

Capitulo IV

Desarrollo experimental.

Para una mejor comprensión del desarrollo de este proyecto se dividió el proceso de experimentación en 2 etapas. La primera etapa ayuda a demostrar a través de pruebas y estudios a base de circuitos simples, el comportamiento del sistema propuesto, para posteriormente de acuerdo a los resultados basados en dichas pruebas, empezar la segunda etapa donde se elegirán los correctos componentes electrónicos y configuraciones necesarios para desarrollar un prototipo acorde las expectativas deseadas.

4.1 Etapa 1

4.1.1 Estudio de la posición del sensor

Antes de hacer cualquier prueba es necesario analizar un factor importante, dicho factor altera las pruebas de caminata debido la distribución del peso en los puntos de apoyo del pie, al caminar de cada persona, dichas áreas varían para cada individuo. También es necesario comprender la respuesta de nuestro sensor al ser deformado y aprovechar las ventajas o minimizar las desventajas. Con la finalidad de encontrar el punto de mayor presión en el pie del sujeto que realizara las pruebas de caminata y a su vez poder asegurar que esta zona sea la más eficiente para transmitir energía.

Se propone un estudio que aprovecha las propiedades piezoeléctricas de nuestros sensores de vibración, los cuales a mayor presión entregan una mayor cantidad de voltaje. Como siguiente paso se elaboró una plantilla de *foamy* del tamaño de la

suela del zapato del sujeto a prueba, después el sensor piezoeléctrico fue adherido a dicha plantilla en 5 sectores distintos según los huesos localizados en la zona, sector 1 primer metatarso, sector 2, cuarto y quinto metatarsos, sector 3 primer cuneiforme, sector 4 cuboides, sector 5 talón. Como se muestra en la figura 3a.

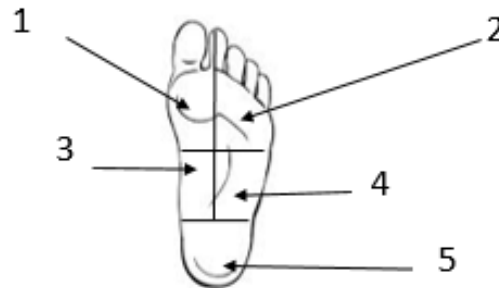


Figura 3a: segmentos del pie.

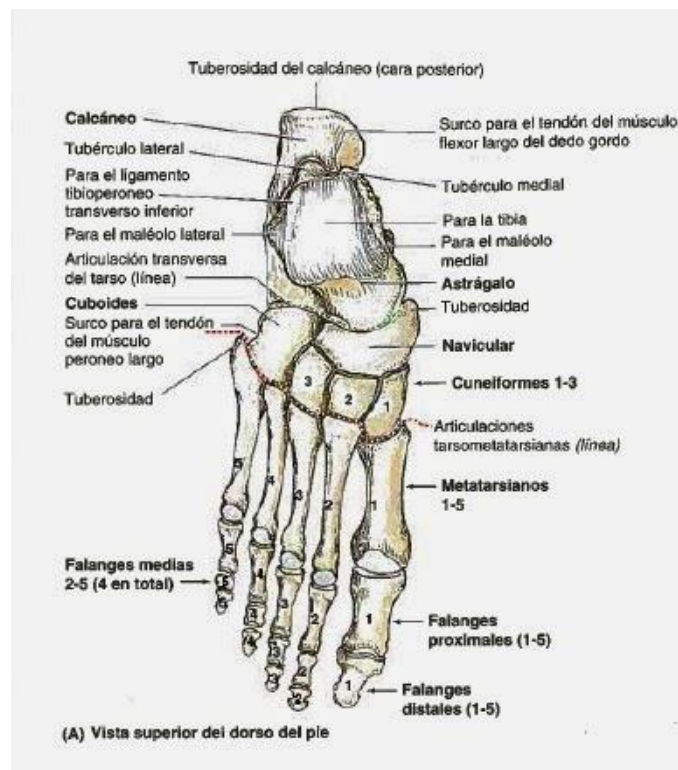
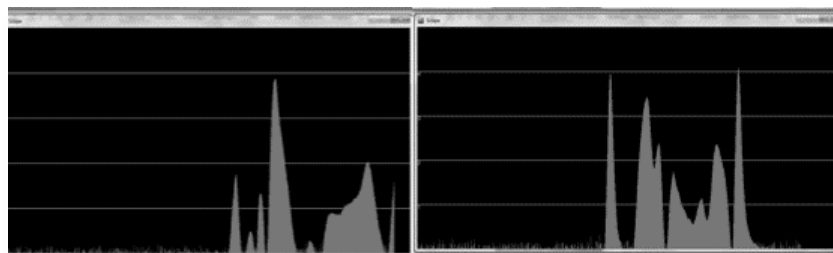


Figura 3b: huesos del pie (moore, 2010).

El estudio consistió dos pruebas, la prueba (a) propone adherir la plantilla al suelo con un sensor piezoeléctrico colocado en alguno de los sectores, el sujeto pisará la plantilla con un paso normal, este mismo proceso se repitió una vez para cada sector moviendo el sensor en cada sector. La prueba (b) ayuda corroborar la prueba anterior, realizando la misma prueba pero ahora con el piezoeléctrico en un punto fijo, en esta ocasión el sujeto pisara el piezoeléctrico fijo, haciendo contacto cada vez con un sector distinto.

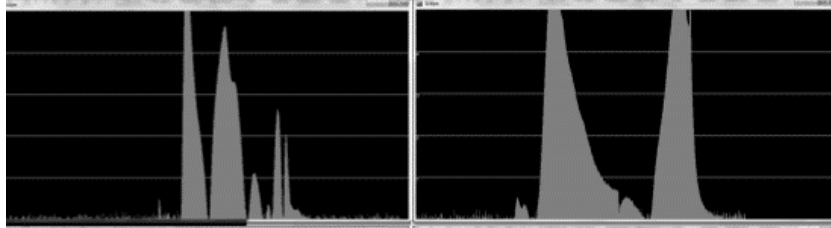
El voltaje de salida en cada caso fue captado mediante la entrada analógica de una tarjeta *ARDUINO UNO*, y graficada en un software de graficación llamado *PROSESING*. Gracias a un código de programación se adquiere la señal en el *ARDUINO*. Como dicha entradas soportan un valor máximo de 5V, se construyó un circuito mediante un divisor de voltaje para nunca recibir más de 5V por nuestro sensor, siendo este valor el límite máximo entregado, protegiendo así el *ARDUINO*. La Pantalla de graficación está configurada para graficar: voltaje (en el eje Y) y tiempo (en el eje X).

Grafica sector 1.



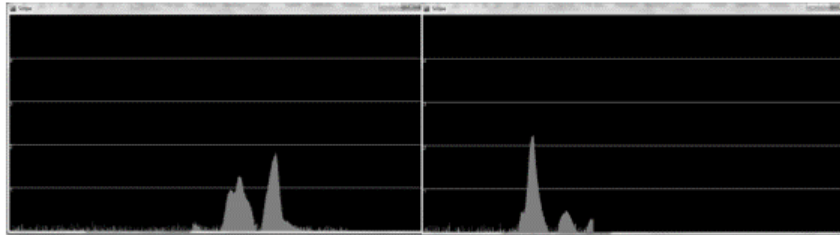
Grafica 1: sector 1.

Grafica sector 2.



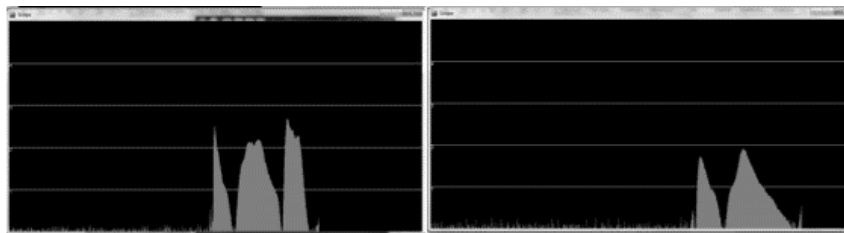
Grafica 2: sector 2.

Grafica sector 3.



Grafica 3: sector 3.

Grafica sector 4.



Grafica 4: sector 4.

Grafica sector 5.



Grafica 5: sector 5.

Los datos muestran que los sectores 1 (metatarsos), 2 (metatarsos), y 5 (talón), presentan una mayor respuesta en las pisadas del sujeto que realizara las pruebas de caminata, aunque la respuesta del sector 5 correspondiente al talón no presenta

consistencia a las 2 pruebas, esto indica que el sujeto de prueba apoya mayormente su peso en los sectores 1 y 2.

Otro factor importante que muestran las gráficas es que el primer pico captado es cuando el peso es aplicado en el sensor y el segundo se presenta al quitar el peso, esto debido a la fuerza normal que ejerce el suelo. Cada uno de estos voltajes ayuda a recolectar la energía como se muestra en las gráficas del sector 1, (primer metatarso), donde se observan mayor cantidad de voltajes en un solo paso siendo el sector 1 el punto ideal para colocar el sensor piezoeléctrico en la planta del pie del sujeto que realizara las pruebas.

4.1.2 Voltaje del sensor y comprobación de la ecuación (14)

Una forma de comprobar el funcionamiento del sensor SEN09196, es aplicando los modelos matemáticos del capítulo 3.2, donde antes de someter el sensor a prueba, podemos aproximar el voltaje que entregará de acuerdo a la fuerza de impacto aplicado, en este caso será el peso del sujeto de prueba sobre el sensor.

De acuerdo con (12):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (12)$$

$\sigma = stress [N/m^2]$

$F = Fuerza [N]$

$A = Área [m^2]$

Pero en este caso el peso del sujeto debe ser transformado a una unidad de fuerza, para esto es necesario multiplicar el peso en kg, por la gravedad. Donde obtenemos:

$$F = (\text{peso})(\text{gravedad}) \quad (15)$$

$$F = (83\text{Kg})(9.81) = 814.2\text{N}$$

Después de este paso podemos encontrar el *stress* debido a que ya se conoce la fuerza y el área en metros del piezoeléctrico nos la brinda el fabricante, mediante a (12), obtenemos:

$$\sigma = \frac{814.2\text{N}}{364.84 \times 10^{-6} \text{m}^2} = 2\,231\,622.21 \text{ N/m}^2$$

Con ayuda de la ecuación (13), podemos encontrar el campo eléctrico porque ya conocemos el *stress* y constante piezoeléctrica g_{33} es proporcionada por el fabricante en la hoja de datos. Donde tenemos:

$$\Sigma = (330 \times 10^{-3} \text{V/N}) \left(2\,231\,622.21 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) = 736\,448.85 \text{ Vm/N} \quad (13)$$

Con todos los datos anteriores, y teniendo el espesor del piezoeléctrico dado por el fabricante, podemos aproximar el voltaje de salida de acuerdo al peso del sujeto de prueba, utilizando (14):

$$V_p = (28 \times 10^{-6}) \left(736\,448.85 \frac{\text{Vm}}{\text{N}} \right) = 20.6\text{V} \quad (14)$$

La respuesta del piezoeléctrico medida por el osciloscopio fue muy similar al valor obtenido por el modelo matemático, variando en valores de más menos 2 volts, confirmando así la precisión del modelo

4.1.3 Circuito básico

Como primera idea se propuso un circuito simple utilizando como el sensor piezoeléctrico SEN-09196, un rectificador de onda completa para aprovechar

ambos semi-ciclos de la señal alterna utilizando diodos 1N4001, un capacitor de 1000uf para posteriormente intentar alimentar cualquier batería recargable.

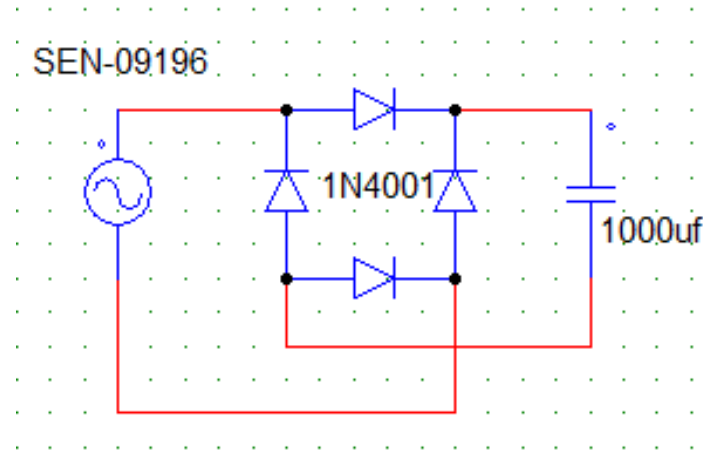


Figura 4: Circuito 1.

Los resultados de esta primera prueba mostraron que después de excitar el sensor piezoeléctrico, fue posible rectificar la señal e incluso cargar el capacitor, pero con voltajes muy pequeños en la salida, incrementando a partir de 1mV, logrando valores de 10mV en 1 minuto de caminata, estos valores no lograrían encender LED y mucho menos cargar una batería. Este problema se suscitó por las pérdidas de voltaje generadas en el rectificador puesto que cada diodo 1N4001 requiere un voltaje de caída de por lo menos 0.7 volts.

4.1.3.1 Circuito 2 sumador de voltajes

Para incrementar el voltaje que es enviado al capacitor se utilizaron 5 circuitos idénticos al circuito 1, pero enviando todas las salidas del rectificador a pequeñas resistencias de 10Ω , con la finalidad de igualar todas las salidas a la misma magnitud de voltaje, para poder dirigir las a un mismo capacitor de 1000uf, los

resultados no fueron satisfactorios por la utilización de demasiados componentes y la carga en el capacitor incrementaba en valores de 0.01 volts logrando cargar 0.020 volts con un minuto de caminata. Los resultados concluyen que a mayor número de piezoeléctricos se aumentan los niveles y disminuyen los tiempos de carga, aunque aún los voltajes generados no son suficientes para el propósito deseado.

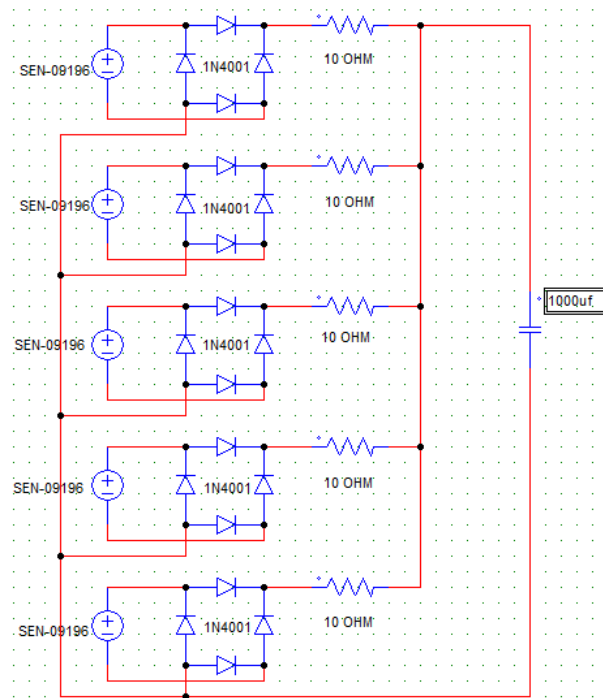


Figura 5: Circuito sumador de voltajes.

4.1.4 Selección de nuevos componentes.

La problemática en los cortos tiempos de carga en el capacitor es obviamente debida a la baja corriente que entrega el sensor piezoeléctrico SEN-09196, que ahora es necesario remplazarlo por algún sensor que cuente con una mayor constante piezoeléctrica g_{33} , puesto que cada material piezoeléctrico al presentar mayor cantidad de esta constante, será capaz de entregar mayores niveles de

corriente. La elección de este sensor es basada en la clasificación de los tipos de materiales vista en el capítulo 2.4, donde se obtiene que los materiales del tipo Navy Type V (Soft), poseen mayor constante g_{33} .

En esta ocasión fue propuesto el uso del sensor de impacto y vibración MIDE v25w de *volture technology*. Este sensor también cuenta con la característica que al ser deformado puede proveer 2 fuentes de voltaje, las cuales de acuerdo a su aplicación pueden ser configuradas en serie, para elevar el voltaje con la misma cantidad de corriente, o en paralelo, incrementando así la corriente al doble, pero con el mismo voltaje.

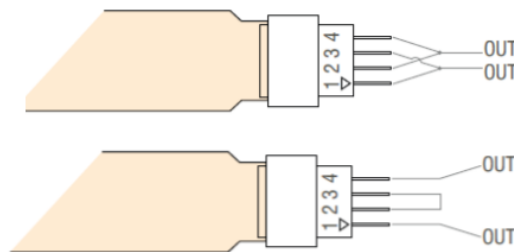


Figura: 6. Arreglo en paralelo y serie (volture, 2013).

Después de haber seleccionado el sensor piezoeléctrico adecuado se necesita resolver el problema de la caída de 0.7 volts en cada uno de los diodos 1N4001 del rectificador, para seleccionar un rectificador adecuado se optó por construir 3 circuitos idénticos al circuito de capítulo 3.1.1, pero esta vez utilizando el mismo sensor piezoeléctrico MIDE V25W en la configuración de paralelo para cada uno de los circuitos, variando los diodos del rectificador en cada circuito. Los diodos propuestos fueron: el diodo IN4148 de alta velocidad, diodo de germanio IN34a, diodo de IN5818 con una caída de voltaje de 0.550V.

4.1.5 Rectificador 1N4148

El diodo de alta velocidad 1N4148, poseen una caída de voltaje de 0.6 volts, valor menor a los del 1N4001, por lo tanto se propuso para reconstruir el circuito 3.1.1 remplazando los diodos.

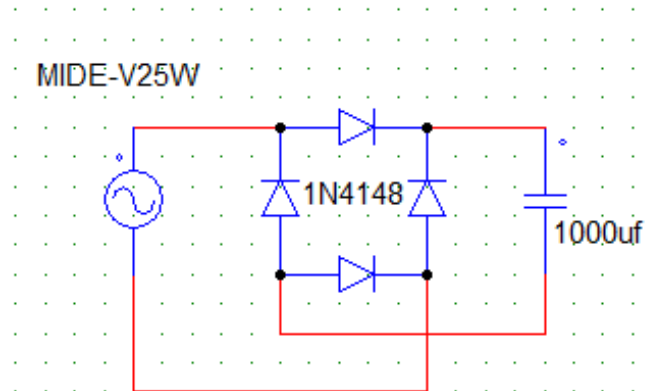


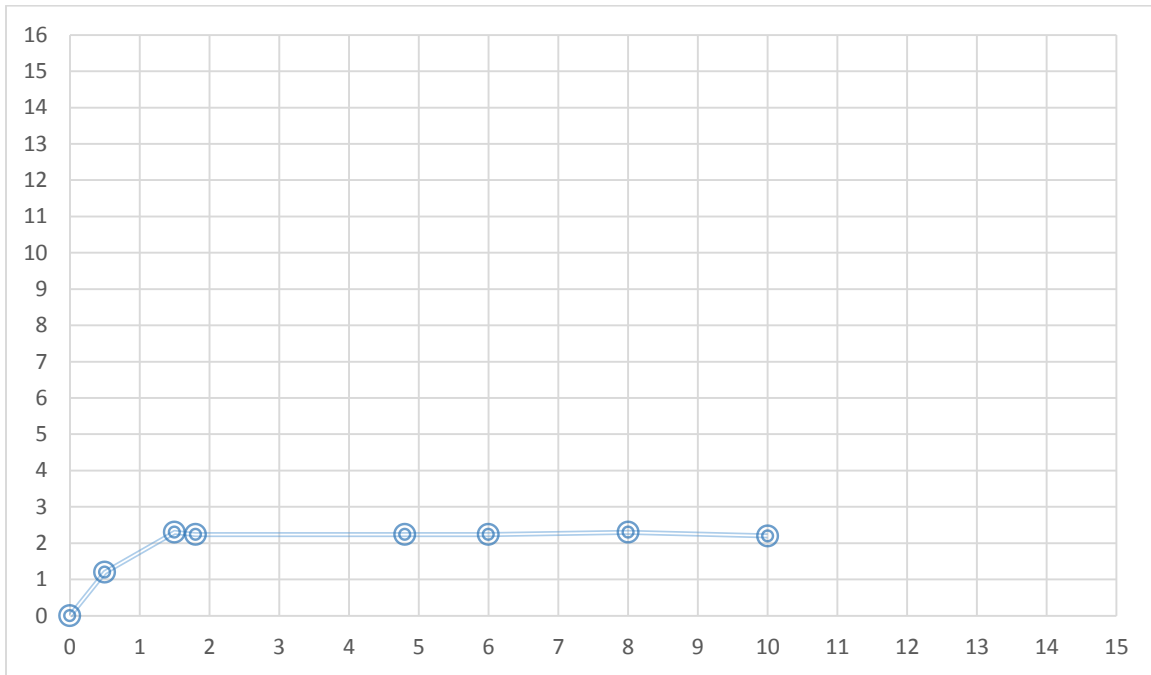
Figura 7: rectificador 1N4148

Para probar la eficiencia del nuevo rectificador, se analizó el voltaje en el capacitor durante 15 minutos de caminata a ritmo normal, para ver la carga en el capacitor en tiempo real. Donde se obtuvieron los siguientes valores.

Tabla 2: Voltaje/tiempo 1N4148.

Tiempo (min)	Voltaje en CAP.
1.5 min	2.3V
1.8 min	2.24V

4.8 min	2.24V
6 min	2.24V
8 min	2.31V
10 min	2.2V



Grafica 1: Voltaje/tiempo 1N4148.

Con la gráfica podemos observar que el capacitor a partir del primer minuto de caminata, empieza almacenando rápidamente el voltaje, pero después de llegar a un tiempo de 1.5 minutos el voltaje de carga empieza a disminuir. En este tiempo la energía en Joules almacenada en el capacitor es calculada mediante (16):

$$E = v^2 c \frac{1}{2} \quad (16)$$

Sustituyendo valores de (16):

$$E = (2.4v)^2(1000uf) \frac{1}{2} = 2.5mJ$$

4.1.6 Rectificador germanio 1N34a

Esta nueva opción evalúa el circuito 3.1.1 ahora sustituyendo los diodos del rectificador, por diodos de germanio 1N34a, los cuales presentan un voltaje de caída de 0.3 volts, valor menor al de los diodos de silicio 1N4001 y al diodo de alta velocidad 1N4148, nuevamente la prueba medirá la carga en el capacitor durante 15 minutos de caminata constante.

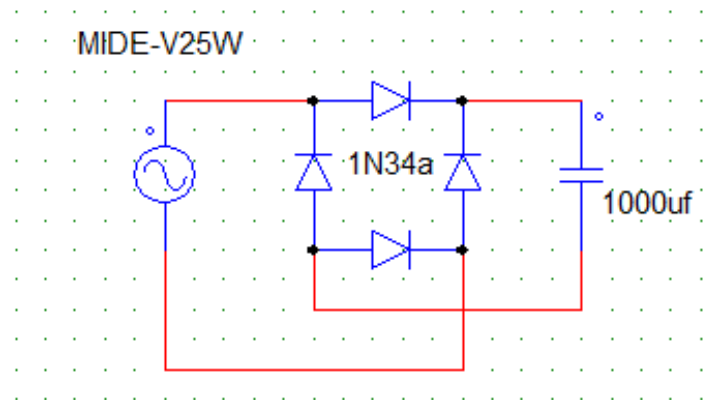


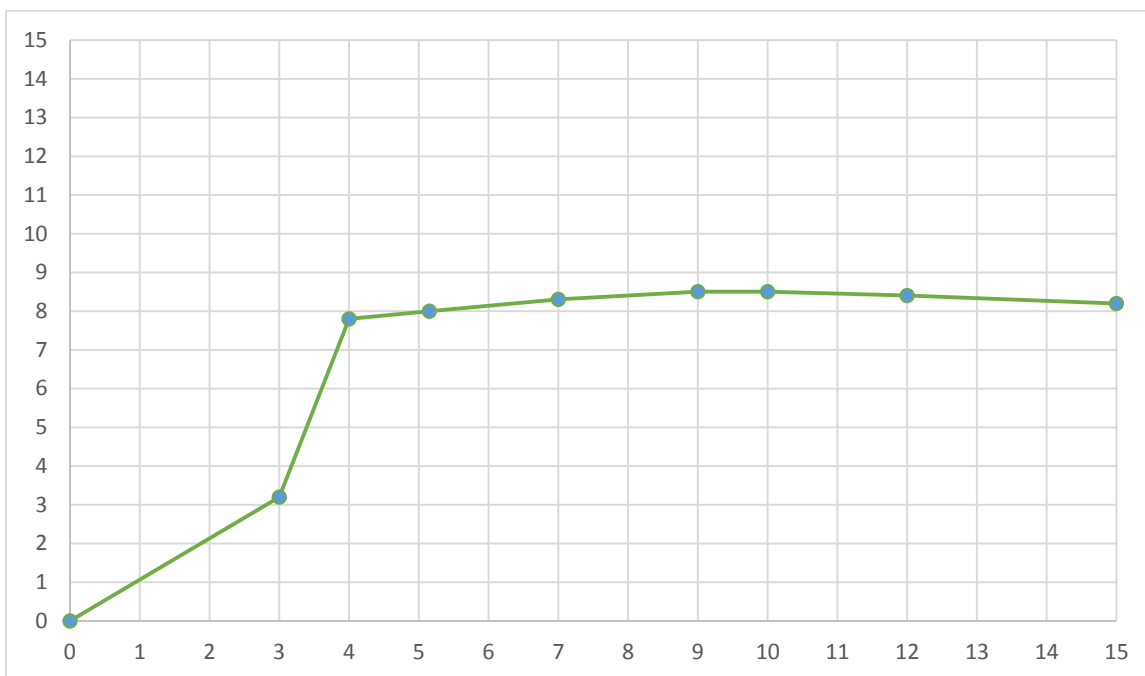
Figura 8: rectificador 1N34a.

Los valores de voltaje contra tiempo obtenidos, se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 3: Voltaje/tiempo 1N34a.

Tiempo	Voltaje
3 min	7.4V
4 min	7.8V

5.15 min	8V
7 min	8.3V
9 min	8.5V
10min	8.5V
12min	8.4V
15min	8.2V



Grafica 2: Voltaje/tiempo 1N34a.

En esta ocasión los datos muestran un mayor voltaje de carga, pero a partir del minuto 7 el capacitor presenta una mayor dificultad para acumular carga, a comparación de los primeros minutos, después del minuto 7.4 la carga se empieza a estabilizar en valores de 8.4V. En este punto la energía en Joules es calculada mediante la ecuación (15) donde se obtiene:

$$E = (8.4v)^2(1000uf) \frac{1}{2} = 35.28mJ$$

Tanto esta prueba como la anterior también muestra que después de llegar a un valor de voltaje máximo en el capacitor, el voltaje se estabiliza por un tiempo, hasta que empieza a disminuir lentamente.

4.1.7 Rectificador 1N5818

Para la siguiente prueba se repetirá el uso del circuito 3.1.1, sustituyendo los diodos del rectificador por diodos 1N5818, los cuales presentan una caída de voltaje de 0.5Volts.

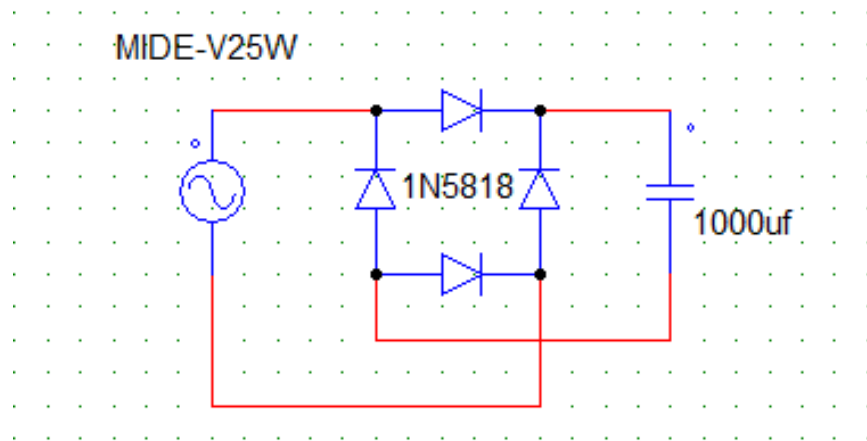


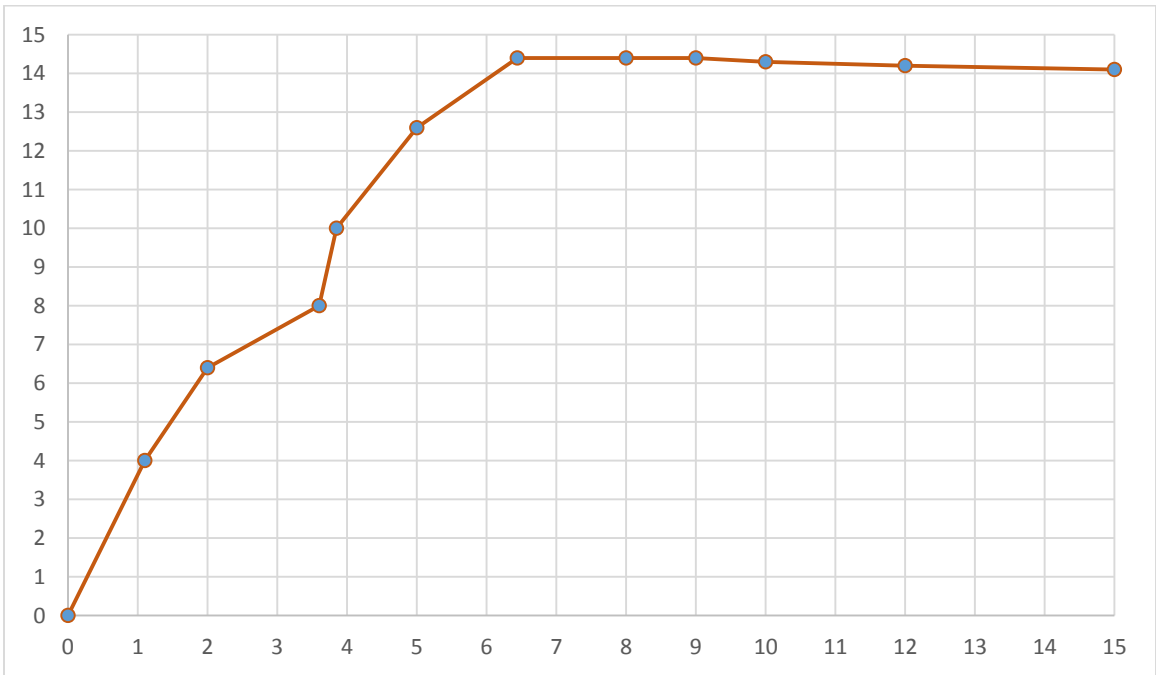
Figura 9: rectificador 1N5818.

La prueba medirá durante 15 minutos de caminata la carga del capacitor. Los datos muestreados se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 4: Voltaje/tiempo 1N5818.

Tiempo	Voltaje
1.10 min	4V

2 min	6.4V
3.6 min	8V
3.85 min	10V
5 min	12.6V
6.44 min	14.4V
8 min	14.4V
9 min	14.4V
10 min	14.3V
12 min	14.2V
15 min	14.1V



Grafica 3: Voltaje/tiempo 1N5818.

Gracias a esta prueba se puede elegir un puente rectificador para nuestro circuito, puesto que presenta un mayor voltaje de carga, que en todos los casos anteriores e incluso en menor tiempo para cargar el capacitor. La tabla (3), muestra que después de 2 minutos de caminata ya se contaban con más de 6 volts, casi el triple que el máximo valor obtenido con el rectificador 1N4001 en 4.8min. Esta prueba también muestra superioridad llegando a los 8V con tan solo caminar 3.6 minutos, comparándola con el rectificador de germanio 1N34A, el cual alcanzaba los 8V con tan solo caminar durante 5 min. La energía en el capacitor se calcula con (16):

$$E = (14.4v)^2(1000uf) \frac{1}{2} = 103.68mJ$$

4.1.8 Resultados de las pruebas

Se puede concluir de las pruebas anteriores que el capacitor de 1000uf a 16v en ningún momento llega a su voltaje máximo de carga. Al analizar nuevamente nuestro circuito podemos concluir que cada vez que damos un paso, el sensor piezoeléctrico produce una cantidad de voltaje, la cual no siempre es la misma, por lo tanto en la salida del rectificador de onda completa los voltajes emitidos no siempre son de la misma magnitud, estos voltajes son mayores a la carga inicial en el capacitor que es de 0 volts, pero después de un tiempo el voltaje en el capacitor es mayor a los voltajes de los pulsos emitidos por el rectificador entonces las diferencias de potencial en paralelo con el capacitor afectan la carga optima del capacitor e impiden que llegue a su valor máximo. De esta forma con el presente problema el siguiente paso será la selección del dispositivo de almacenamiento y su configuración para la óptima conexión con la salida del rectificador.

4.1.9 Rectificador 1N5818 Duplicador de voltaje

Para la elaboración de este proyecto solo se cuenta con dos sensores piezoeléctricos MIDE- V25W, por lo cual utilizando las ventajas previamente analizadas del rectificador 1N5818, se preparó cada sensor en su configuración interna en paralelo, y a su vez los dos sensores fueron colocados en serie, para así aumentar al doble el voltaje de entrada como se muestra en la figura 10, con la premisa de que potencia de entrada es igual a voltaje por corriente:

$$P = Vi \quad (17)$$

Por lo tanto si se tiene dos veces el voltaje:

$$2V * i = 2P$$

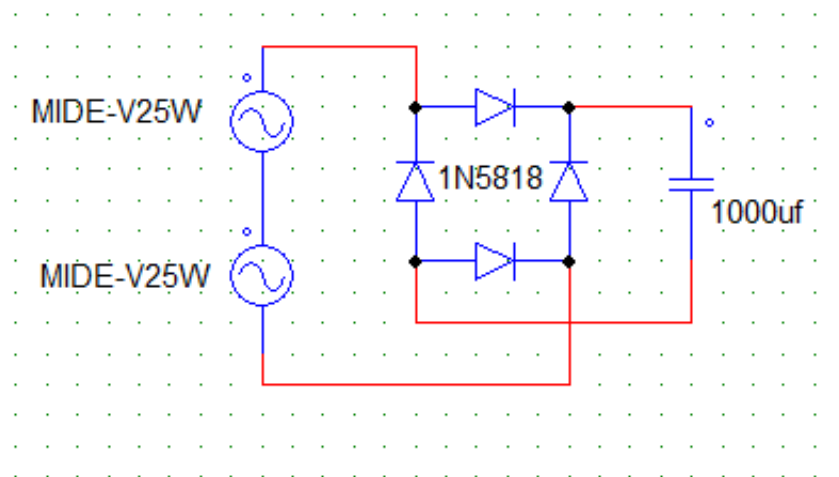
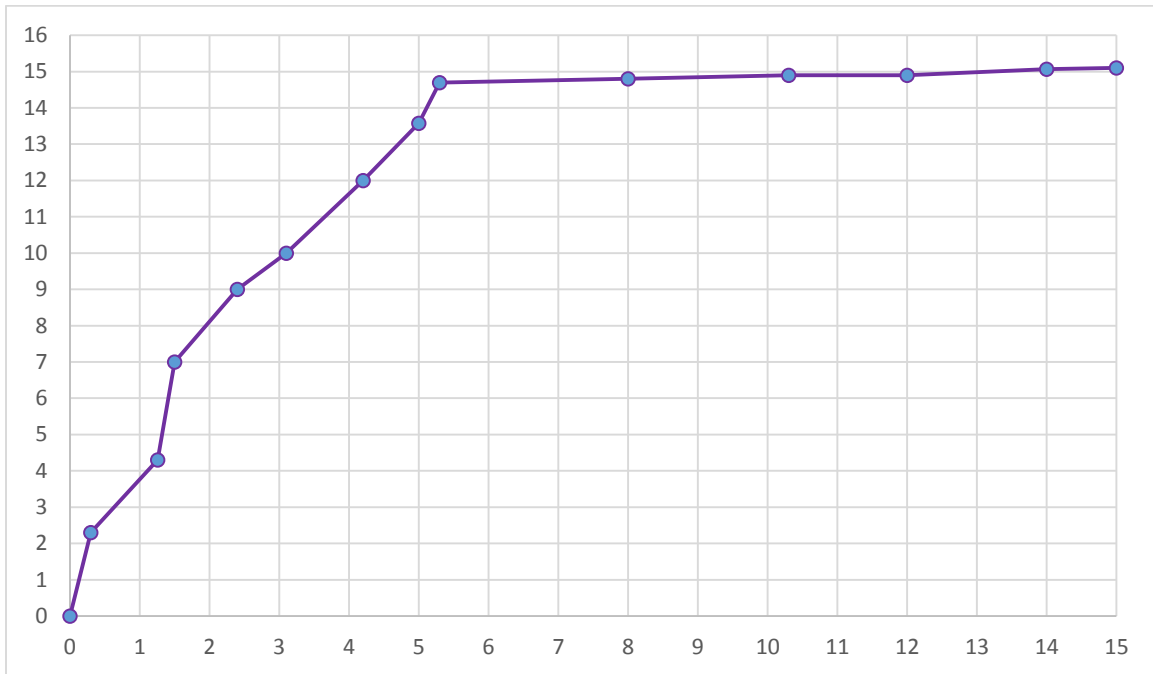


Figura 10: circuito duplicador de voltaje.

Realizando la prueba de caminata durante 15 min para poder comparar los resultados con los obtenidos por el rectificador 1N5818, se obtuvieron los siguientes valores de voltaje en el capacitor:

Tabla: 5 Voltaje/tiempo duplicador de voltaje.

Tiempo	Voltaje
30s	2.3V
1.26 min	4.3V
1.50 min	7V
2.4 min	9V
3.10 min	10V
4.2 min	12V
5 min	13.58V
5.30 min	14.7V
6.50 min	14.8V
8 min	14.8V
10.3 min	14.9V
12 min	14.9V
14 min	15.07V
15 min	15.1V



Grafica 4: Voltaje/tiempo 1N5818 duplicador de voltaje.

Comparando los resultados duplicando la potencia de entrada se puede ver que en solo 30 segundos se alcanzan los 2.3V tiempo record comparado con los demás rectificadores, también es el único circuito que durante 15 minutos de prueba mantiene un incremento en la carga del capacitor, en el minuto 5.30 se cuentan con 14.7V a partir de ese punto, se observa que el capacitor empieza a cargarse lentamente hasta el fin de la prueba.

$$E = (15.07v)^2(1000uf) \frac{1}{2} = 113.55mJ$$

4.1.10 Incremento de la capacitancia

Gracias a los circuitos anteriores se llega a la conclusión que los capacitores nunca llegan a su voltaje maximo de carga puesto que estan conectados en paralelo con la salida del los puentes rectificadores, lo cual despues de un tiempo el voltaje en el

capacitor es mayor a la salida de los puentes, esto compromete a nuestro capacitor a estar en paralelo con una fuente de voltaje de distinto valor. Por lo tanto se requiere un capacitor mas grande para en ese caso tardar mas tiempo con valores menores a los de la salida del puente rectificador.

4.1.10.1 Rectificador 1N5818-50000uf

Nuevamente la prueba consistio en caminar durante un tiempo establecido para analizar el comportamiento de carga pero esta vez de un capacitor de mayor en este caso 50000uf. Donde se obtuvieron los siguientes datos.

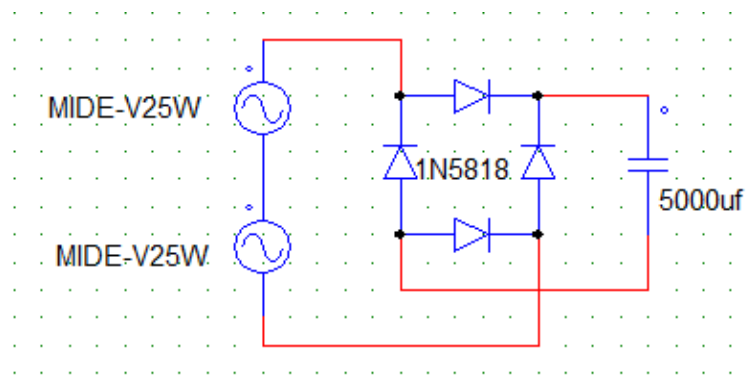
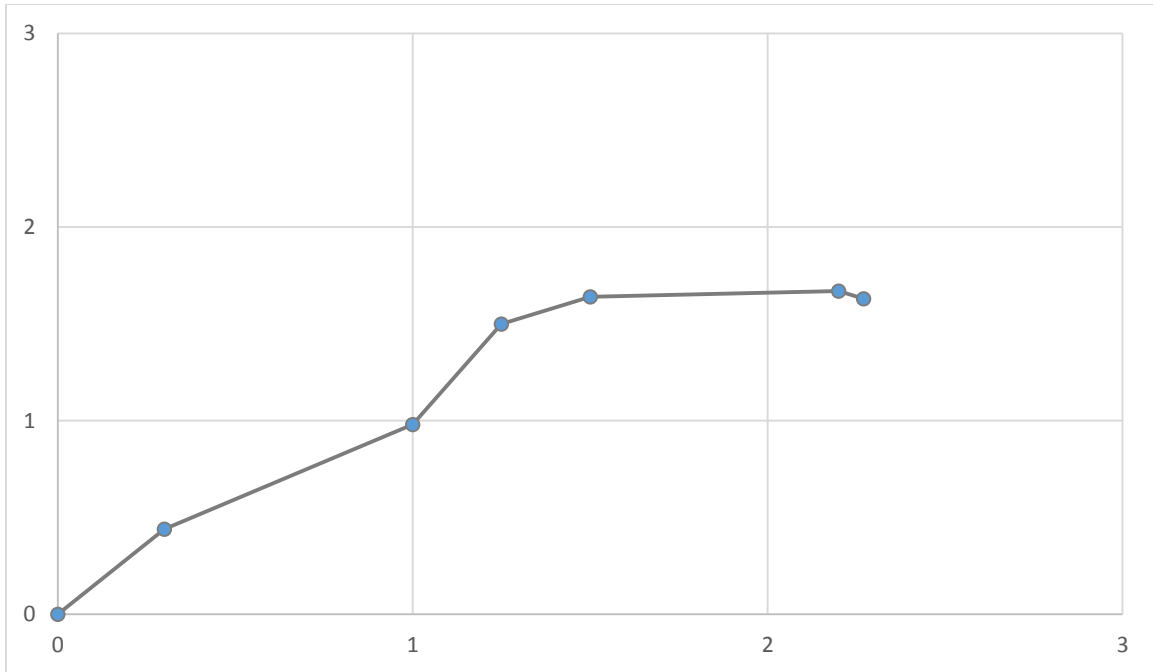


Figura 11: capacitor 5000uf.

Tabla 6: Voltaje/tiempo en capacitor 5000uf.

Tiempo	Voltaje
30s	0.44V
1 min	0.98V
1.25 min	1.5V
1.5 min	1.64V
2.20 min	1.67V

2.27 min	1.63V
----------	-------



Grafica 5: Voltaje/tiempo 1N5818-5000uf.

A pesar de que el voltaje almacenado es menor, en una capacitancia mas grande, resulta en una mayor cantidad de energía, se puede observar nuevamente el mismo comportamiento de descarga en el capacitor despues de un corto tiempo de caminata, en este circuito resulta mala idea aumentar el tamaño del capacitor.

4.2 Etapa 2

4.2.1 Regulador de voltaje LTC3588-1

El LTC3588-1 (*Linear technology*), es utilizado como regulador para fuentes de baja corriente, que almacena el voltaje en un capacitor externo para posteriormente ser

regulado por un *buck* síncrono utilizando tecnología *CMOS*. La configuración utilizada se muestra en la figura (12).

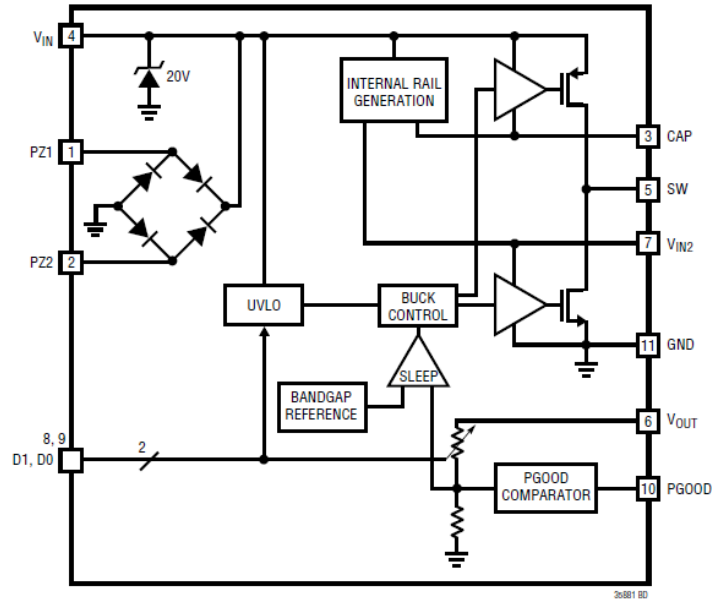


Figura 12: integrado LTC3588-1 (Linear technology, 2013).

El puente rectificador, tiene como función transformar la corriente del piezoeléctrico de AC a DC, que manda el voltaje a un capacitor en el pin V_{in} , la caída total del puente es de 400mV.

El *under voltage lockout* (ULVO), cuando el voltaje del capacitor de V_{in} es mayor a este punto, el buck se activa y envía la carga al capacitor de salida, si el voltaje es menor a este rango el buck se apaga, esto permite que cargas desde 450nA sean acumuladas, para fuentes de muy baja potencia.

4.2.2 Rectificador LTC3588

Utilizando tecnología de micro soldadura, el LTC3588 fue soldado con la colaboración del departamento de microelectrónica del (INAOE) Instituto Nacional

de Astrofísica Óptica y Electrónica en Tonanzintla, Puebla, montándolo sobre una base de 16 pines para facilitar su manipulación, cada cable de soldadura mide 40 micras la mitad del diámetro de un cabello humano que llega a medir 80 micras, y soporta corrientes de 100 mili amperios, por lo que se decidió utilizar tres cables por cada terminal del integrado a excepción de la tierra que utiliza 6 cables.

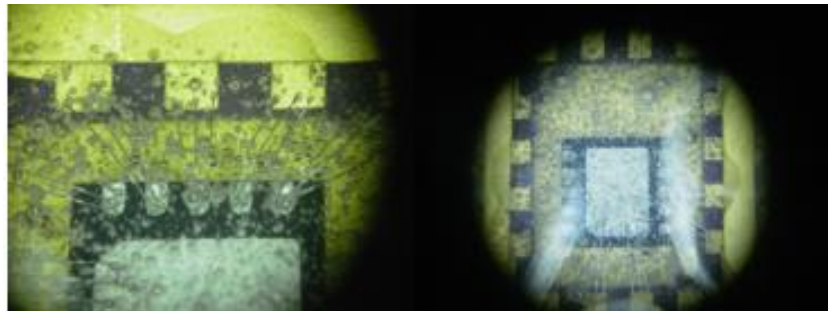


Figura 13: vista microscópica.

El circuito fue utilizado con la configuración:

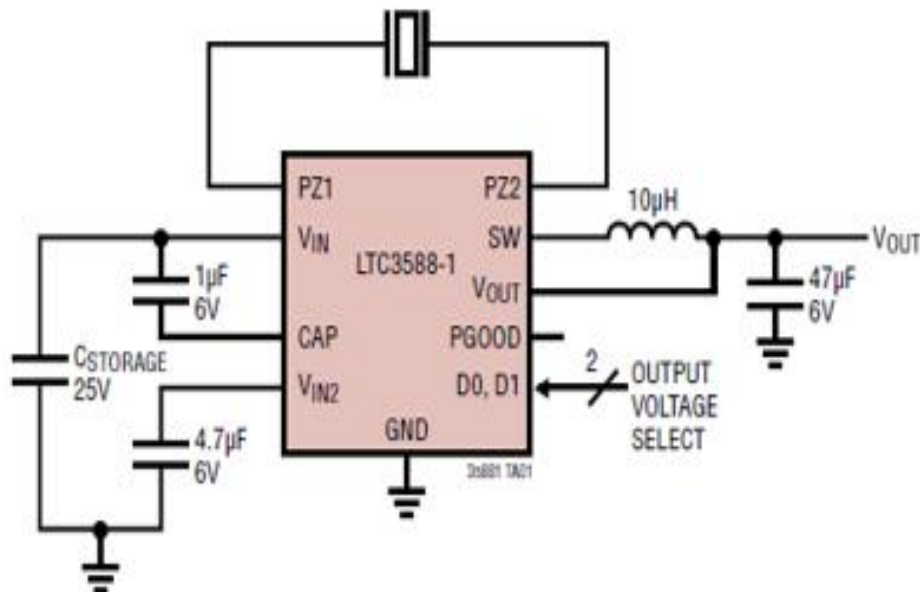


Figura 13.1: circuito regulador (Vulture, 1013).

4.2.3 Funcionamiento básico LTC3588

Puente rectificador: convierte de AC a DC, manda el voltaje de entrada a un capacitor en V_{in} que sirve como reserva para el *buck*.

Under voltage lockout UVLO: Cuando V_{in} es mayor que el *UVLO* el *buck converter* se activa y envía la carga desde el capacitor de entrada hasta el capacitor de salida. Cuando el V_{in} es menor al *UVLO* el *buck* se apaga, esto permite que corrientes de hasta 450mA se almacenen en el capacitor de entrada, esto último para fuentes de baja potencia.

Internal Rail: activa los lados altos y bajos del *buck converter* y se conectan al capacitor de reserva para conmutar el *buck converter*.

Operación del *buck converter*: cargar capacitor de salida usando sus lados altos y bajos

4.2.4 Rectificador LTC3588-5000uf

El circuito fue sometido a la prueba de caminata con el capacitor de 5000uf, para tratar de conseguir por esta vez cargar el capacitor hasta los 3.6V que naturalmente regula el LTC3588, para así después mandar el voltaje a una pila recargable.

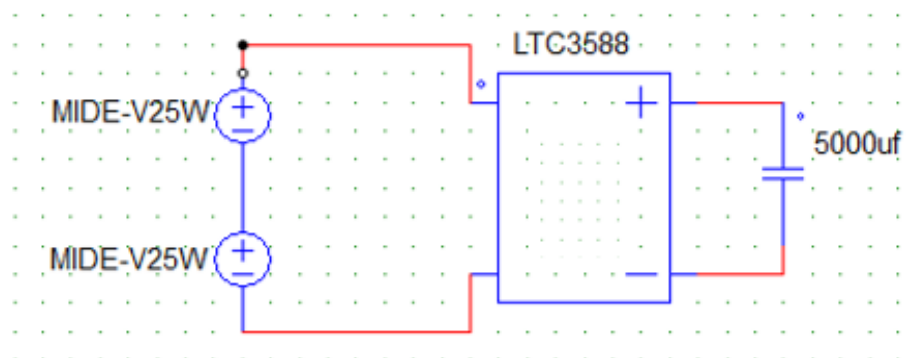
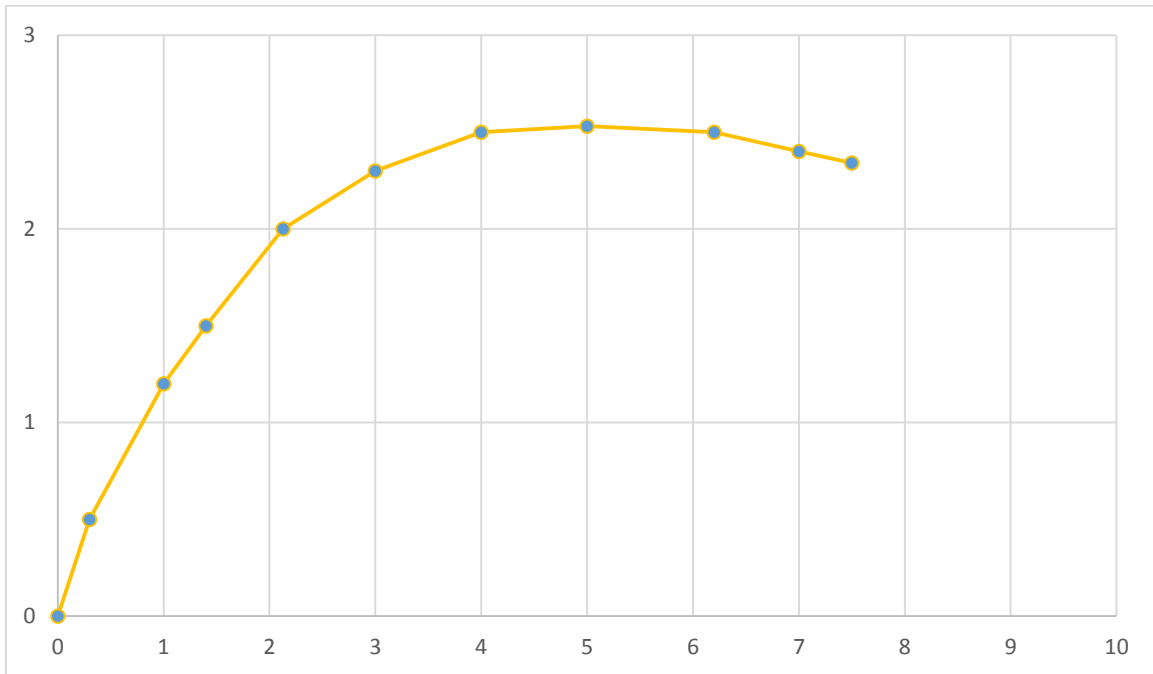


Figura 14: Rectificador LTC3588-5000uf.

Donde se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 7: Voltaje/tiempo en capacitor 5000uf.

Tiempo	Voltaje
30s	0.5V
1 min	1.2V
1.4 min	1.5V
2.13 min	2V
3 min	2.3V
4 min	2.5V
5 min	2.53V
6.2 min	2.5V
7 min	2.4V
7.5 min	2.34V



Grafica 6: Voltaje/tiempo LTC3588-5000uf.

Ahora esta prueba muestra que el rectificador logra una mayor carga en el capacitor antes de que empiece a descargarse aunque en un mayor tiempo, nuevamente se observa que el voltaje en el capacitor disminuye después de los 5 minutos de caminata.

2.2.5 Rectificador LTC3588-5000uf con diodo

El problema del capacitor consiste en que después de un tiempo de carga empieza a regresar la corriente almacenada al rectificador, por esta razón se propone un diodo entre la salida del rectificador y el capacitor de carga, este circuito fue sometido a la prueba de caminata.

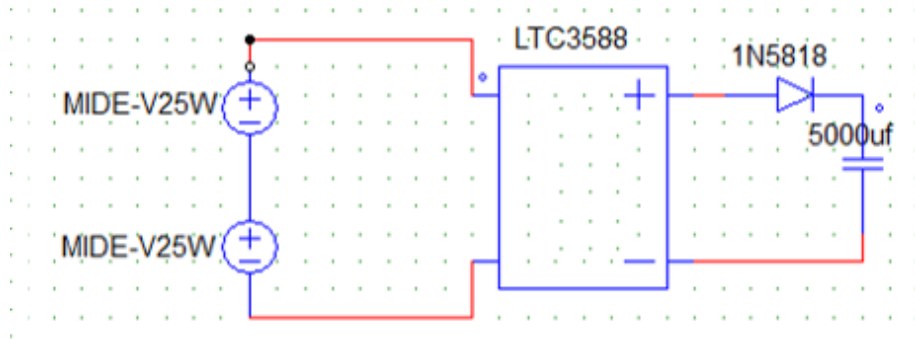
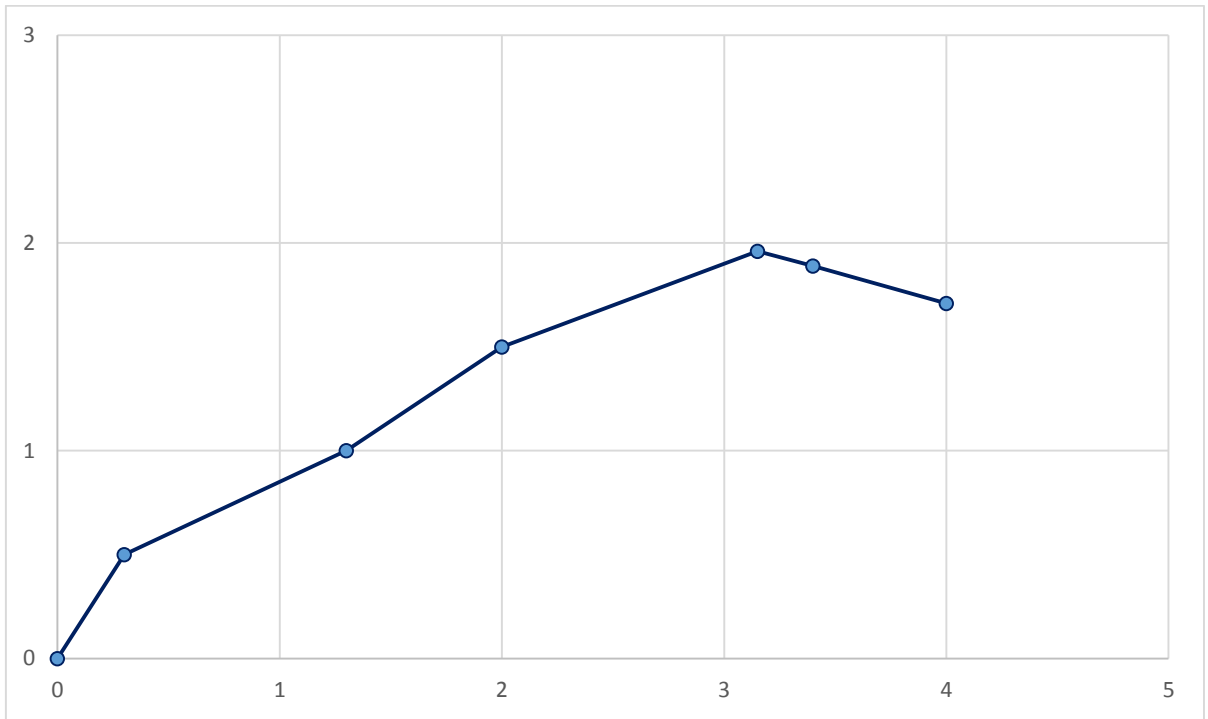


Figura 15: Rectificador LTC3588-5000uf, con diodo.

Tabla 8: Voltaje/tiempo en capacitor 5000uf.

Tiempo	Voltaje
30s	0.5V
1.3 min	1V
2	1.5V
3.15 min	1.96V
3.4 min	1.89V
4 min	1.71V



Grafica 7: Voltaje/tiempo LTC3588-5000uf, con diodo.

El problema se repite en esta prueba incluso los valores de voltaje en el capacitor son menores a los presentados por la prueba anterior, el diodo y el incremento del capacitor no son una idea factible para la solución del problema.