

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

SISTEMA DE CONTROL PARA UN CONVERTIDOR BUCK.

Danilo Orozco Patiño

Programa Académico

Ingeniería Electrónica

Director del trabajo de grado

Julián Peláez Restrepo

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

13/02/2017

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

RESUMEN

Se diseñó un sistema de control para un convertidor Buck con el cual se pretende realizar investigaciones en aplicaciones con energía renovable. Dicho control, está compuesto por una tarjeta Arduino Mega2560 y un controlador programado en Simulink, el cual sirve como interfaz para realizar modificaciones y se utilizó comunicación serial para realizar la conexión de estos dos elementos, igualmente en MatLab se programó el código del modelo matemático del convertidor Buck y además se realizaron pruebas a lazo abierto con las cuales se verificó el funcionamiento del sistema y se logró obtener los resultados que permitieron diseñar la parte final del proyecto. Se evidenció entonces que la tarjeta Arduino Mega2560 es lenta con respecto a el convertidor Buck, por tal motivo se diseñó un control PI con un tiempo de estabilización aproximado de 2 segundos, así se determinó que Arduino Mega no tiene las características para cumplir con el diseño de un control de convertidor Buck que sea óptimo.

Palabras clave: Convertidor Buck, PWM, Simulink, Arduino, Controlador, MatLab, Comunicación Serial.

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

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin la colaboración y ayuda del asesor asignado Julián Peláez Restrepo, de igual forma expresar mi agradecimiento al profesor Daniel González Montoya por su valioso aporte durante esta experiencia y también a todas las personas que hacen parte del laboratorio de Electrónica, Telecomunicaciones e Informática, por último, a mi mamá ya que sin su apoyo constante y desinteresado yo no sería nada.

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

ACRÓNIMOS

PWM Modulación por ancho de pulsos.

COM Puerto serial del computador.

TCCRnB Temporizador de la placa Arduino.

TUNE Técnica para diseñar un controlador en MatLab.

MATLAB Herramienta de software matemático.

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

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	6
1.1	OBJETIVO GENERAL	7
1.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	8
2.	MARCO TEÓRICO	9
3.	METODOLOGÍA.....	14
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	21
	REFERENCIAS	22
	APÉNDICE.....	23

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

1. INTRODUCCIÓN

A través de este trabajo se presenta el diseño de un control para un convertidor Buck con la idea de realizar un montaje sencillo y económico con el cual se pueda realizar pruebas, este convertidor es utilizado en proyectos de energía renovable con lo cual se pueden llevar a cabo muchas aplicaciones y resolver o minimizar problemas que se presentan en la industria. En este caso con la ayuda del software MatLab y Simulink y la placa Arduino se realizara todo el montaje para controlar el convertidor tipo Buck.

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

1.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar un sistema de control para un convertidor reductor de electrónica de potencia DC/DC del tipo Buck. Dicho control, estará compuesto por un dispositivo de adquisición de señales digitales tipo Arduino y un controlador programado digitalmente, se debe tener en cuenta las características y parámetros del convertidor para optimizar al máximo el funcionamiento de todo el montaje.

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

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar las características del convertidor para determinar los elementos del montaje mediante las especificaciones de estos.
- Describir el procedimiento con el cual se desarrollaron las diferentes actividades para llevar a cabo el producto de laboratorio.
- Realizar pruebas al montaje final para verificar su correcto funcionamiento e identificar procesos de optimización para posibles trabajos con este montaje en un futuro.
- Utilizar el software MatLab y la placa Arduino para diseñar el controlador del convertidor.

2. MARCO TEÓRICO

SISTEMA DE CONTROL

Un sistema de control es un conjunto de dispositivos encargados de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema, con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener los resultados deseados. Existen dos clases comunes de sistemas de control, sistemas de lazo abierto y sistemas de lazo cerrado.

Sistema de control de lazo abierto: La variable de salida que es la variable controlada no tiene efecto sobre la acción de control (variable de control). En este caso no se compara la salida del sistema con el valor deseado de la salida del sistema (referencia) y para cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fijada, además la exactitud de la salida del sistema depende de la calibración del controlador.

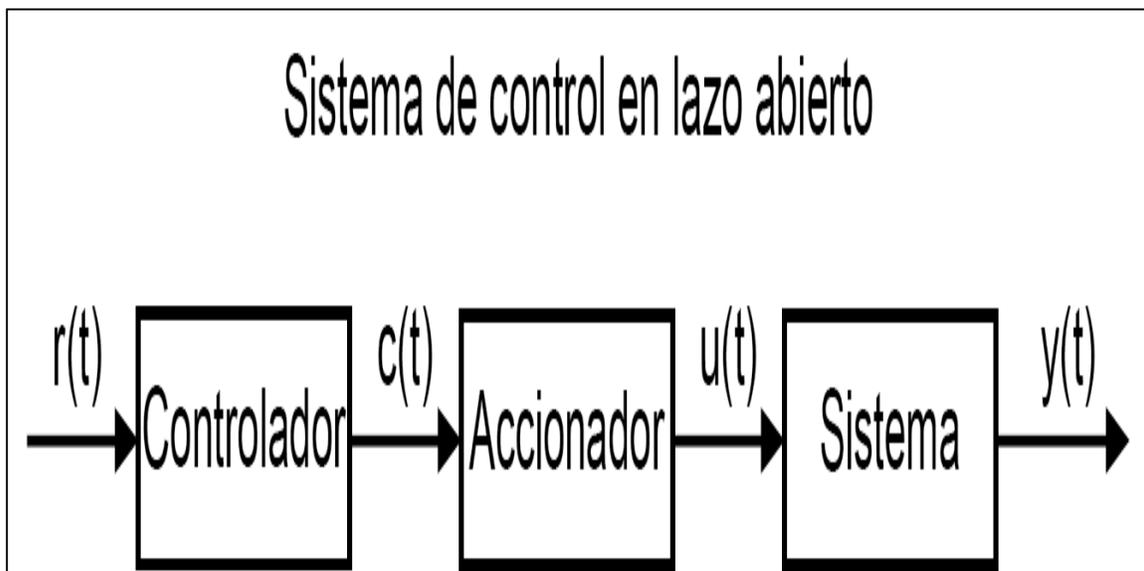


Imagen 1: Sistema de control en lazo abierto

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

Sistema de control de lazo cerrado: Aquellos en los que la señal de salida del sistema (variable controlada) tiene efecto directo sobre la acción de control (variable de control). Este tipo de sistema de control soluciona el problema de los sistemas en lazo abierto, que dependen de las condiciones ambientales.

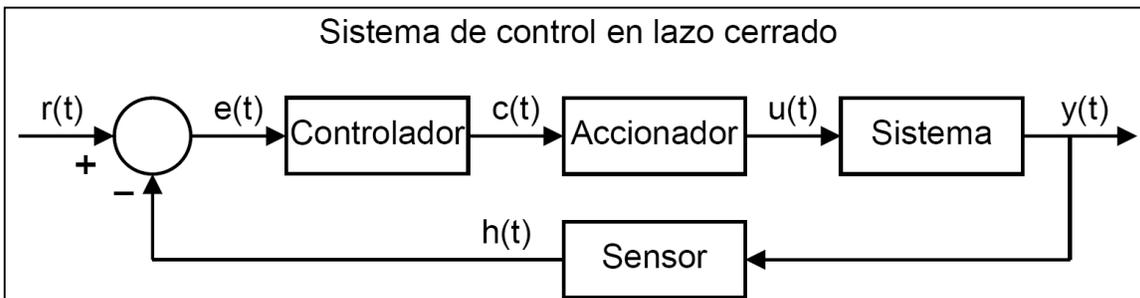


Imagen 2: Sistema de control en lazo cerrado

Los elementos del sistema de control en lazo cerrado son los mismos que los del sistema en lazo abierto con dos añadidos: **El sensor** mide el estado o variable a controlar en el sistema (posición, temperatura, humedad, etc.) Esto permite conocer el estado del sistema y corregir las desviaciones para que se pueda conseguir la respuesta deseada. **El comparador**, este elemento está representado por un círculo en el esquema. Su función es comparar la señal de referencia $r(t)$ y la señal de realimentación $h(t)$ y calcular el error $e(t)$ que existe entre la respuesta deseada y el estado real del sistema. A partir de ese error se puede conseguir llevar al sistema al estado deseado.

SIMULINK

Es una herramienta para modelado, simulación y análisis de sistemas dinámicos, soporta tanto sistemas lineales como no lineales. También es un entorno de diagrama de bloques para la simulación multidominio y diseño basado en modelos. Se integra con MATLAB, lo que le permite incorporar algoritmos de MATLAB en los modelos de simulación y los resultados de exportación a MATLAB para su posterior análisis.

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

ENTORNO DE TRABAJO SIMULINK.

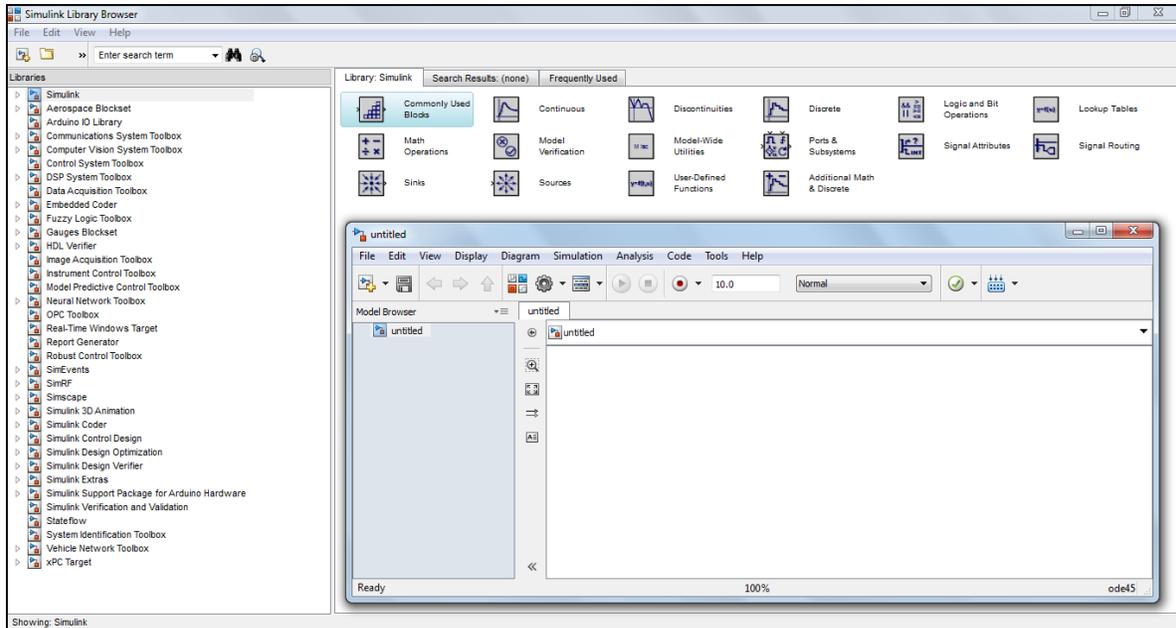


Imagen 3: Entorno de Simulink

ARDUINO.

Es una plataforma de desarrollo de computación física de código abierto, basada en una placa con un sencillo microcontrolador y un entorno de desarrollo para crear software (programas) para la placa. Arduino puede ser alimentado a través de la conexión USB o con una fuente de alimentación externa y en cuanto a la programación Arduino está basado en C y soporta todas las funciones del estándar C y algunas de C++.

HARDWARE Y CABLE USB.



Imagen 4: Placa Arduino Mega 2560



Imagen 5: Cable USB (Arduino)

Tabla 1: Especificaciones técnicas Arduino Mega 2560

Microcontrolador	ATMEGA 2560
Voltaje del sistema	5v
Voltaje de entrada	7-12v
Frecuencia de reloj	16MHz
Entradas/Salidas Digitales	54
Entradas analógicas	16
PWM	14
UART	4
Memoria flash	256Kb
Cargador	STK500v2
Interfaz de programación	USB vía ATmega8U2

CONVERTIDOR BUCK (REDUCTOR).

El convertidor Buck (o reductor) es un convertidor de potencia, DC/DC sin aislamiento galvánico, que obtiene a su salida un voltaje continuo menor que a su entrada. Es una fuente conmutada con dos dispositivos semiconductores (transistor S y diodo D), un inductor L y un condensador C a la salida opcionalmente.

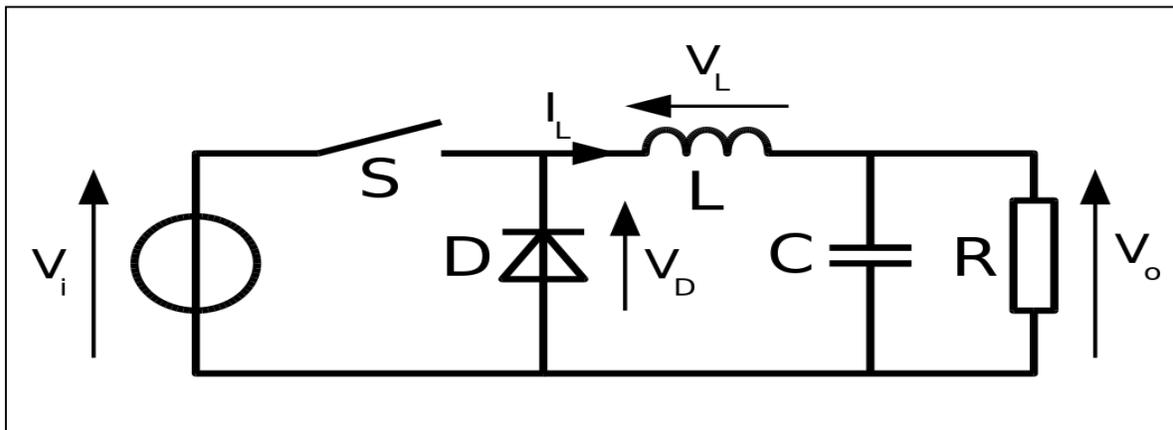


Imagen 6: Circuito convertidor Buck

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

El funcionamiento es sencillo, consta de un inductor controlado por dos dispositivos semiconductores los cuales alternan la conexión del inductor bien a la fuente de alimentación o bien a la carga. Un convertidor Buck puede tener una alta eficiencia (superior al 95% con circuitos integrados) y autorregulación.

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

3. METODOLOGÍA

Primero se determinó que referencia de Arduino era la más asequible y tenía las características necesarias para desarrollar el trabajo, es decir, necesitábamos una salida PWM con una frecuencia de mínimo 50 KHz y que el ciclo de trabajo (Duty) se pudiera controlar desde Simulink. En este caso, trabajamos con Arduino Mega 2560 cuyas especificaciones técnicas están en este documento.

Luego pasamos a consultar la manera de programar la placa de Arduino Mega 2560, cuya interfaz de programación se presenta a continuación:

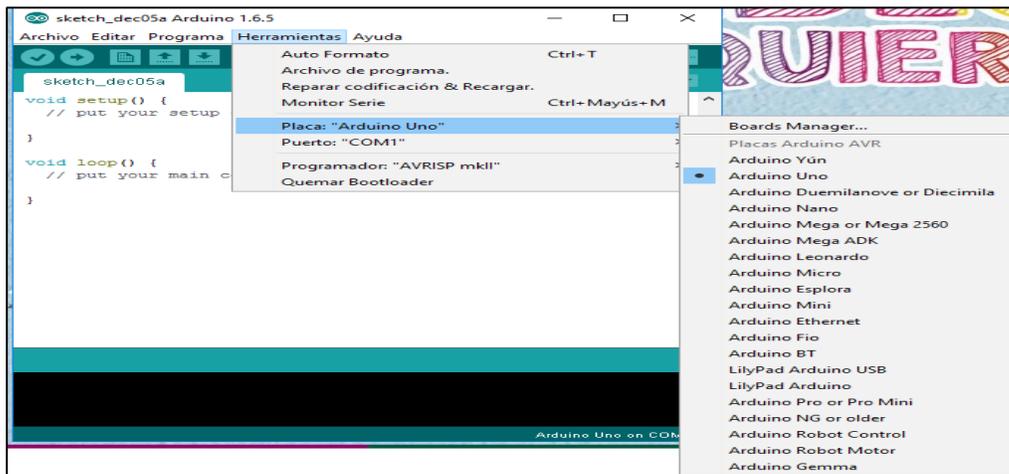


Imagen 7: Entorno software Arduino

En la imagen anterior podemos observar el entorno del software para la programación de Arduino, en donde desde la pestaña **Herramientas** y la opción **Placa**, podemos elegir la versión con la que vamos a trabajar.

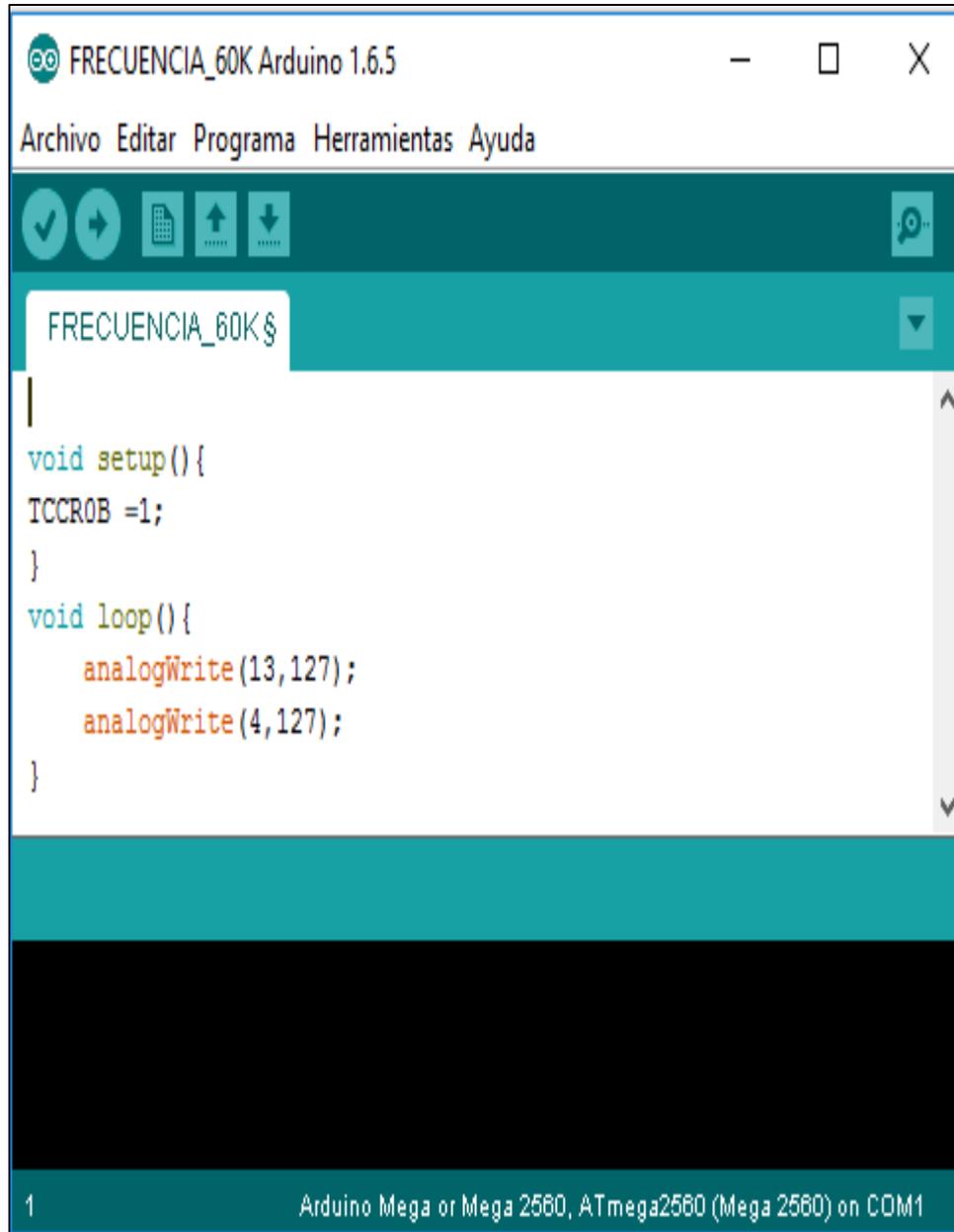
Inicialmente las salidas PWM vienen con una frecuencia predeterminada que está controlada por el registro TCCRnB, el cual es un temporizador y n es el número del temporizador que escojamos. En cuanto a Arduino Mega 2560, así se relacionan las salidas PWM con los temporizadores.

- Temporizador 0: TCCR0B (PWM4, PWM13).
- Temporizador 1: TCCR1B (PWM11, PWM12).

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

- Temporizador 2: TCCR2B (PWM9, PWM10).
- Temporizador 3: TCCR3B (PWM2, PWM3, PWM5).
- Temporizador 4: TCCR4B (PWM6, PWM7, PWM8).

Se escogió el Temporizador 0 para controlar el pin 13, el registro TCCR0B se iguala a uno para obtener una frecuencia de 62.5KHz.



```

FRECUENCIA_60K Arduino 1.6.5
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
FRECUENCIA_60K$
|
void setup() {
  TCCR0B = 1;
}
void loop() {
  analogWrite(13, 127);
  analogWrite(4, 127);
}
1 Arduino Mega or Mega 2560, ATmega2560 (Mega 2560) on COM1
  
```

Imagen 8: Código para cambiar la frecuencia a 62.5Khz

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

Hicimos programación en Simulink para establecer comunicación con Arduino, en este caso utilizamos el protocolo de comunicación serial, por medio de los bloques o librerías **Serial Send**, **Serial Receive** y **Serial Configuration**. **Send** sirve para enviar el dato a la tarjeta Arduino y **Receive** sirve para recibir el dato que se envía desde Arduino. Realizamos la configuración del bloque dando doble clic sobre este para escoger los diferentes parámetros, para este trabajo solo se escoge el puerto por el cual se vaya a enviar y recibir información.

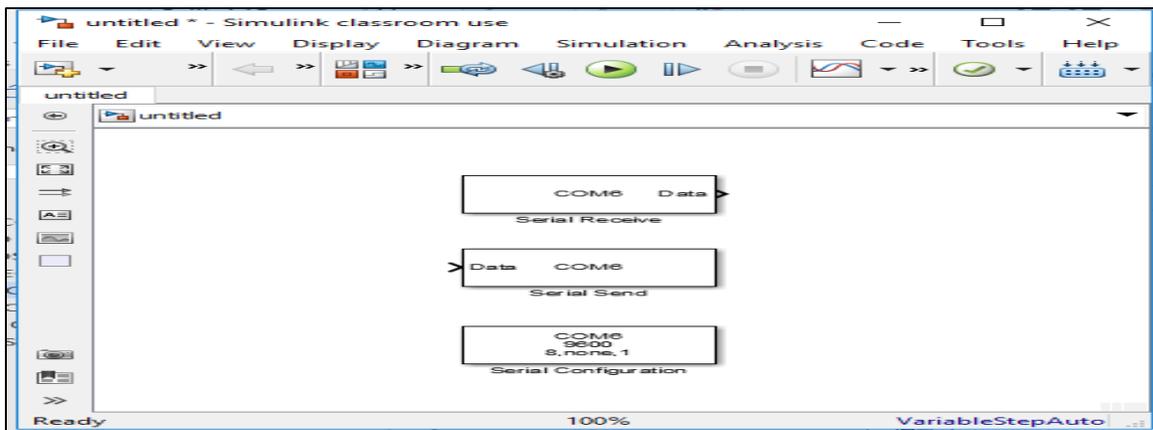


Imagen 9: Bloques para configurar comunicación serial

También realizamos pruebas a lazo abierto del sistema, evidenciamos que el montaje funcionaba muy bien debido a que desde Simulink se envía el dato (porcentaje de duty) al Arduino este lo procesa y envía la señal al circuito convertidor y el voltaje a la salida se estabiliza sin retardos ni inconvenientes de ningún tipo.

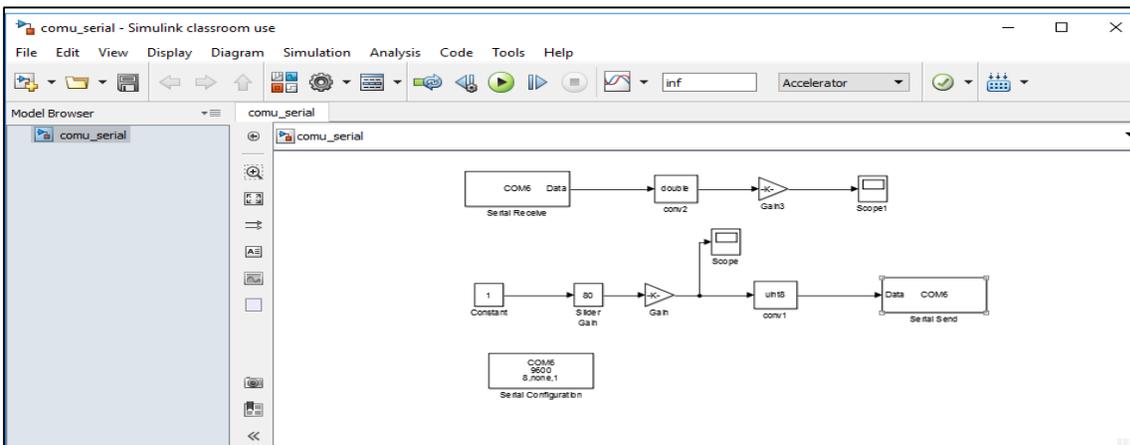


Imagen 10: Programa para pruebas a lazo abierto

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

Para encontrar el modelo matemático del circuito nos basamos en el siguiente circuito, mediante este encontramos las ecuaciones del modelado y posteriormente en MatLab obtuvimos la función de transferencia con ayuda de esta información, el desarrollo matemático y el código de MatLab se encuentran en los Apéndice A y B respectivamente.

Convertidor BUCK

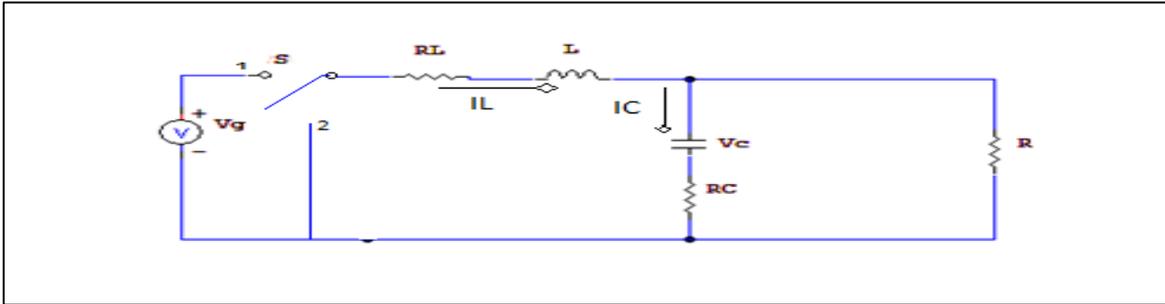


Imagen 11: Circuito Buck para el modelado matemático

A continuación, diseñamos el controlador PID del circuito, inicialmente por medio de la opción **TUNE** en Simulink, tuvimos en cuenta que la curva de respuesta o reacción debía ser rápida para tener un control óptimo del montaje.

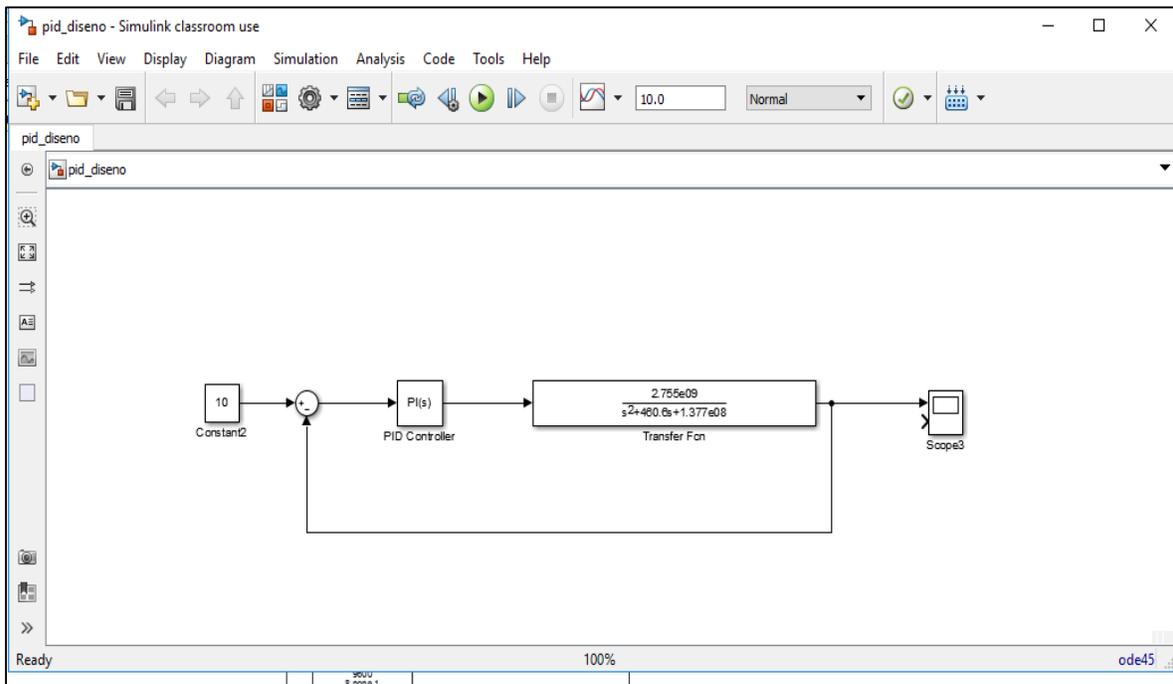


Imagen 12: Programa diseño del control.

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

Por ultimo para verificar el funcionamiento del montaje completo, realizamos pruebas a lazo cerrado, donde identificamos que la placa Arduino no tiene la capacidad para procesar los datos con la velocidad que se requiere en este caso.

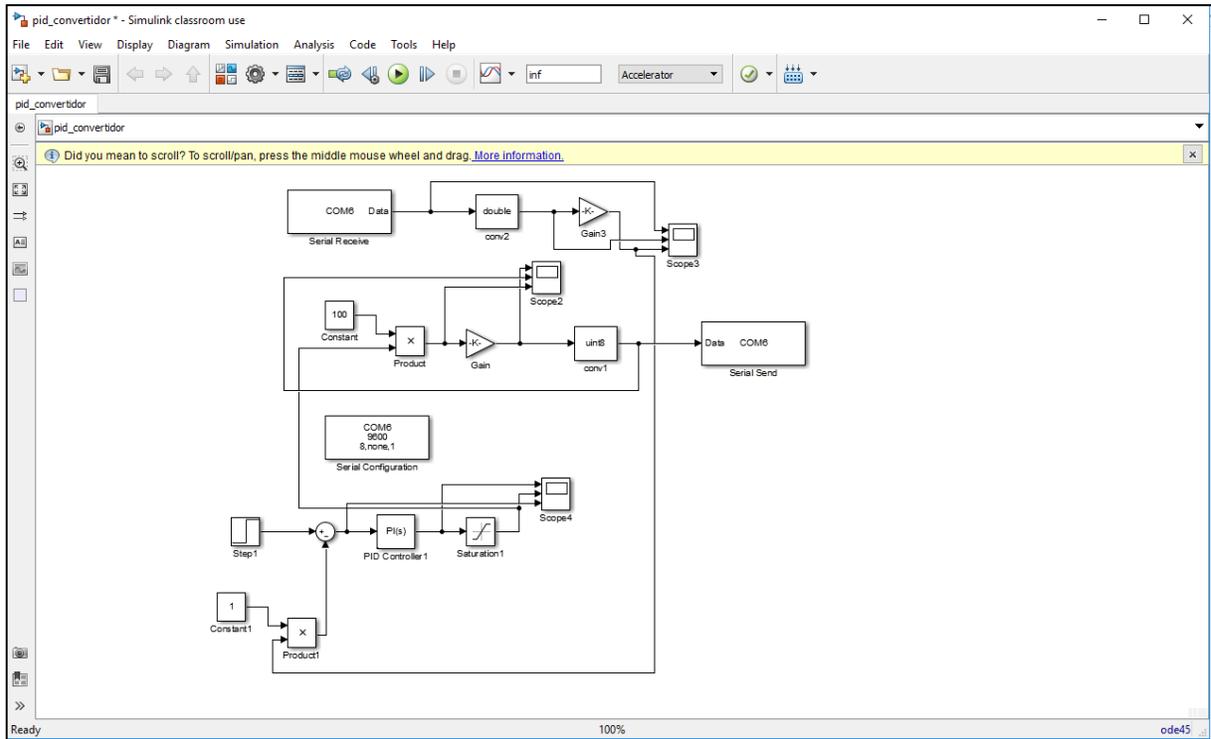


Imagen 13: Programa del montaje completo

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Identificamos que la placa Arduino no cumple con las características para realizar un control óptimo de un convertidor Buck, ya que en las diferentes pruebas realizadas obtuvimos un desempeño muy regular de este dispositivo, es decir, en el proceso de enviar el dato desde Simulink hasta Arduino y que este acondicione esta señal para luego retornarla a Simulink tarda demasiado, por consiguiente por la culpa de estos retardos y poca capacidad de la placa Arduino el control del montaje no es el adecuado.

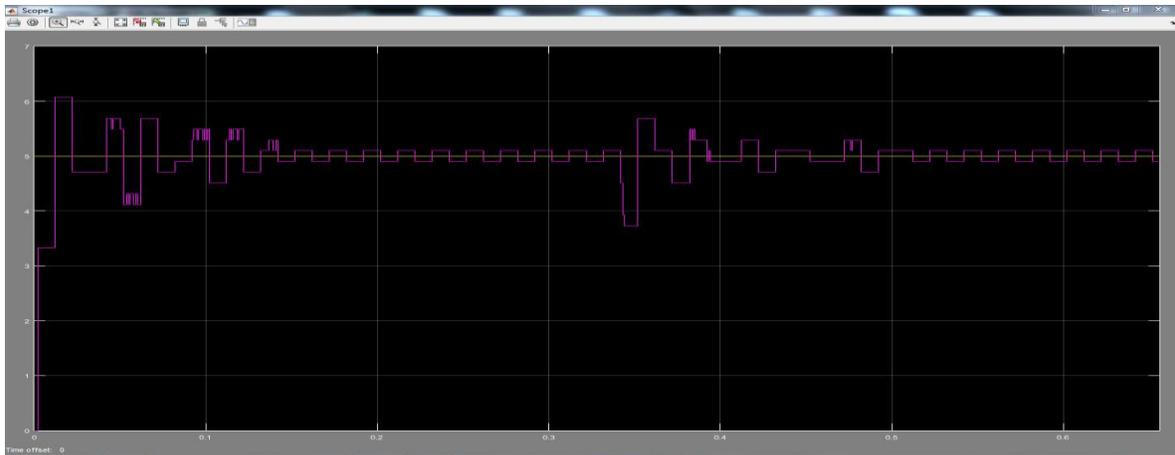


Ilustración 1: Cambio de voltaje de entrada (20 a 15.5)v

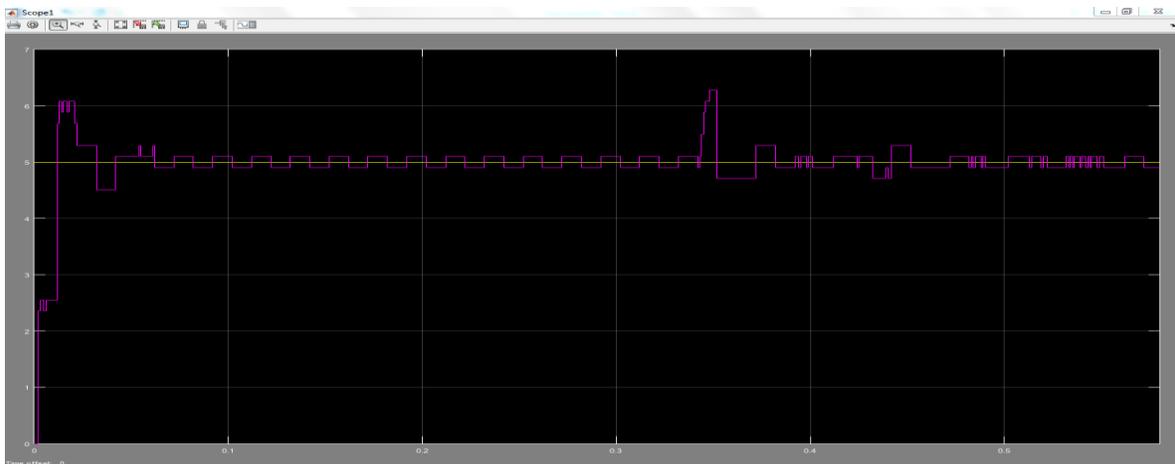


Ilustración 2: Cambio de voltaje de entrada (15.5 a 19)v

En las imágenes anteriores se muestra algunas perturbaciones al sistema como cambios de voltaje a la entrada del circuito, donde se observa que, aunque el montaje o control reacciona para estabilizarse nuevamente, no lo hace de manera inmediata ni tampoco en un tiempo prudente.

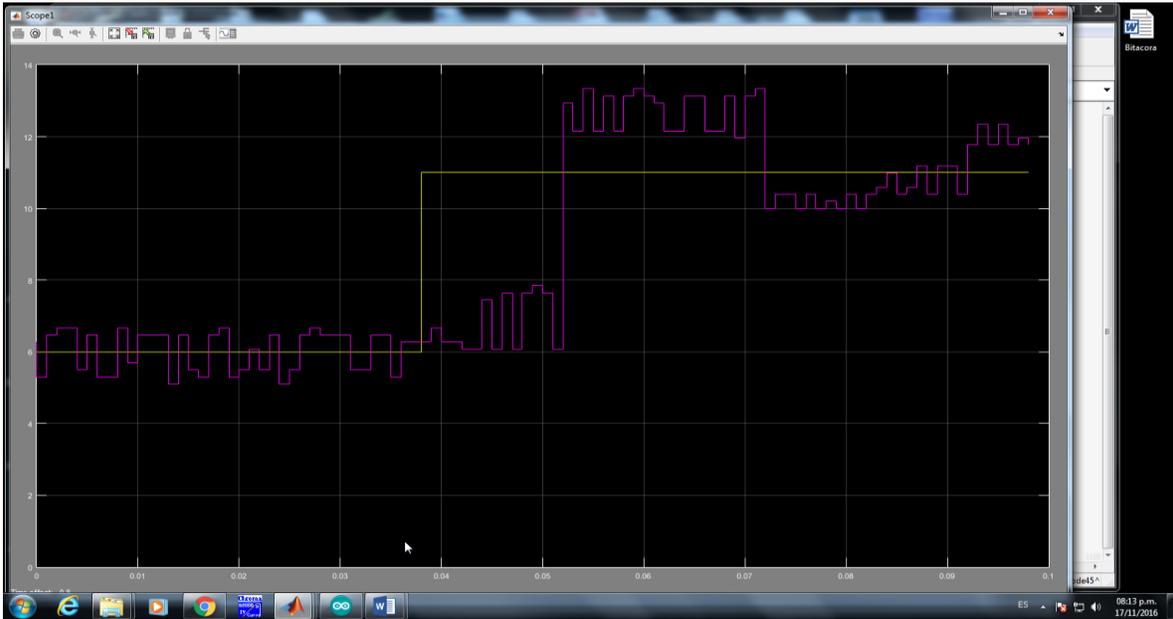


Ilustración 3: Cambio referencia de 6 a 11 v

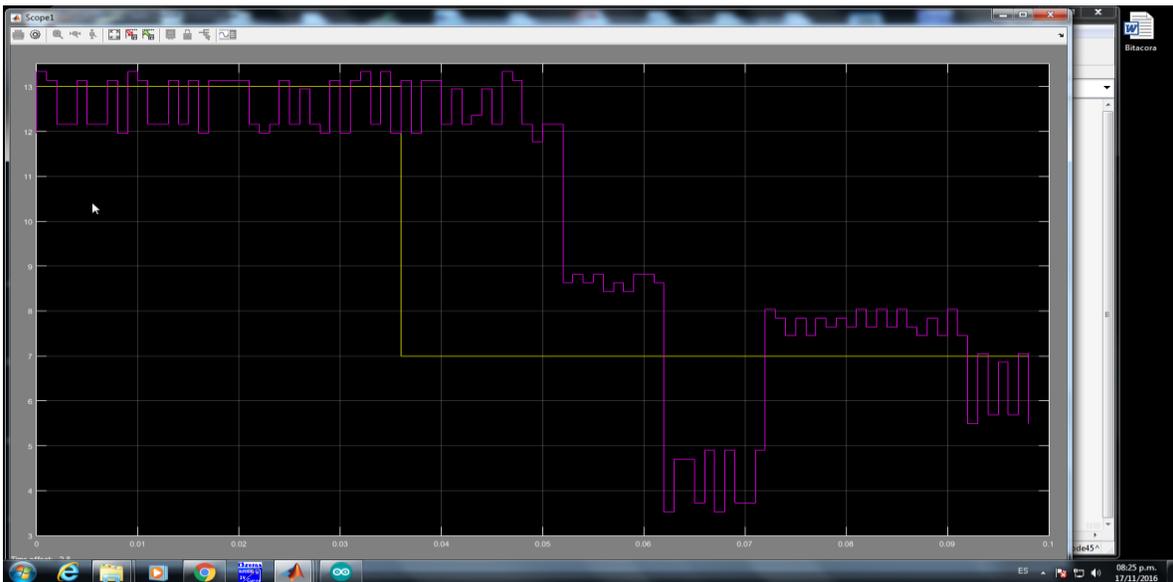


Ilustración 4: Cambio referencia de 13 a 7 v

De igual manera se verifico el funcionamiento realizando cambios de referencia para el control, obteniendo los mismos resultados ya mencionados.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Después de terminar este trabajo podemos concluir lo siguiente.

El dispositivo de adquisición de señales tipo Arduino no tiene las características suficientes para implementar un sistema de control para un convertidor reductor de electrónica de potencia DC/DC del tipo Buck, debido a que la velocidad de procesamiento de la información no es óptima para este montaje.

- Las pruebas a lazo abierto del montaje muestran que el control con Arduino puede ser útil, pero al realizar las pruebas a lazo cerrado nos damos cuenta que este no es el más óptimo ni adecuado.
- El software MatLab y su librería Simulink tienen múltiples aplicaciones y su entorno de trabajo es sumamente amigable, igualmente que el software para programar la placa Arduino.
- Se recomienda usar otra tarjeta de adquisición para elaborar un controlador más robusto y que cumpla con las especificaciones del montaje.

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

REFERENCIAS

https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_control#Tipos_de_sistemas_de_control

<http://www.picuno.com/es/arduprog/control-auto.html>

http://www.academia.edu/7885227/Sistemas_de_control_-_lazo_abierto_-_lazo_cerrado

<https://www.mathworks.com/products/simulink/?requestedDomain=es.mathworks.com>

http://www.ugr.es/~javierrp/master_files/Seminario%20de%20Matlab.pdf

<https://es.wikipedia.org/wiki/Arduino>

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

APÉNDICE

Apéndice A: Desarrollo matemático para modelar el circuito Buck.

$$1) -V_g + R_L * iL + V_L + V_C + R_C iC = 0$$

$$V_L = V_g - R_L * iL - V_C - R_C iC$$

$$V = V_C + R_C iC \quad (2)$$

$$iC = \frac{V - V_C}{R_C}$$

$$V_L = V_g - R_L * iL - V$$

$$iL - iC - \frac{V}{R} = 0$$

$$iC = iL - \frac{V}{R} \quad (1)$$

Reemplazamos (1) en (2)

$$V = V_C + R_C * (iL - \frac{V}{R})$$

$$V \left(1 + \frac{R_C}{R}\right) = iL R_C + V_C$$

$$V = \frac{iL R_C + V_C}{1 + \frac{R_C}{R}}$$

$$V = \frac{iL R_C}{1 + \frac{R_C}{R}} + \frac{V_C}{1 + \frac{R_C}{R}}$$

$$2) R_L iL + V_L + V_C + R_C iC = 0$$

$$V_L = -R_L iL - V_C - R_C iC$$

$$V_L = -R_L iL - V$$

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

$$iL - iC - \frac{V}{R} = 0$$

$$iC = iL - \frac{V}{R}$$

$$\langle V_L \rangle = V_g D - R_L iL - V = 0$$

$$V_g D - R_L \left(\frac{V}{R} \right) - V = 0$$

$$V_g D = V \left(\frac{R_L}{R} + 1 \right)$$

$$\frac{V}{V_g} = \frac{D}{1 + \frac{R}{R_L}}$$

$$M(D) = \frac{D}{1 + \frac{R}{R_L}}$$

ECUACIONES DE RIZADO

$$1) V_L = V_g - R_L iL - V$$

$$\frac{diL}{dt} = \frac{V_g - R_L iL - V}{L}$$

$$2) V_L = -R_L iL - V$$

$$\frac{diL}{dt} = \frac{-R_L iL - V}{L}$$

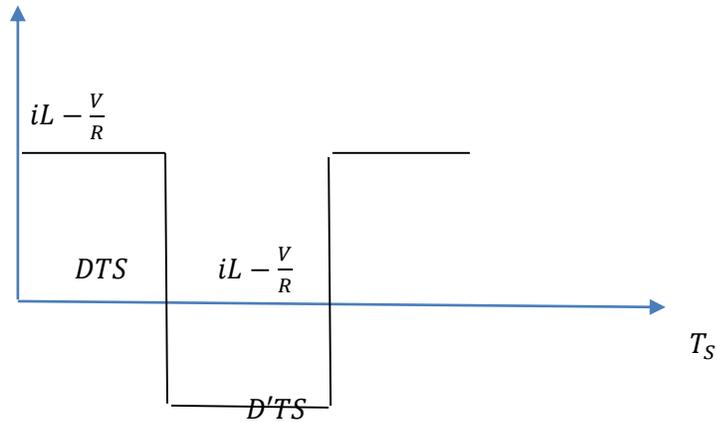
$$\frac{V_g - R_L iL - V}{L} = \frac{iL + \Delta iL - (iL - \Delta iL)}{DTS} = \frac{2\Delta iL}{DTS}$$

$$\Delta iL = \frac{DTS}{2L} * (V_g - R_L iL - V)$$

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

$$\Delta i_L = \frac{DTS}{2L} * (V_g - R_L i_L - V_c - R_C i_C)$$

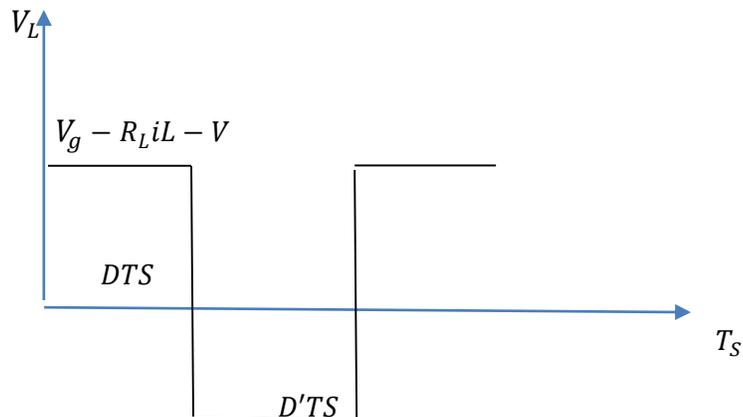
$$\Delta V_c = \frac{\Delta i_L T_S}{8C}$$



$$\langle i_L \rangle = \frac{\left(i_L - \frac{V}{R}\right) DTS + \left(i_L - \frac{V}{R}\right) D'TS}{T_S}$$

$$\langle i_C \rangle = i_L - \frac{V}{R} = 0$$

$$i_L = \frac{V}{R}$$



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

$$-R_L i_L - V$$

$$\langle V_L \rangle = \frac{(V_g - R_L i_L - V) D T S + (-R_L i_L - V) D' T S}{T S}$$

ECUACIONES DEL MODELADO

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{i_L - \frac{V}{R}}{C}$$

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{i_L - \frac{V_C - R_C i_C}{R}}{C}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{(V_g - R_L i_L - V) D}{L} + \frac{(-R_L i_L - V) D'}{L}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{(V_g D - R_L i_L - V)}{L}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{(V_g D - R_L i_L - V_C - R_C i_C)}{L}$$

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

Apéndice B: Código de MatLab para encontrar la función de transferencia del circuito Buck.

```

clc
close all
clear all

% Parámetros del convertidor Buck
L= 330e-6;
C = 22e-6;
R = 100;
Vg = 20;
d = 0.5;
RL=1e-3;
RC=1e-3;
Fsw = 60e3;
Tsw = 1/Fsw;

%%PARAMETROS PROMEDIADOS M(D) Y CORRIENTE PROMEDIO
V=Vg*d/(1+RL/R);
I=V/R
Ic = I-V/R;
Vc = V-RC*Ic;

%%CALCULO RIZADOS
delta_IL=(Vg-RL*I-Vc-RC*Ic)*d*Tsw/(2*L)
delta_Vc=(delta_IL*Tsw)/(8*C)

% Condiciones Iniciales
u = 1;
iL = 0;
vC = 0;
tPWM = 0;

iL_av = 0;
vC_av = 0;

% Parámetros de simulacion
dT = 1e-7;
Tfin = 7e-3;

%%PWM
data_u = zeros(length(0:dT:Tfin), 1);
i=1;
for(t = 0:dT:Tfin)

    if(tPWM < d*Tsw)
        data_u(i) = 1;
    else
        data_u(i) = 0;
    end;

```

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

```

tPWM = tPWM + dT;

if(tPWM >= Tsw)
    tPWM = 0;
end;

i=i+1;
end

% Vectores para visualizacion
data_t = zeros(length(0:dT:Tfin), 1);
data_iL = zeros(length(0:dT:Tfin), 1);
data_vC = zeros(length(0:dT:Tfin), 1);
data_iL_av = zeros(length(0:dT:Tfin), 1);
data_vC_av = zeros(length(0:dT:Tfin), 1);

i = 1;
for(t = 0:dT:Tfin)

    % Switched Eq. Diff

    V = (iL*RC + vC)/(1+RC/R);
    diL_dt = (Vg*data_u(i)-RL*iL-V)/L;
    dvC_dt = (iL -V/R)/C;

    iL = iL + diL_dt*dT;
    if(iL<=0)
        iL = 0;
    end;
    vC = vC + dvC_dt*dT;

    data_t(i) = t;
    data_iL(i) = iL;
    data_vC(i) = vC;

    % Averaged Eq. Diff

    V_av = (iL_av*RC + vC_av)/(1+RC/R);

    diL_dt_av = (Vg*d-RL*iL_av-V_av)/L;
    dvC_dt_av = (iL_av - V_av/R)/C;

    iL_av = iL_av + diL_dt_av*dT;
    if(iL_av<=0)
        iL_av = 0;
    end;
    vC_av = vC_av + dvC_dt_av*dT;

```

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

```

data_iL_av(i) = iL_av;
data_vC_av(i) = vC_av;

```

```

i = i + 1;

```

```

end;

```

```

subplot(1,2,1)
plot(data_t, data_vC, '-r')
hold on;
%plot(t_PSIM, vC_PSIM, '--b')
plot(data_t, data_vC_av, '-b')
hold off;
xlabel('Time [s]');
ylabel('v_C [V]');
legend('Switched Equations', 'Averaged Equations');

```

```

subplot(1,2,2)
plot(data_t, data_iL, '-r')
hold on;
%plot(t_PSIM, iL_PSIM, '--b')
plot(data_t, data_iL_av, '-b')
hold off;
xlabel('Time [s]');
ylabel('iL [A]');

```

```

%%% Funciones de transferencia

```

```

t0 = (1+(RC/R));
t1 = (-RL/L)-(RC/(t0*L));
t2 = -1/(t0*L);
t3 = (1/C)-(RC/(t0*R*C));
t4 = -1/(t0*R*C);
A = [t1 t2; t3 t4];
B = [Vg/L;0];
C = [1 0;0 1];
D = [0];

```

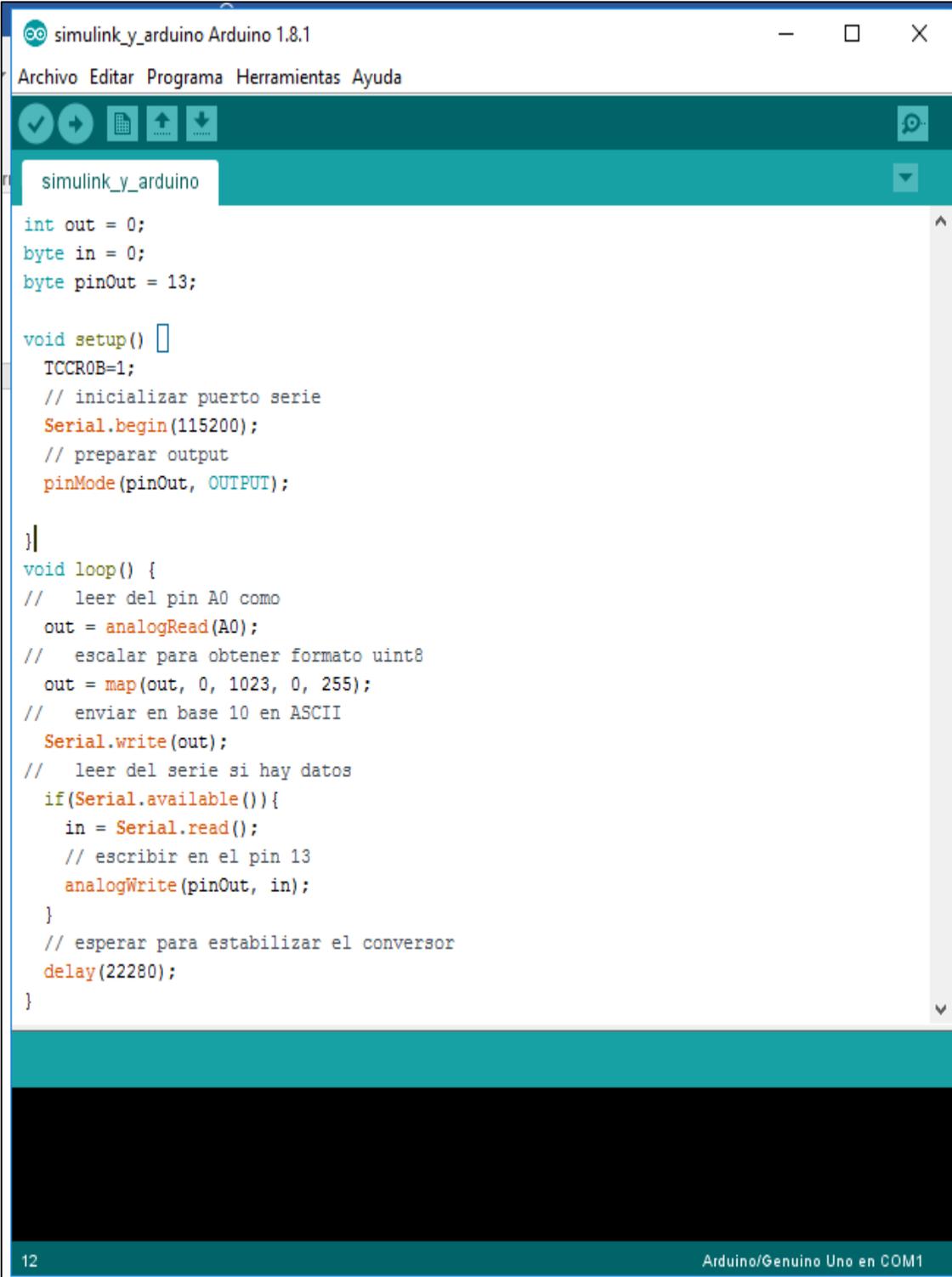
```

sys=ss(A,B,C,D);
F = tf(sys)
t = 0:dT:Tfin;
u = d*ones(length(t),1);

```

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

Apéndice C: Código en Arduino.



```

simulink_y_arduino Arduino 1.8.1
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
simulink_y_arduino
int out = 0;
byte in = 0;
byte pinOut = 13;

void setup() {
  TCCR0B=1;
  // inicializar puerto serie
  Serial.begin(115200);
  // preparar output
  pinMode(pinOut, OUTPUT);
}

void loop() {
  // leer del pin A0 como
  out = analogRead(A0);
  // escalar para obtener formato uint8
  out = map(out, 0, 1023, 0, 255);
  // enviar en base 10 en ASCII
  Serial.write(out);
  // leer del serie si hay datos
  if(Serial.available()){
    in = Serial.read();
    // escribir en el pin 13
    analogWrite(pinOut, in);
  }
  // esperar para estabilizar el conversor
  delay(22280);
}
12 Arduino/Genuino Uno en COM1

```

Imagen14: Código final Arduino

Apéndice D: Ilustraciones tomadas desde el osciloscopio.

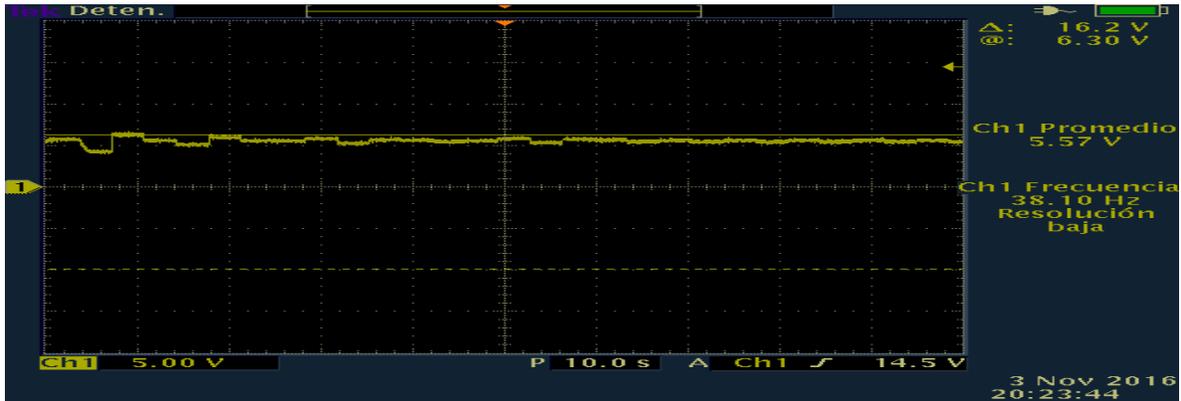


Ilustración 5: Perturbación en el sistema

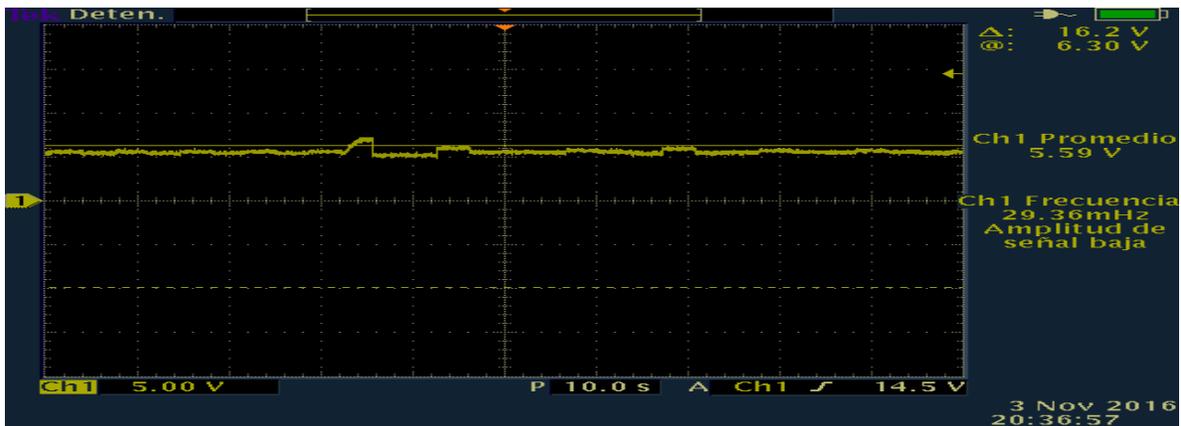


Ilustración 6: Cambio de voltaje a la entrada y estabilización

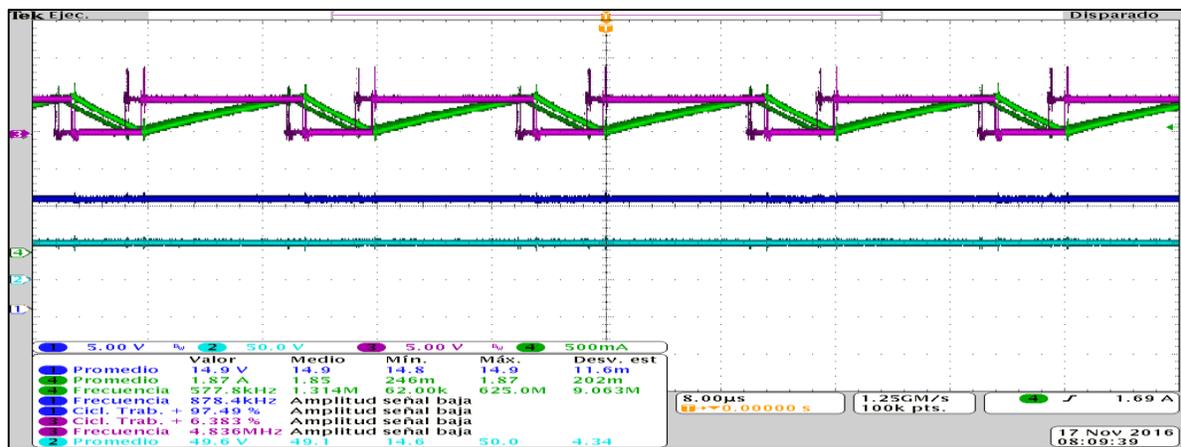


Ilustración 7: Variación ciclo de dureza

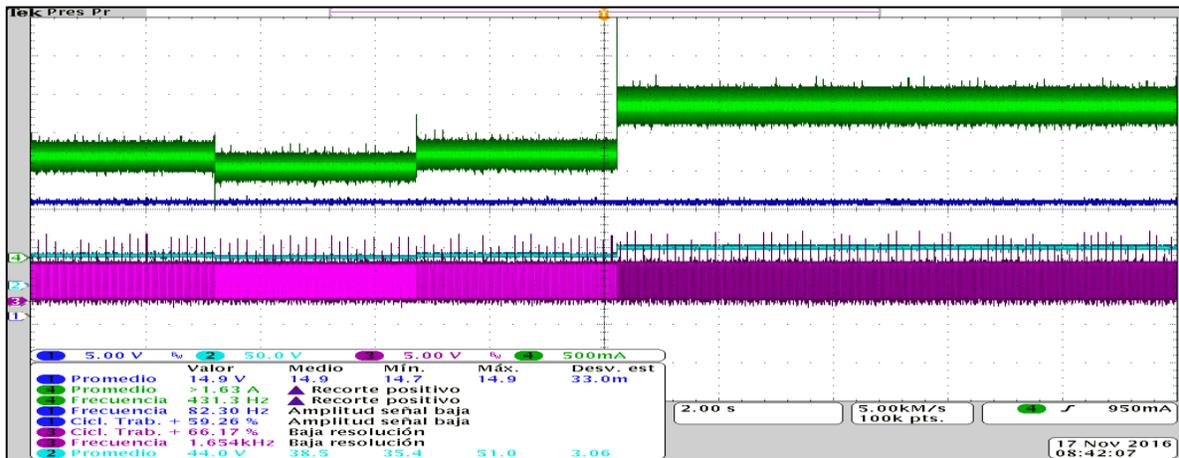


Ilustración 8: Cambio de referencia

Apéndice E: Diferentes ciclos de trabajo a una frecuencia aproximada de 60Khz.



Ilustración 9: Duty=20%

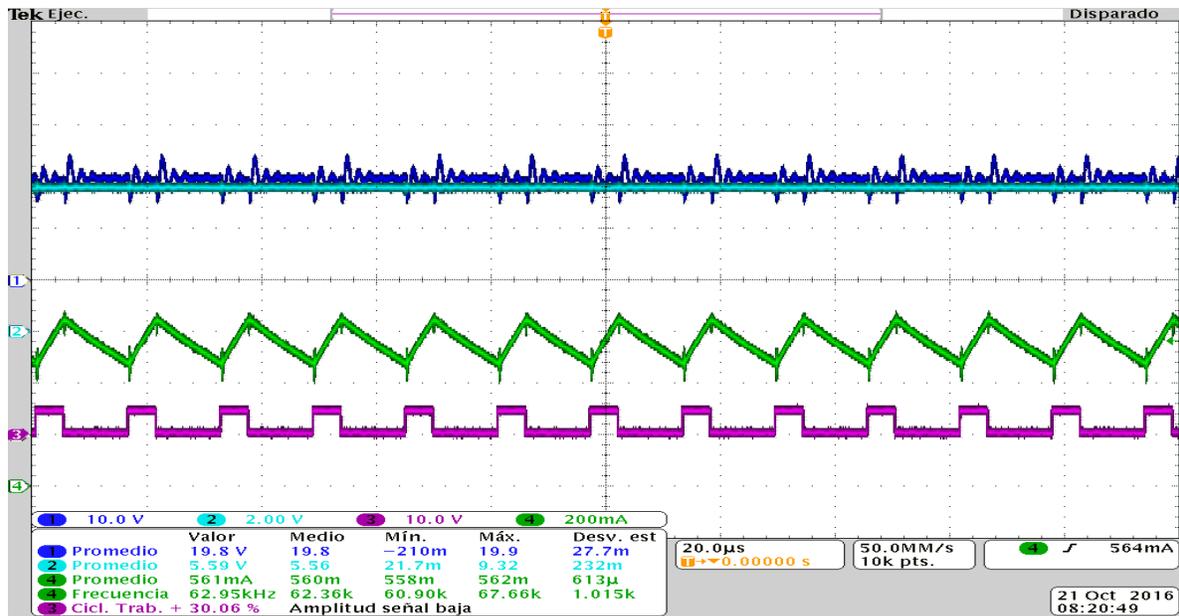


Ilustración 10: Duty=30%

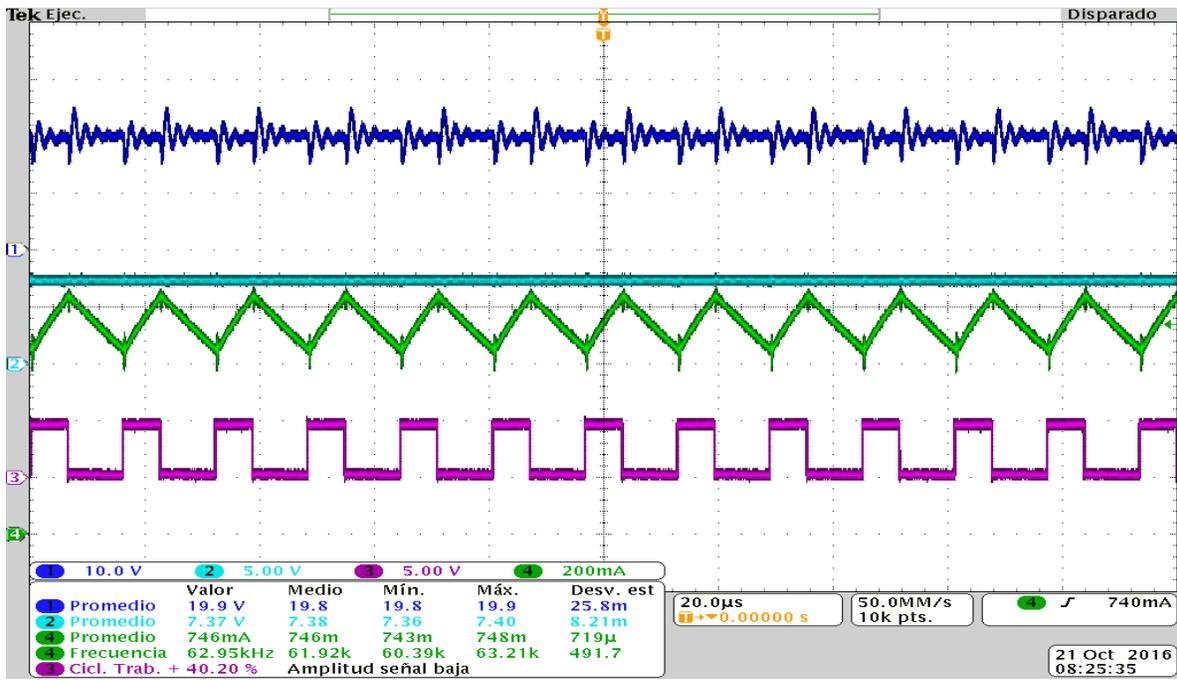


Ilustración 11: Duty=40%

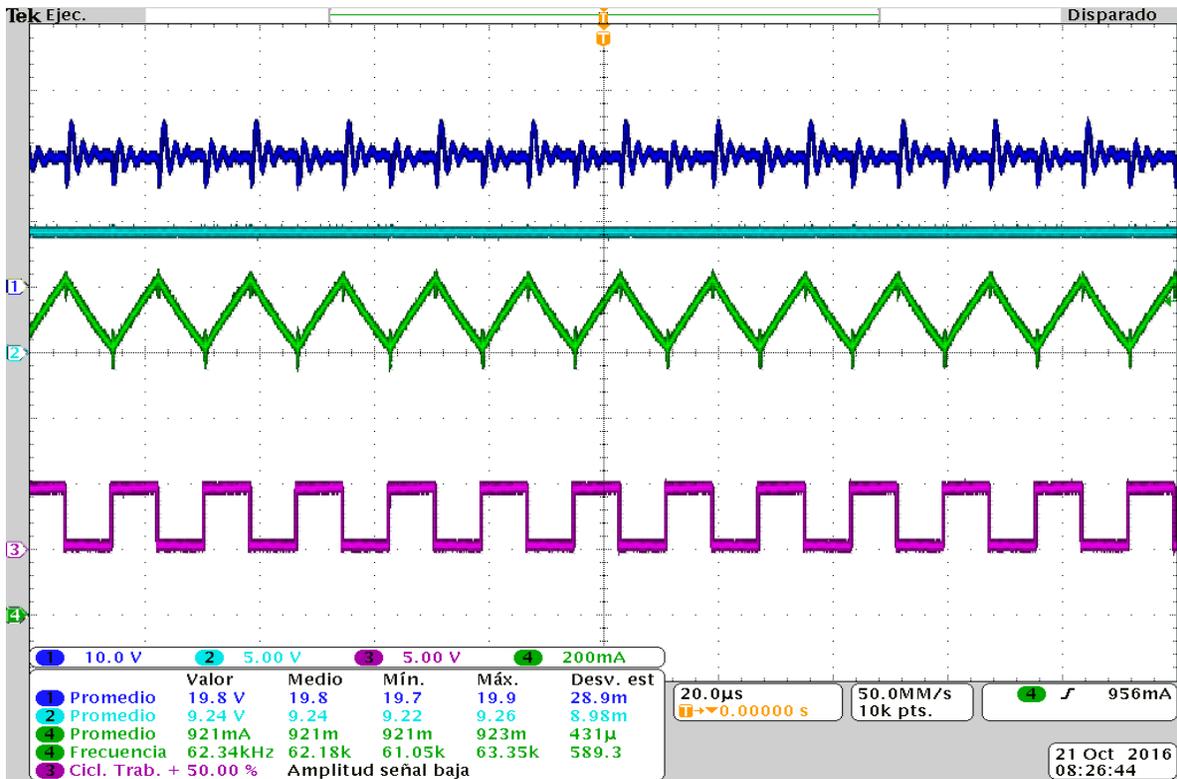


Ilustración 12: Duty=50%

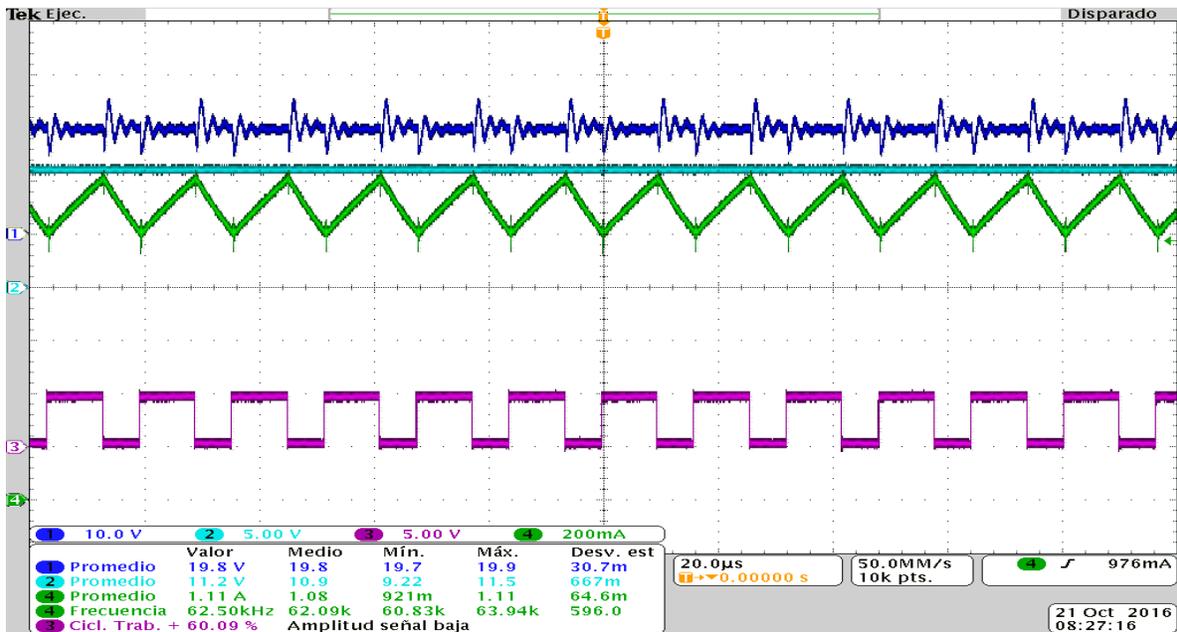


Ilustración 13: Duty=60%

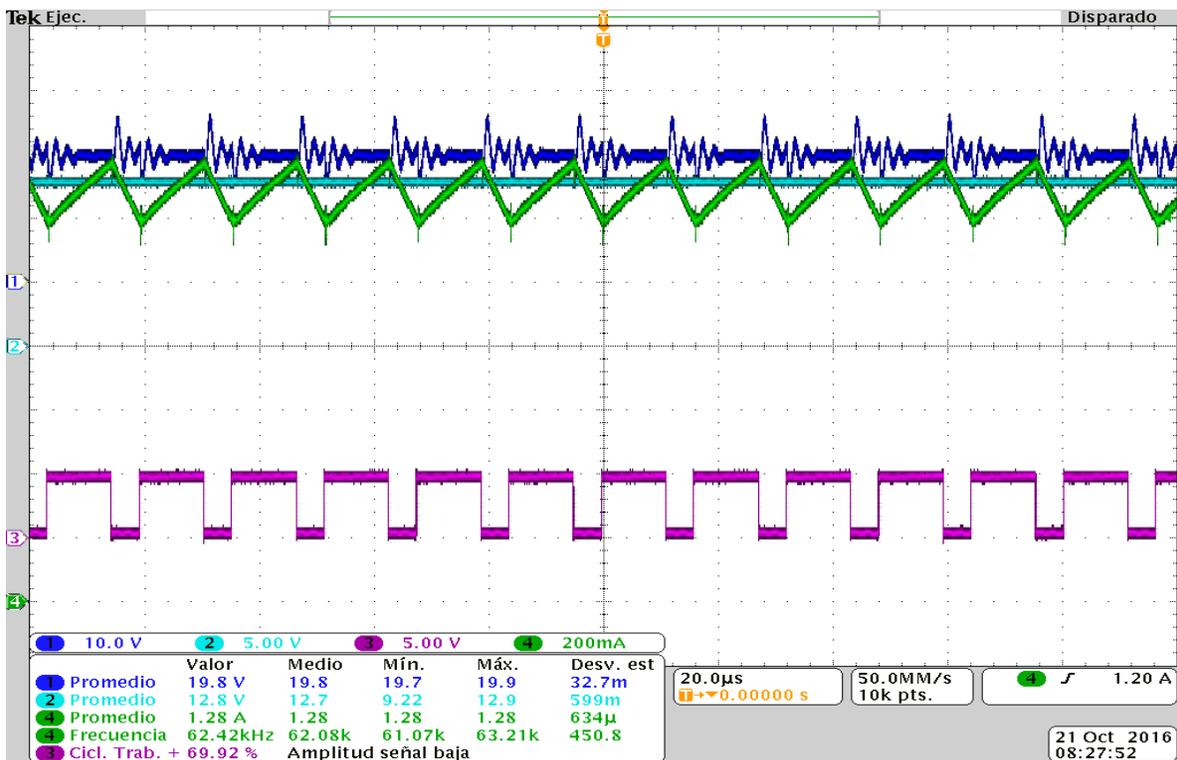


Ilustración 14: Duty=70%

Apéndice F: Diferentes ciclos de trabajo a una frecuencia aproximada de 30Khz.

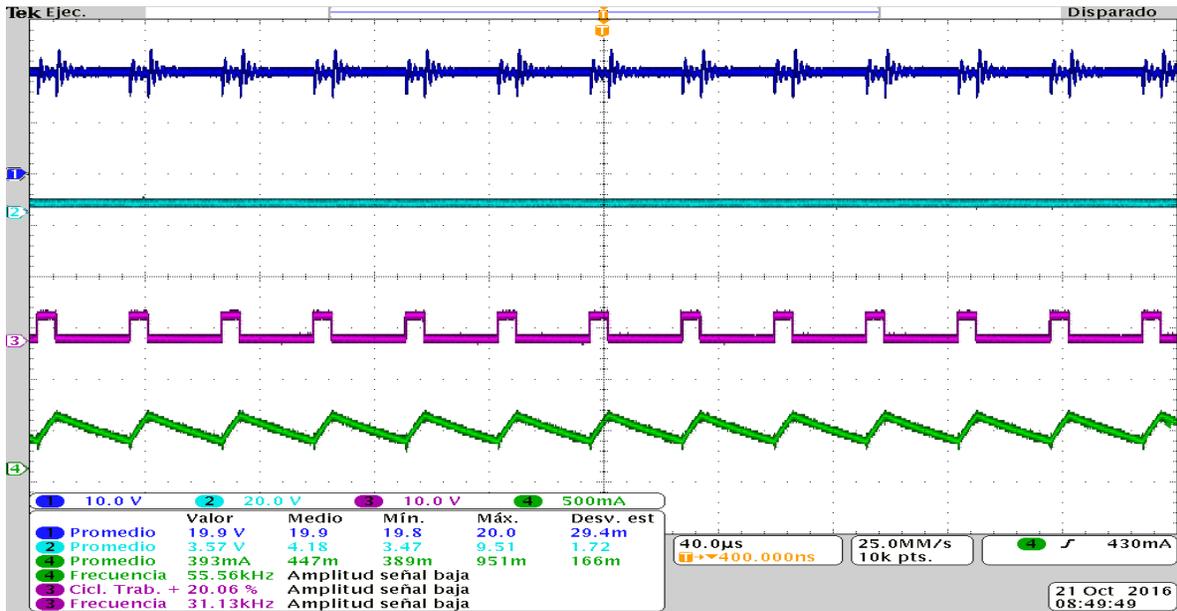


Ilustración 15: Duty=20%

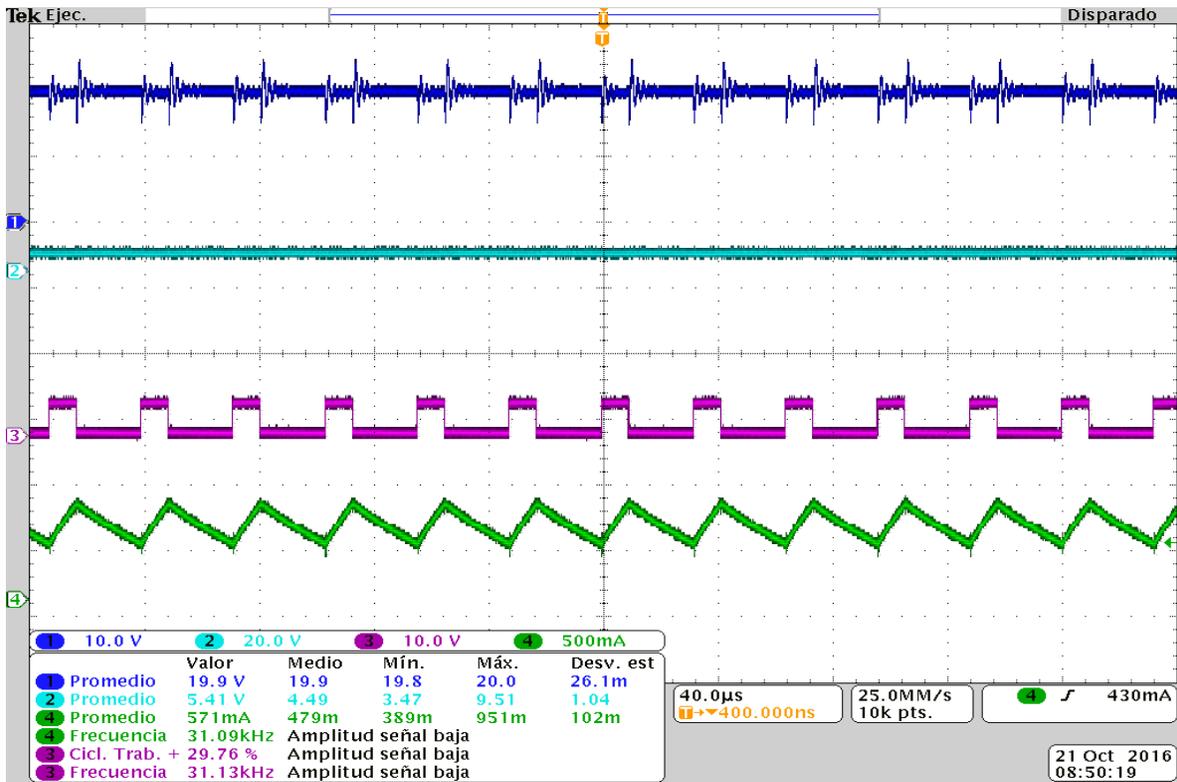


Ilustración 16: Duty=30%

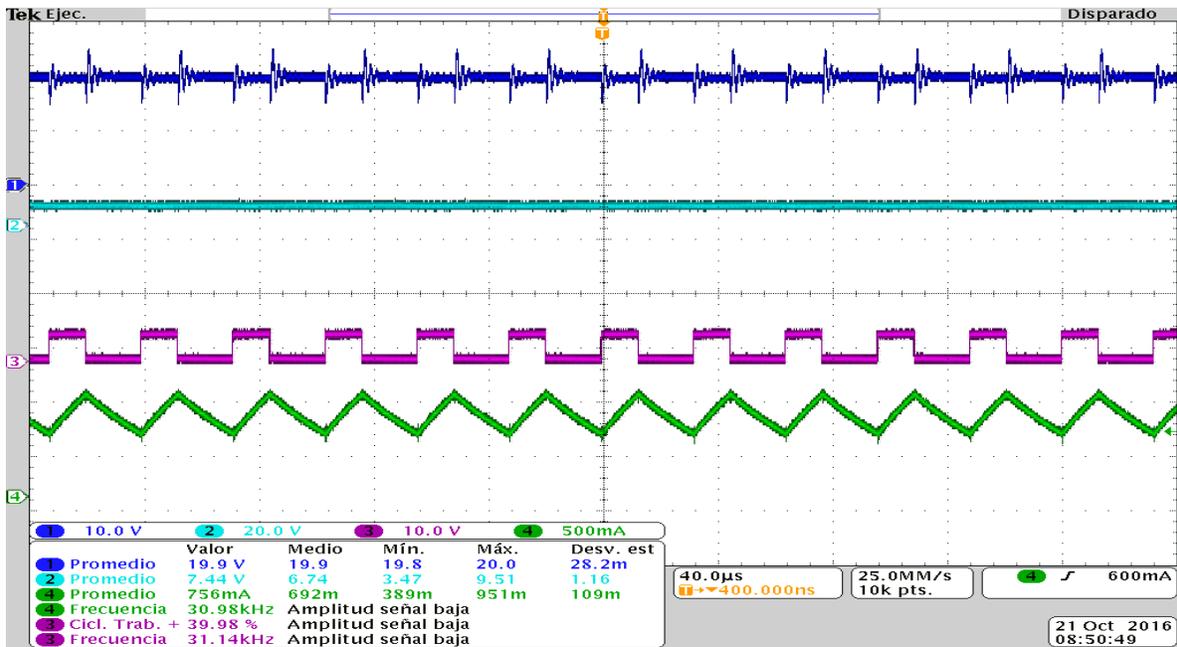


Ilustración 17: Duty=40%

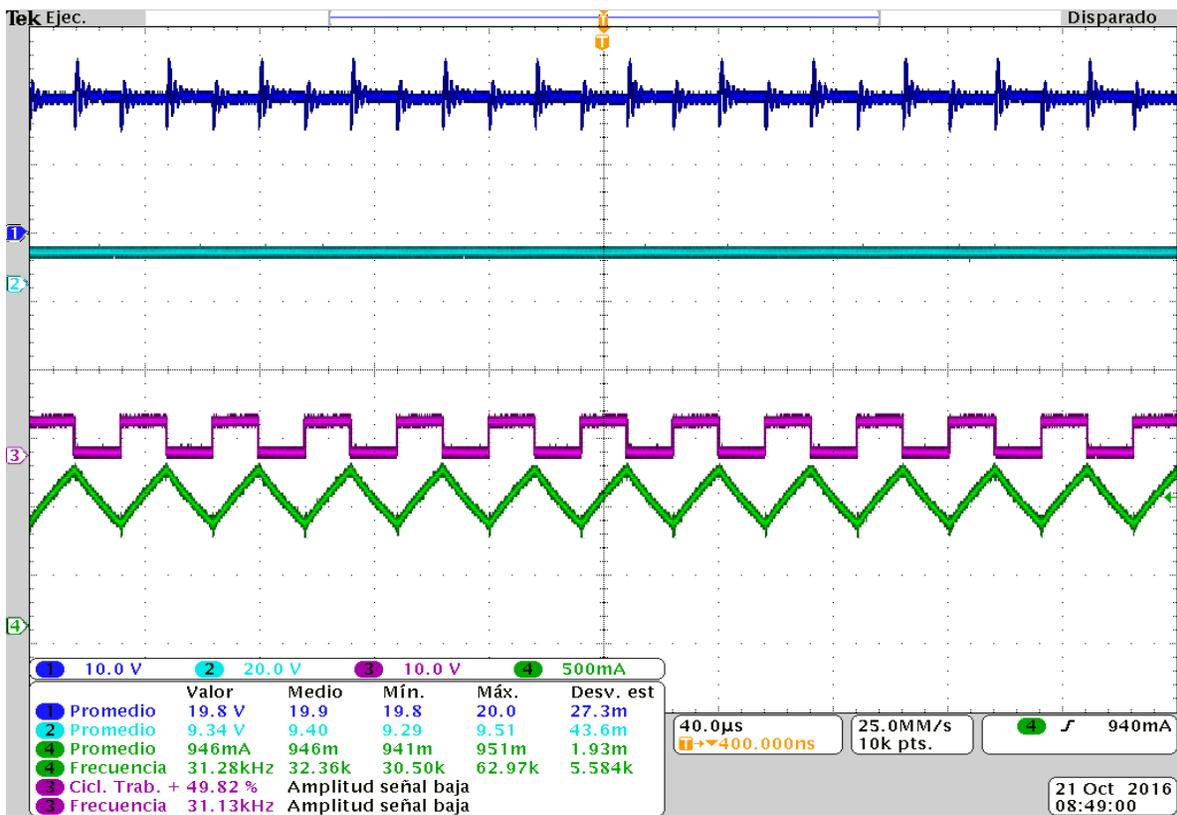


Ilustración 18: Duty 50%

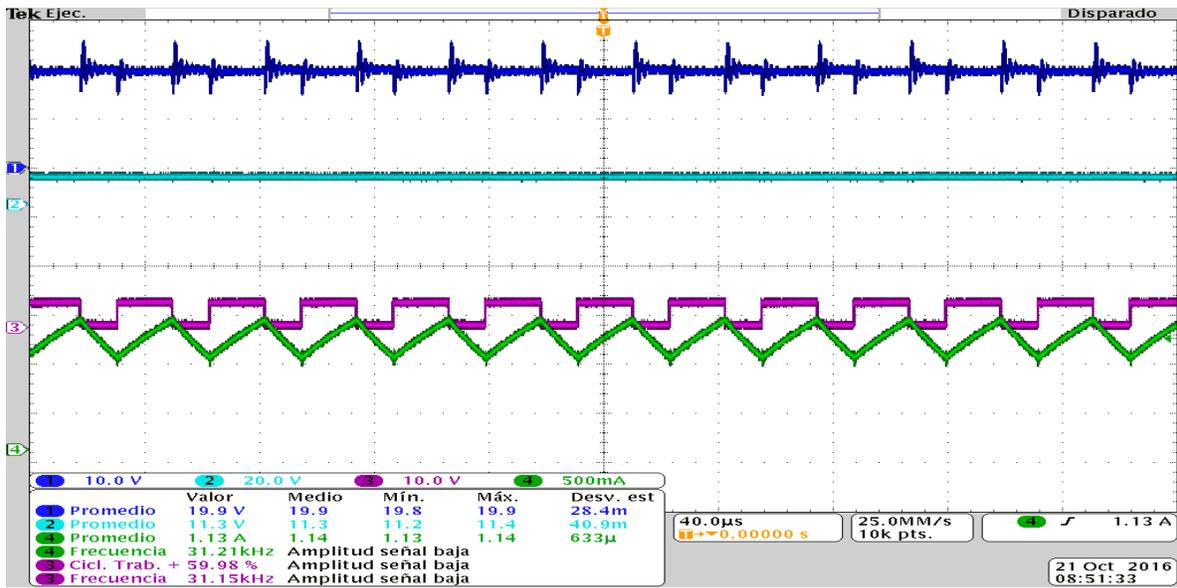


Ilustración 19: Duty=60%

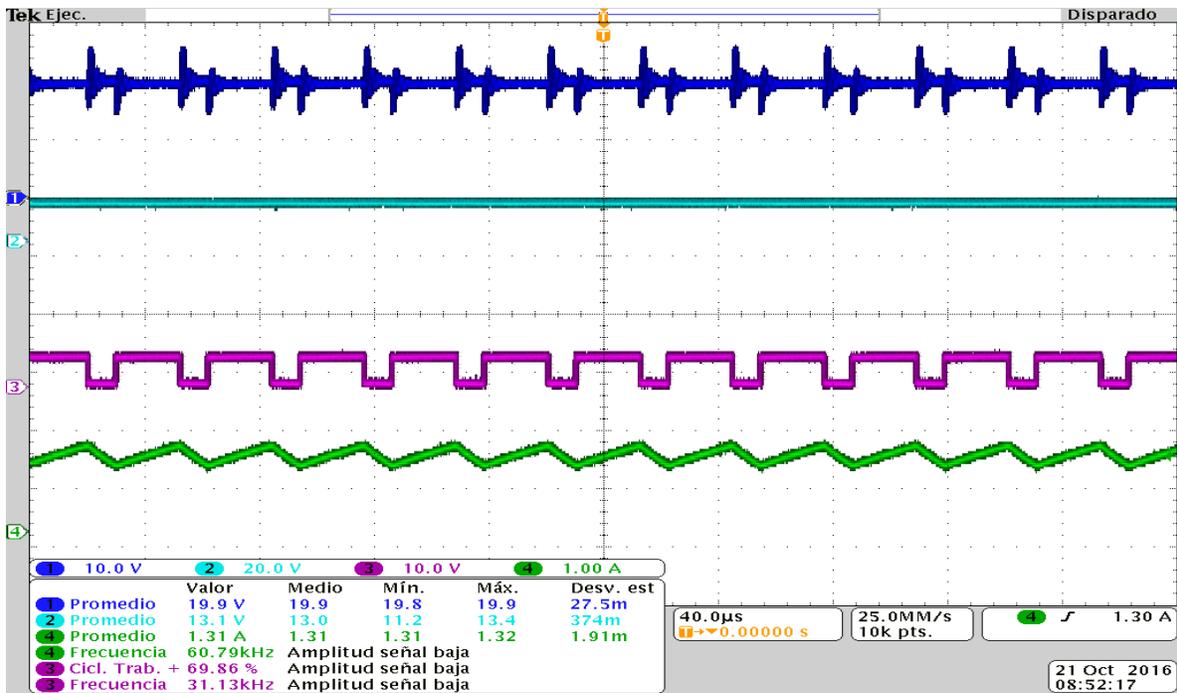


Ilustración 20: Duty70%

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

Apéndice G: Elementos usados para el montaje.

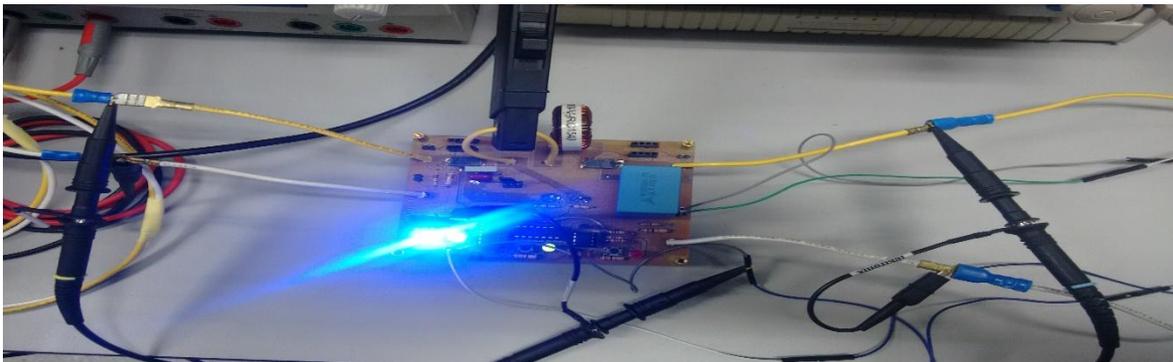


Ilustración 21: Circuito convertidor Buck



Ilustración 22: Carga utilizada, R=100 Ohmios

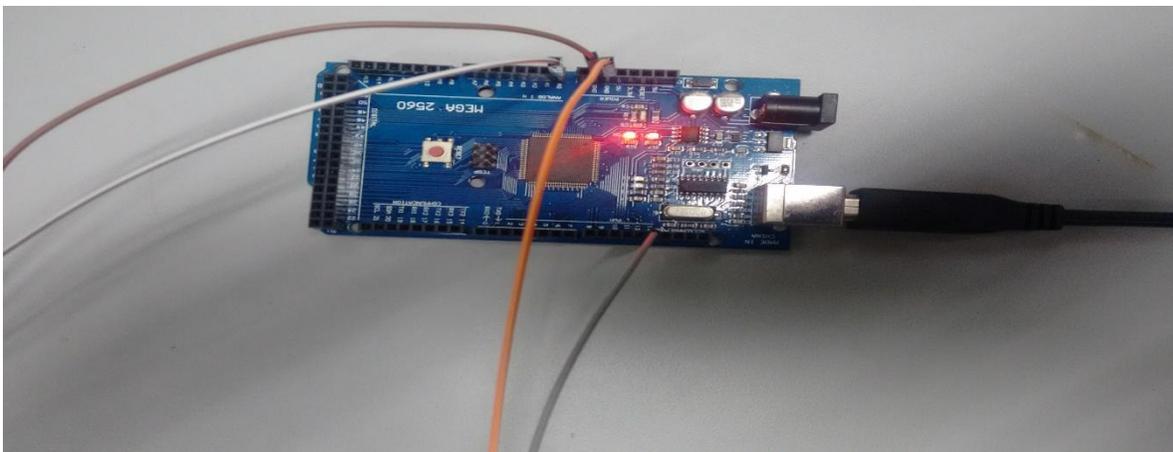


Ilustración 23: Placa ARDUINO MEGA 2560

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



Ilustración 24: Osciloscopio para mediciones

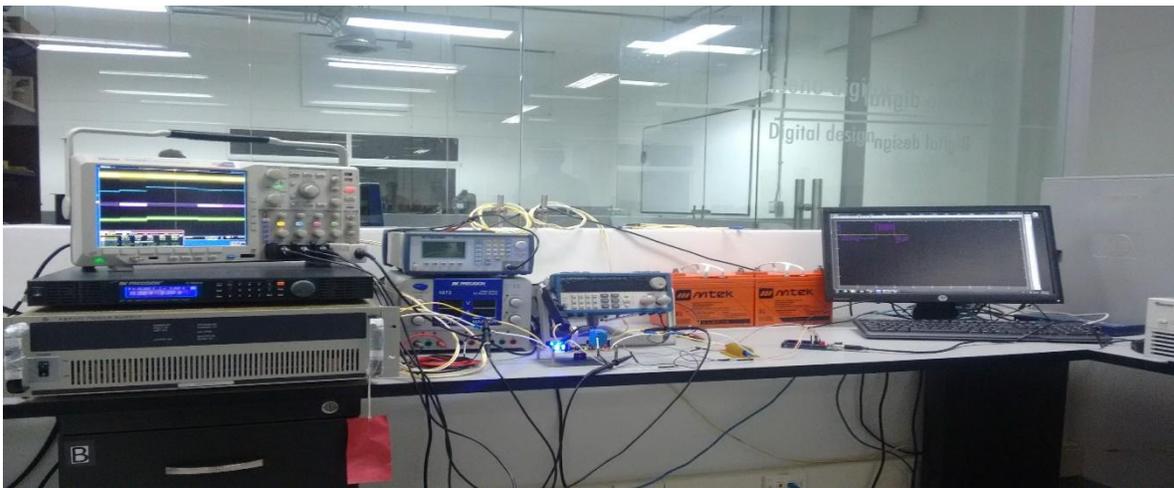


Ilustración 25: Montaje completo con todos los elementos conectados