por impulsos. (Nelson, 2004).....	24
Figura 8. Señal trifásica alterna. (Nunez, n.d.).....	25
Figura 9. <i>Señal de tensión de la fuente y de salida trifásica rectificada. Recuperado de https://docplayer.es/37170453-Rectificador-trifasico-de-onda-completa.html</i>	25
Figura 10. Diagrama de bloques de un convertidor DC/DC controlado. Elaboración propia.....	26
Figura 11. Circuito de convertidor tipo Buck cuadrático. Elaboración propia.....	27
Figura 12. Cuando Q ₁ y Q ₂ están en posición ON. Elaboración propia.....	27
Figura 13. Cuando Q ₁ y Q ₂ están en posición OFF. Elaboración propia.....	28
Figura 14. Modelo de batería mejorada. (Chan, 2000).....	29
Figura 15. Regulador PI. Recuperado de http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4926/html/13_controlador_de_accion_proporcional_e_integral_pi.html	30
Figura 16. Esquema de conexión y ubicación física de baterías en el banco. Elaboración Propia. ..	31
Figura 17. Curva característica de carga de la batería. Tomada de datasheet de la batería.....	33
Figura 18. Esquema de conexión propuesto para el banco de baterías. Elaboración propia.	34
Figura 19. Esquema básico de rectificador trifásico PWM con PFC. Elaboración propia.	35
Figura 20. Convertidor DC/DC de topología buck cuadrático. Elaboración propia.	36
Figura 21. <i>Cuando Q₁ y Q₂ están en posición ON. Elaboración propia</i>	36
Figura 22. <i>Cuando Q₁ y Q₂ están en posición OFF. Elaboración Propia</i>	37
Figura 23. <i>Modelo simplificado de Thevenin. Elaboración Propia.</i>	41
Figura 24. Convertidor conectado a equivalente de Norton. Elaboración propia.....	43
Figura 25. Convertidor con switch's en estado On conectado a equivalente de Norton. Elaboración propia.	44
Figura 26. Convertidor con switch's en estado Off conectado a equivalente de Norton. Elaboración propia.	45
Figura 27. Convertidor conectado a equivalente de Thevenin. Elaboración propia.	47
Figura 28. Convertidor con switch's en estado On conectado a equivalente de Thevenin. Elaboración propia.	47
Figura 29. Convertidor con switch's en estado Off conectado a equivalente de Thevenin. Elaboración propia.	48
Figura 30. Diagrama eléctrico del rectificador. Elaboración propia.	51
Figura 31. Diagrama de convertidor DC-DC. Elaboración propia.....	52

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Figura 32. Modelo simplificado de Thevenin. Elaboración propia. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 33. Modelado individual de la batería. Elaboración propia..... 57

Figura 34. Modelado de la conexión en serie de 4 baterías. Elaboración propia..... 58

Figura 35. Diagrama controlador de Corriente. Elaboración propia. 59

Figura 36. Variables para el controlador PI de corriente del convertidor DC-DC. Elaboración propia. 60

Figura 37. Diagrama controlador de Voltaje. Elaboración propia. 61

Figura 38. Variables para el controlador PI de Voltaje del convertidor DC-DC. Elaboración propia. 62

Figura 39. Convertidor DC-DC con controladores. Elaboración propia. 63

Figura 40. Diagrama de bloques de cargador de baterías. Elaboración propia..... 64

Figura 41. Diagrama eléctrico del cargador de baterías. Elaboración propia..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 42. Comportamiento del rectificador. Elaboración propia..... 65

Figura 43. Factor de potencia del rectificador y alteración a la fuente de energía. Elaboración propia. 66

Figura 44. Voltaje de salida de convertidor DC-DC tipo buck cuadrático. Elaboración propia..... 67

Figura 45. Operación de los ciclos de trabajo de corriente y voltaje. Elaboración propia. 67

Figura 46. Comparación de ciclo de trabajo con el estado de la batería. Elaboración propia. 68

Figura 47. Cambio de referencia en la señal de corriente. Elaboración Propia..... 69

Figura 48. Control de corriente con cambios en la fuente. Elaboración Propia. 70

Figura 49. Cambio de referencia en control de voltaje. Elaboración propia. 71

Figura 50. Control de Voltaje con cambios en la fuente. Elaboración propia. 72

Figura 51. Tensión y Corriente final en una serie de 4 baterías. Elaboración propia. 73

Figura 52. Tensión y Corriente final de 1 batería. Elaboración propia. 73

Figura 53. Comparación de operación de dos baterías en el circuito completo. Elaboración propia. 74

Figura 54. Comportamiento de voltaje vs Corriente de la red, alimentando el cargador de baterías. Elaboración propia. 76

Figura 55. Factor de Potencia del circuito completo cargador de baterías. Fuente: Elaboración propia. 75

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Magnitudes eléctricas que circulan por los elementos activos del convertidor DC-DC.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2. Magnitudes eléctricas que circulan por los elementos activos del convertidor DC-DC.	54
Tabla 3. Dimensión de los componentes activos del convertidor DC-DC.....	55
Tabla 4. Dimensión de los elementos del modelado de la batería.....	57
Tabla 5. Parámetros de controlador de corriente.	60
Tabla 6. Parámetros de sintonización controlador de Voltaje.	62

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

1. INTRODUCCIÓN

La finalidad de este proyecto es dar solución a un problema que se tiene en el túnel Fernando Gómez Martínez con las baterías de respaldo de los UPS. El Túnel conecta la ciudad de Medellín con el municipio de Santa Fe de Antioquia, ubicados en el departamento de Antioquia, cuenta con sistemas ininterrumpidos de potencia (UPS) para alimentar cargas críticas, como lo son el sistema de supervisión y control (CCTV, instrumentación al interior del túnel, SCADA, entre otros) y el sistema de alumbrado de emergencia al interior del túnel; cada uno de estos UPS, están conectados a un banco de baterías secas para almacenar la energía que posteriormente proveerá al sistema. En caso de que la empresa prestadora de energía sufra daños en el suministro de energía hacia el túnel, entra en funcionamiento el sistema ininterrumpido de potencia, de esta manera garantiza constante suministro de energía mientras se realiza el correctivo en el flujo de energía prestado por la empresa de servicios públicos.

El problema del túnel Fernando Gómez Martínez, específicamente se presenta en los bancos de baterías secas, que a su vez hacen parte del sistema ininterrumpido de potencia, estas baterías sufren daños o descargas en su nivel de energía almacenada por la falta de uso en largos períodos de tiempo en que se encuentre fuera de servicio algún UPS. Adicionalmente el Túnel tiene baterías de respaldo que están almacenadas, y cuando se van a usar pueden estar descargadas. Por tanto, en este proyecto se pretende dar solución mediante el diseño de un cargador de baterías secas, con alimentación trifásica y múltiples salidas de corriente continua, con el cual se mantendrán las baterías cargadas constantemente y así evitar daños ocasionados por falta de uso, haciendo más confiable los sistemas ininterrumpidos de potencia, sin trastornos en cortes de energía para garantizar una adecuada operación del túnel.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

Diseñar un cargador con alimentación AC trifásica con múltiples salidas DC para ser utilizado en baterías secas (baterías estacionarias) de respaldo para UPS en el Túnel Fernando Gómez Martínez.

1.1.2. Objetivos específicos

- Determinar la cantidad de baterías que se va a mantener cargada y las topologías de conexión entre ellas.
- Diseñar un rectificador PFC trifásico, teniendo como restricción la carga y la fuente.
- Diseñar el tipo de convertidor DC/DC que servirá como interfaz entre el rectificador y cada batería o banco de baterías.
- Diseñar el sistema de control del cargador de baterías, según las restricciones de carga de baterías.
- Simular el sistema diseñado en software de circuitos especializado, para verificar el comportamiento en la carga y en la fuente.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

1.2. ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

El siguiente trabajo está dividido en 5 secciones que describen el proceso Diseño un cargador de baterías con alimentación AC trifásica con múltiples salidas DC para ser utilizado en baterías secas.

En la primera sección se muestra la introducción que da pie a la necesidad de implementar este sistema, enfoque en el tema real de la problemática que se quiere abordar con el proyecto.

Continuando en la segunda sección, se encuentra el marco teórico que habla de los conceptos básicos que se deben tener en cuenta en la lectura del documento. Cabe aclarar que allí se describen datos técnicos, por lo que este texto está dirigido a un público con conocimientos básicos de los temas tratados en él.

La sección 3 muestra la metodología implementada en el diseño del cargador de baterías, es decir, cada uno de los pasos necesarios para el diseño de los elementos que contiene este dispositivo.

En la sección 4 se muestran los resultados obtenidos en la etapa del diseño, apoyados en los programas de diseño y simulación, se discuten para la mejor utilización dentro del proyecto.

En la sección 5 se presentan las conclusiones de la implementación de este trabajo, además se proponen unas recomendaciones para optimizar el diseño del cargador de baterías y los trabajos futuros que pueden mejorar mucho más el dispositivo diseñado.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

2. MARCO TEÓRICO

2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Para la operación del Túnel Fernando Gómez Martínez es necesario tener un sistema eléctrico confiable que permita operación continua sin afectar a los usuarios. Las cargas eléctricas críticas en el túnel son:

1. Sistema de supervisión y control (SC): compuesto de sistema cerrado de televisión, detección de incendios, control y supervisión de energía, el control de la ventilación, sistema de tráfico, sistema HMI, etc.
2. Sistema de Alumbrado de Emergencia (AE): compuesto de la iluminación de emergencia y evacuación del interior del túnel.

Las Empresas Públicas de Medellín (EPM) se encargan de suplir la energía eléctrica al Túnel, éste a su vez cuenta con tres subestaciones que distribuyen la energía a lo largo de los 4,6km de longitud que tiene el túnel; cada subestación eléctrica tiene esquemas de conexiones idénticos, tal y como se ilustra en la Figura 1. Dado que la red eléctrica de EPM sufre daños inesperados por problemas en su subestación, cortes inesperados ocasionados por descargas atmosféricas o cortes de servicio por mantenimientos programados, se hace necesario un sistema ininterrumpido de potencia (UPS) que permita alimentar las cargas críticas en el túnel, como son la iluminación de emergencia y el sistema de supervisión y control.

En la Figura 1 se muestra el esquema eléctrico de una de las tres subestaciones con las cuales cuenta el túnel, allí se observa que las cargas críticas son respaldadas por grupos de dos UPS, y cada UPS tiene un banco de baterías externo en el cual se almacena la energía de respaldo. También se puede apreciar que entre cada par de UPS hay una línea punteada que corresponde a la comunicación necesaria entre los dos equipos para operar de manera síncrona.

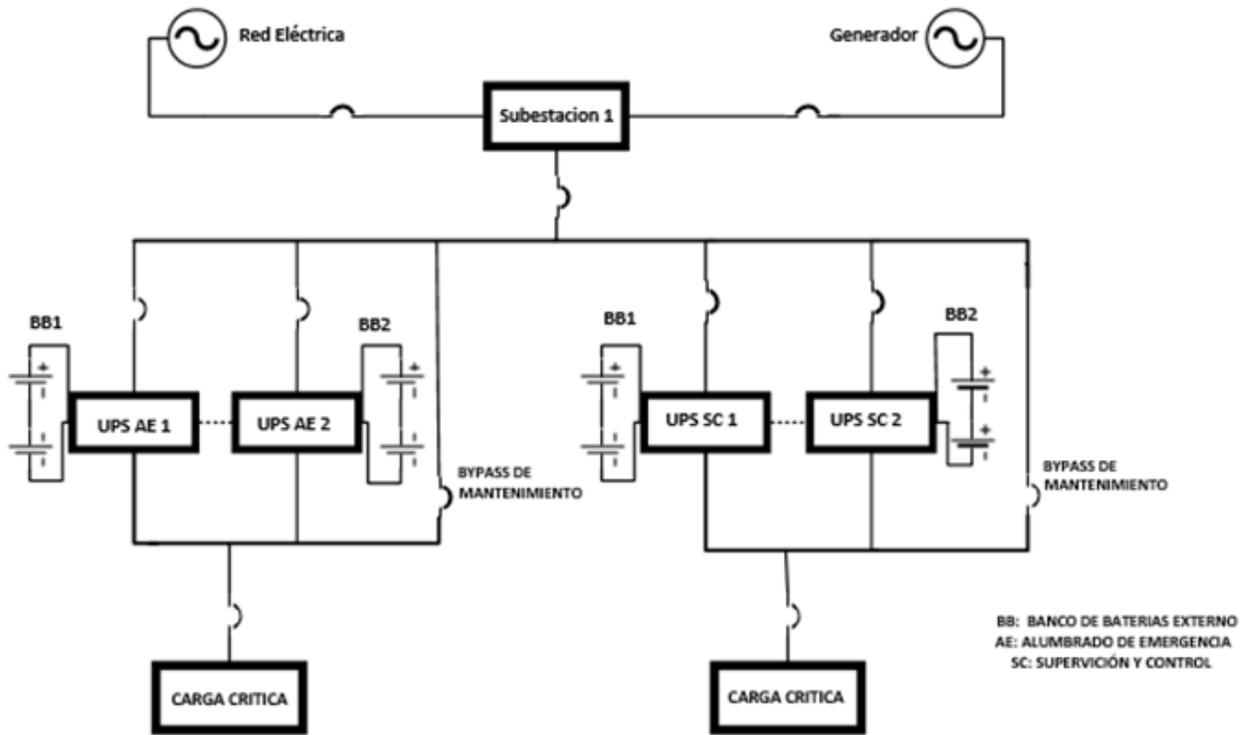


Figura 1. Esquema eléctrico de la red. Elaboración propia.

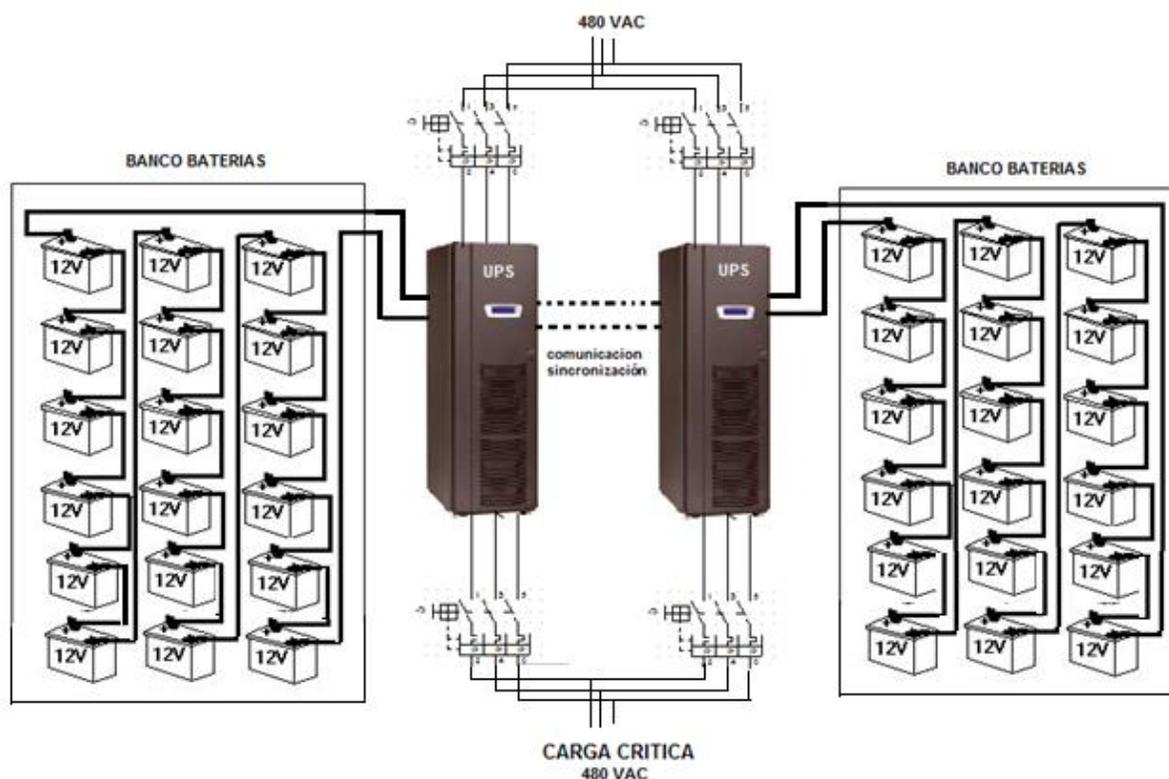


Figura 2. Conexión del sistema paralelo redundante. Elaboración propia.

El túnel cuenta con 12 UPS's divididos en 6 paralelos redundantes, cuya conexión se ilustra en la Figura 2; dos paralelos redundantes en cada subestación, un paralelo para alimentar alumbrado de emergencia (AE) y el otro paralelo para alimentar el sistema de supervisión y control (SC); cada UPS se encuentra conectada a un banco de baterías externo y se componen de 36 unidades de plomo-ácido VRLA de 75Ah a 12V. Cada UPS se dimensiona de tal manera que pueda suplir completamente la carga, en este caso son trifásicas de 40kVA a 480V. Cada pareja de UPS se encarga de alimentar completamente la carga asignada, es decir, la carga se divide a la mitad para cada una. Si una de las UPS falla o se le debe hacer algún mantenimiento mientras está en operación, la otra UPS debe asumir la carga completa. A partir del historial de eventos en el túnel, el sistema de respaldo energético entra en operación una vez por semana durante 10 minutos en promedio. El resto del tiempo la UPS mantiene las baterías con un nivel de carga óptimo. Dado que las baterías en uso pueden sufrir daños, se tiene disponible un stock de baterías para reemplazo cuando sea necesario.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Este proyecto se enfoca en presentar solución a un problema específico de bajo nivel de carga relacionado con las baterías del stock de respaldo y con las que están en operación con alguna de las UPS y que por algún motivo no reciben carga desde la UPS. El primer problema se presenta en las baterías que no están conectadas a las UPS (Baterías en stock), ya que estas pueden durar bastante tiempo sin uso y cuando se van a utilizar ya no tienen carga debido a su auto descarga, lo cual disminuye la vida útil de la batería, su capacidad de utilización y la confiabilidad en la operación de las UPS en los cortes de la red eléctrica. Problemas que reducen la vida útil de la batería como los que se explican en (Belmokhtar, Ibrahim, Féger, & Ghandour, 2016), y no sirve de respaldo energético en el momento que se necesita.

El segundo problema se presenta en las baterías que están en algún banco de las UPS. Si una UPS está en operación y falla por cualquier motivo, dicha UPS sale de funcionamiento y se desconecta del paralelo redundante mientras es reparada, la reparación de estos sistemas solo la puede hacer una única empresa acreditada para ello en Colombia, por lo tanto, el mantenimiento correctivo y puesta en marcha puede tardar semanas o meses, mientras realizan los trámites administrativos y pliegos de contratación. Durante ese tiempo las baterías conectadas a la UPS no reciben carga y continúan descargándose debido al auto descarga de las mismas.

Por tanto, con el diseño del cargador de baterías planteado en este trabajo se pretende dar solución a los dos problemas anteriormente descritos.

2.2. CARGADORES DE BATERÍAS

Los cargadores de baterías son dispositivos utilizados para suministrar permanentemente la tensión y la corriente eléctrica a una batería recargable o a un conjunto de éstas simultáneamente, para mantenerlas en un estado de carga óptima para su operación, ya que éstas se descargan mediante su ciclo de operación normal y al fenómeno de autodescarga causado por la resistencia interna de la batería. Son generalmente construidos bajo topologías de convertidores DC/DC y rectificadores AC/DC para mantener la carga de un banco de baterías utilizado como fuente de energía por un sistema ininterrumpido de potencia (UPS) o en aplicaciones modernas como los automóviles eléctricos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Los sistemas ininterrumpidos de potencia (UPS) son equipos de gran importancia y relevancia en industrias o procesos críticos, que no pueden interrumpir su operación, ya que si se detiene o se altera su funcionamiento por problemas de alimentación de energía, resulta costoso, tanto en dinero como en tiempo, por pérdida de información o daños en sus componentes (Aamir, Ahmed Kalwar, & Mekhilef, 2016). Los UPS obtienen la energía de respaldo, generalmente, de un banco de baterías de descarga profunda ácido-plomo (VLRA), debido a que estas tienen un mejor comportamiento a un mayor porcentaje de descarga y ciclos constantes de descarga en comparación con otro tipo de baterías (Pascoe & Anbuky, 2004); estas baterías a lo largo del tiempo van reduciendo su nivel de carga, bien sea por su ciclo normal de descarga alimentando la carga o por el fenómeno de autodescarga que se presenta aún en circuito abierto; por esto se requiere de un dispositivo como el cargador de baterías que mediante diferentes métodos de carga, según sea la necesidad o la aplicación, con el control en la aplicación de tensión y corriente eléctrica, eleva nuevamente la carga de las baterías para tener disponibilidad de operación y para optimizar la vida útil de estas, puesto que si un acumulador o batería no recibe carga, pierde su capacidad de operación. La selección del método de carga de la batería es importante según sus especificaciones, ya que un mal proceso de carga puede desencadenar procesos no deseados como la fuga térmica que es un fallo recurrente en las baterías de ácido-plomo, que consiste en el incremento de la temperatura de la batería, la cual afecta directamente su vida útil (Catherino, 2006).

Un cargador de baterías es un dispositivo electrónico que debe cumplir básicamente 3 funciones, entregar carga a la batería, optimizar la velocidad de carga y poner fin al proceso de carga cuando la batería cargue completamente (Hussein & Fardoun, 2015); en todos los casos el cargador debe entregar una salida de voltaje limpio con límites estrictos sobre los picos de corriente y voltaje, ondulación, ruido y las interferencias de radiofrecuencia, todo lo cual podría causar problemas a la batería o los circuitos en los que se utiliza. Para aplicaciones de alta potencia el cargador de baterías debe tener una buena eficiencia, superior al 90%; manejar la corriente de irrupción, es decir, limitar el impulso de corriente cuando se conecta inicialmente una batería sin carga; y manejar un factor de potencia lo más cercano al ideal, para no generar alteraciones en el sistema eléctrico (Woodbank Communications Ltd., 2005)

Fue el proceso de carga de las baterías o acumuladores, el que generó la necesidad del diseño de un dispositivo que regulara la tensión de carga de los dispositivos. En sus inicios el proceso de carga

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

de las baterías no era un proceso que controlara la tensión, la corriente y el tiempo, sino un proceso ambiguo en cual simplemente se conectaba la batería a un voltaje mayor al nominal para que pudiera aceptar la carga, pero no se controlaban las variables corrientes y tiempo; por este motivo los primeros cargadores de baterías no eran dispositivos eficientes y afectaban considerablemente la vida útil de las baterías. Sus componentes básicos eran un transformador de energía para reducir la tensión de la fuente de alimentación y un puente rectificador de diodos para rectificar la corriente alterna en corriente directa.

En la actualidad los cargadores de baterías son diseñados con el fin de conservar el voltaje, la corriente y la temperatura en valores dentro de rangos normalizados dentro de los cuales se optimice la vida útil de la batería, el consumo de energía y el tiempo de mora en completar completamente la carga (carga rápida). Para cumplir estos lineamientos se encuentran con mucha frecuencia convertidores DC/DC paso a paso que tienen un tiempo de mora tolerable para cargar las baterías y que permite mediante semiconductores de potencia regular que tipo de carga es el conveniente para el tipo de batería o acumulador al que esté conectado.

En el futuro se espera que los cargadores de batería se diseñen y se mejoren continuamente con los resultados que se obtengan de procesos de análisis de comportamiento de las baterías en sus etapas de operación, como también realizar procesos de predicción de vida útil de las baterías (Tsujikawa & Matsushima, 2007); igualmente en la industria automotriz se están impulsando con gran fuerza los vehículos eléctricos y los vehículos eléctricos híbridos, que tienen como deudores a las baterías por su baja autonomía y a los cargadores por la incapacidad de realizar la carga de la batería de una manera rápida y confiable para la operación continua y longeva que se espera tenga una batería (Svoboda, Doering, & Garche, 2005).

2.2.1. Funcionamiento de la batería.

El funcionamiento normal de las baterías se puede describir en tres fases, en los cuales el cargador de baterías es participante activo de dos de ellas; la primera fase es la descarga donde la batería alimenta la carga conectada, en esta fase el cargador de baterías no participa; la segunda fase es la fase de carga, donde los cargadores de baterías inician su operación inmediatamente la carga se

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

desconecta de la batería, en esta etapa la batería se encuentra baja de carga, entonces el cargador de baterías aplica una tensión superior a la tensión nominal de la batería para que esta comience a aceptar la carga. La corriente de carga aumenta rápidamente alcanzando un límite, ya sea debido a limitaciones de potencia del cargador o a una limitación de corriente inherente de la batería en función de su resistencia interna (Pascoe & Anbuky, 2004); esto hasta que la batería alcance su valor de tensión nominal; una vez que el voltaje de la batería alcanza la tensión de carga, la corriente de carga disminuye, y comienza la tercera etapa, que es la fase de carga de flotación, donde el cargador de baterías debe suministrar permanentemente una corriente baja a las baterías, especialmente las baterías de plomo-ácido de descarga profunda (VRLA), para prevenir el fenómeno de auto descarga (Tsujikawa & Matsushima, 2007).

2.2.2. ¿Qué es una batería?

Las baterías son dispositivos electroquímicos que pueden estar constituidos por una o varias celdas electroquímicas, eléctricamente conectadas en arreglos en serie o paralelo, según las necesidades de voltaje y corriente que requiera la carga, su función es convertir la energía química almacenada en sus materiales activos directamente en energía eléctrica mediante una reacción electroquímica de oxidación-reducción (redox) que involucra la transferencia de electrones desde un material a otro a través de un circuito eléctrico (Ehrlich, 2002). Las celdas que están conectadas al interior de la batería constan de los siguientes elementos como lo muestra la Figura 3 (Campos & Ronyver, 2015):

- El electrodo negativo o ánodo, el cual libera electrones.
- El electrodo positivo o cátodo, el cual recibe electrones.
- El electrolito, es el medio que permite la circulación de electrones entre ánodo y cátodo.
- Los separadores que garantizan el aislamiento entre los dos electrodos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

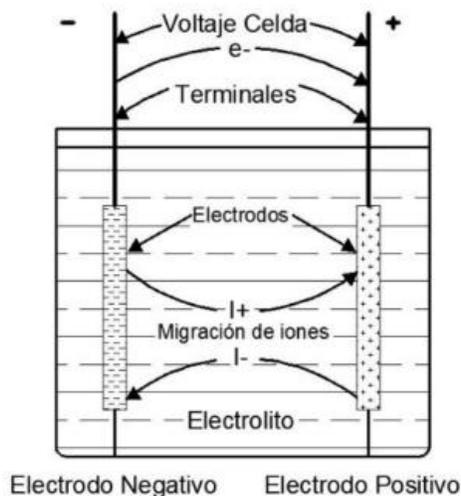


Figura 3. Celda Electroquímica. (Campos & Ronyver, 2015)

2.2.2.1 Baterías de Plomo-Acido

Las baterías de plomo-ácido cuando se encuentran totalmente cargadas, están compuestas por un cátodo de dióxido de plomo y un ánodo de plomo, durante el proceso de descarga se produce la disociación del electrolito que es ácido sulfúrico, de manera que el dióxido de plomo y el plomo se transformen gradualmente en sulfato de plomo, durante esta reacción se genera agua, por lo cual el electrolito va disminuyendo su densidad y va quedando menos ácido. Durante la carga, el flujo de corriente entre las placas hace que se produzca la disociación del sulfato de plomo, mientras que en el electrolito se produce la electrólisis del agua liberando hidrógeno y oxígeno, por ende la disminución del volumen de agua; en esa situación el sulfato de plomo de la placa positiva se transforma en dióxido de plomo, la placa negativa en plomo y se forma nuevamente ácido sulfúrico, volviendo a la condición de carga de la batería (Gobierno de Chile, 2009).

2.2.2.2 Baterías de plomo-Acido VRLA

Las baterías de plomo-ácido VRLA (Valve Regulated Lead-Acid) se basan en los mismos principios, materiales y reacciones químicas que su antecesora la batería abierta o ventilada, se diferencian

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

entre sí principalmente por el control de la liberación de gases mediante una válvula y por el estado en el que se encuentra el electrolito en su interior, si bien ambas tienen como el electrolito una disolución de ácido sulfúrico, en las baterías abiertas se encuentra el electrolito en estado líquido, mientras que en las baterías VRLA se puede encontrar el electrolito en forma de gel o en esteras de vidrio absorbente, lo cual permite instalar la batería en diferentes posiciones (Berndt, 2001).

El diseño de la batería VRLA en comparación a su antecesora la batería ventilada tiene ventajas como la eliminación en gran medida de la estratificación sólida, esta estratificación es causada por la participación de ácido sulfúrico del electrolito en la reacción del electrodo y consiste en los cambios de concentración del electrolito en la parte superior e inferior de la batería (Berndt, 2001), también se consideran ventajas las tasas de gasificación reducidas y la ausencia de derrames de ácido.

El sistema electroquímico de las baterías VRLA, como se puede observar en la Figura 4 es un complejo sistema de reacciones de sus componentes durante los procesos de carga y descarga.

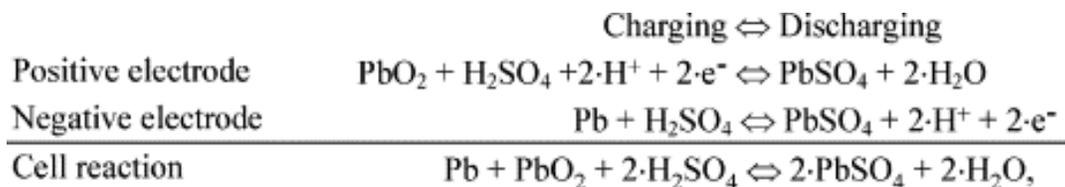


Figura 4. Sistema electroquímico de la batería VRLA. (Berndt, 2006)

Sin embargo, aparte de las reacciones primarias, también se presentan una serie de reacciones secundarias inherentes al sistema y que, aunque se ha disminuido su efecto en las VRLA aún hacen parte de la operación normal de las baterías.

Evolución del hidrógeno y el oxígeno:

Estas reacciones ocurren mientras se encuentran polarizados los electrodos de la batería, se libera hidrógeno en el electrodo negativo y se libera oxígeno en el electrodo positivo; afortunadamente ambas reacciones se encuentran restringidas en las superficies de dióxido de plomo y plomo, respectivamente. Esto hace que estas reacciones sean tan lentas que no afecten el funcionamiento

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

de la batería, pero siempre se producen durante los procesos de carga y descarga y durante la estancia de circuito abierto de la batería; este fenómeno es el que produce la auto descarga (Berndt, 2006).

La corrosión de la rejilla:

La situación de los conductores en el electrodo positivo no es estable, por ende, aunque la rejilla de plomo se encuentra protegida por una capa de óxido de plomo, la corrosión penetra gradualmente a las placas más internas, la velocidad de corrosión depende de la aleación de plomo que se utilice y es mucho más baja para el plomo puro. Igualmente, factores como el potencial del electrodo, la temperatura de la batería, entre otras, aceleran el proceso de corrosión de la placa. A medida que se corroe la rejilla se ve afectado el flujo de corriente a través del electrodo.

2.3. METODOS DE CARGA

2.3.1. Voltaje constante.

Es una técnica de carga en la cual el ajuste de tensión está en la región de sobrecarga y un límite de corriente que no dañe la batería. Al inicio de la carga la tensión será relativamente baja y se irá alcanzando rápidamente el límite de corriente, el proceso de carga se mantendrá en el límite de corriente hasta que la tensión de carga de la batería alcance la tensión establecida como se muestra en la Figura 5 (Nelson, 2004).

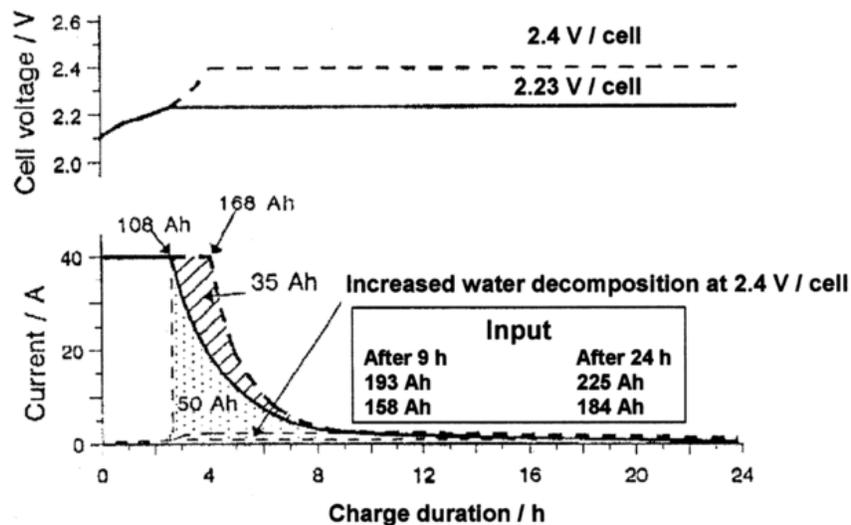


Figura 5. Voltaje constante. (Nelson, 2004)

2.3.2. Corriente constante.

En este método una corriente constante de carga se aplica a la batería; debido a que los voltajes generalmente no están controlados puede ocurrir que se produzcan gases o exista corrosión en las rejillas debido a que las células pasen gran cantidad de tiempo a tensiones más altas de las de diseño.

2.3.3. Combinación entre corriente constante y voltaje constante:

Es uno de los métodos más eficaces para cargar baterías VRLA, por tanto, es el que se tomó para el objetivo del proyecto. Es simplemente una carga con corriente limitada con una etapa de voltaje controlado inferior al actual. Un ejemplo se visualiza en la Figura 6 (Nelson, 2004), donde en el gráfico superior se ve el voltaje de la batería y en el gráfico inferior la corriente de carga, allí se puede identificar como el voltaje de la batería va alcanzando el voltaje de flotación por celda (2,45V) mientras es cargada a corriente constante y luego de que la batería alcanza su voltaje nominal, permanece en dicho voltaje mientras que la corriente de carga baja a 0.

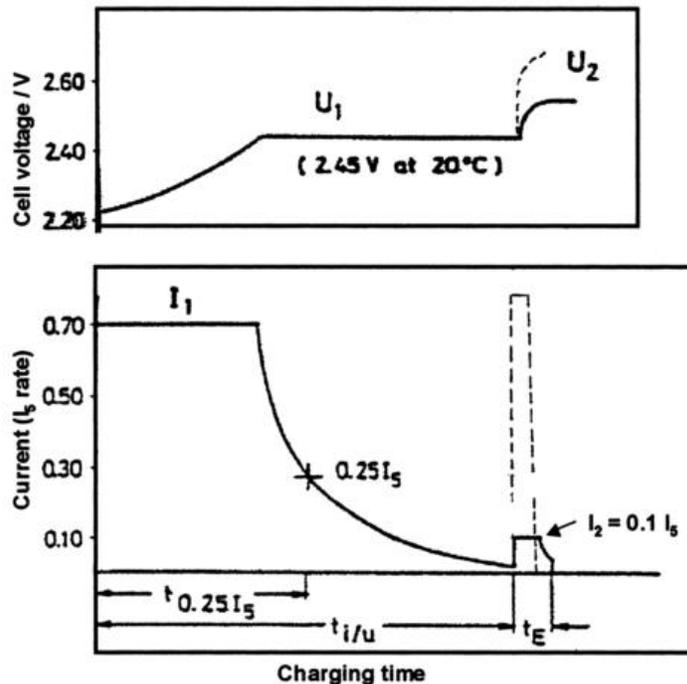


Figura 6. Combinación entre corriente constante y voltaje constante. (Nelson, 2004)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

2.3.4. Disminución gradual de corriente.

Como su nombre lo indica la corriente disminuye a razón que el voltaje de la celda se acumula. Existe un alto peligro de dañar las celdas por sobrecarga. Este tipo de carga es adecuado solo para baterías de plomo.

2.3.5. Corriente por impulsos.

Como puede verse en la Figura 7 (Nelson, 2004), hay dos enfoques generales, uno que utiliza un periodo constante con la disminución de la amplitud, tal como se observa en el lado izquierdo de la Figura 7 y otro con una amplitud constante y período decreciente, como el que se observa en la parte derecha de la Figura 7; en ambos casos la corriente disminuye al acercarse al final del proceso, de este modo se disminuye la sobrecarga y la liberación de gases.

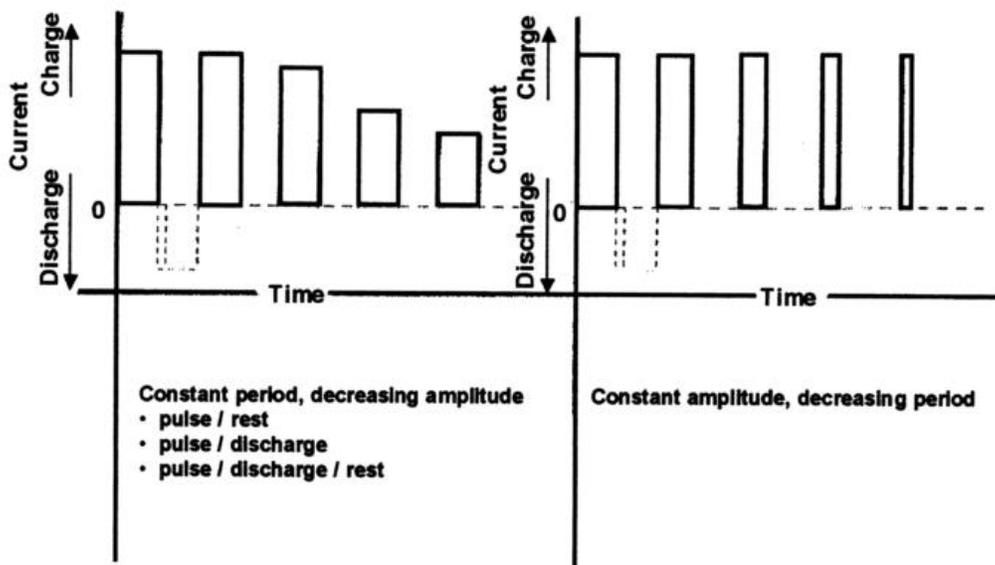


Figura 7. Corriente por impulsos. (Nelson, 2004)

2.4. RECTIFICADOR TRIFÁSICO PFC

La principal característica de un rectificador es convertir corriente alterna en corriente continua, convierte una señal alterna la cual cambia contantemente en el tiempo variando su intensidad, también cambia de sentido de acuerdo a la frecuencia de trabajo, es decir 60 Hz, 60 veces cada segundo. En una señal continua en la cual la tensión y la corriente son constantes no varían en el

tiempo y siempre tienen un mismo sentido de circulación. En la Figura 8 se observan las señales típicas en una fuente de tensión trifásica sin alteraciones, ni distorsiones y secuencia de fases a-b-c. Las señales del rectificador de puente completo se muestran en la Figura 9.

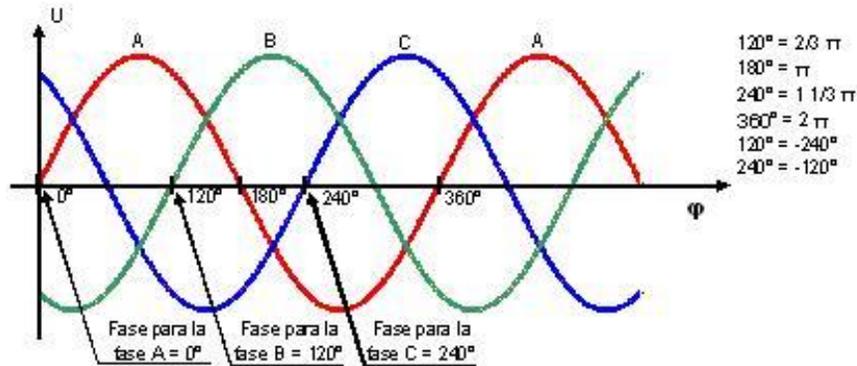


Figura 8. Señal trifásica alterna. (Nunez, n.d.)

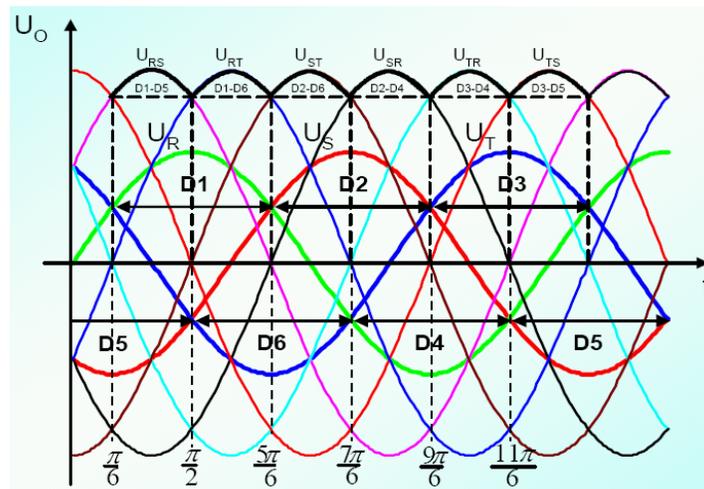


Figura 9. Señal de tensión de la fuente y de salida trifásica rectificada. (docplayer)

Los rectificadores trifásicos controlados se pueden clasificar en dos topologías básicas dependiendo del nivel de tensión a la salida. Los reductores llamados “buck” y los elevadores llamados “boost”. (Kolar & Friedli, 2011) y (Singh et al., 2004). Adicionalmente en la entrada del rectificador se necesita un filtro LC que permita tener un THD admisible en aplicaciones industriales.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

2.5. CONVERTIDOR DC-DC

Un convertidor DC/DC, básicamente, es un dispositivo cuya finalidad es elevar voltaje, para la topología boost, o reducirlo para la topología Buck. Como se ilustra en la Figura 10, el dispositivo por lo general es controlado por un dispositivo que compara la señal de salida con un valor de referencia establecido y de esta manera altera el porcentaje de tiempo de operación (duty) de los dispositivos conmutadores.

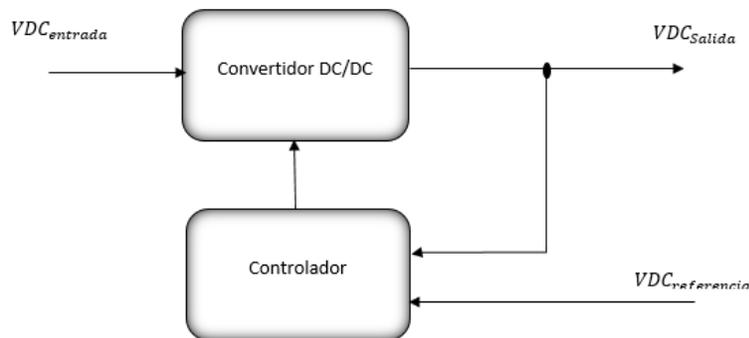


Figura 10. Diagrama de bloques de un convertidor DC/DC controlado. Elaboración propia.

El convertidor cuadrático reductor es mostrado en la Figura 11, este es básicamente la conexión en cascada de dos convertidores reductores básicos solo que es controlado con cuatro interruptores de potencia. Esta topología presenta la relación de transformación de voltaje entrada-salida dada por (1), donde V_g corresponde al voltaje de entrada o alimentación, D al ciclo de trabajo y V_0 el voltaje de salida, obtenido entre los terminales positivo y negativo.

$$V_0 = D^2 \times V_g \quad (1)$$

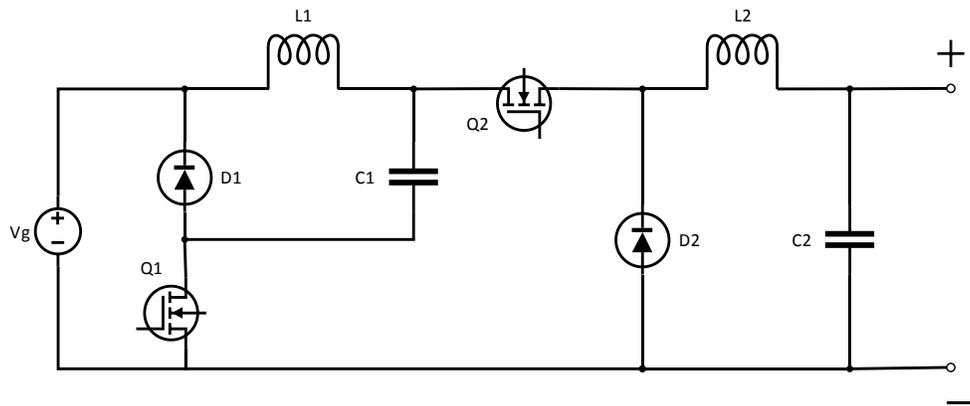


Figura 11. Circuito de convertidor tipo Buck cuadrático. Elaboración propia.

De la Figura 11, Circuito de convertidor tipo Buck cuadrático, se derivan dos circuitos, el primer circuito equivalente, mostrado en la Figura 12, está relacionado con el tiempo de conexión del transistor Q1 y Q2. Durante este período de tiempo, las corrientes en los inductores L1 y L2 aumentará en valor absoluto. El condensador C1 se descarga por medio de L2 y el condensador C2 se descarga a través de la carga.

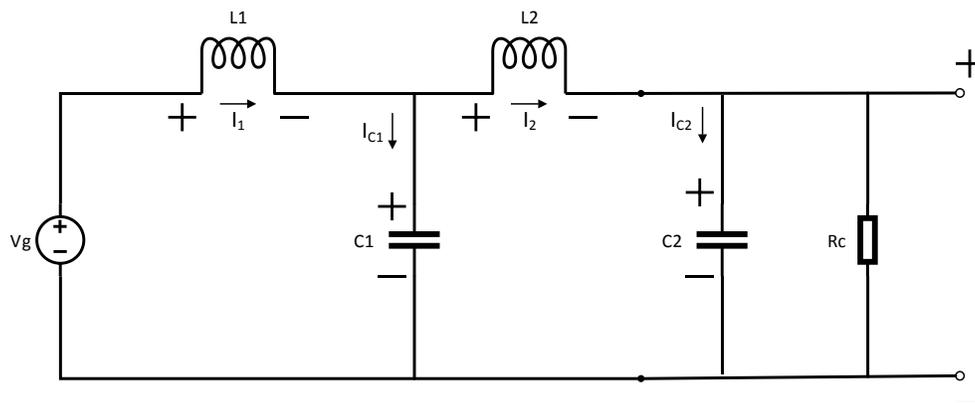


Figura 12. Cuando Q₁ y Q₂ están en posición ON. Elaboración propia.

El segundo circuito equivalente, ilustrado en la Figura 13, es asociado al tiempo complementario y está relacionado con el transistor Q1 y Q2 en estado OFF. En este estado, las corrientes en los inductores L1 y L2 disminuirán en valor absoluto. La energía que se almacenó en esos inductores se transferirá al condensador y a la carga (sistema de almacenamiento).

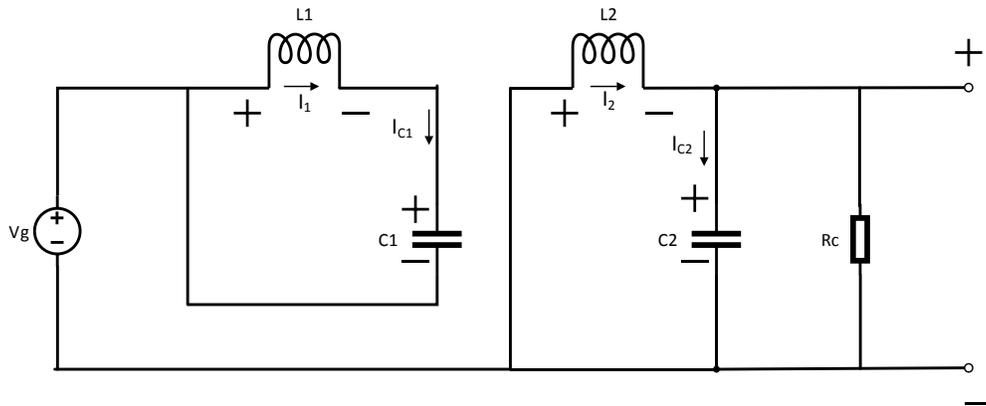


Figura 13. Cuando Q_1 y Q_2 están en posición OFF. Elaboración propia.

2.6. MODELADO DE BATERIAS

Las baterías son uno de los dispositivos más comunes utilizados para almacenar energía eléctrica en diversas aplicaciones. Se necesita un modelo preciso de una batería con una aplicación específica para un análisis y simulación apropiados, tal como se explica en (Ceraolo, 2000), (Roiu, Primon, Rossella, & Ornato, 2017) y (Jantharamin & Zhang, 2008). Se requiere de un modelado de la batería para poder obtener simulaciones precisas y así evaluar el funcionamiento del sistema, por lo tanto, encontrar un modelo que pueda describir el comportamiento de una batería no es trivial, ya que se deben involucrar algunas variables del comportamiento de la batería durante los procesos de carga y descarga, como la temperatura, el tiempo de utilización, el nivel de la carga, el estado de la carga, etc. Se pueden encontrar muchos modelos de baterías basados en ensayos prácticos y experimentales, algunos son prácticos y relativamente simples para la simulación y otros son más complejos, tal como se ilustra en (Chan, 2000) y que se ilustra en la Figura 14.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

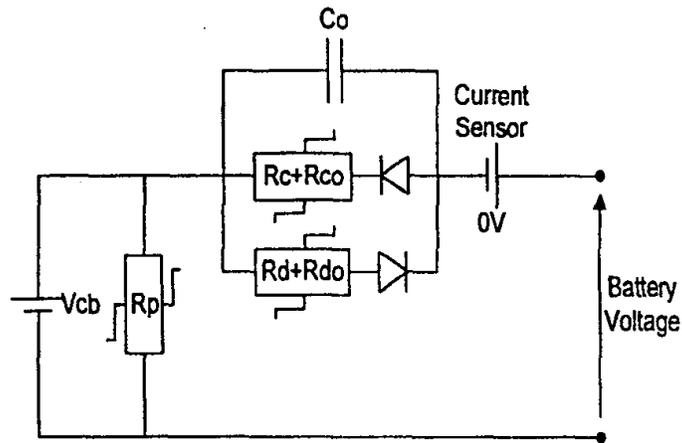


Figura 14. Modelo de batería mejorada. (Chan, 2000)

2.7. CONTROLADOR PI

El objetivo principal del controlador PI en este proyecto es la regulación de la tensión y la corriente de salida de un convertidor DC-DC, y que los valores de tensión y corriente controlados se ajusten lo más posible al valor de referencia, para el convertidor este valor de referencia es más bajo que el voltaje de entrada. Esta regulación debe mantenerse a pesar de las variaciones en la carga o el voltaje de entrada. Las diferentes técnicas de control que se usan en la práctica tienen en común el empleo de controladores de tipo PI que se sintonizan sobre la base de modelos promediados linealizados como se ve en (Abdullah, Tan, & Yatim, 2015) que emplea dos circuitos de control para la corriente del inductor y el voltaje de salida.

En realidad, no existen controladores que actúen únicamente con acción integral, siempre actúan en combinación con reguladores de una acción proporcional, complementándose los dos tipos de reguladores como lo muestra la Figura 15, primero entra en acción el regulador proporcional (instantáneamente) mientras que el integral actúa durante un intervalo de tiempo. (T_i = tiempo integral)

La Función de transferencia del bloque de control PI responde a la ecuación:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = K_p \times \left(\frac{1}{T_i \times s} + 1 \right) \quad (2)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Donde K_p y T_i son parámetros que se pueden modificar según las necesidades del sistema. Si T_i es grande la pendiente de la rampa, correspondiente al efecto integral será pequeña y, su efecto será atenuado, y viceversa.

Por lo tanto, la respuesta de un regulador PI será la suma de las respuestas debidas a un control proporcional P, que será instantánea a detección de la señal de error, y con un cierto retardo entrará en acción el control integral I, que será el encargado de anular totalmente la señal de error.

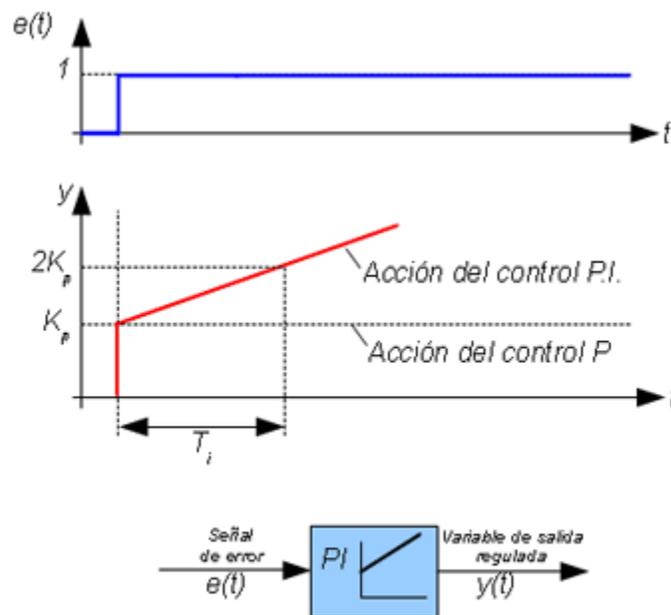


Figura 15. Controlador PI. Recuperado de http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4926/html/13_controlador_de_accion_proporcional_e_integral_pi.html

En la Figura 15 se observa como la acción proporcional entra en operación inmediatamente la señal de error es detectada, y a partir de ese momento la acción integradora entrará en operación durante un periodo de tiempo T_i , con el objetivo de volver a anular la señal de error.

3. METODOLOGÍA

Los bancos de baterías del Túnel Fernando Gómez Martínez están conformados por un grupo de 36 baterías de 75Ah a 12V, que se encuentran interconectadas en serie como se muestran en la Figura 16, dicho banco es el que proporciona la energía a los UPS's durante una ausencia de energía en la fuente de alimentación principal; mientras los UPS's no se encuentren en servicio, son éstos los encargados de mantener el banco de baterías con el nivel de carga óptima, listas para entrar en operación, pero en el momento que un UPS se encuentre fuera de servicio, el banco de baterías queda sin supervisión del nivel de carga y bajo el fenómeno de autodescarga.

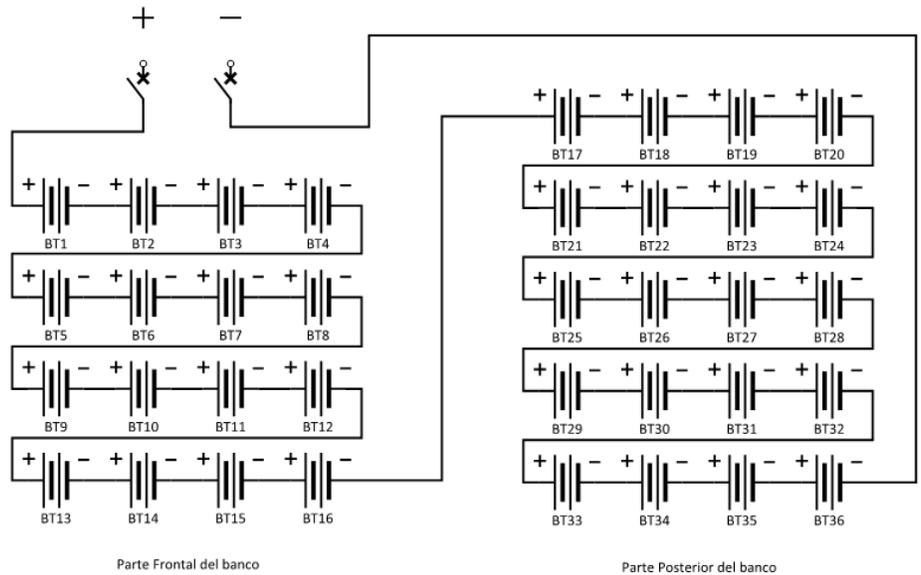


Figura 16. Esquema de conexión y ubicación física de baterías en el banco. *Elaboración Propia.*

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

El método de carga de baterías que proporciona el UPS es un sistema propio del fabricante Eaton, denominado ciclos ABM, el cual opera con todas las baterías conectadas en serie a un voltaje de 480V, 13.5V/batería; el problema de este sistema es, que considera que todas la baterías se encuentran en el mismo nivel de carga, cosa que es muy difícil que ocurra ya que cada batería es un sistema independiente en el que ocurren reacciones químicas internas que pueden llegar a alterar la vida útil de la batería y su estado de carga de manera diferente.

El método de carga ideal para el banco sería implementar un sistema que cargue de manera individual cada una de las baterías, ya que al momento de la carga las baterías van a tener un estado de carga diferente y van a alcanzar el estado de carga total en momentos diferentes; éste método de carga presenta también una gran restricción, habría que diseñar un convertidor DC/DC para cada batería y conectar 36 Convertidores DC/DC en paralelo a la salida de un rectificador que esté en la capacidad de soportar la potencia de consumo del sistema de carga, para este proyecto sería un dispositivo de alrededor de los 78kW, cargando las baterías con la corriente sugerida por el fabricante; por tanto, si se diseña un sistema bajo estas condiciones, el rectificador sería un sistema demasiado robusto y con componentes de difícil adquisición, además de los costos y la complejidad del montaje para la cantidad de elementos que se requerirían para construir 36 convertidores DC/DC.

Realizando un análisis de las ventajas y desventajas de ambos sistemas de carga y aprovechando la ubicación física de las baterías dentro del banco, como se puede observar en la Figura 16, se decide cargar series de 4 baterías, con la corriente, voltaje y sistema de carga sugerido por el fabricante.

Según los datos aportados por el fabricante y que se observan en las curvas de carga de la Figura 17, el método de carga sería corriente constante hasta alcanzar el valor de voltaje de flotación, luego continuar la carga a voltaje constante; el valor de la corriente de carga se sugiere el 10% de la capacidad de la batería, para el diseño de este cargador sería de 7.5A y el voltaje de carga sugerido es de 2.25V/celda, 13.5V para este caso.

Float Charging Characteristics

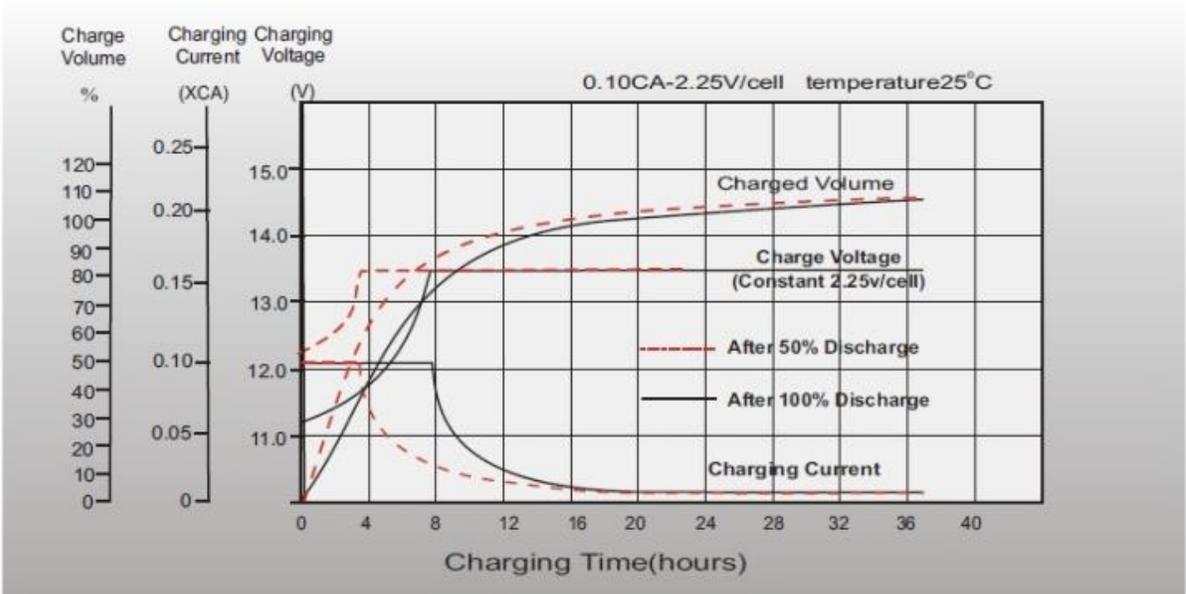
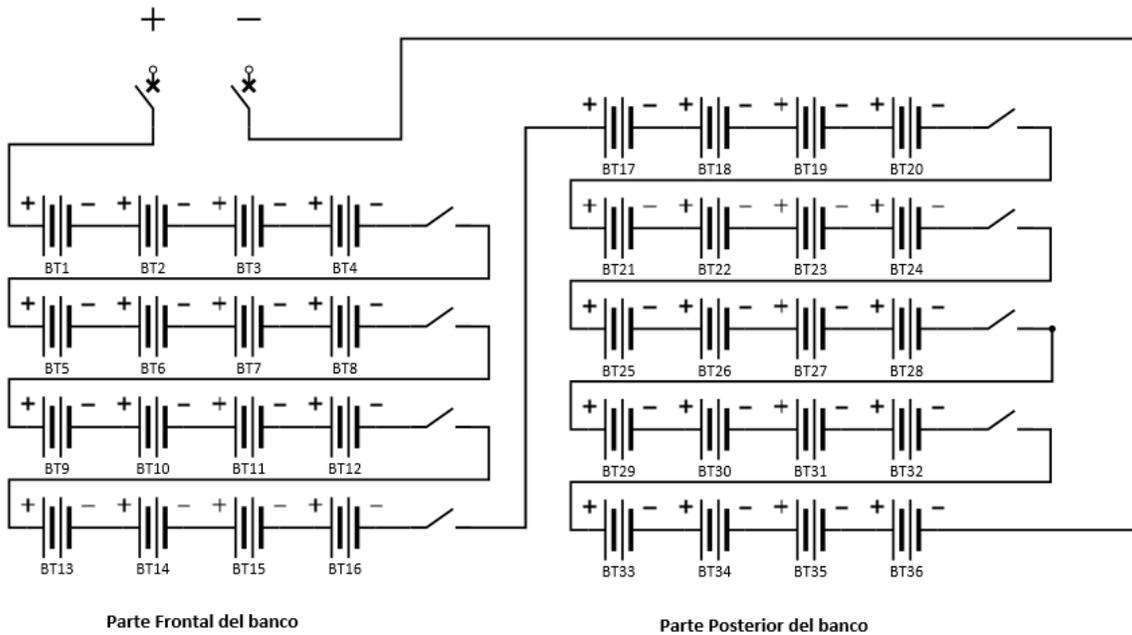


Figura 17. Curva característica de carga de la batería. Tomada de datasheet de la batería.

Para realizar el método de carga propuesto es necesario independizar físicamente dentro del banco de baterías cada una de las series de 4 baterías, para ello se quiere aprovechar su distribución actual para implementar contactos normalmente abiertos entre bandejas, como se muestra en la Figura 18, y así independizar cada una de las series para realizar el proceso de carga. Cabe anotar que los contactos se operarían de manera simultánea y que cuando esta operación se realice no va a tener ninguna alimentación dependiente del UPS.



Simbología eléctrica



Figura 18. Esquema de conexión propuesto para el banco de baterías. Elaboración propia.

3.1. RECTIFICADOR

Debido a que las baterías operan con corriente directa y la fuente de alimentación a la cual se va conectar el dispositivo es una red trifásica de corriente alterna, es necesario utilizar un dispositivo que convierta la energía eléctrica de la red trifásica de corriente alterna a una corriente directa, que pueda ser utilizada en el proceso de carga de las baterías; pero que a su vez realice corrección de factor de potencia para no afectar la red eléctrica a la que sea conectada.

Para el desarrollo de este trabajo se indagó en la literatura especializada acerca de un rectificador PFC que se ajustara a las necesidades planteadas y fuera posible implementarlo en el desarrollo del trabajo; se selecciona una topología de un rectificador trifásico PWM con PFC, ilustrado en la Figura 19., el cual se ajusta a las condiciones de la red eléctrica disponible para la conexión del cargador, la cual es una red eléctrica trifásica a 208V; entrega una salida en DC que puede variarse sin

afectaciones del mismo entre 300V-400V y realiza corrección al factor de potencia para no afectar la red eléctrica de alimentación.

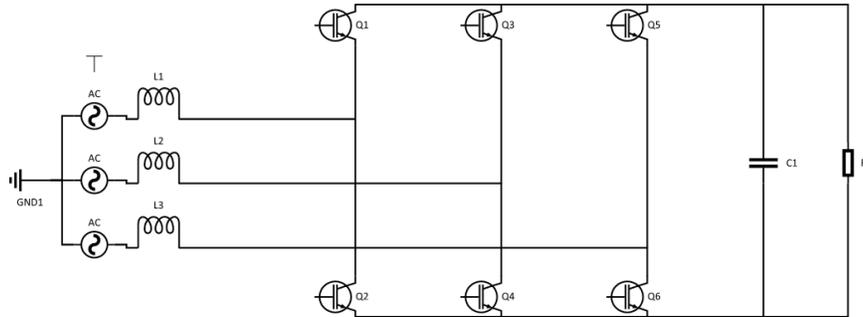


Figura 19. Esquema básico de rectificador trifásico PWM con PFC. Elaboración propia.

3.2. CONVERTIDOR DC-DC

Para el diseño del convertidor DC-DC se parte de dos datos importantes para la elaboración del mismo, el voltaje de alimentación del convertidor denominado $V_g = 300V$ y el voltaje a la salida del convertidor denominado $V_{buck} = 54V$, que es el voltaje adecuado para cargar una serie de 4 baterías, ya que como se puede evidenciar en la Figura 17 el fabricante recomienda cargar la batería a 2.25V/Celda, cada batería está conformada por 6 celdas conectadas en serie, lo que indica que cada batería se debe cargar a 13.5V, por tanto, para cargar una serie de 4 baterías se debe realizar a 54V según recomendación de fabricante; como es de notar el voltaje a la salida del convertidor es mucho menor que el de la entrada, debido a esto, se tuvo que utilizar una topología tipo Buck, la cual permite realizar una disminución del voltaje a través del convertidor.

Para el desarrollo del trabajo se optó por una topología tipo Buck cuadrático, ilustrado en la Figura 20, dado que el voltaje de salida es aproximadamente el 18% del voltaje de entrada, un convertidor Buck clásico tendría un rango de operación muy pequeño debido a que el ciclo de trabajo tendría un rango de variación muy pequeño y con valores cercanos a cero. Esto en cambio no se presenta en el convertidor seleccionado.

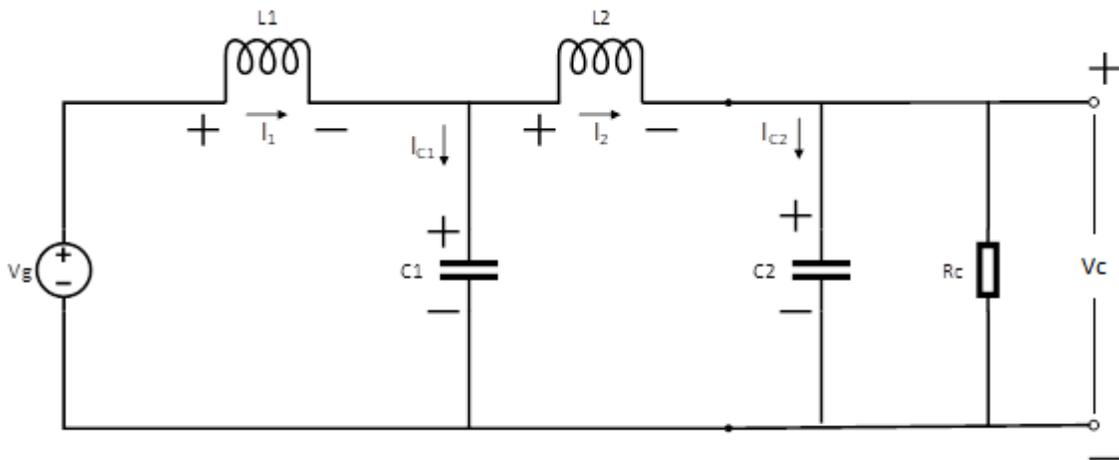


Figura 20. Convertidor DC/DC de topología buck cuadrático. Elaboración propia.

La topología buck cuadrática cuenta con dos switch tipo mosfet (Q_1 y Q_2) para realizar la conmutación, estos dispositivos son controlados simultáneamente, es decir, ambos se encuentran en operación (On) como lo muestra la Figura 21, o en reposo (Off) como lo muestra la Figura 22, en el mismo instante de tiempo; para iniciar con los cálculos de los elementos se analizó la corriente que circula por los capacitores y el voltaje de las bobinas, cuando se encuentran activos los switches y cuando éstos se encuentran inactivos, asumiendo el circuito en estado estable.

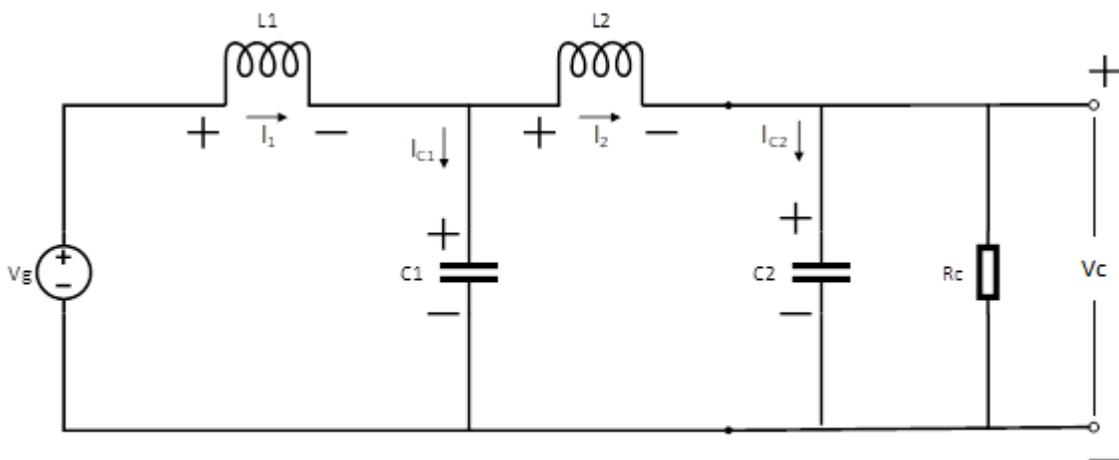


Figura 21. Cuando Q_1 y Q_2 están en posición ON. Elaboración propia

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Se inicia con el hallazgo de las variables de estado, mediante los métodos de mallas y nodos para la solución de circuitos eléctricos; para cuando los mosfet del circuito están en posición ON.

$$V_{L_1} = V_g - V_1 \quad (3)$$

$$V_{L_2} = V_1 - V_2 \quad (4)$$

$$I_{C_1} = I_1 - I_2 \quad (5)$$

$$I_{C_2} = I_2 - \frac{V_2}{R} \quad (6)$$

Donde:

V_{L_1} = Voltaje en la bobina 1.

V_{L_2} = Voltaje de la bobina 2.

I_{C_1} = Corriente en el capacitor 1.

I_{C_2} = Corriente en el capacitor 2.

V_1 = Voltaje en el capacitor 1.

V_2 = Voltaje en el capacitor 2.

I_1 = Corriente en la bobina 1.

I_2 = Corriente en la bobina 2.

V_g = Voltaje de la fuente o salida del rectificador.

R = Resistencia de carga.

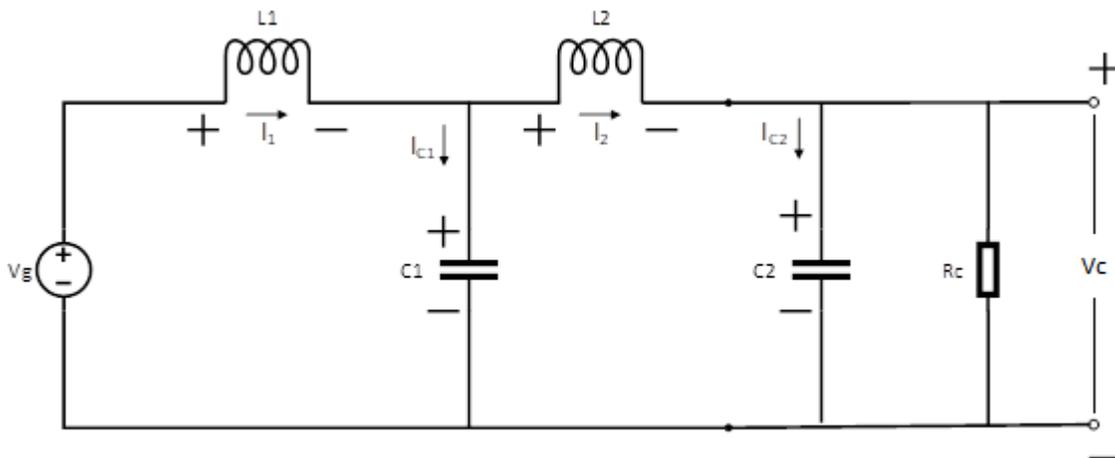


Figura 22. Cuando Q_1 y Q_2 están en posición OFF. Elaboración Propia.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Luego se hallan las variables de estado, para cuando los mosfet del circuito se encuentran en estado OFF.

$$V_{L_1} = -V_1 \quad (7)$$

$$V_{L_2} = -V_2 \quad (8)$$

$$I_{C_1} = I_1 \quad (9)$$

$$I_{C_2} = I_2 - \frac{V_2}{R} \quad (10)$$

Como se mencionó anteriormente, se partió desde un estado estable del circuito, por tanto, el valor de las magnitudes eléctricas que circulan por los componentes se van a asumir constantes, por lo cual su derivada va a ser igual a 0.

Para las bobinas se suman los voltajes en los ciclos de trabajo y de reposo, de esta manera se obtiene el modelo promediado del sistema y pueden hallarse los valores medios de cada una de las variables de estado.

$$L_1 \frac{di_1}{dt} = (V_g - V_1) * D - V_1 * D' \quad (11)$$

Resolviendo (11):

$$L_1 \frac{di_1}{dt} = V_g * D - V_1$$

$$0 = V_g * D - V_1 \xrightarrow{\text{Despejando } V_1} V_1 = V_g * D \quad (12)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} = (V_1 - V_2) * D - V_2 * D' \quad (13)$$

Resolviendo (13):

$$L_2 \frac{di_2}{dt} = V_1 * D - V_2$$

$$0 = V_1 * D - V_2 \xrightarrow{\text{Despejando } V_2} V_2 = V_1 * D \quad (14)$$

Despejando en términos de V_g :

$$V_2 = V_g * D^2 \quad (15)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Como V_2 se encuentra en paralelo con el voltaje de carga (V_c) se puede deducir que $V_2 = V_c$, por tanto de (15) se puede despejar el ciclo de trabajo (D)

$$D = \sqrt{\frac{V_c}{V_g}} \quad (16)$$

Igualmente para los capacitores con ayuda del modelo promediado, se hallan los valores medios de las variables de estado.

$$C_2 \frac{dv_2}{dt} = \left(I_2 - \frac{V_2}{R}\right) * D + \left(I_2 - \frac{V_2}{R}\right) * D' \quad (17)$$

Resolviendo (17):

$$C_2 \frac{dv_2}{dt} = I_2 - \frac{V_2}{R}$$

$$0 = I_2 - \frac{V_2}{R} \xrightarrow{\text{Despejando } I_2} I_2 = \frac{V_2}{R} \quad (18)$$

Despejando en términos de V_g :

$$I_2 = \frac{V_g * D^2}{R} \quad (19)$$

$$C_1 \frac{dv_1}{dt} = (I_1 - I_2) * D - I_1 * D' \quad (20)$$

Resolviendo (20):

$$C_1 \frac{dv_1}{dt} = I_1 - I_2 * D$$

$$0 = I_1 - I_2 * D \xrightarrow{\text{Despejando } I_1} I_1 = I_2 * D \quad (21)$$

Despejando en términos de V_g :

$$I_1 = \frac{V_g * D^3}{R} \quad (22)$$

Donde

$$R = \frac{V_c}{I_c} \quad (23)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Y como el voltaje de carga (V_C) y la corriente de carga (I_C) se definieron al inicio, se puede calcular la resistencia del circuito (R)

Conociendo los valores medios de las variables de estado, se debe dimensionar los elementos con la ayuda de las siguientes fórmulas obtenidas del libro (Erickson, Robert W., Maksimovic, Erickson, & Maksimovic, 2005); para esto es importante definir los rizados de corriente, voltaje y período de conmutación; ya que en (Drouilhet & Johnson, 2013; Thounthong, Raël, & Davat, 2009) se habla de las afectaciones al SOH de la batería debido a los rizados de las señales.

$$\frac{-V_1}{L_1} = \frac{-2\Delta i_1}{D'T_s} \xrightarrow{\text{Despejando } L_1} L_1 = \frac{V_1 D'T_s}{2\Delta i_1} \quad (24)$$

$$\frac{-V_2}{L_2} = \frac{-2\Delta i_2}{D'T_s} \xrightarrow{\text{Despejando } L_2} L_2 = \frac{V_2 D'T_s}{2\Delta i_2} \quad (25)$$

$$\frac{-I_1}{C_1} = \frac{-2\Delta v_1}{D'T_s} \xrightarrow{\text{Despejando } C_1} C_1 = \frac{I_1 D'T_s}{2\Delta v_1} \quad (26)$$

$$C_2 = \frac{T_s \Delta i_2}{8\Delta v_2} \quad (27)$$

Donde:

L_1 = Bobina 1

L_2 = Bobina 2

C_1 = Capacitor 1

C_2 = Capacitor 2

T_s = Período de conmutación = 0,00001s

Δi = Rizado permisible de la corriente = 10% para este caso, es admisible hasta el 20%.

Δv = Rizado permisible del voltaje = 1% para este caso, es admisible hasta el 3%

3.3. MODELADO DE BATERIA

Para el desarrollo de este proyecto, fue necesario investigar sobre modelos de batería de plomo-acido para realizar la simulación del proceso de carga de la batería, ya que el software con el cual se desarrolla la simulación tiene como batería un elemento que se asemeja más en su funcionamiento a una fuente de voltaje DC, la cual no va a alterar sus magnitudes en los procesos de carga o descarga, por tanto, no se podría observar su comportamiento en el proceso de carga y de esta manera observar las variaciones del voltaje y la corriente durante el proceso.

Existen diferentes modelos de baterías en la literatura (Ceraolo, 2000) y (Roiu et al., 2017), en los cuales relacionan las distintas variables a las cuales está sometida una batería, como lo es la

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

temperatura, el tiempo de uso, el nivel de carga y descarga, los aspectos constructivos, las reacciones químicas, entre otras.

Para este caso se necesita verificar el comportamiento de las baterías durante los ciclos de carga solamente, y supervisar la corriente y el voltaje de carga, y de esta manera obtener el estado de carga; puesto que la función del cargador de baterías sólo compromete la etapa de carga de éstas. Se presenta entonces un circuito simple, el circuito de batería simplificado de thevenin (Chan, 2000) que es de simple simulación, aplicable a baterías de plomo-ácido como se explica en (Jantharamin & Zhang, 2008) y con buena precisión para lo requerido para el cargador de baterías propuesto, ya que al utilizar un capacitor, el proceso de carga de voltaje del capacitor se asemeja mucho más al proceso de carga de la batería.

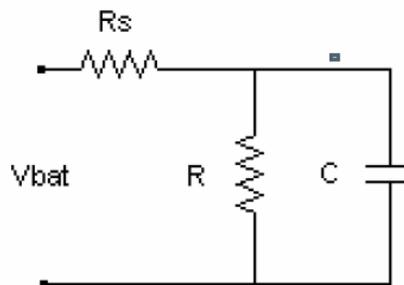


Figura 23. Modelo de batería simplificado de Thevenin. Elaboración Propia.

Donde:

Vbat: Tensión de la Batería

Rs: Resistencia interna para carga

R: Resistencia de auto descarga

C: Capacitancia de la Batería

Los valores para los componentes de este circuito son determinados como se presenta a continuación:

La resistencia serie (R_s), que es la resistencia interna, se encuentra en el catálogo del fabricante, su valor es de 6,6 [mΩ]. Para hallar la Resistencia de autodescarga (R) y la capacitancia de la batería

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

(C), se calculan partiendo de la siguiente fórmula de los cálculos realizados en un circuito de simplificado de Thevenin obtenidas de (El Shahat, 2014).

$$S = 1 - \frac{Ah}{C10} \quad (28)$$

S: estado de carga

A: Corriente en el proceso de descarga

h: tiempo en el proceso de descarga

C10: capacidad de la batería en diez horas (amperios-hora)

El estado de carga (S) cambia de 0 (cuando la batería se descarga) a 1 (cuando la batería está completamente cargada).

De la fórmula (28) se despeja la corriente para poder hallar la Resistencia de auto descarga (R).

Para calcular la magnitud del capacitor se utiliza la siguiente fórmula:

$$C = \frac{I*t}{V} \quad (29)$$

I = Corriente de carga que va a circular por el capacitor

t = tiempo de carga total de la batería

V = Voltaje de carga de la batería

3.4. CONTROLADORES DE CORRIENTE Y VOLTAJE:

Como bien se habló en el marco teórico, para realizar un buen proceso de carga de la batería se requiere de unos valores de voltaje y corriente sugeridas por el fabricante, las cuales no afecten la vida útil de la batería, generando reacciones adversas al interior de éstas; para ello es necesario realizar controladores de voltaje y corriente, los cuales regulen dichas magnitudes y los mantenga en los valores deseados.

3.4.1. Controlador de voltaje

Para el controlador de voltaje se utiliza un controlador de acción proporcional e integral (PI), cuya función es garantizar que en todo momento el valor real del convertidor sea igual al valor deseado o punto de operación asignado, 13,5V para este caso; se parte del circuito base del convertidor DC/DC conectado a un equivalente de Norton como se muestra en la siguiente Figura 24.

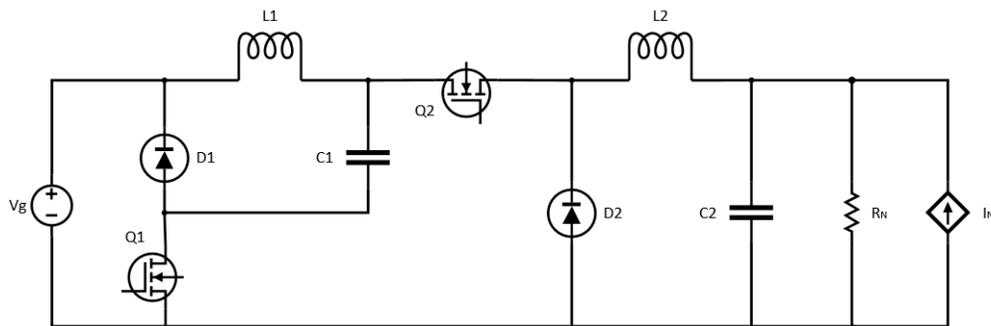


Figura 24. Convertidor conectado a equivalente de Norton. Elaboración propia.

Para realizar los cálculos del controlador de voltaje, se asume la carga como un circuito equivalente de Norton, para así encontrar el modelo dinámico del sistema y a partir de éste se obtienen las funciones de transferencia necesarias para realizar el cálculo de los controladores.

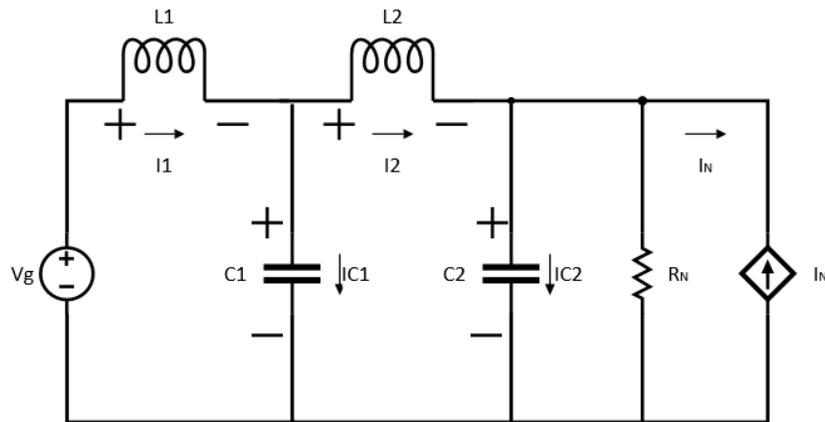


Figura 25. Convertidor con switches en estado On conectado a equivalente de Norton. Elaboración propia.

Al igual que en el cálculo del convertidor DC/DC se inicia con el hallazgo de las variables de estado, mediante los métodos de mallas y nodos para la solución de circuitos eléctricos; para cuando los mosfet del circuito están en posición ON.

$$V_{L_1} = V_{in} - V_1 \quad (30)$$

$$V_{L_2} = V_1 - V_2 \quad (31)$$

$$V_{R_N} = V_2 \quad (32)$$

$$I_{C_1} = I_1 - I_2 \quad (33)$$

$$I_{C_2} = I_2 - (I_{R_N} + I_N) \xrightarrow{\text{Despejando } I_{R_N}} I_{C_2} = I_2 - \left(\frac{V_2}{R_N} + I_N\right) \quad (34)$$

Donde:

V_{L_1} = Voltaje en la bobina 1.

V_{L_2} = Voltaje de la bobina 2.

I_{C_1} = Corriente en el capacitor 1.

I_{C_2} = Corriente en el capacitor 2.

V_1 = Voltaje en el capacitor 1.

V_2 = Voltaje en el capacitor 2.

I_1 = Corriente en la bobina 1.

I_2 = Corriente en la bobina 2.

V_{R_N} = Voltaje en la Resistencia equivalente de Norton

V_{in} = Voltaje de la fuente o salida del rectificador.

R_N = Resistencia equivalente de Norton.

I_N = Fuente de Corriente.

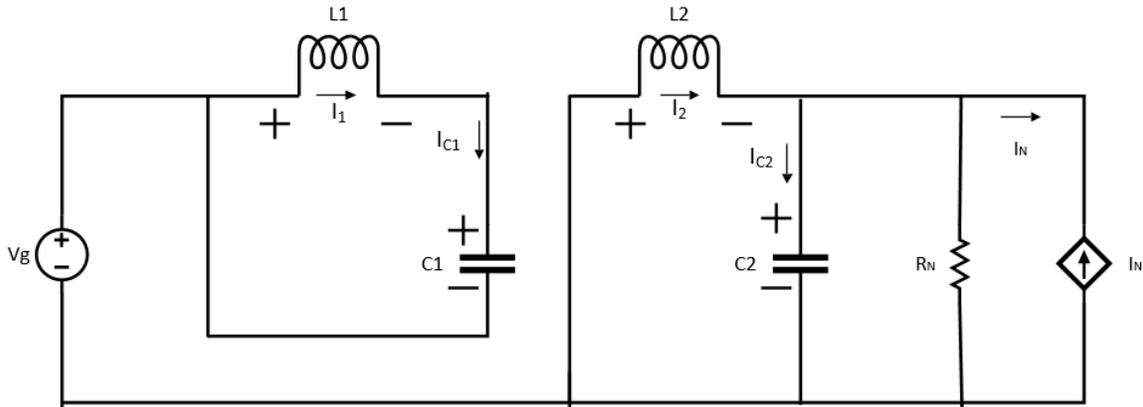


Figura 26. Convertidor con switches en estado Off conectado a equivalente de Norton. Elaboración propia.

Luego se hallan las variables de estado, para cuando los mosfet del circuito se encuentran en estado OFF.

$$V_{L_1} = -V_1 \quad (35)$$

$$V_{L_2} = -V_2 \quad (36)$$

$$I_{C_1} = I_1 \quad (37)$$

$$I_{C_2} = I_2 - (I_{R_N} + I_N) \xrightarrow{\text{Despejando } I_{R_N}} I_{C_2} = I_2 - \left(\frac{V_2}{R_N} + I_N\right) \quad (38)$$

Se obtiene el modelo promediado del sistema, unificando en cada uno de los elementos los estados ON y OFF; estas fórmulas van a permitir realizar la linealización del circuito.

$$L_1 \frac{di_1}{dt} = (V_{in} - V_1) * D - V_1 * D' \quad (39)$$

Resolviendo (39):

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{V_{in} * D}{L_1} - \frac{V_1}{L_1} \quad (40)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} = (V_1 - V_2) * D - V_2 * D' \quad (41)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Resolviendo (41):

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{V_1 * D}{L_2} - \frac{V_2}{L_2} \quad (42)$$

$$C_1 \frac{dv_1}{dt} = (I_1 - I_2) * D - I_1 * D' \quad (43)$$

Resolviendo (43):

$$\frac{dv_1}{dt} = \frac{I_1}{C_1} - \frac{I_2 * D}{C_1} \quad (44)$$

$$C_2 \frac{dv_2}{dt} = \left(I_2 - \frac{V_2}{R_N} + I_N \right) * D - \left(I_2 - \frac{V_2}{R_N} + I_N \right) * D' \quad (45)$$

Resolviendo (45):

$$\frac{dv_2}{dt} = \frac{I_2}{C_2} - \frac{V_2}{(R_N * C_2)} + \frac{I_N}{C_2} \quad (46)$$

Con la obtención de las fórmulas del modelo promediado (40), (42), (44) y (46) y con la ayuda del programa Matlab se realiza la linealización del sistema, posterior a esto se determinan los valores de las variables eléctricas en el punto de operación, luego se realiza un modelo en espacio de estados y función de transferencia y por último se utiliza la herramienta pidtool de Matlab para obtener los valores de ganancia (K_p) y constante de tiempo (T_i) para parametrizar el bloque PI en el simulador PSIM. (Ver apéndice B)

3.4.2. Controlador de Corriente

Para el controlador de corriente se utiliza igualmente un controlador de acción proporcional e integral (PI), cuyo objetivo es garantizar que la corriente que suministra el convertidor DC/DC sea igual al valor asignado, 7,5A para este proyecto; para calcular las variables de estado, se realiza un procedimiento idéntico al realizado en la sección anterior del controlador de voltaje, salvo que el circuito utilizado en el controlador de voltaje tiene conectado un circuito equivalente de Thevenin, ilustrado en la Figura 27, a cambio del equivalente de Norton utilizado en el controlador de voltaje; con estas variables se obtiene el modelo matemático del sistema, que se describe a continuación.

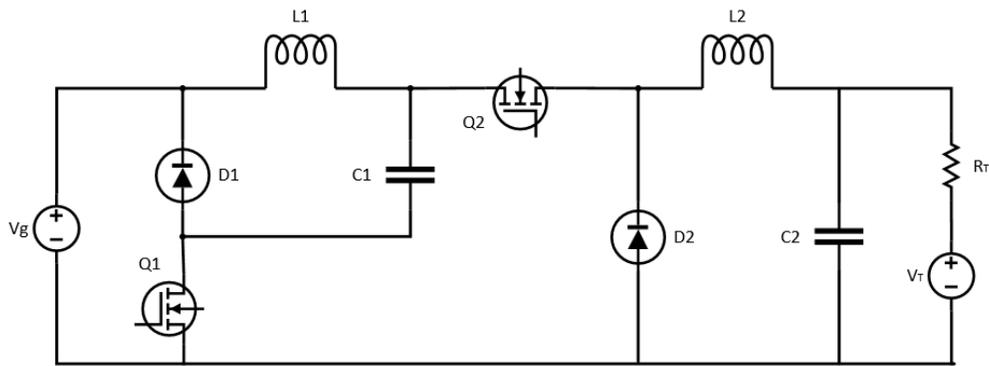


Figura 27. Convertidor conectado a equivalente de Thevenin. Elaboración propia.

Se inicia con el hallazgo de las variables de estado cuando los mosfet se encuentran en estado ON

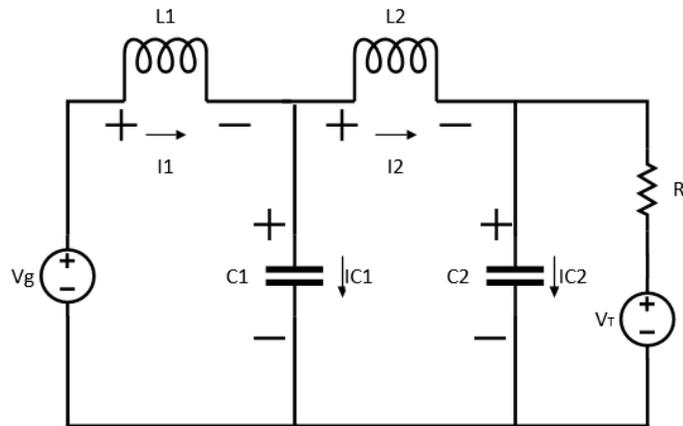


Figura 28. Convertidor con switches en estado On conectado a equivalente de Thevenin. Elaboración propia.

Analizando el circuito mediante los métodos de nodos y mallas, se obtiene que:

$$V_{L_1} = V_{in} - V_1 \quad (47)$$

$$V_{L_2} = V_1 - V_2 \quad (48)$$

$$I_{C_1} = I_1 - I_2 \quad (49)$$

$$I_{C_2} = I_2 - I_B \xrightarrow{\text{Despejando con } I_B = \frac{V_2 - V_T}{R_T}} I_{C_2} = I_2 - \frac{V_2}{R_T} + \frac{V_T}{R_T} \quad (50)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Donde:

V_{L_1} = Voltaje en la bobina 1.

V_{L_2} = Voltaje de la bobina 2.

I_{C_1} = Corriente en el capacitor 1.

I_{C_2} = Corriente en el capacitor 2.

V_1 = Voltaje en el capacitor 1.

V_2 = Voltaje en el capacitor 2.

I_1 = Corriente en la bobina 1.

I_2 = Corriente en la bobina 2.

V_T = Fuente de Voltaje.

V_{in} = Voltaje de la fuente o salida del rectificador.

R_T = Resistencia equivalente de Thevenin.

I_B = Corriente de la batería.

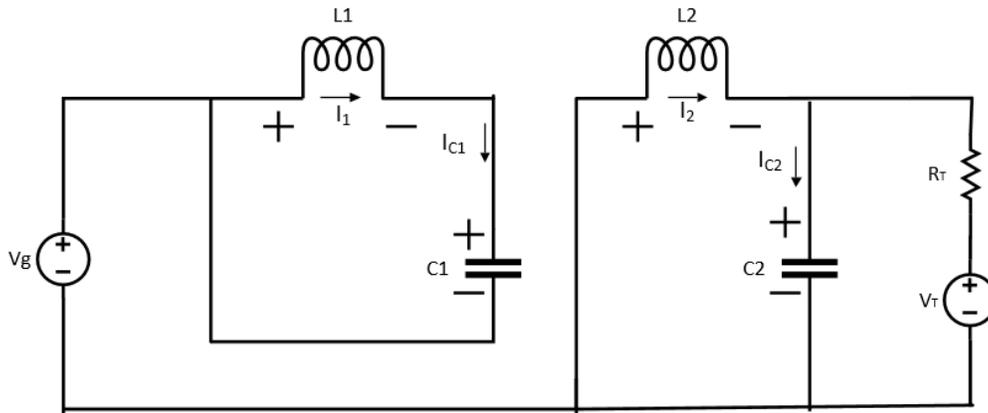


Figura 29. Convertidor con switches en estado Off conectado a equivalente de Thevenin.
 Elaboración propia.

Luego se hallan las variables de estado, para cuando los mosfet del circuito se encuentran en estado OFF.

$$V_{L_1} = -V_1 \quad (51)$$

$$V_{L_2} = -V_2 \quad (52)$$

$$I_{C_1} = I_1 \quad (53)$$

$$I_{C_2} = I_2 - I_B \xrightarrow{\text{Despejando con } I_B = \frac{V_2 - V_T}{R_T}} I_{C_2} = I_2 - \frac{V_2}{R_T} + \frac{V_T}{R_T} \quad (54)$$

Se obtiene el modelo promediado del sistema, unificando en cada uno de los elementos los estados ON y OFF; estas fórmulas van a permitir realizar la linealización del circuito.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

$$L_1 \frac{di_1}{dt} = (V_{in} - V_1) * D - V_1 * D' \quad (55)$$

Resolviendo (55):

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{V_{in}*D}{L_1} - \frac{V_1}{L_1} \quad (56)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} = (V_1 - V_2) * D - V_2 * D' \quad (57)$$

Resolviendo (57):

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{V_1*D}{L_2} - \frac{V_2}{L_2} \quad (58)$$

$$C_1 \frac{dv_1}{dt} = (I_1 - I_2) * D - I_1 * D' \quad (59)$$

Resolviendo (59):

$$\frac{dv_1}{dt} = \frac{I_1}{C_1} - \frac{I_2*D}{C_1} \quad (60)$$

$$C_2 \frac{dv_2}{dt} = \left(I_2 - \frac{V_2}{R_T} + \frac{V_T}{R_T} \right) * D - \left(I_2 - \frac{V_2}{R_T} + \frac{V_T}{R_T} \right) * D' \quad (61)$$

Resolviendo (61):

$$\frac{dv_2}{dt} = \frac{I_2}{C_2} - \frac{V_2}{R_T} + \frac{V_T}{R_T} \quad (62)$$

Con la obtención de las fórmulas del modelo promediado (56), (58), (60) y (62) y con la ayuda del programa Matlab se realiza la linealización del sistema, posterior a esto se determinan los valores de las variables eléctricas en el punto de operación, luego con la ayuda de la herramienta Jacobiano se realiza un modelo en espacio de estados y función de transferencia y por último se utiliza la herramienta pidtool de Matlab para obtener los valores de ganancia (K_p) y constante de tiempo (T_i) para parametrizar el bloque PI en el simulador PSim. (Ver apéndice C)

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

4.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CÁLCULOS Y DIAGRAMAS ELÉCTRICOS.

4.1.1. Rectificador.

En la Figura 30 se ilustra el esquema completo del rectificador PWM trifásico con corrección de factor de potencia conectado a una carga resistiva que simula la carga que soportará el dispositivo cuando estén conectadas todas las baterías, dicho sistema se conecta a una red trifásica de 208V, que se tiene disponible en el túnel de occidente, lugar donde se conectará el dispositivo; el sistema de rectificación consta de un puente trifásico de seis pulsos controlado por un sistema automático de control PI, el cual mediante un voltaje de referencia establecido (300V), controla la operación de los mosfets para obtener a la salida el voltaje deseado, y adicionalmente un filtro inductivo a la entrada conectado en serie a cada una de las fases del sistema trifásico, que al igual que el capacitor conectado en paralelo a la salida, permiten amortiguar la señal de la onda, disminuir el rizado de la señal y tener un factor de potencia cercano a la unidad.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Los valores definitivos de los componentes activos del rectificador trifásico PFC, se definieron luego de realizar sintonización de datos y los valores utilizados fueron 250 μH para las bobinas y 300 μF el capacitor.

4.1.2. Convertidor DC/DC

En la Figura 31 se ilustra el esquema básico del convertidor DC/DC tipo Buck cuadrático, el cual es alimentado por $V_g = 300V$ y otorga una salida de $V_c = 54V$ para realizar la carga de la serie de 4 baterías.

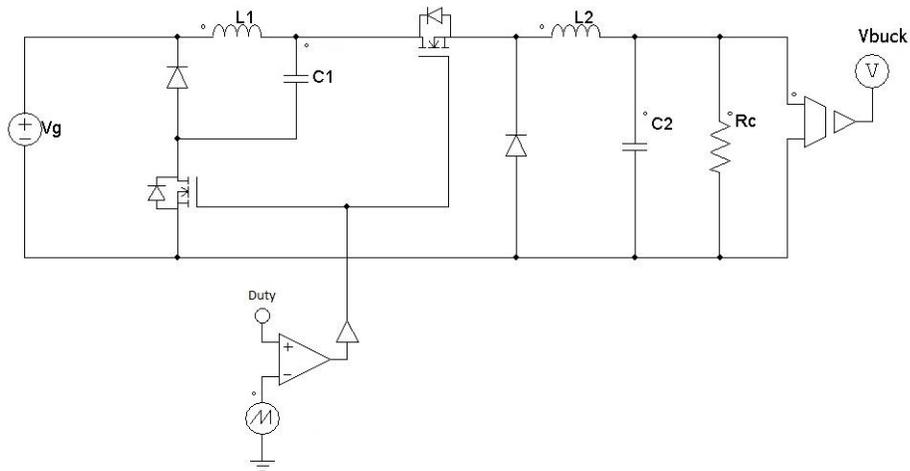


Figura 31. Diagrama de convertidor DC-DC. Elaboración propia.

Partiendo de las fórmulas utilizadas en la metodología, se hallan los valores de las magnitudes eléctricas que circulan por cada uno de los elementos del convertidor.

Los valores de referencia para realizar el cálculo de los componentes son:

$V_g = 300V$ *Voltaje de la fuente (Entregado por el rectificador)*

$V_c = 54V$ *Voltaje de carga de las baterías*

$I_c = 7.5A$ *Corriente de carga de las baterías*

De la fórmula (23), se halla la resistencia del circuito:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

$$R = \frac{V_C}{I_C}$$

$$R = \frac{54V}{7.5A} = 7,2\Omega$$

Ahora bien, de la fórmula (16) se obtiene el ciclo de trabajo (D):

$$D = \sqrt{\frac{V_C}{V_g}}$$

$$D = \sqrt{\frac{54V}{300V}} = 0.424264$$

El voltaje que circula por el capacitor 1 se halla mediante la fórmula (12):

$$V_1 = V_g * D$$

$$V_1 = 300V * 0.424264 = 127.2792V$$

El voltaje que circula por el capacitor 2 se obtiene de la fórmula (15):

$$V_2 = V_g * D^2$$

$$V_2 = 300V * (0.424264)^2 = 54V$$

La corriente que circula por la bobina 1 se obtiene de la fórmula (22):

$$I_1 = \frac{V_g * D^3}{R}$$

$$I_1 = \frac{300V * (0.424264)^3}{7,2\Omega} = 3.18A$$

La corriente que circula por la bobina 2 se halla de la fórmula (19):

$$I_2 = \frac{V_g * D^2}{R}$$

$$I_2 = \frac{300V * (0.424264)^2}{7,2\Omega} = 7.5A$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Los valores de voltaje y corriente en estado estable para cada elemento pasivo se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Magnitudes eléctricas que circulan por los elementos pasivos del convertidor DC-DC.

V_1	127.2792V
V_2	54V
I_1	3.18A
I_2	7.5A

Habiendo conocido los valores de las variables eléctricas que circulan por los componentes, se continua con el dimensionamiento de los componentes pasivos del convertidor, para ello es importante definir el rizado que se quiere permitir en la generación de la señal, en el capítulo 2 de (Erickson, Robert W., Maksimovic et al., 2005) y en (Power, 2013) se habla que el rizado de corriente debe estar entre el 10% y el 20% y el rizado de voltaje debe ser aproximado a 0; para este caso se utiliza $\Delta i = 10\%$ y $\Delta v = 0.1\%$, con un período de conmutación de $T_s = 10\mu s$.

Habiendo definido los rizados de voltaje y corriente se utiliza la fórmula (24) para obtener el valor de la bobina 1:

$$L_1 = \frac{V_1 D' T_s}{2 \Delta i_1}$$

$$L_1 = \frac{127.27V * 0.575736 * 0.000001s}{2 * 0.318A} = 1.15mH$$

Mediante la fórmula (25) se dimensiona la bobina 2:

$$L_2 = \frac{V_2 D' T_s}{2 \Delta i_2}$$

$$L_2 = \frac{54V * 0.575736 * 0.00001s}{2 * 0.75A} = 0.2mH$$

De la fórmula (26) se halla el valor del capacitor 1:

$$C_1 = \frac{I_1 D' T_s}{2 \Delta v_1}$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

$$C_1 = \frac{3.18A * 0.575736 * 0.00001s}{2 * 0.12727V} = 72\mu F$$

Y de la fórmula (27) se obtiene el valor del capacitor 2:

$$C_2 = \frac{T_s \Delta i_2}{8 \Delta v_2}$$

$$C_2 = \frac{0.00001s * 0.75A}{8 * 0.054V} = 17.36 \mu F$$

En la Tabla 2 se resumen los valores de los componentes eléctricos y variables relevantes del convertidor DC/DC tipo Buck cuadrático.

Tabla 2. Dimensión de los componentes del convertidor DC-DC

L_1	1.15mH
L_2	0.2mH
C_1	72 μF
C_2	17.36 μF
Duty (D)	0.4243
R_C	7.2 Ω
V_g	300V
V_{buck}	54V

4.1.3. Modelado de batería

Como se habló en el marco teórico, el modelo de batería utilizado es el modelo simplificado de Thevenin, observado en la Figura 23, el cual es aplicable a baterías de plomo-ácido como se puede ver en (Jantharamin & Zhang, 2008), donde se tiene a R que actúa como resistencia de autodescarga de la batería, R_S como resistencia interna y C un capacitor que simula el proceso de almacenamiento de energía de la batería.

La resistencia interna R_S , se obtiene del datasheet de la batería

$$R_S = 6,6m\Omega$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Por ley de ohm, se puede calcular la resistencia de autodescarga

$$R = \frac{V_C}{I}$$

Como no se conoce el valor de la corriente, de (28) se despeja la corriente

$$S = 1 - \frac{Ah}{C10}$$

$$0,5 = 1 - \frac{I * 4320h}{75 Ah} \Rightarrow I = \frac{0,5 * 75Ah}{4320h}$$

$$I = 8,68mA$$

$$V_C = V_{bat} - V_{R_S}$$

$$V_{R_S} = I_{R_S} * R_S \Rightarrow V_{R_S} = 7,5A * 6,6m\Omega = 0,0495V$$

$$V_C = 13,5V - 0,0495V = 13,4505V$$

$$R = \frac{V_C}{I} = \frac{13,4505V}{8,68mA} = 1549,6\Omega$$

Ya habiendo calculado los valores de ambas resistencias, sólo queda por calcular el valor del capacitor y para hallar este se utiliza (29)

$$C = \frac{I_C * t}{V_C}$$

De donde,

$$I_C = I_{R_S} - I = 7,5A - 8,68mA = 7,491A$$

$t = 8h = 28800s$ (Tomado de la gráfica de carga de la hoja técnica de la batería, Anexo A)

$$C = \frac{I_C * t}{V_C} = \frac{7,491A * 28800s}{13,4505V} = 16039,611F$$

En la Tabla 3 se muestran los parámetros y valores de los componentes eléctricos del modelo de la batería utilizados en este proyecto, el cual sería para una batería de plomo-ácido VRLA, de 75A/h a 12V.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Tabla 3. Dimensión de los elementos del modelado de la batería.

Resistencia interna	R_s	$6,6m\Omega$
Resistencia de autodescarga	R	$1549,6\Omega$
Capacitancia	C	$16039,11F$

Para efectos de simulación no se utiliza el valor real de la capacitancia de la batería, debido a que esta capacitancia es de gran valor, tomaría demasiado tiempo para alcanzar el voltaje de flotación y se necesita mucha capacidad de memoria para almacenar datos de una simulación de más de 8 horas; por tanto, se utiliza una capacitancia de menor valor para simular en un corto tiempo el comportamiento de la batería durante el proceso de carga, el valor utilizado en la simulación es de 5F. Esto no modifica el proceso de carga, sólo reduce el tiempo de carga a un período más corto, el cual permita obtener datos de simulación de una manera más práctica.

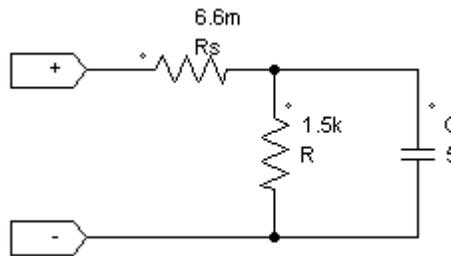


Figura 32. Modelado individual de la batería. Elaboración propia.

En la Figura 32 se muestra el modelado del batería utilizado para la simulación, basado en el circuito eléctrico simplificado de Thevenin, en dicho modelo ya se utiliza la capacitancia de bajo valor para disminuir el tiempo de carga de la batería.

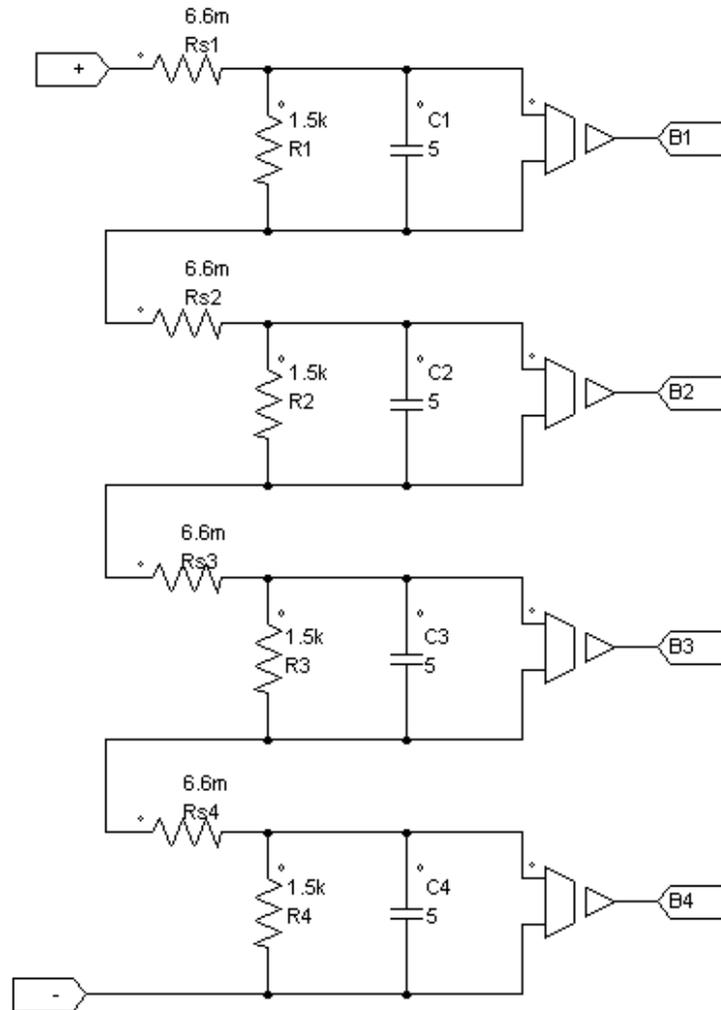


Figura 33. Modelado de la conexión en serie de 4 baterías. Elaboración propia

En la Figura 33 se muestra la conexión eléctrica en serie de 4 baterías que van a ser cargadas por cada convertidor DC-DC tipo buck cuadrático.

4.1.4. Controlador de corriente

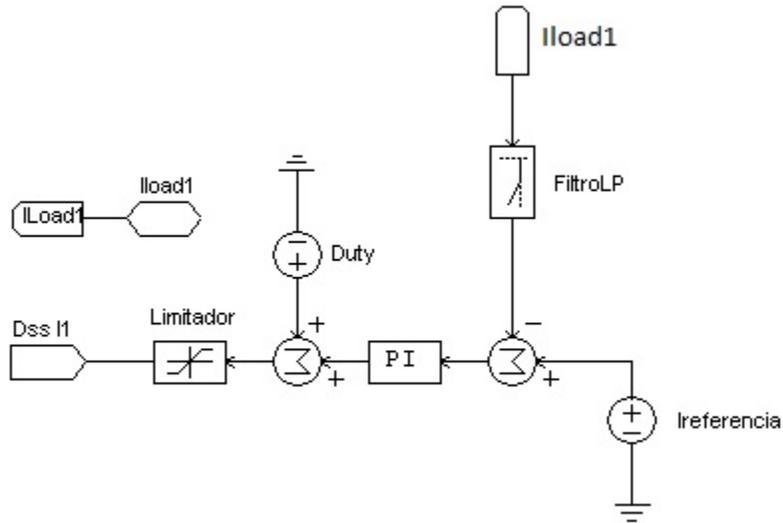


Figura 34. Diagrama controlador de Corriente. Elaboración propia.

En la Figura 34 se visualiza el esquema del controlador de corriente, en el cual se realiza una comparación entre el valor de referencia ($I_{referencia}=7.5A$) y el valor de corriente actual (I_{load1}) que es atenuado por un filtro pasa bajos (FiltroLP), el valor de la comparación ingresa al controlador PI y éste realiza la corrección y modifica el valor del Duty (0.3587) para realizar la corrección y modificar el ciclo de trabajo; el valor controlado es pasado por un limitador que va a garantizar que la salida del controlador ($D_{ss I1}$) esté siempre entre 0.2 y 0.5. Los parámetros para configurar el controlador PI se obtienen de los cálculos realizados en el Apéndice B con la ayuda de Matlab, y éstos se observan en la Figura 35.

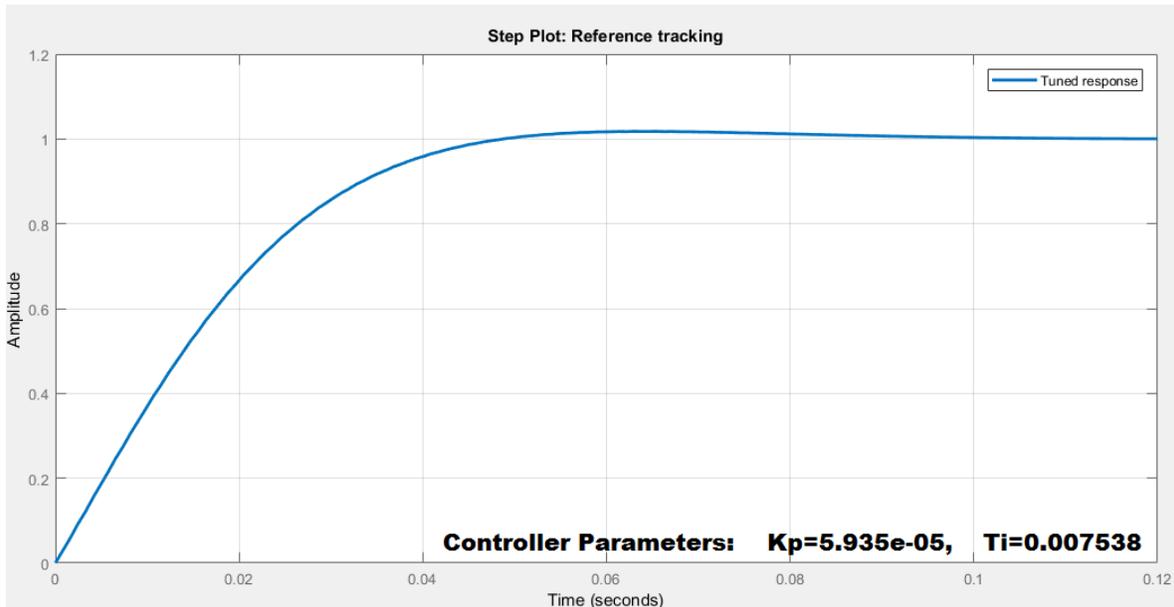


Figura 35. Variables para el controlador PI de corriente del convertidor DC-DC. Elaboración propia.

Los parámetros del controlador $K_p = 5.925e^{-5}$ y $T_i = 0.007382$ son los valores de configuración para el control PI arrojados por los cálculos matemáticos, pero al momento de realizar simulación se empieza a realizar sintonización de datos y se modifican estos valores hasta los que se pueden observar en la Tabla 4, donde se resumen los valores de los componentes del controlador de corriente.

Tabla 4. Parámetros de controlador de corriente.

Duty	Amplitude	0.3587
Limitador	Lower Limit	0.2
	Upper Limit	0.5
Filtro LP	Gain	1
	Cut-off Frequency	1000
PI	Gain K_p	0.13
	Time Constant T_i	8
I Referencia	Amplitude	7.5

4.1.5. Controlador de voltaje

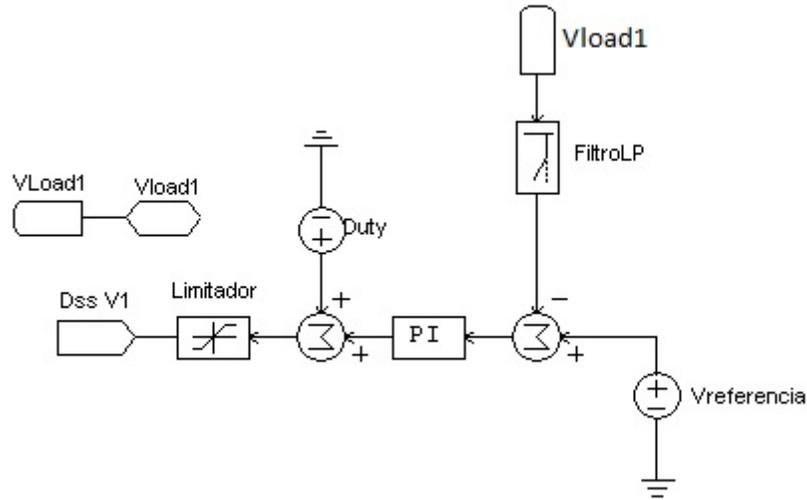


Figura 36. Diagrama controlador de Voltaje. Elaboración propia.

En la Figura 36 se visualiza el esquema del controlador de voltaje, que funciona de manera similar al controlador de corriente, comparando la diferencia entre el valor de referencia ($V_{referencia}=54V$) y el valor actual de voltaje del sistema (V_{load1}) atenuado por un filtro pasa bajos ($FiltroLP$), el valor de dicha comparación ingresa al controlador PI, el cual realiza la corrección del Duty que inicialmente es de 0.4243 y genera la salida de un nuevo ciclo de trabajo ($Dss V1$) que es limitado entre 0.1 y 0.9. Los parámetros para configurar el controlador PI se obtienen de los cálculos realizados en el Apéndice C con la ayuda de Matlab, y éstos se pueden observar en la Figura 37.

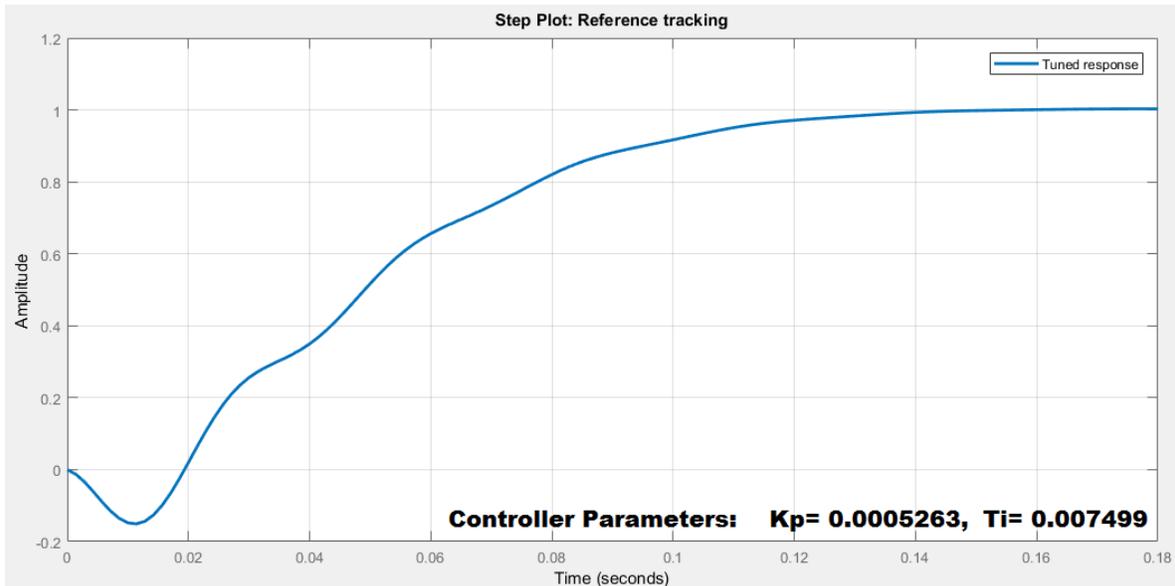


Figura 37. Variables para el controlador PI de Voltaje del convertidor DC-DC. Elaboración propia.

Los parámetros del controlador $K_p = 0.0005031$ Y $T_i = 0.007784$ son los valores generados por los cálculos matemáticos obtenidos mediante el programa Matlab, pero luego de realizar sintonización de datos durante la simulación, se corrigen estos valores a los mostrados en la Tabla 5, donde se resumen los valores para configurar el controlador de voltaje.

Tabla 5. Parámetros de controlador de Voltaje.

Duty	Amplitud	0.4243
Limitador	Lower Limit	0.1
	Upper Limit	0.9
Filtro LP	Gain	1
	Cut-off Frequency	1000
PI	Gain K_p	0.001
	Time Constant T_i	100
V Referencia	Amplitud	54

En la Figura 38, se observa el convertidor DC/DC conectado a los controladores de corriente y voltaje, allí se observa el elemento MUX que realiza el cambio de controladores, dicho elemento es un multiplexor cuya función es seleccionar cual controlador es el que va a operar en el sistema;

mientras la señal de activación del multiplexor se encuentre en 0, cuando el voltaje de la batería esté por debajo del voltaje de flotación 54V, el multiplexor permite la operación del controlador de corriente, y si la señal de activación del multiplexor se encuentra en 1, cuando el voltaje de la batería alcance el voltaje de flotación 54V, permite la operación del controlador de voltaje; es decir, que el multiplexor permite realizar el cambio de controladores cuando el voltaje de la serie de baterías alcanza los 54V, 13.5V por batería.

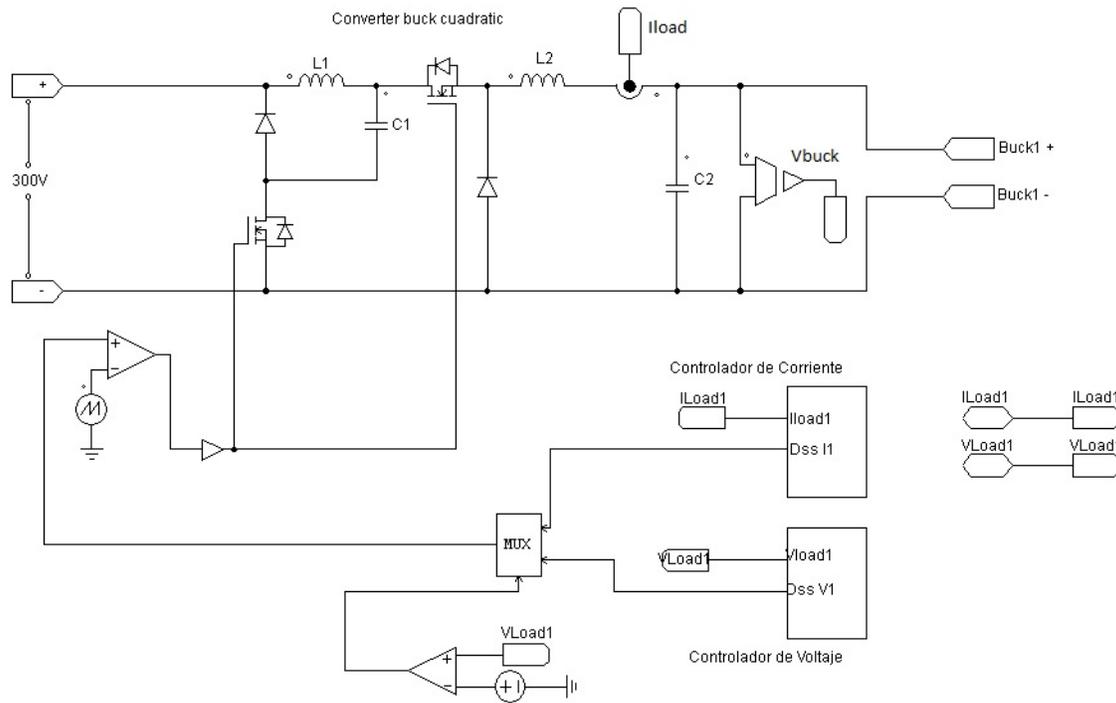


Figura 38. Convertidor DC-DC con controladores. Elaboración propia.

4.1.6. Diseño de montaje final

El cargador de baterías diseñado consta de un rectificador trifásico PFC conectado en paralelo a 9 convertidores DC/DC que, a su vez están conectados cada uno a una serie de 4 baterías, en la Figura 39 se ilustra en forma de diagrama de bloques la ubicación según el funcionamiento de cada uno de los componentes del diseño final propuesto; iniciando con la fuente de alimentación, filtro, rectificador, convertidores DC/DC y finalizando con las series de 4 baterías.

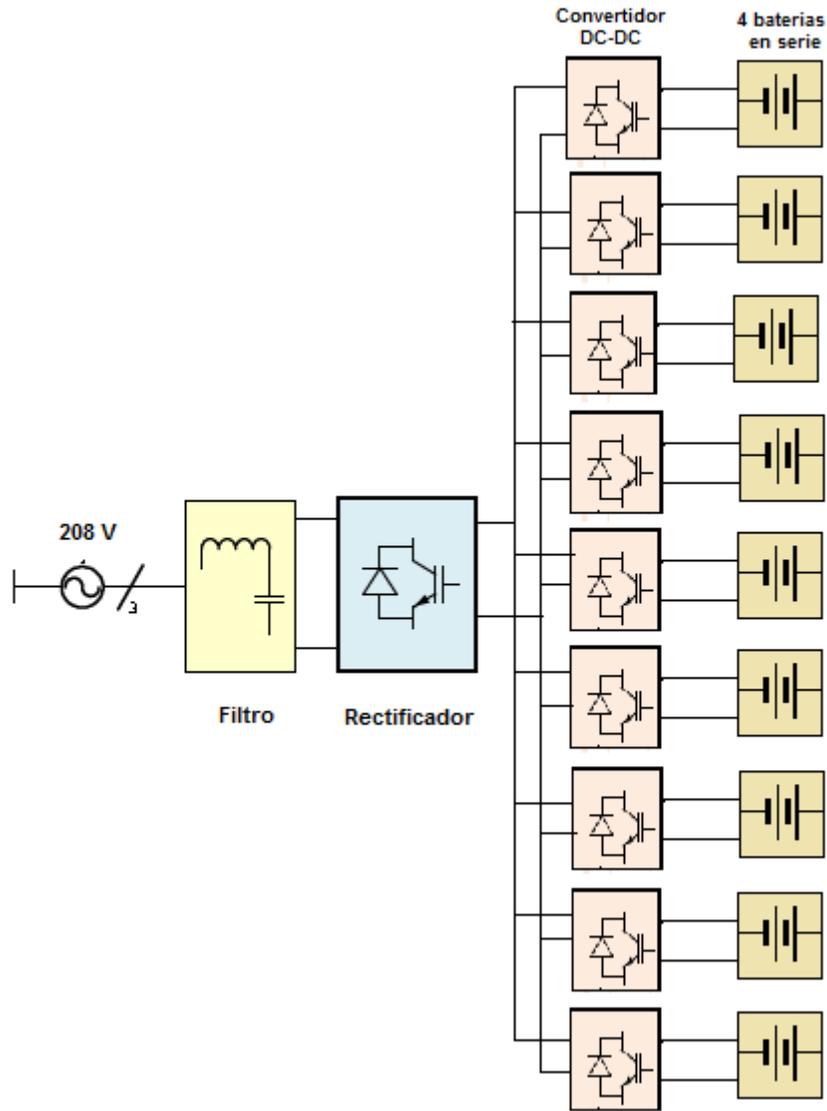


Figura 39. Diagrama de bloques de cargador de baterías. Elaboración propia.

4.2. SIMULACIÓN.

Para la simulación del proyecto se utiliza el simulador PSIM versión 9.1, con el cual se quiere demostrar el funcionamiento del cargador de baterías, el funcionamiento de los controladores, el factor de potencia del sistema, el comportamiento del sistema frente a cambios inesperados en la fuente de alimentación y el comportamiento del sistema frente a cambios en la carga.

4.2.1. Rectificador.

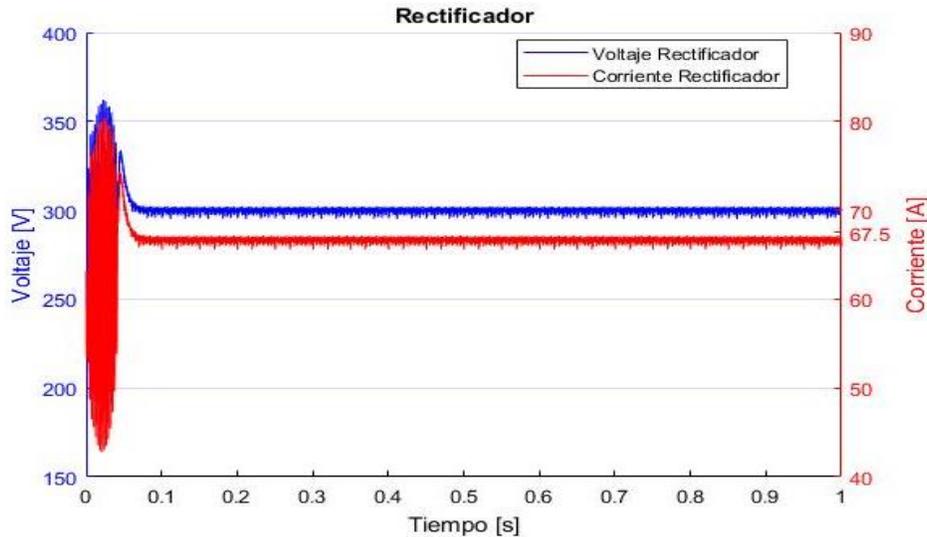


Figura 40. Comportamiento del rectificador. Elaboración propia.

En la Figura 40, se puede observar el comportamiento del rectificador propuesto conectado a una carga resistiva que simula el consumo que generarían los 9 convertidores conectados al sistema, allí se observa que el rectificador mantiene el voltaje en 300V y entrega una corriente de 67.5A, valores necesarios para cargar el sistema de baterías disponible. Se muestra de igual manera en un corto período de tiempo en la Figura 41, en los que se observan que las señales de voltaje y corriente no presentan mayor distorsión, esto debido a la poca alteración que genera el rectificador a la red y el comportamiento del factor de potencia, que es muy cercano a la unidad, mientras el rectificador alimenta la carga resistiva.

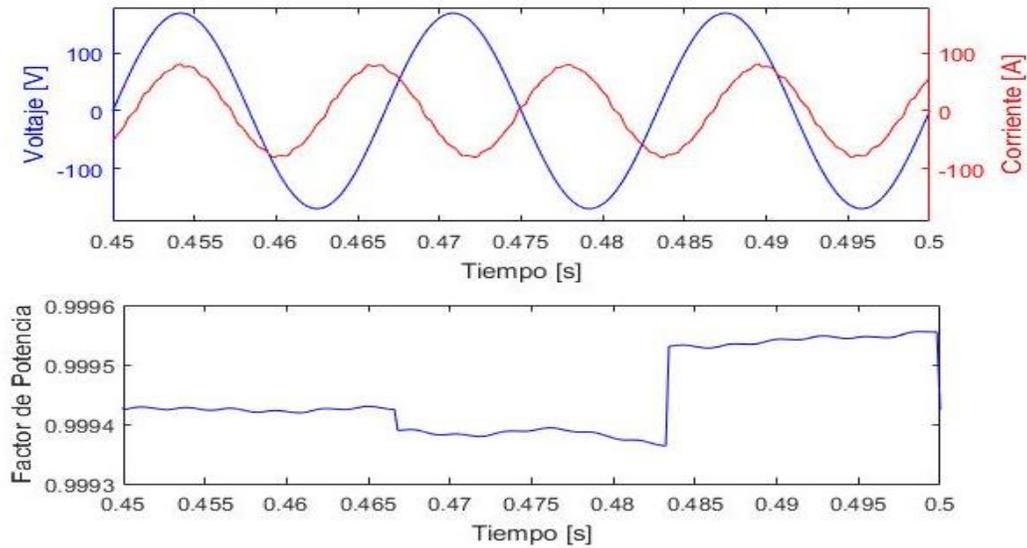


Figura 41. Factor de potencia del rectificador y alteración a la fuente de energía. Elaboración propia.

4.2.2. Convertidor DC/DC

En la Figura 42, se muestra el comportamiento del convertidor DC/DC, como el voltaje de salida del rectificador es disminuido a 54V y permanece estable en el tiempo y cercano al valor de referencia demarcado con la línea punteada.

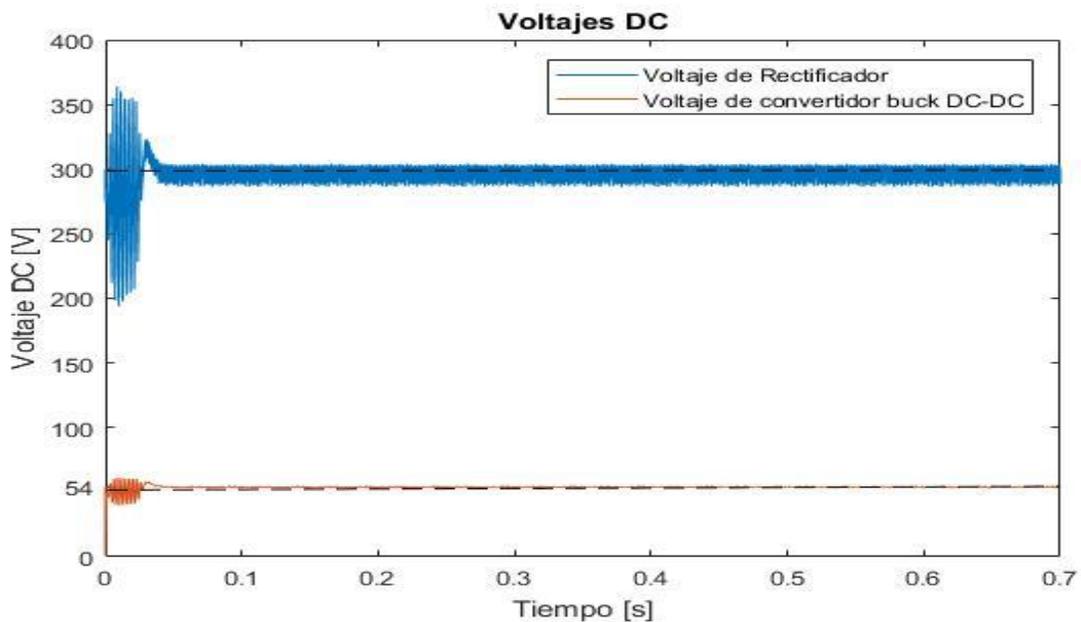


Figura 42. Voltaje de salida de convertidor DC-DC tipo buck cuadrático. *Elaboración propia.*

4.2.3. Controladores de corriente y voltaje

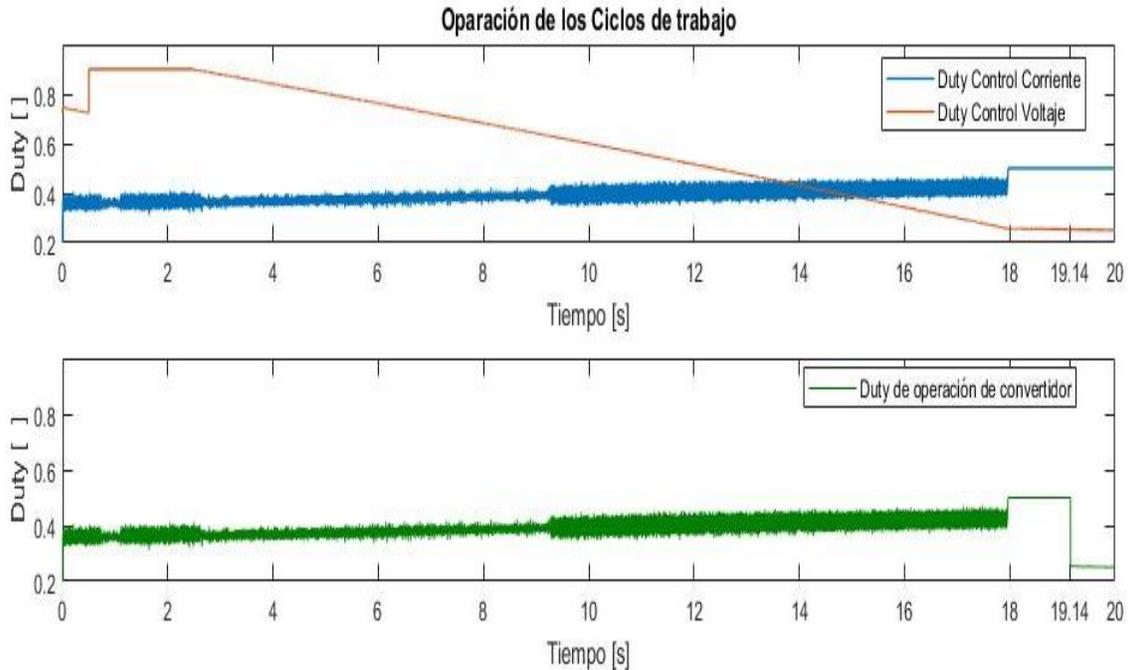


Figura 43. Operación de los ciclos de trabajo de corriente y voltaje. *Elaboración propia.*

En la Figura 43 se puede observar la función que desempeña el multiplexor en la selección del controlador para el convertidor DC/DC, en la parte superior de la figura se observa el comportamiento de cada uno de los controladores de corriente y voltaje por separado durante todo el proceso de carga, es decir, las variables de entrada del multiplexor y en la parte inferior se ilustra la señal de control que está seleccionando el multiplexor, es decir, la salida del multiplexor; en la figura se puede identificar que en el segundo 19.14, es el instante de tiempo en el cual el multiplexor realiza el cambio de control de corriente a control de voltaje. En la Figura 44, se puede confirmar que en el instante de tiempo en el que el multiplexor realiza el cambio de control es el momento en el que la serie de baterías ha alcanzado el voltaje de flotación 54V.

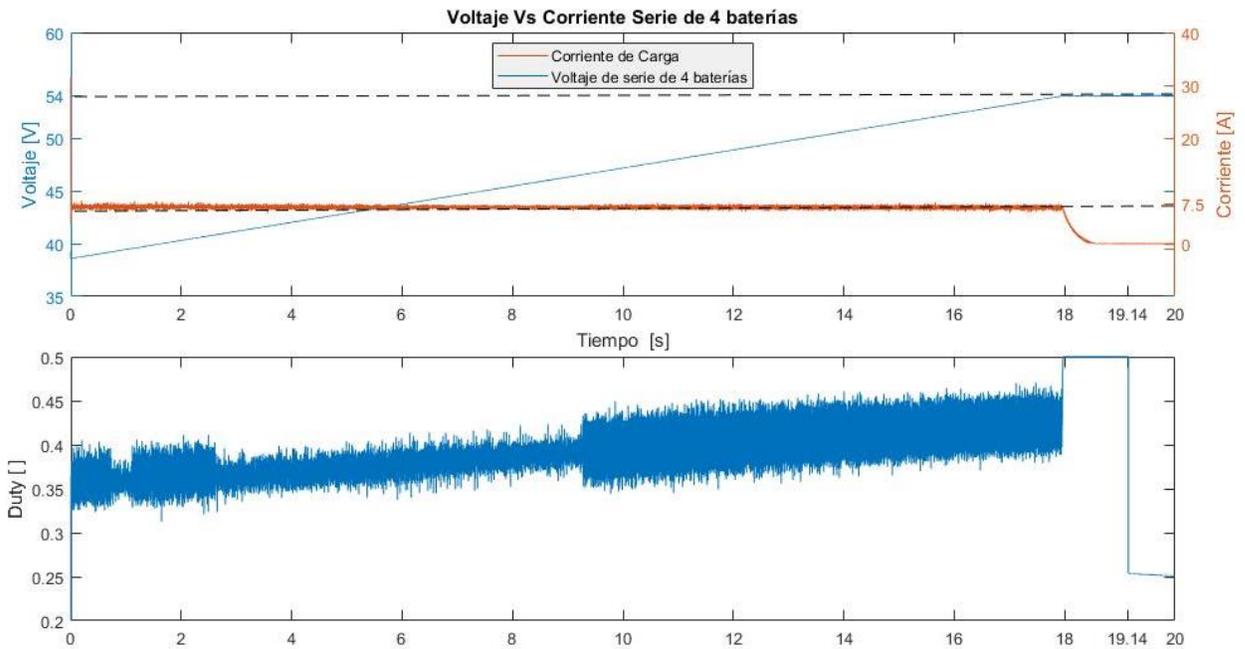


Figura 44. Comparación de ciclo de trabajo con el estado de la batería. Elaboración propia.

A los controladores de corriente y voltaje se les realizaron pruebas adicionales en las cuales se muestra cómo se comportarían los controladores en condiciones de alteración de la fuente de alimentación y en cambios en la referencia.

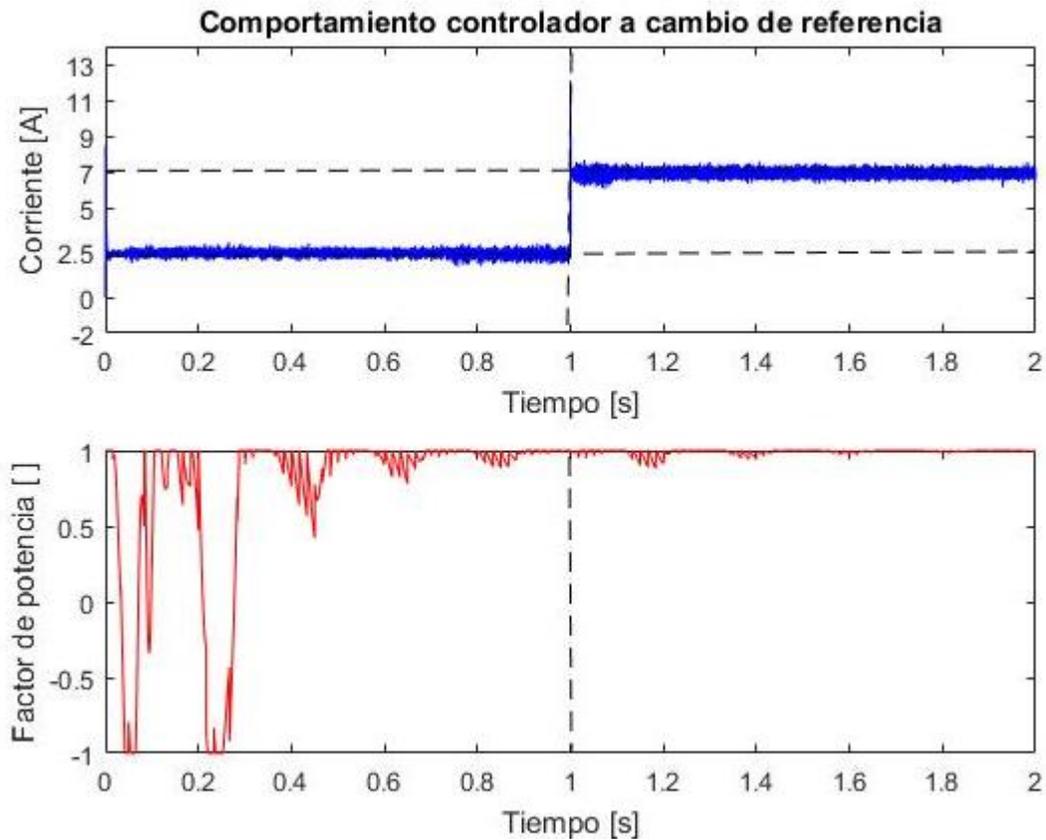


Figura 45. Cambio de referencia en la señal de corriente. *Elaboración Propia.*

En la Figura 45 se muestra el cambio de referencia de corriente, se puede observar que el convertidor está proporcionando la corriente requerida de 2.5 A hasta el segundo 1, cuando se realiza un cambio de referencia a 7.5 Amperios, el control responde de manera inmediata, mostrando el cambio significativo instantáneamente y verificando la funcionalidad correcta del control de corriente cuando se realiza un cambio de referencia a un valor deseado. También se observa que el control de corriente con el cambio de referencia no tiene gran impacto en el cambio del factor de potencia, trata de mantenerlo siempre cercano a la unidad, ya que no se observa una alteración del factor de potencia sino desde que se enciende el sistema hasta que se estabiliza.

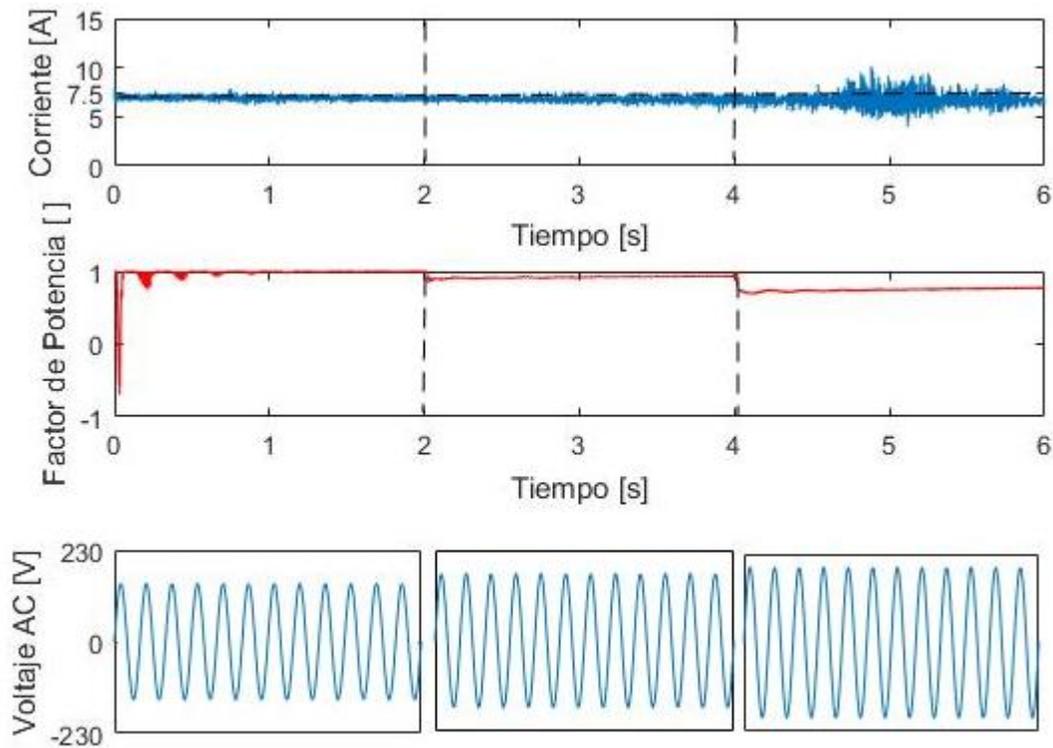


Figura 46. Control de corriente con cambios en la fuente. Elaboración Propia.

En la Figura 46, se puede observar el comportamiento del control de corriente en un tiempo de 6 segundos cuando existe un cambio en la tensión de la fuente, es decir en la red principal, en el tiempo de 0 a 2 segundos se presenta un nivel de tensión en la fuente de inferior del 15 % del valor nominal real que debe ser 208 V, en el siguiente tiempo de 2 a 4 segundos se presenta un nivel de tensión de 208 V el cual es el valor nominal real de trabajo del rectificador, y por último en los tiempos de 4 a 6 segundos se presenta un nivel de tensión en la fuente del 10% por encima del valor nominal real, generando una sobretensión en el equipo. Se nota como el control de corriente ante los cambios de tensión de la fuente, no genera trastornos mayores en la operación del rectificador, trata siempre de mantener la corriente de salida en 7.5 Amperios y el factor de potencia siempre es cercano a la unidad. Que son los valores requeridos para suministrar a la carga. La sobretensión se presenta como una perturbación en la red, debido a una deficiente calidad de la energía lo cual trae consigo varios efectos nocivos, como el mal comportamiento de las cargas eléctricas y fallo de condensadores que son necesarios en la corrección del factor de potencia, por este motivo se

observa que en el instante después de 4 segundos el factor de potencia cae a 0.8 más o menos, sin embargo, sigue siendo cercano a la unidad.

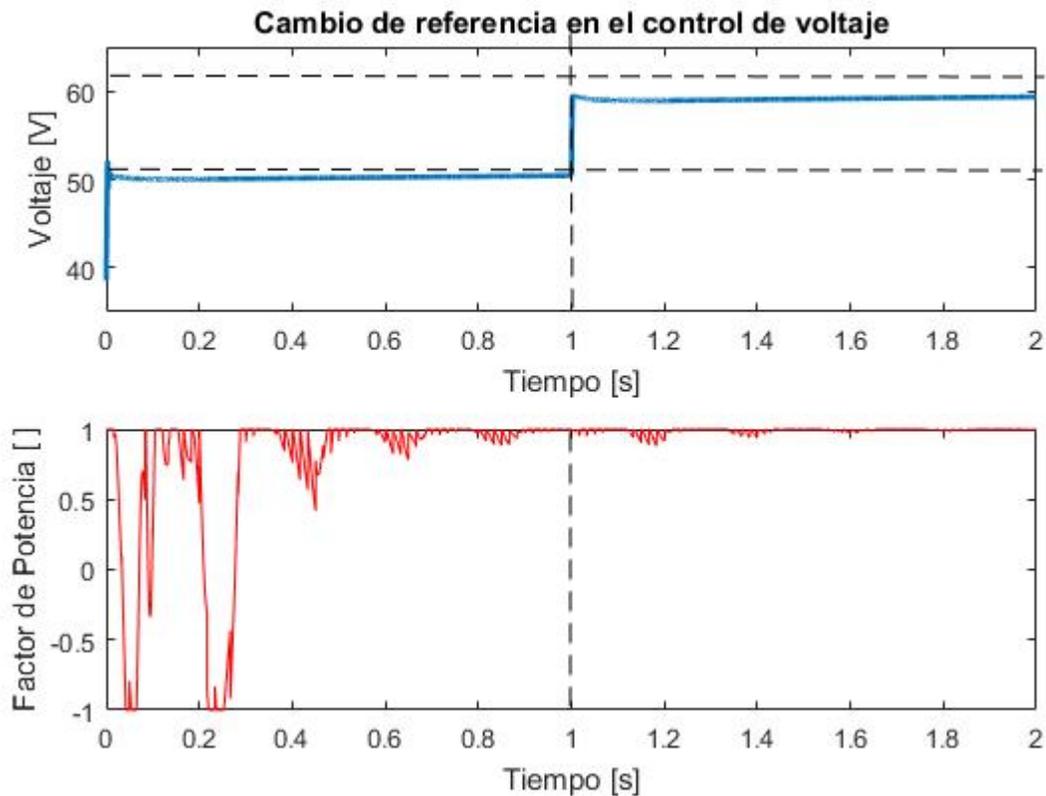


Figura 47. Cambio de referencia en control de voltaje. Elaboración propia.

En la Figura 47 se puede observar que el convertidor está proporcionando el voltaje requerido de 54 voltios para la carga de las 4 baterías conectadas en serie; pero cuando se le realiza un cambio de referencia a 60 voltios, el control responde inmediatamente, mostrando el cambio significativo instantáneamente y corrigiendo para alcanzar el valor deseado paulatinamente. También se observa que el control de voltaje con el cambio de referencia no tiene gran impacto en el cambio del factor de potencia, trata de mantenerlo siempre cercano a la unidad.

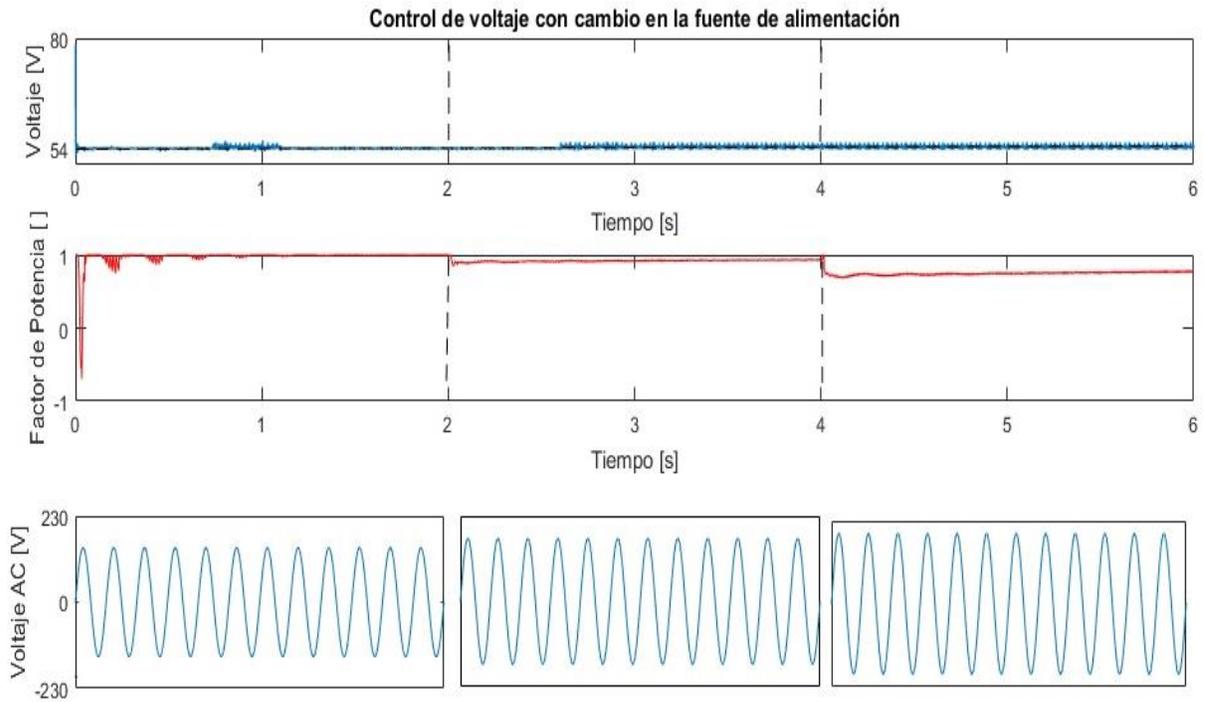


Figura 48. Control de Voltaje con cambios en la fuente. Elaboración propia.

En la Figura 48, se observa el comportamiento del controlador de voltaje a cambios realizados de igual manera en el controlador de corriente, se puede observar que los resultados son muy similares, ya que sólo se presenta una leve alteración al factor de potencia en condiciones de sobretensión, pues en condiciones normales y de subtensión se comporta de una manera idónea. De igual manera salvo la alteración del factor de potencia el sistema trata de mantener bajo cualquier situación el voltaje de salida en el valor deseado.

4.2.4. Comportamiento de la batería

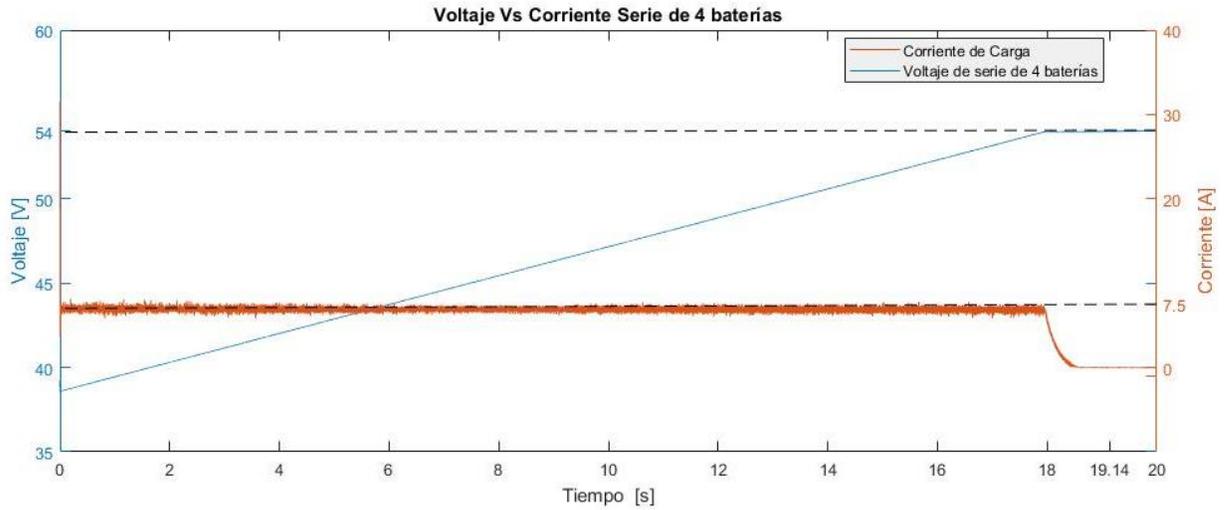


Figura 49. Tensión y Corriente final en una serie de 4 baterías. Elaboración propia.

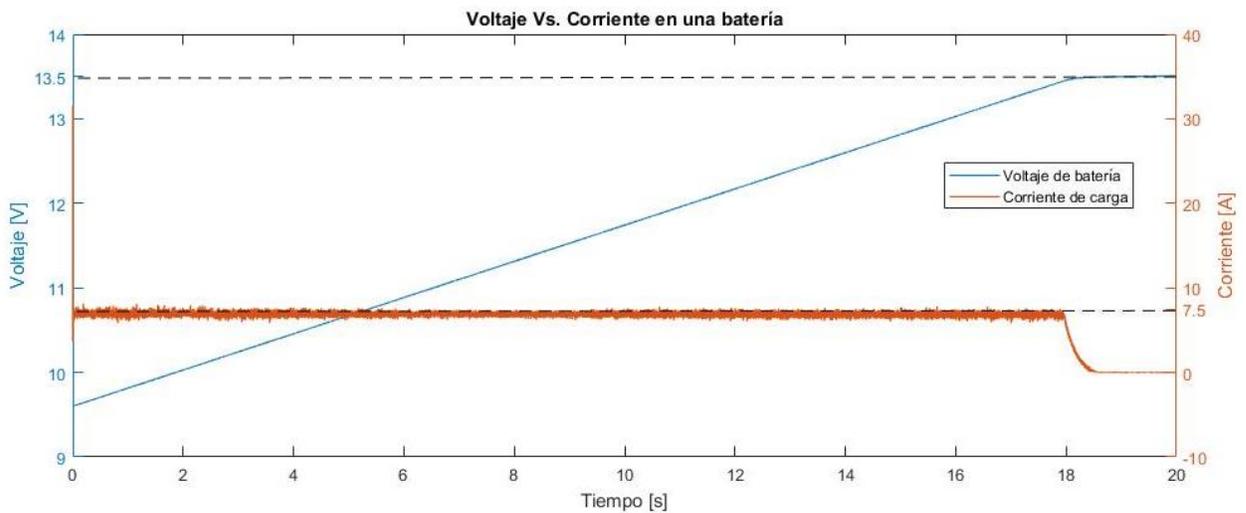


Figura 50. Tensión y Corriente final de 1 batería. Elaboración propia.

En las Figuras 49 y 50, se presentan los niveles de tensión y la corriente durante el proceso de carga, para cuatro baterías conectadas en serie y para 1 batería; se observa que el proceso de carga es idéntico para la batería individual y para la serie de 4 baterías, en ambos casos se evidencia que a corriente constante (7.5A) la batería va aumentando su nivel de tensión y al llegar al voltaje de flotación (13.5V), la corriente disminuye a un valor cercano a 0, en realidad baja hasta el valor de la corriente de autodescarga despejada de la fórmula (28) $I = 8,68mA$, que es el valor de consumo de la batería aún en circuito abierto.

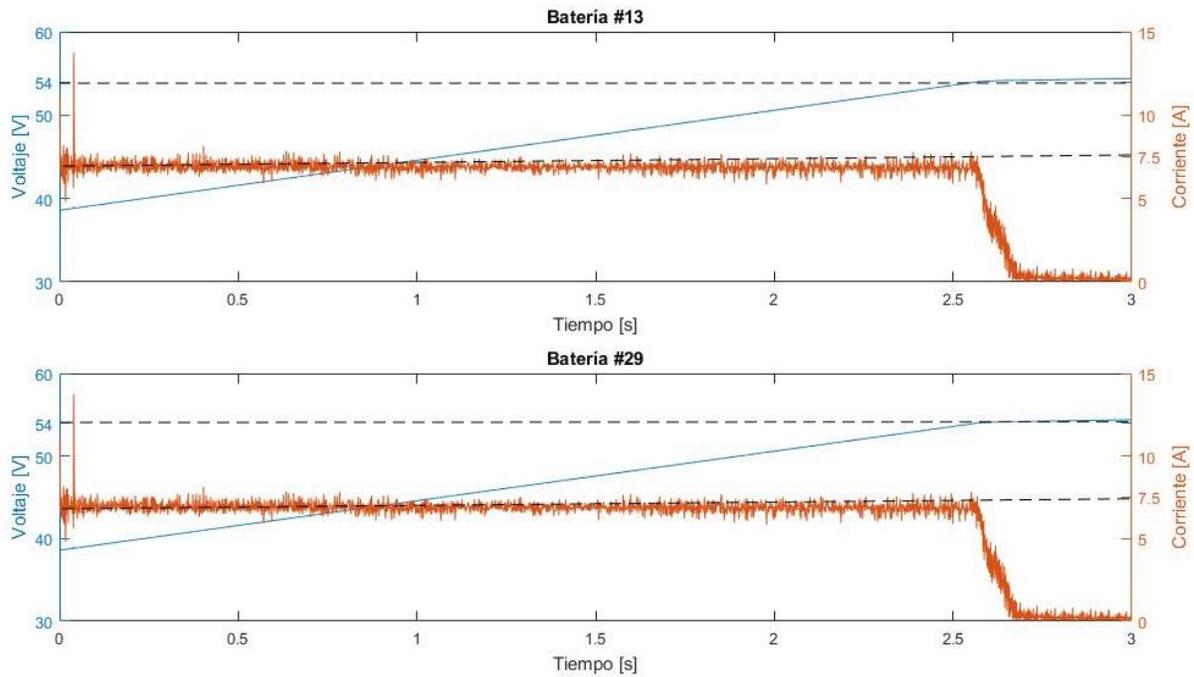


Figura 51. Comparación de operación de dos baterías en el circuito completo. Elaboración propia.

En la Figura 51, se observa el comportamiento que presentan dos baterías distintas conectadas a distintos convertidores, la idea con esta imagen es mostrar que no importa a cual de los convertidores esté conectado la batería o en qué posición dentro de la serie de 4 baterías se encuentre, pues se observa en las imágenes que el proceso de carga de ambas baterías es idéntico, con corriente de carga constante de 7.5A, hasta alcanzar el voltaje de flotación y luego de alcanzar el SOC del 100%, se mantiene la batería con la corriente de autodescarga de 8.68mA.

4.2.5. Alteraciones de la red eléctrica de alimentación.

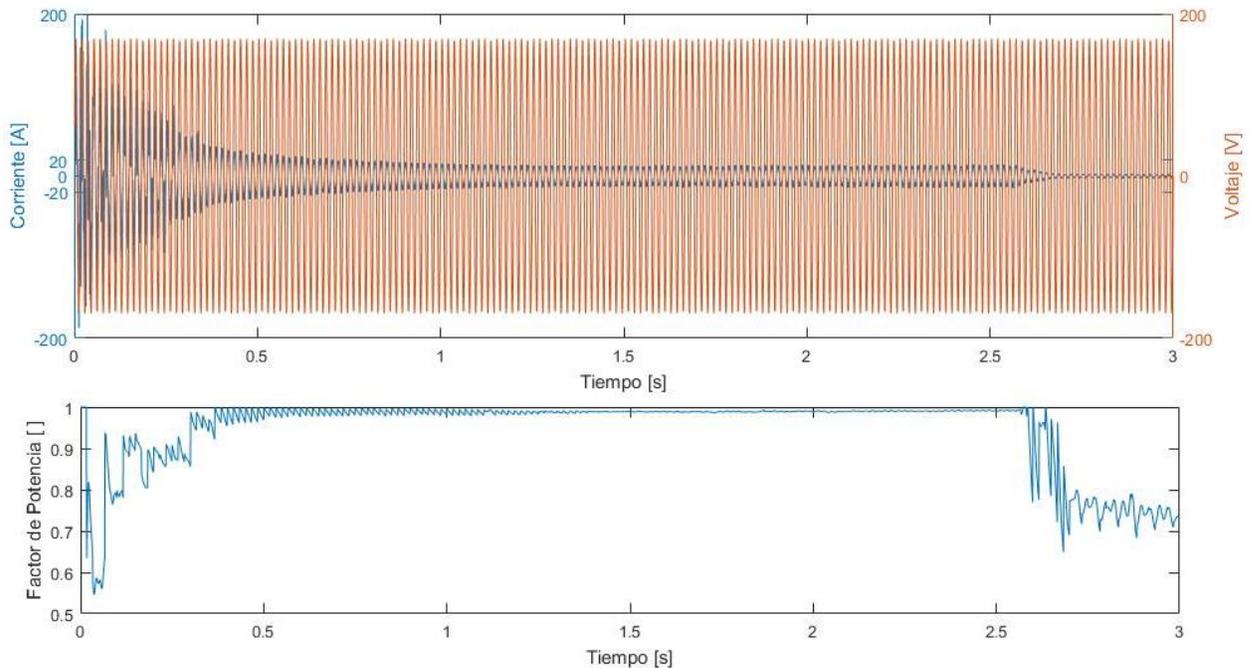


Figura 52. *Factor de Potencia del circuito completo cargador de baterías. Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 52, se puede observar el comportamiento del circuito completo del cargador de baterías cuando carga las 36 baterías, se aprecia como la corriente y el voltaje se encuentran en fase, permitiendo también que el factor de Potencia sea cercano a la unidad. También se observa que la distorsión de las señales de voltaje y corriente es mínima, es decir no cambia la forma de onda del voltaje o de la corriente de su forma de onda sinusoidal convencional, para facilitar la comprensión de esta idea, en la Figura 53 se presenta un zoom de la figura 52, entre 1.5s y 1.75s, donde se puede apreciar de una manera más clara, las formas de onda del voltaje y la corriente. Se puede observar también que después de 2.5 segundos el factor de potencia cae considerablemente, ya que no hay intensidad de corriente que fluya por el circuito, pues a partir de allí, opera el controlador de voltaje y la corriente de carga de la batería es muy cercano a 0, debido a esto, el medidor de factor de potencia al no obtener la lectura de la variable de corriente altera el resultado de la medición.

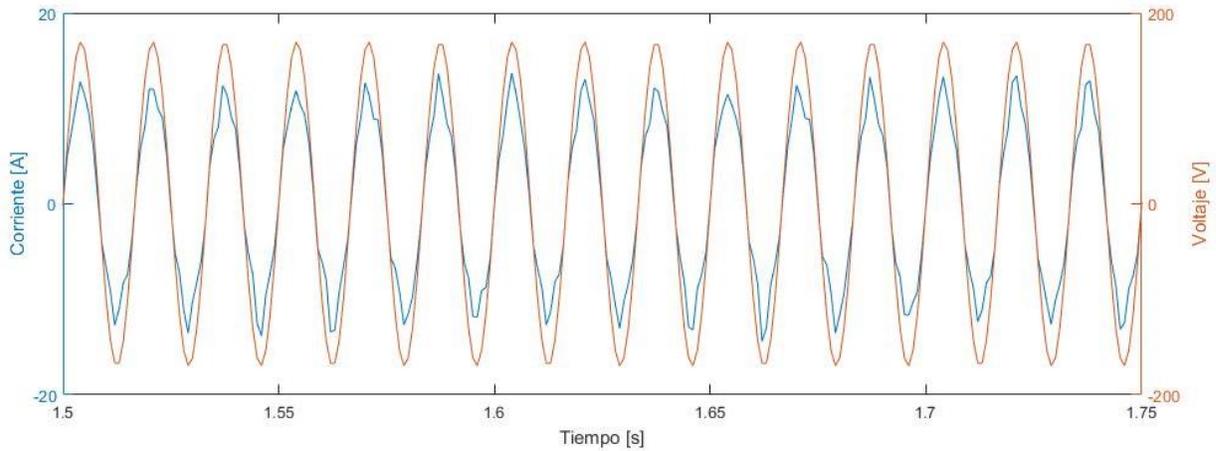


Figura 53. *Comportamiento de voltaje vs Corriente de la red, alimentando el cargador de baterías. Elaboración propia.*

Las figuras 51 y 52 también permiten apreciar que el cargador de baterías no afecta de una manera perjudicial la red eléctrica de alimentación del sistema, ya que no va a presentar mayores distorsiones armónicas, ni pérdidas considerables por potencia reactiva.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Siendo coherentes con los objetivos propuestos en la presente tesis, se puede decir con respecto al objetivo general y específicos, que se diseñó un cargador con alimentación AC trifásica con múltiples salidas DC para ser utilizado en la carga de baterías secas (baterías estacionarias) de respaldo para UPS en el Túnel Fernando Gómez Martínez. Para esto se diseñó un rectificador PFC (Power Factor Correction) trifásico, teniendo como restricción la carga y la fuente y se optó por utilizar un rectificador trifásico elevador de topología Boost que permitiera cumplir con los parámetros para corrección del factor de potencia, y un bajo THD, con una tensión de entrada de 208 Vac, una tensión de salida del rectificador de 300 Vdc que luego alimenta los convertidores DC-DC que se diseñaron, y se usaron como interfaz entre el rectificador y las baterías. Se utilizaron convertidores reductores tipo buck cuadrático. Estos convertidores tienen una salida de 54 Vdc para la carga de las baterías lo cual se determinó que la cantidad de baterías que se va a mantener cargadas serán en arreglos de 4 conectadas en topología serie.

También dentro del diseño se intervino el sistema de control del cargador de baterías, según las restricciones de carga de las baterías, se optó por utilizar un sistema de control PI (proporcional integral) el cual es uno de los más utilizados a nivel industrial.

Por último, con el sistema diseñado se realizaron pruebas de simulación en software de circuitos especializado PSIM, y MATLAB, para verificar el comportamiento en la carga y en la fuente. En general los resultados entregados fueron óptimos, logrando así los objetivos propuestos y la solución al problema principal que era suministrar carga a un banco de baterías que se encontraba sin operar o en stock.

En trabajos futuros sobre este proyecto, se pueden implementar mejoras en los controles, tanto de corriente como de voltaje, reducir la cantidad de componentes que componen el circuito, se podría mediante microcontroladores realizar una programación donde se pueda conectar en cada serie de

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

baterías un número diferente de baterías e implementar un control de temperatura de baterías, ya que la temperatura de funcionamiento de la batería está ligado directamente a su SOH.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

REFERENCIAS

- Aamir, M., Ahmed Kalwar, K., & Mekhilef, S. (2016). Review: Uninterruptible Power Supply (UPS) system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *58*, 1395–1410.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.335>
- Abdullah, M. A., Tan, C. W., & Yatim, A. H. M. (2015). A simulation comparison of PI and Linear Quadratic Regulator controllers in DC-DC converter. *2015 IEEE Conference on Energy Conversion, CENCON 2015*, (1), 37–41.
<https://doi.org/10.1109/CENCON.2015.7409510>
- Belmokhtar, K., Ibrahim, H., Féger, Z., & Ghandour, M. (2016). Charge Equalization Systems for Serial Valve Regulated Lead-Acid (VRLA) Connected Batteries in Hybrid Power Systems Applications. *Energy Procedia*, *99*, 277–284.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.117>
- Berndt, D. (2001). Valve-regulated lead-acid batteries. *Journal of Power Sources*, *100*(1-2), 29–46. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00881-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00881-3)
- Berndt, D. (2006). VRLA batteries, advances and limitations. *Journal of Power Sources*, *154*(2), 509–517. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.10.083>
- Campos, F., & Ronyver, F. (2015). DE BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO CON DIFERENTES TIPOS DE ARREGLOS.
- Catherino, H. A. (2006). Complexity in battery systems: Thermal runaway in VRLA batteries. *Journal of Power Sources*, *158*(2), 977–986.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.11.005>
- Ceraolo, M. (2000). New Dynamical Models of Lead – Acid Batteries, *15*(4), 1184–1190.
- Chan, H. L. (2000). A new battery model for use with battery energy storage systems and electric vehicles power systems\r - Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE. *Order A Journal On The Theory Of Ordered Sets And Its Applications*, *00*(c).
- Daniel W.Hart. (2011). *Power Electronics*. Mc Graw Hill.
- Drouilhet, S., & Johnson, B. (2013). A battery life prediction method for hybrid power applications, (January). <https://doi.org/10.2514/6.1997-948>

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

- Ehrlich, G. M. (2002). *Lithium-Ion Batteries. Handbook of Batteries*.
[https://doi.org/10.1016/0378-7753\(86\)80059-3](https://doi.org/10.1016/0378-7753(86)80059-3)
- El Shahat, A. (2014). *Storage device unit modeling. International Conference on Engineering and Technology (págs. 1-6)*. Cairo: ICET.
- Erickson, Robert W., Maksimovic, D., Erickson, R. W., & Maksimovic, D. (2005). *Fundamentals of Power Electronics*. (Springer, Ed.) (2nd ed.). Springer.
- Gobierno de Chile. (2009). Guia tecnica sobre el manejo de baterias de plomo acido usadas, 85. Retrieved from http://www.sinia.cl/1292/articles-47018_recurso_1.pdf
- Hussein, A. A., & Fardoun, A. A. (2015). Design considerations and performance evaluation of outdoor PV battery chargers. *Renewable Energy*, 82, 85–91.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.08.063>
- Jantharamin, N., & Zhang, L. (2008). A new dynamic model for Lead-acid batteries. *4th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2008)*, 86–90. <https://doi.org/10.1049/cp:20080488>
- Kolar, J. W., & Friedli, T. (2011). The essence of three-phase PFC rectifier systems. *INTELEC, International Telecommunications Energy Conference (Proceedings)*, 1–27.
<https://doi.org/10.1109/INTLEC.2011.6099838>
- Nelson, R. F. (2004). *Valve-Regulated Lead-Acid Batteries. Valve-Regulated Lead-Acid Batteries*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-044450746-4/50011-8>
- Nunez, B. (n.d.). Webquest Creator 2. Retrieved from
<http://www.webquestcreator2.com/majwq/ver/verp/32120>
- Pascoe, P. E., & Anbuky, A. H. (2004). A VRLA battery simulation model. *Energy Conversion and Management*, 45(7-8), 1015–1041.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.08.014>
- Power, E. N. (2013). Effects of AC Ripple Current on VRLA Battery Life. *A Technical Note from the Expert in Businnes-Critical Continuity*, 8. Retrieved from
[http://www.emersonnetworkpower.com/documentation/en-us/brands/liebert/documents/white papers/effects of ac ripple current on vrla](http://www.emersonnetworkpower.com/documentation/en-us/brands/liebert/documents/white%20papers/effects%20of%20ac%20ripple%20current%20on%20vrla)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

battery life.pdf

- Roiu, D., Primon, A., Rossella, M., & Ornato, M. (2017). 12V battery modeling: Model development, simulation and validation. *2017 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive*, 1–5.
<https://doi.org/10.23919/EETA.2017.7993215>
- Singh, B., Member, S., Singh, B. N., Chandra, A., Al-haddad, K., Pandey, A., & Kothari, D. P. (2004). A Review of Three-Phase Improved Power Quality AC – DC Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51(3), 641–660.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2003.817609>
- Svoboda, V., Doering, H., & Garche, J. (2005). The influence of fast charging on the performance of VRLA batteries. *Journal of Power Sources*, 144(1), 244–254.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.12.026>
- Thounthong, P., Raël, S., & Davat, B. (2009). Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications. *Journal of Power Sources*, 193(1), 376–385. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.12.120>
- Tsujikawa, T., & Matsushima, T. (2007). Remote monitoring of VRLA batteries for telecommunications systems. *Journal of Power Sources*, 168(1), 99–104.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.12.062>
- Woodbank Communications Ltd. (2005). Battery Chargers and Charging Methods. *Electropaedia*. Retrieved from <http://www.mpoweruk.com/chargers.htm>

APÉNDICE

Apéndice A



Duncan R - 75

(12V75AH)

Specification		
Nominal Voltage	12 VDC	
Nominal Capacity (10 HR)	>=75 Ah	
Floating voltage range	13.5 - 13.72V	
Dimensions	Length	259+/-3mm
	Width	168+/-2mm
	Container Height	208+/-3mm
	Total Height (With Terminal)	214+/-3mm
Approx Weight	22.3 Kg.	
Terminal	T6/T9	
Container Material	ABS	
Building material	Electrolyte. Type Gel, cadmium free, AGM, AGM-VRLA.	
Rated Capacity	78.0 Ah/3.90A (20hr, 1.80 V/Cell, 25°C/77°F)	
	75.0 Ah/7.50A (10hr, 1.80 V/Cell, 25°C/77°F)	
	64.5 Ah/12.9A (5 hr, 1.75 V/Cell, 25°C/77°F)	
	58.5 Ah/19.5A (3 hr, 1.75 V/Cell, 25°C/77°F)	
	45.8 Ah/45.8A (1 hr, 1.60 V/Cell, 25°C/77°F)	
Max. Discharge Current	900A (5s)	
Internal Resistance	Approx 6.6 m ohms	
	Discharge -15 - 50°C (5-122°F)	
Operating Temp. Range	Charge 0 - 40°C (32-104°F)	
	Storage -40 - 40°C (5-104°F)	
Nominal Operating Temp. Range	25+/-3°C (77+/-5°F)	
Cycle Use	Initial charging current less than 22.5A voltage	
Working cycles	14.4V-15.0V at 25°C (77°F) temp. Coefficient -20mV/°C	
Deep cycles	Continuous	
Standby Use	>1500	
	No limit on initial charging current voltage	
	13.5V-13.8V at 25°C (77°F) temp. Coefficient -20mV/°C	
	40°C (104°F) 103%	
Capacity affected by Temperature	25°C (77°F) 100%	
	0°C (32°F) 86%	
	Duncan R series batteries may be stored for up to 6 months at 25°C (77°F) and then a freshening charges is required. For higher temperatures the time interval will be shorter.	
Self Discharge	AI >=50%	
Depth of Discharge	Fully sealed and maintenance-free batteries	
Construction	Grooming and cleaning only connectors	
Maintenance	With out antimony and cadmium	
Plates	10 years	
Useful life	Connectors and screws in stainless steel with eye terminals for wire #8	
Accessories	Date, manufacture, warranty, capacity and reference	
Permanent marker		



Applications

- ◆ All purpose
- ◆ Uninterruptable Power Supply (UPS)
- ◆ Electric Power System (EPS)
- ◆ Emergency backup power supply
- ◆ Emergency light
- ◆ Railway signal
- ◆ Aircraft signal
- ◆ Alarm and security system
- ◆ Electronic apparatus and equipment
- ◆ Communication power supply
- ◆ DC power supply
- ◆ Auto control system



Constant Current Discharge (Amperes) at 25 °C (77°F)

F.V/Time	5min	10min	15min	20min	30min	45min	1h	2h	3h	4h	5h	6h	8h	10h	20h
1.85V/cell	128.4	100.9	85.8	71.8	57.1	43.2	35.4	22.5	17.8	14.5	11.7	10.2	8.29	7.08	3.86
1.80V/cell	172.3	128.9	103.7	84.9	67.3	50.2	39.6	24.6	19.2	15.5	12.6	10.9	8.79	7.50	3.90
1.75V/cell	194.3	141.7	113.3	91.3	69.9	52.1	41.4	25.5	19.5	15.9	12.9	11.2	8.94	7.58	3.94
1.70V/cell	213.9	154.4	120.9	95.9	72.7	54.2	42.7	26.5	20.1	16.3	13.2	11.5	9.07	7.65	4.01
1.65V/cell	235.9	166.7	128.6	101.9	76.7	55.6	44.2	27.2	20.9	16.8	13.6	11.7	9.21	7.81	4.07
1.60V/cell	260.2	180.9	137.5	108.6	81.0	57.9	45.8	28.2	21.6	17.4	14.1	12.0	9.30	7.89	4.09

Constant Power Discharge (Watts/cell) at 25 °C (77°F)

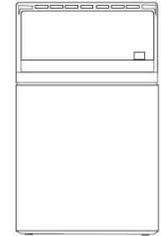
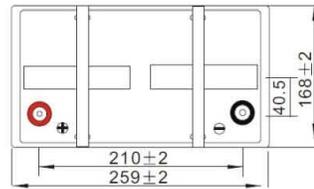
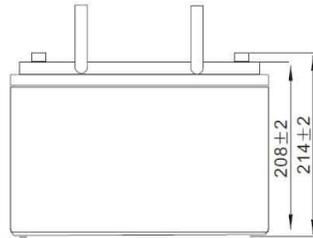
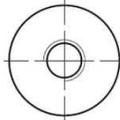
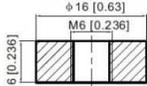
F.V/Time	5min	10min	15min	20min	30min	45min	1h	2h	3h	4h	5h	6h	8h	10h	20h
1.85V/cell	234.7	186.4	160.1	135.3	108.7	83.0	68.2	43.7	34.7	28.4	23.0	20.1	16.4	14.0	7.65
1.80V/cell	311.7	235.4	190.9	157.6	126.3	95.8	76.0	47.4	37.1	30.2	24.6	21.4	17.3	14.8	7.71
1.75V/cell	343.9	254.5	205.9	167.9	130.1	98.4	79.1	49.0	37.7	30.8	25.1	22.0	17.6	14.9	7.78
1.70V/cell	368.2	271.1	216.8	175.1	134.6	102.0	81.4	50.8	38.7	31.5	25.7	22.4	17.8	15.1	7.92
1.65V/cell	400.3	289.9	228.8	184.7	140.9	103.6	83.5	52.0	40.1	32.5	26.3	22.8	18.0	15.4	8.02
1.60V/cell	431.3	307.6	240.6	194.6	147.7	107.4	86.0	53.4	41.2	33.4	27.1	23.2	18.2	15.5	8.05

Dimensions

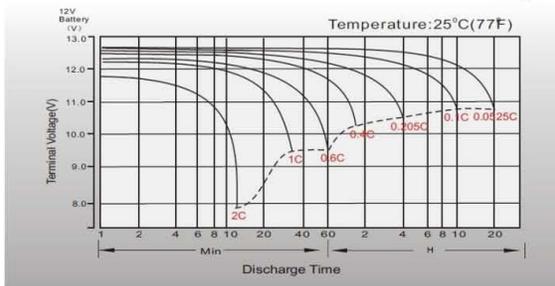


T6 Terminal

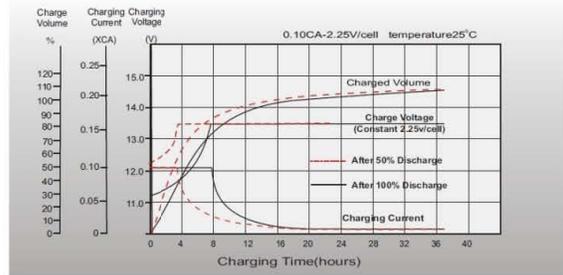
Unit: mm [inches]



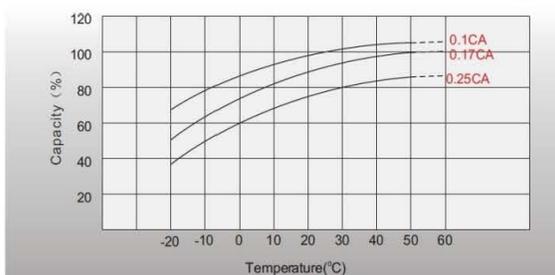
Discharge Characteristics



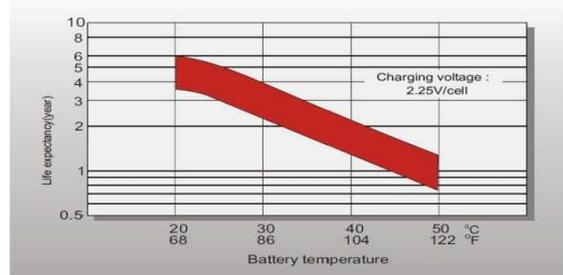
Float Charging Characteristics



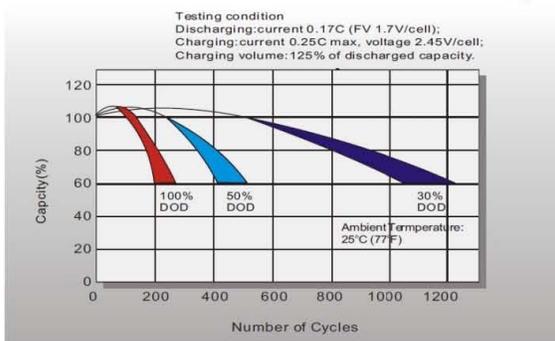
Temperature Effects in Relation to Battery Capacity



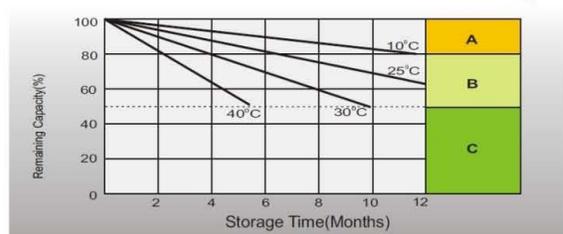
Effect of Temperature on Long Term Float Life



Cycle Life in Relation to Depth of Discharge



Self Discharge Characteristics



- A** No supplementary charge required
(Carry out supplementary charge before use if 100% capacity is required.)
- B** Supplementary charge required before use. Optional charging way as below:
1. Charged for above 3 days at limited current 0.25CA and constant voltage 2.25V/cell.
2. Charged for above 20 hours at limited current 0.25CA and constant voltage 2.45V/cell.
3. Charged for 8-10 hours at limited current 0.05CA.
- C** Supplementary charge may often fail to recover the capacity.
The battery should never be left standing till this is reached.

Sales Office

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Apéndice B

Cálculo en Matlab de parámetros para controlador PI en el control de corriente

linealización

```

syms dv1 dv2 di1 di2 Ri L1 L2 C1 C2 VB D Vin V1 V2 I1 I2
U=[Vin; VB; D];
X=[V1;V2;I1;I2];
Y=[V2; I2];
dv1=I1/C1-I2*D/C1;
dv2=I2/C2-V2/(C2*Ri)+VB/(C2*Ri);
di1=Vin*D/L1-V1/L1;
di2=V1*D/L2-V2/L2;
dX=[dv1;dv2;di1;di2];

```

```

A=jacobian(dX,X)
B=jacobian(dX,U)
Css=jacobian(Y,X)
Dss=jacobian(Y,U)

```

Resultados.

A =

```

[ 0, 0, 1/C1, -D/C1]
[ 0, -1/(C2*Ri), 0, 1/C2]
[-1/L1, 0, 0, 0]
[ D/L2, -1/L2, 0, 0]

```

B =

```

[ 0, 0, -I2/C1]
[ 0, 1/(C2*Ri), 0]
[ D/L1, 0, Vin/L1]
[ 0, 0, V1/L2]

```

Css =

```

[ 0, 1, 0, 0]
[ 0, 0, 0, 1]

```

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Dss =

[0, 0, 0]

[0, 0, 0]

%% Determinar los valores de las variables en el punto de operación

L1=1.15e-3; L2=0.2e-3; C1=71.97e-6; C2=17.36e-6; Ri=26.4e-3;

Vin=300; VB=38.4; I2=7.5;

[Ds,V1s,V2s,I1s] = solve(I1-I2*D==0,I2-V2/Ri+VB/Ri==0,Vin*D-V1==0,V1*D-V2==0, D, V1, V2, I1)

D=eval(Ds(2))

V1=eval(V1s(2))

V2=eval(V2s(2))

I1=eval(I1s(2))

Resultados.

Ds =

-32165^(1/2)/500
32165^(1/2)/500

D =

0.3587

V1s =

-(3*32165^(1/2))/5
(3*32165^(1/2))/5

V1 =

107.6076

V2s =

19299/500
19299/500

V2 =

38.5980

I1s =

-(3*32165^(1/2))/200
(3*32165^(1/2))/200

I1 =

2.6902

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

%% Modelo en espacio de estados y función de transferencia

```

A=eval(A)
B=eval(B)
Css=eval(Css)
Dss=eval(Dss)

[Num,Den]=ss2tf(A,B,Css,Dss,3);
Gv2d=tf(Num(1,:),Den)
Gi2d=tf(Num(2,:),Den)

Co=ctrb(A,B(:,3))
Rango=rank(Co)

```

Resultados.

A =

```

1.0e+06 *

    0    0  0.0139 -0.0050
    0 -2.1820    0  0.0576
-0.0009    0    0    0
 0.0018 -0.0050    0    0

```

B =

```

1.0e+06 *

    0    0 -0.1042
    0  2.1820    0
 0.0003    0  0.2609
    0    0  0.5380

```

Css =

```

 0  1  0  0
 0  0  0  1

```

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Dss =

```
0 0 0
0 0 0
```

Gv2d =

$$\frac{3.099e10 s^2 - 1.077e13 s + 7.489e17}{s^4 + 2.182e06 s^3 + 3.09e08 s^2 + 4.587e13 s + 3.48e15}$$

Continuous-time transfer function.

Gi2d =

$$\frac{5.38e05 s^3 + 1.174e12 s^2 - 3.948e14 s + 2.837e19}{s^4 + 2.182e06 s^3 + 3.09e08 s^2 + 4.587e13 s + 3.48e15}$$

Continuous-time transfer function.

Co =

```
1.0e+23 *
-0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
 0 0.0000 -0.0000 1.4757
0.0000 0.0000 -0.0000 -0.0000
0.0000 -0.0000 -0.0000 0.0034
```

Rango =

3

%% Graficar y obtener Kp e Ti

pidtool(Gi2d)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Apéndice C

Cálculo en Matlab de parámetros para controlador PI en el control de voltaje

linealización

```

syms dv1 dv2 di1 di2 Rn L1 L2 C1 C2 In D Vin V1 V2 I1 I2
U=[Vin; In; D];
X=[V1;V2;I1;I2];
Y=[V2; I2];
dv1=I1/C1-I2*D/C1;
dv2=I2/C2-(V2/(C2*Rn))+(In/C2);
di1=Vin*D/L1-V1/L1;
di2=V1*D/L2-V2/L2;
dX=[dv1;dv2;di1;di2];

```

```

A=jacobian(dX,X)
B=jacobian(dX,U)
Css=jacobian(Y,X)
Dss=jacobian(Y,U)

```

Resultados.

A =

```

[ 0, 0, 1/C1, -D/C1]
[ 0, -1/(C2*Rn), 0, 1/C2]
[-1/L1, 0, 0, 0]
[ D/L2, -1/L2, 0, 0]

```

B =

```

[ 0, 0, -I2/C1]
[ 0, 1/C2, 0]
[ D/L1, 0, Vin/L1]
[ 0, 0, V1/L2]

```

Css =

```

[ 0, 1, 0, 0]
[ 0, 0, 0, 1]

```

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Dss =

[0, 0, 0]
 [0, 0, 0]

%% Determinar los valores de las variables en el punto de operación

L1=1.15e-3; L2=0.2e-3; C1=71.97e-6; C2=17.36e-6; Rn=26.4e-3;
 Vin=300; In=5818.18; V2=54;

[Ds,V1s,I2s,I1s] = solve(I1-I2*D==0,I2-((V2/Rn)+In)==0,Vin*D-V1==0,V1*D-V2==0, D, V1, I2, I1)

D=eval(Ds(2))
 V1=eval(V1s(2))
 I2=eval(I2s(2))
 I1=eval(I1s(2))

Resultados.

Ds =

$-(3 \cdot 2^{1/2})/10$
 $(3 \cdot 2^{1/2})/10$

V1s =

$-90 \cdot 2^{1/2}$
 $90 \cdot 2^{1/2}$

D =

0.4243

I2s =

$4323078809654157/549755813888$
 $4323078809654157/549755813888$

V1 =

127.2792

I1s =

-
 $(12969236428962471 \cdot 2^{1/2})/5497558138880$

I2 =

7.8636e+03

$(12969236428962471 \cdot 2^{1/2})/5497558138880$

I1 =

3.3363e+03

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

%% Modelo en espacio de estados y función de transferencia

```

A=eval(A)
B=eval(B)
Css=eval(Css)
Dss=eval(Dss)

[Num,Den]=ss2tf(A,B,Css,Dss,3);
Gv2d=tf(Num(1,:),Den)
Gi2d=tf(Num(2,:),Den)

Co=ctrb(A,B(:,3))
Rango=rank(Co)

```

Resultados.

A =

```

1.0e+06 *
    0    0  0.0139 -0.0059
    0 -2.1820    0  0.0576
-0.0009    0    0    0
 0.0021 -0.0050    0    0

```

B =

```

1.0e+08 *
    0    0 -1.0926
    0  0.0006    0
 0.0000    0  0.0026
    0    0  0.0064

```

Css =

```

 0  1  0  0
 0  0  0  1

```

Dss =

```

 0  0  0
 0  0  0

```

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Gv2d =

$$\frac{3.666e10 s^2 - 1.335e16 s + 8.858e17}{s^4 + 2.182e06 s^3 + 3.126e08 s^2 + 5.365e13 s + 3.48e15}$$

Continuous-time transfer function.

Gi2d =

$$\frac{6.364e05 s^3 + 1.157e12 s^2 - 5.057e17 s + 3.355e19}{s^4 + 2.182e06 s^3 + 3.126e08 s^2 + 5.365e13 s + 3.48e15}$$

Continuous-time transfer function.

Co =

$$1.0e+23 * \begin{bmatrix} -0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0 & 0.0000 & -0.0000 & 2.0365 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 \\ 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0047 \end{bmatrix}$$

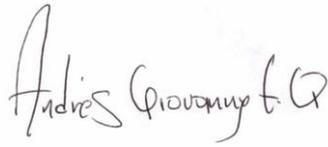
Rango =

3

%% Graficar y obtener Kp e Ti

pidtool(Gv2d)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


 FIRMA ESTUDIANTES _____




 Informe Final
 Proyecto de Grado.
 FIRMA ASESOR _____

FECHA ENTREGA: 29 Abril 2019

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____