

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

SIMULACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL Y PROPULSIÓN ELÉCTRICA DEL CAMIÓN AC

Trabajo de titulación para optar al título
Técnico Universitario en ELECTRÓNICA

Alumnos:

Leonardo Allan Collao Bacián

Fabián Matías Díaz Bravo

Profesor guía:

Ing. Sergio Riquelme Bravo

Profesor co-referente:

Ing. José Llantén Álvarez

2018

RESUMEN

KEYWORDS: AC, RECTIFICACIÓN, INVERSOR TRIFÁSICO, IGBT, INTERFAZ

El presente trabajo de título consiste en implementar la simulación del funcionamiento del sistema de control y propulsión eléctrica de un camión minero AC a baja escala, también se detallan todos los procesos realizados durante el tiempo de estudio del camión AC, análisis de componentes necesarios y construcción de la simulación final.

En el capítulo 1: se plantea el sistema eléctrico de control y potencia del camión en general, se especificará la investigación y cálculos realizados para escalar la primera parte del sistema de potencia del camión que consiste sobre la rectificación y filtrado.

En el capítulo 2: se expone la parte final del sistema de potencia del camión, simulada a través de la conmutación de los IGBT's a través de sus drivers con el propósito de conocer los componentes que posee el camión.

En el capítulo 3: se desarrolla el interfaz del sistema de monitoreo de buen estado de funcionamiento al momento de propulsión. Se evalúan los costos y tiempo que involucrar el trabajo completo.

ÍNDICE

RESUMEN

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: FUNDAMENTOS DEL CAMIÓN PARA LA PRIMERA ETAPA DE LA SIMULACIÓN	2
1.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3 DIAGRAMA DE BLOQUE	3
1.4 CAMIÓN AC	5
1.4.1 Sistema de Potencia	5
1.4.2 Sistema de retardo	6
1.4.3 Sistema de control	6
1.5 FUNDAMENTOS DE LA RECTIFICACIÓN	7
1.5.1 Rectificadores de media onda no controlados	7
1.5.2 Rectificadores de onda completa no controlado	8
1.6 RECTIFICACIÓN DEL SISTEMA	9
1.6.1 Cálculo de tensión DC	9
1.6.2 Etapa de rectificación práctica	11
1.7 FILTRO	12
1.7.1 Rizado	12
1.7.2 Armónicos	13
1.7.3 Voltaje de rizado	14
1.7.4 Factor de rizado	14
1.8 ETAPA DE FILTRADO PRÁCTICO	14

1.9	PRIMERA ETAPA DE SIMULACIÓN	18
CAPÍTULO 2: CONTROL DE BAJA Y ALTA POTENCIA PARA LA PROPULSIÓN DEL CAMIÓN		19
2.1	EL INVERSOR	20
2.1.1	IGBT	21
2.1.2	Características del IGBT	22
2.2	DRIVER	23
2.3	AISLACIÓN ETAPA DE CONTROL DE POTENCIA	25
2.3.1	Fibra óptica	26
2.3.2	Optocoplador	26
2.4	SEÑAL DE CONTROL	28
2.5	DISPOSITIVO DE CONTROL	29
2.5.1	TMC	31
2.6	MOTOR DE TRACCIÓN POR INDUCCIÓN AC	32
2.7	MOTOR PASO A PASO	34
2.8	SEGUNDA ETAPA DE SIMULACIÓN	36
CAPÍTULO 3: INTERFAZ AL USUARIO Y COSTOS DE LA SIMULACIÓN		37
1.1	INTERFAZ DEL CAMION AC	38
1.2	INTERFAZ AL USUARIO DE LA SIMULACIÓN	40
1.2.1	Controlador principal	40
1.2.2	Oscilador	41
1.2.3	Control de la alimentación	43
1.2.4	Señalización de voltaje	43
1.2.5	Pantalla de visualización	44
1.2.6	Modo de uso	45

1.3	ANÁLISIS DE COSTOS	46
1.3.1	Hardware utilizado	46
1.3.2	Software utilizado	47
1.3.3	Horas Hombre	48
1.4	COSTO ASOCIADO FINAL DE LA SIMULACIÓN	50
1.5	TERCERA ETAPA DE SIMULACIÓN	51
	Observaciones y conclusiones	53
	BIBLIOGRAFÍA	54
	ANEXO A: GLOSARIO	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Diagrama en bloques del trabajo	4
Figura 1-2 Señal de un rectificador de media onda	8
Figura 1-3 Señal de onda de un rectificador de onda completa	8
Figura 1-4 Esquema de un rectificador trifásico	9
Figura 1-5 Respuesta de un rectificador trifásico	10
Figura 1-6 Respuesta práctica del rectificador trifásico	11
Figura 1-7 Comparación entre la entrada VS la salida del rectificador	12
Figura 1-8 Salida de la etapa de filtro	15
Figura 1-9 Salida práctica del rectificador	17
Figura 2-1 Puente trifásico conformado con IGBT's	20
Figura 2-2 Conformación de un IGBT	21
Figura 2-3 Diagrama de la estructura interna	22
Figura 2-4 Diagrama de conexión driver IR2110	23
Figura 2-5 Esquema interno del 4n26	27
Figura 2-6 Señal PWM	29
Figura 2-7 Arduino Nano	30
Figura 2-8 Esquema de la tarjeta TMC del camión	31
Figura 2-9 Motor de tracción	33
Figura 2-10 Motor paso a paso	35
Figura 2-11 Driver A4988	36
Figura 3-1 Software "Wptu" de General Electric	39
Figura 3-2 Microcontrolador "Pic 16877A"	40
Figura 3-3 Tabla de osciladores con frecuencias y condensadores típicos	42
Figura 3-4 Conexión del XTAL con los condensadores al microcontrolador	42
Figura 3-5 Simulación del optocoplador para etapa de señalización de voltaje	43
Figura 3-6 Pantalla LCD de 2X16 modelo GDM160k	44

ÍNDICE DE TABLAS

Figura 3-1 Materiales utilizados para la creación de la simulación	46
Figura 3-1 Materiales utilizados para la creación de la simulación	47
Figura 3-2 Software utilizados para la creación de la simulación	48
Figura 3-3 Tiempo utilizado para la creación de la simulación	49
Figura 3-4 Tiempo total con su respectivo costo asociado	50
Figura 3-5 Costo asociado final de la simulación	51

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la minería sigue siendo la entrada más significativa para el estado de CHILE, y con el reciente cambio de mandatario, uno de los desafíos de los futuros programas de Gobiernos es reactivar la gran cantidad de proyectos mineros que están paralizados por distintas razones, estos superan los US \$50.000 millones. Por este argumento se logra entender que el área de extraer minerales (minería) espera alza y no solo ayuda al crecimiento a ellas mismas sino también a la creación de empresas externas que prestan sus servicios a estas.

En cada gran faena existe una cantidad considerable de camiones de alto tonelaje para uso fuera de carretera, siendo los camiones AC algunos de los más utilizados. Estos camiones juegan un rol fundamental en este ámbito, debido a que estos mueven una cantidad que supera las 221 toneladas de material (estéril y mineral). La exigencia en el mercado por estos camiones es debido al costo de reparación y tiempo que es menor, su vida útil que logra ser considerable comparadas con otras marcas competidoras. Por lo que el presente trabajo de título se centra en la simulación del sistema de propulsión eléctrica de los módulos de potencias y control de los camiones AC.

**CAPÍTULO 1: FUNDAMENTOS DEL CAMIÓN PARA LA PRIMERA ETAPA
DE LA SIMULACIÓN**

1.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar la simulación del sistema de control y propulsión eléctrica a menor escala de un camión AC de minería.

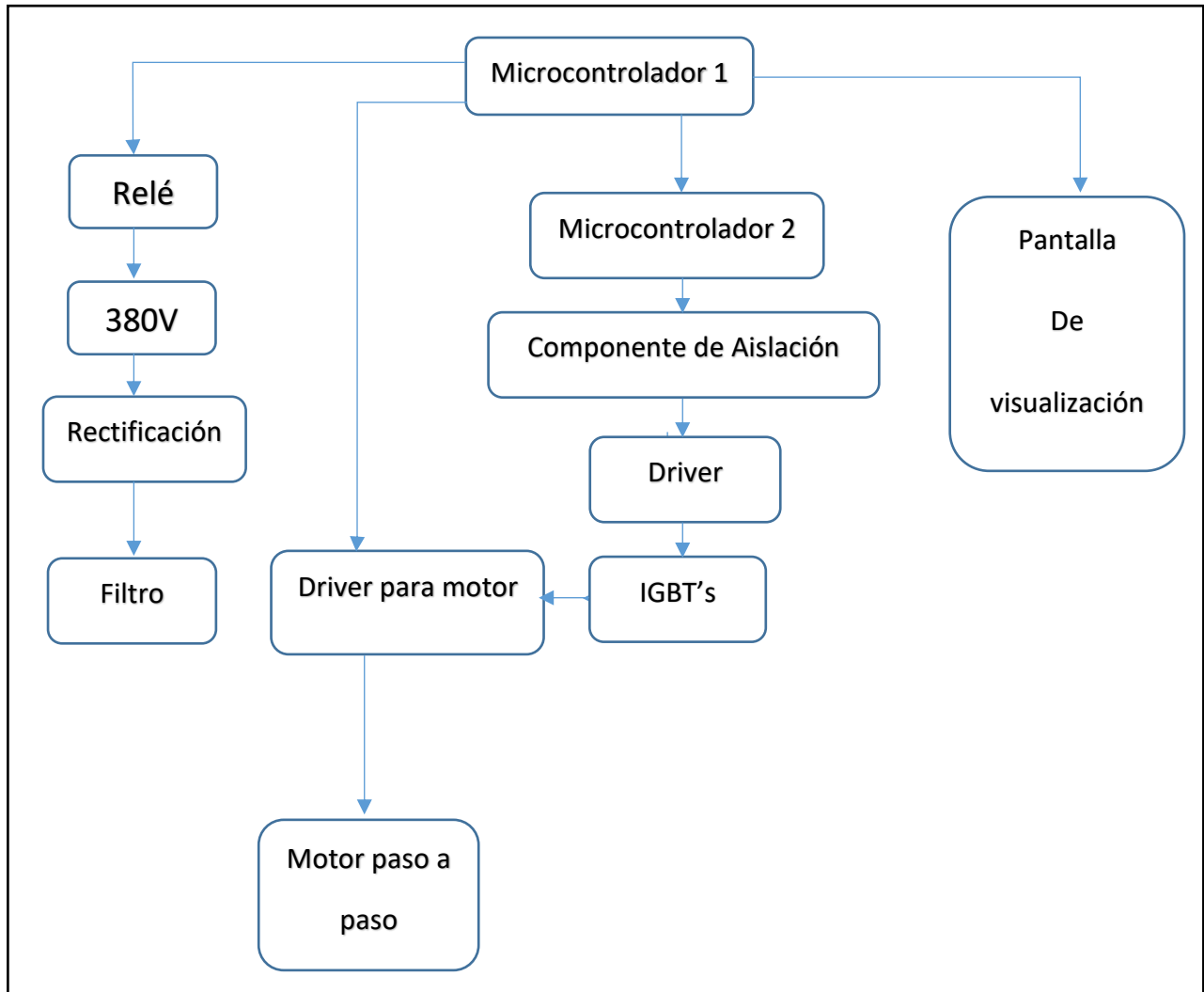
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar del sistema eléctrico de propulsión de los camiones AC.
- Investigar e implementar la rectificación del voltaje de la red.
- investigar del inversor de corriente del camión y su control en baja potencia.
- Implementar del interfaz del sistema de control y sensado.

1.3 DIAGRAMA DE BLOQUES

Para la realización del trabajo de título se realiza una investigación previa, donde se recopila información sobre el funcionamiento del camión, como las principales características que rigen su sistema. Se reemplaza la alta potencia que utiliza el camión a una escala menor para realizar la simulación del sistema de control y propulsión del camión AC.

La figura 1-1 muestra el diagrama de bloques que regirá el presente trabajo de título donde se reúnen las diferentes etapas del camión y son reemplazadas a través de componentes de menor escala.



Fuente: propia creada para propósito del trabajo de título

Figura 0-1 Diagrama en bloques del trabajo

1.4 CAMIÓN AC

El nombre de estos camiones (AC), es debido a los motores de tracción de corriente alterna, estos son los responsables que la maquinaria pueda realizar movimientos tales como propulsión y retardo. Previamente a los motores de tracción, existen elementos y procesos que se presentan a continuación.

1.4.1 Sistema de Potencia

El radiador, motor, alternador y soplador van montados en un sub-chasis separado para proporcionar un rápido y fácil desmontaje y montaje del módulo de potencia.

El camión es impulsado por un motor diésel el cual en los modelos normalmente utilizados alcanzan las 1900 RPM. Este motor de alta compresión que funciona con combustible diésel es el encargado de transformar energía cinética en energía mecánica y es fundamental ante todos los sistemas, debido a que es el que impulsa al alternador, conectado a través de un eje llamado cigüeñal.

El alternador es una máquina eléctrica que a través de la energía mecánica la transforma a energía eléctrica, es así como este componente genera AC donde posteriormente es convertida a DC a través de un rectificador trifásico y filtrada a través de una malla RC para eliminar el efecto del rizado.

Después del proceso de filtrado de DC, esta energía se modifica a AC por medio de grupos de dispositivos llamados “inversores”. Cada inversor está compuesto por seis módulos de accionamiento. La energía AC producida por medio de los inversores es de voltaje y frecuencia variable, donde estos responden a las condiciones de operación logrando así el control de los motores de tracción.

1.4.2 Sistema de retardo

Se emplean resistencias de potencia para disipar la energía proveniente de los motores de tracción (que operan como generadores posteriormente a la propulsión) cuando están en el modo de retardo dinámico. Esta potencia se disipa a través de energía calórica que debe ser evacuada de las resistencias, por lo que se utiliza un ventilador para disipar la potencia que se requiera.

1.4.3 Sistema de control

El ICP (Panel de Control Integrado) está compuesto de 3 controladores principales: El PSC (Controlador del Sistema de Propulsión), el TCI (Interface de Control del Camión) y el TMC (Controlador del Motor de Tracción).

El PSC es el controlador para el sistema de control AC, el cual es el encargado de recibir respuesta de los sensores de velocidad ubicados en el alternador y en los motores de tracción, señales de retroalimentación de corriente y voltaje de distintos dispositivos de control. Usando estas entradas como referencia, controla inversores, los circuitos de retardo, relés, contactares y otros dispositivos externos.

La interface TCI es la principal entre los sistemas, dispositivos del camión y el personal de servicio. Este panel se usa en conjunto con la pantalla de información de diagnóstico.

El TMC es el que recibe señales de la velocidad del motor, voltaje y corriente para el control de los microprocesadores para los inversores. Controla los módulos de disparo a través de fibra óptica, esto debido a que la fibra proporciona aislación eléctrica a las señales de control y retroalimentación.

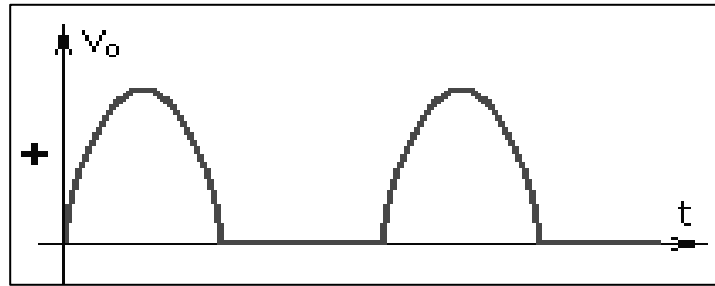
1.5 FUNDAMENTOS DE LA RECTIFICACIÓN

El uso de los rectificadores es de importancia en la industria debido a que transforma la AC en DC, para su posterior uso en diversas aplicaciones como, por ejemplo, cargador de baterías, fuente de poder. Sin embargo, actualmente los camiones de minería utilizan motores de tracción AC para su propulsión, utilizando una parte inversora de corriente conformada por IGBT que se explicarán mejor en el siguiente capítulo.

Los rectificadores se pueden clasificar según su voltaje de entrada en una red monofásica o una red trifásica de voltaje, forma de activación si son circuito no controlados o controlados que utilizan tiristores en reemplazo de los diodos, también se subdividen en 2, dependiendo de su señal de salida se tiene los de media onda y los de onda completa.

1.5.1 Rectificadores de media onda no controlados

Los rectificadores de media onda se componen de un diodo en el caso del monofásico y con 3 diodos en el caso del trifásico. Este tipo de rectificador solo mantiene la parte positiva de la onda, mientras que la parte negativa es eliminada. La desventaja que tiene este tipo de rectificador es que no se aprovecha toda la potencia producto de la eliminación del semi-ciclo negativo y su forma no se asemeja con una onda constante, lo que dificulta la eliminación del rizado para obtener una DC, un ejemplo claro se puede apreciar en la Figura 1-2 donde existe un voltaje monofásico rectificado de tipo media onda

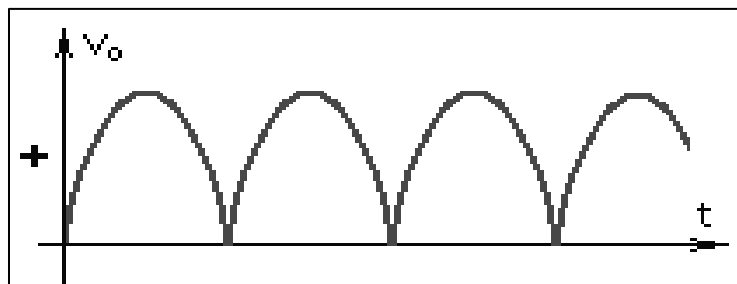


Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Rectificador_de_media_onda

Figura 0-2 Señal de salida de un rectificador de media onda

1.5.2 Rectificadores de onda completa no controlado

Los rectificadores de onda completa o puente Graetz, por otro lado, están compuestos por 4 diodos en el caso de voltaje monofásico y 6 diodos en el caso de voltaje trifásico, este tipo de rectificadores utiliza los dos ciclos del voltaje de entrada, siendo esta su principal ventaja sobre los de media onda, es porque ellos que aprovechan tanto la componente positiva como la negativa de la onda, haciéndolos más eficientes y más similares a la forma de la corriente continua. En la figura 1-3 se puede apreciar un rectificador de onda completa monofásico.

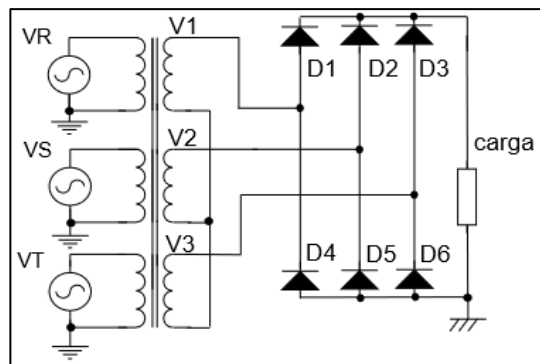


Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tensi%C3%B3n_rectificada_onda_completa.png

Figura 0-3 Señal de salida de un rectificador de onda completa

1.6 RECTIFICACIÓN DEL SISTEMA

El rectificador que se utilizará en el sistema de propulsión es el rectificador de onda completa trifásico que utiliza 6 diodos ubicados 2 por cada fase en oposición entre si, la alimentación al panel es de la red trifásica con una conexión en forma de estrella que entrega un voltaje de 380V como se puede apreciar en la figura 1-4.

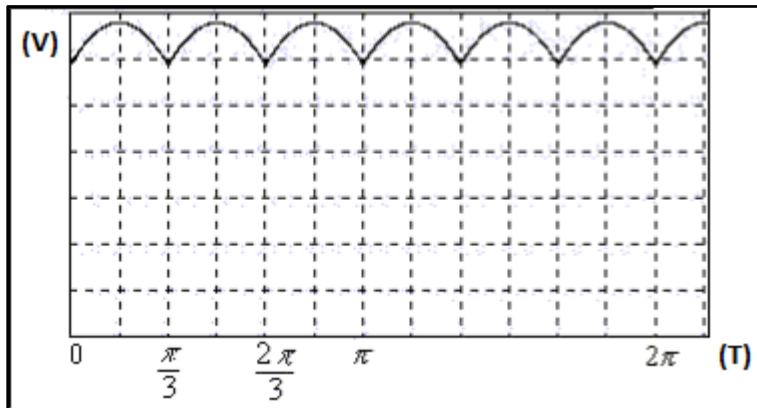


Fuente: <https://www.uv.es/emaset/iep00/IEP6-0607.pdf>

Figura 0-4 Esquema de un rectificador trifásico onda completa.

1.6.1 Cálculo de tensión DC

A continuación se exponen los calculos teórico para la salida DC del rectificador que tiene un pequeño rizado de $\frac{\pi}{3}$ de periodo mostrado en la figura 1-5 y la señal será evaluada entre $\frac{\pi}{3}$ y $\frac{2\pi}{3}$, analizando solo el semiperiodo de esta señal que es de mayor frecuencia.



Fuente: <https://www.uv.es/emaset/iep00/IEP6-0607.pdf>

Figura 0-5 Respuesta de un rectificador trifásico onda completa.

Dado que:

$$Vm = \sqrt{2} * \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}}$$

$$Vm = 310v$$

$$DC = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{\frac{2\pi}{3}} Vm * \text{Sen } wt \, dwt$$

$$DC = \frac{3Vm}{\pi} (-\text{Cos } wt)_{\pi/3}^{\frac{2\pi}{3}}$$

$$DC = \frac{3Vm}{\pi} \left(-\text{Cos } \frac{2\pi}{3} + \text{Cos } \frac{\pi}{3} \right)$$

$$DC = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} Vm$$

$$DC = 1,653 * Vm$$

$$DC = 514,3V$$

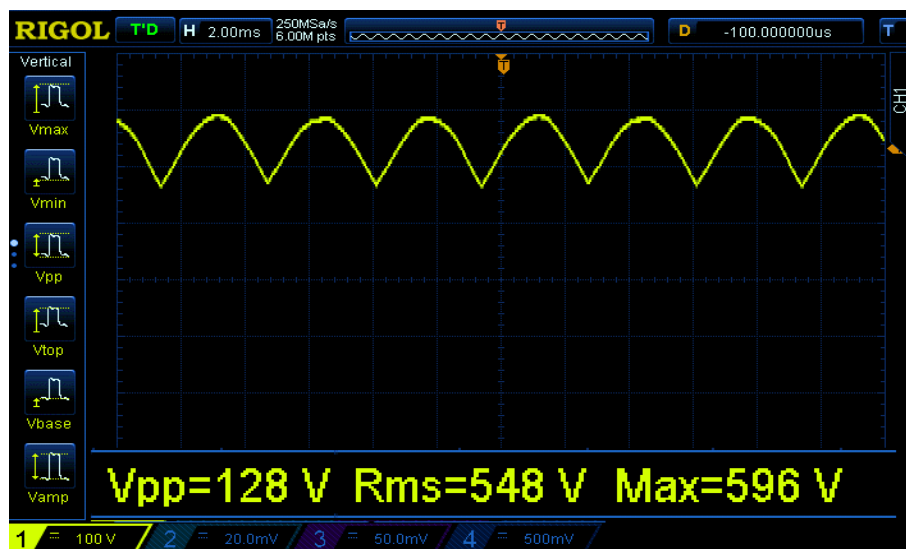
En la salida del rectificador se obtiene un voltaje continuo pulsante de 514,3v.

1.6.2 Etapa de rectificación práctica

Para la simulación se utilizan los módulos de 380V de los laboratorios, los cuales poseen un contactor para accionar la tensión trifásica, este voltaje será de menor magnitud comparada con la del camión debido a que alcanza voltajes cercanos a los 1.400V.

El diodo utilizado es el “41A281727P1”, este diodo está diseñado para elevadas potencias. Para la simulación fue seleccionado el diodo “1N5408” que cumple el mismo propósito que el anteriormente mencionado, pero a una escala menor.

La etapa de rectificación de voltaje se logra con éxito, resultando a su salida una DC pulsante. Para realizar esta prueba se instala como carga una resistencia de $47\text{K}\Omega/10\text{W}$. Como se puede apreciar en la figura 1-6, todo esto con el fin del análisis de la onda de rizado que se obtiene para su posterior cálculo.



Fuente: propia obtenida en el osciloscopio del aula para propósito de trabajo de título

Figura 0-6 Respuesta práctica del rectificador trifásico

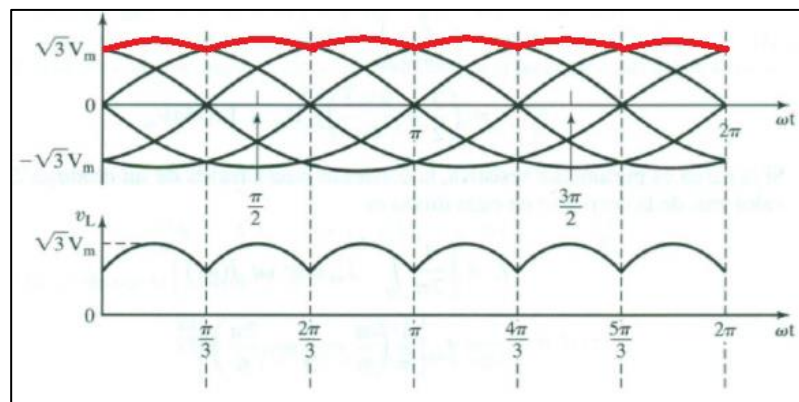
1.7 FILTRO

Un filtro electrónico se utiliza con mucha frecuencia en un sin fin de aplicaciones electrónicas debido a la importancia de su función, de tal forma que elimina la frecuencia de la señal de entrada para obtener lo que se requiera en diferentes sistemas.

Antes de aplicar este filtro se deben conocer características muy importantes de lo que se quiere filtrar, como tensiones, frecuencias, etc.

1.7.1 Rizado

Posterior al procedimiento de rectificación, muchas veces se presenta una envolvente (pulsante) en la tensión de salida que queda tras el cambio a DC, a este efecto se le denomina rizado y se puede apreciar a continuación en la figura 1-7:



Fuente: https://es.m.wikipedia.org/wiki/Rectificador_trif%C3%A1sico

Figura 0-7 Comparación entre la entrada VS la salida del rectificador

Se puede observar claramente que quedan componentes senoidales en la tensión de salida desfasadas 120° en esta rectificación trifásica de onda completa. En otros casos de rectificación, el rizado puede variar ya que dependerá de cuantas fases se rectificarán y si será de media onda o de onda completa, a través de esto se puede inferir, que mientras más fases existan y si la rectificación es de onda completa, se generará menor rizado.

1.7.2 Armónicos

¿Por qué es necesario filtrar las distorsiones para proporcionar el mínimo de rizado después de la rectificación?

Tanto como los componentes AC que quedan en la rectificación y distorsiones que se puedan generar bajo cualquier circunstancia, pueden afectar en la señal rectificada, debido a que los resultados de estas manifestaciones generan múltiplos de la frecuencia fundamental que disminuye su amplitud cada vez que decrece el múltiplo, a estas frecuencias se les llama armónicos. Si DC posee distorsión, puede que esté generando armónicos. Todo esto es con respecto a que la DC idealmente no posee frecuencia de oscilación, es decir no debe poseer armónicos.

Los armónicos de corriente son los más inquietantes, debido a que generan efectos negativos y traen como consecuencia sobrecalentamientos de los transformadores, disparos de interruptores automáticos, sobrecarga de los condensadores, daños en circuitos electrónicos, alteraciones en la forma de onda, ruido, entre otros.

1.7.3 Voltaje de rizado

Se le denomina voltaje de rizado a la diferencia entre el voltaje máximo y el voltaje mínimo de la forma de onda de salida de la fuente de voltaje DC. De tal forma que:

$$V.R = V_{DCmax} - V_{DCmin}$$

$$V.R(PP) = V_{carga}(T1) - V_{carga}(t2)$$

Esta tensión de rizado debe especificarse indicando la carga de la fuente con la que se ha realizado la medición, entendiéndose por carga como la cantidad de corriente que dicha fuente debe suministrar al circuito conectado a ella. Usualmente el voltaje de rizado se especifica para la máxima carga que puede manejar la fuente de tensión DC.

1.7.4 Factor de rizado

Este factor es la relación porcentual entre voltaje de rizado y el valor máximo de la fuente de voltaje DC. Esto es:

$$FR = \frac{V_r}{V_{DCmax}} \cdot 100\% = \frac{V_{DCmax} - V_{DCmin}}{V_{DCmax}} \cdot 100\% = \frac{V_{AC}}{V_{DC}}$$

Al igual que el voltaje de rizado, el factor de rizado se especifica para la máxima carga que puede manejar la fuente de voltaje DC.

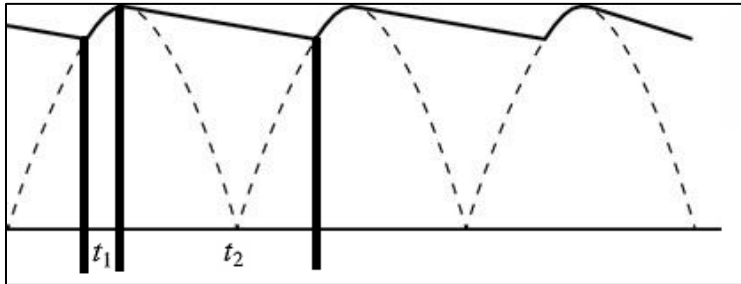
1.8 ETAPA DE FILTRADO PRÁCTICO

Al hacer un análisis a la envolvente obtenida de la etapa rectificadora, se puede realizar el cálculo del voltaje de rizado y el factor de rizado:

$$\text{Voltaje de rizado} = 548 \text{ V.} - 468 \text{ V.} = 128 \text{ V.}$$

$$\text{Factor de rizado} = \frac{128 \text{ V.}}{548 \text{ V.}} \cdot 100\% = 23,4 \%$$

Una vez realizado estos cálculos, se procede a dar análisis para la solución al filtro, considerando que en la carga se observa que disminuye la tensión de rizado como lo muestra la figura 1-8.



Fuente: <https://sites.google.com/site/tsistemastecnologicos2/9-diodos>

Figura 0-8 Salida de la etapa de filtro capacitivo

Se considera que: T1= carga del condensador y T2=descarga del condensador, entonces:

$$V. \text{ rizado (p.p)} = V. \text{ carga}(t1) - V. \text{ carga}(t2)$$

$$I. (\text{carga}) = \frac{V. \text{ max} \cdot e^{-\frac{T}{R \cdot c}}}{R}$$

$$V. \text{ dc} = V. \text{ peak} - \frac{V. \text{ rizado(peak to peak)}}{2}$$

$$V. \text{ ac} = \frac{V. \text{ rizado(peak to peak)}}{2\sqrt{2}}$$

Estas ecuaciones son utilizadas para calcular el filtro capacitivo, hay que tener términos con el condensador para realizar el análisis.

$$V.r(pp) = V.carga(t1) - V.carga(t2)$$

Se considera $V.carga(t1) = V(Max)$ debido a que se necesita que el condensador se cargue instantáneamente al valor máximo de la red, y $V.carga(t2) = I.carga \cdot R$ (carga) entonces:

$$V.r(pp) = V.(Max) - V.(Max)e^{-\frac{T}{RC}}$$

$$V.r(pp) = V.(Max) \left(1 - 1e^{-\frac{T}{RC}}\right)$$

Pero se considera que $e^{-x} \approx 1 - X$, entonces:

$$V.r(pp) = V.(Max) \left(1 - 1 + \frac{T}{RC}\right)$$

Donde se considera $T=t2$ y $t2 = \frac{1}{6f}$ porque cada envolvente posee un tiempo de repetición de $\frac{1}{6f}$, entonces el $V.r(pp)$ da como resultado:

$$V.r(pp) = \left(\frac{1}{6 \cdot f \cdot R \cdot C}\right)$$

Una vez obtenido el voltaje de rizo peak to peak se puede sacar el $V.dc$ y el $V.ac$:

$$V.dc = V.max - \frac{\left(\frac{1}{6 \cdot f \cdot R \cdot C}\right)}{2} = \frac{V.max(12 \cdot f \cdot R \cdot C - 1)}{12 \cdot F \cdot R \cdot C}$$

$$V.ac = \frac{\left(\frac{1}{6 \cdot f \cdot R \cdot C}\right)}{2\sqrt{2}} = \frac{V.max}{12 \cdot \sqrt{2} \cdot R \cdot f \cdot C}$$

Una vez obteniendo estos resultados con respecto al condensador se determina el factor de rizado.

$$Factor\ de\ rizado = \frac{V.ac}{V.dc} = \frac{V.max}{\sqrt{2} \cdot 12 \cdot R \cdot F \cdot C} \cdot \frac{12 \cdot F \cdot R \cdot C}{V.max(12 \cdot f \cdot R \cdot C - 1)}$$

$$F \cdot r = \frac{1}{12 \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot R \cdot C - \sqrt{2}}$$

$$F \cdot r \cdot 12 \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot R \cdot C - F \cdot r \sqrt{2} = 1$$

$$c = \frac{1}{F \cdot r \cdot 12 \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot R} + \frac{F \cdot r \sqrt{2}}{F \cdot r \sqrt{2} \cdot 12 \cdot f \cdot R}$$

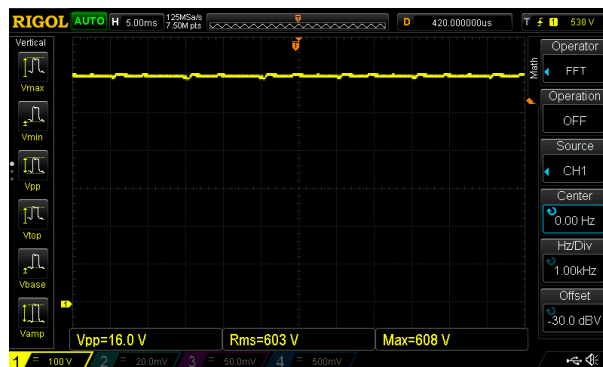
$$c = \frac{1}{12 \cdot f \cdot R} \left(\frac{1}{F \cdot r \sqrt{2}} + 1 \right)$$

Una vez despejado el condensador de la ecuación del factor de rizado y considerando que los términos f =Frecuencia, R = carga(motor), $F \cdot R$ =Factor de rizado se puede obtener el condensador de filtro.

$$c = \frac{1}{12 \cdot 50 \cdot 600} \left(\frac{1}{\sqrt{2} \cdot 0.234} + 1 \right)$$

$$c = 11,17 \mu F.$$

Se obtiene como resultado $C = 11,17 \mu F$, por lo tanto, de manera práctica se utilizará un condensador de $20 \mu F / 600V$, que a continuación será el filtro del puente rectificador, el resultado se muestra en la figura 1-9.



Fuente: propia obtenida en el osciloscopio del aula para propósito de trabajo de título

Figura 0-9 Salida práctica del rectificador

Se puede observar que se reduce el V. (peak to peak) = 16V. Logrando disminuir el voltaje de rizado que se observa sin el filtro.

1.9 PRIMERA ETAPA DE SIMULACIÓN

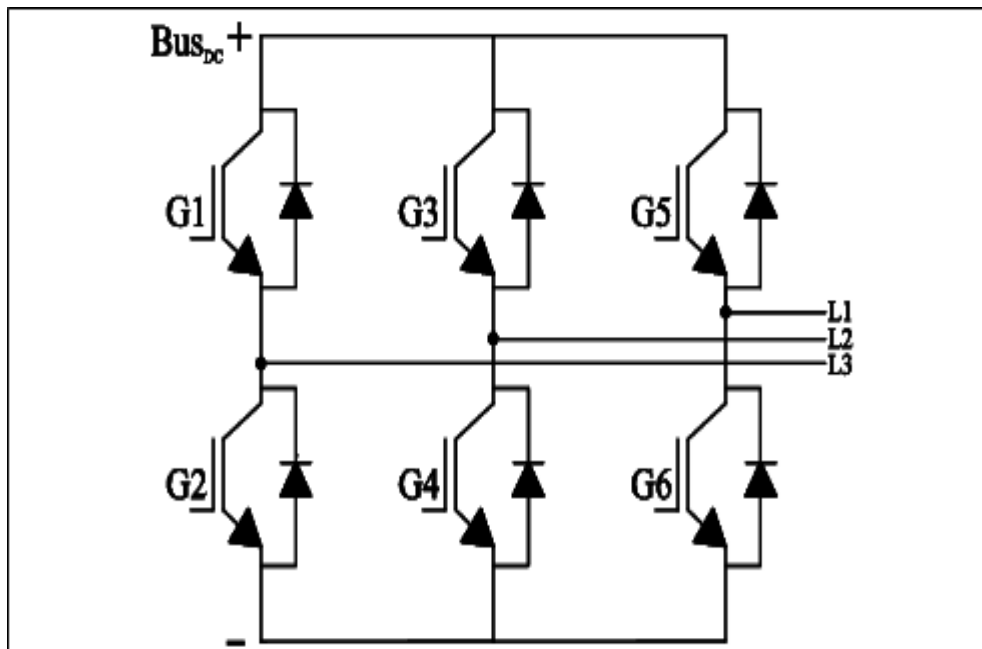
Como se menciona anteriormente, en el camión el alternador es el que genera AC. En la simulación es reemplazada con un módulo con conector 380 V, donde para energizarlo se ocupa un switch, este posee la tarea de energizar la bobina de un contactor para suministrar la corriente alterna trifásica. Una vez realizado esto se le conecta los 380V al puente rectificador logrando con éxito la rectificación con componentes AC, después de dar análisis y registrar la respuesta del rectificador se le aplica el filtro comprobando en el osciloscopio que es una señal DC.

Cabe mencionar que a la señal DC rectificada no se le aplica carga debido a que es utilizada de modo de simulación y análisis en alta potencia. Esta tensión rectificada es reemplazada por un voltaje más pequeño para tener el control de un motor paso a paso de 15V.

CAPÍTULO 2: CONTROL DE BAJA Y ALTA POTENCIA PARA LA PROPULSIÓN DEL
CAMIÓN

2.1 EL INVERSOR

El inversor o convertidor se encuentra en la parte final de la etapa de propulsión del camión, cumpliendo la función de transformar un voltaje continuo que entrega la etapa de rectificación y filtrado, a una salida donde se obtiene un voltaje alterno de magnitud y frecuencia variable. Esta formado principalmente por dispositivos de potencia controlados mediante una señal generada por hardware. En la figura 2.1 se puede apreciar el esquema de un inversor trifásico en puente completo, compuesto por 6 unidades de transistores IGBT's cada uno con su diodo de conexión inversa.



Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Inversor-Trifasico-de-Puente-Completo-en-Conmutacion-SPWM_fig1_299307352

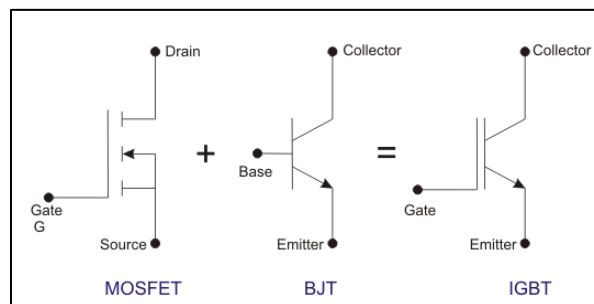
Figura 0-10 Puente trifásico conformado con IGBT's

El inversor que se ubica en el camión AC se controla para producir un deslizamiento y eficiencia óptimas en los motores de tracción (GDY106). A bajas velocidades el inversor actúa como un modulador de amplitud de pulso, a mayores velocidades el inversor funciona como modulador de onda cuadrada para poder convertir el voltaje DC a voltaje AC.

2.1.1 IGBT

El transistor bipolar de puerta aislada (IGBT) es un dispositivo de conmutación que mezcla características de los transistores BJT y los MOSFET, tienen la ventaja sobre los otros dispositivos de ser totalmente controlado, también se obtiene una buena respuesta en frecuencia y el manejo de altas potencias.

Este dispositivo tiene un diseño apto para que éstos trabajen en la zona de saturación, entrando en estado de conducción o en la zona de corte donde el IGBT se comporta en estado de bloqueo. También tiene la capacidad de controlar elevadas potencias entre colector y emisor teniendo bajas pérdidas de conducción en estado activo, este comportamiento tiene semejanza a un transistor BJT. El control se hace mediante un voltaje, con una baja señal que ingresa por la puerta (Gate), esto se debe a que tiene el mismo funcionamiento de puerta aislada de que posee un MOSTET.



Fuente: <https://www.electrical4u.com/insulated-gate-bipolar-transistor-igbt/>

Figura 0-11 Conformación de un IGBT

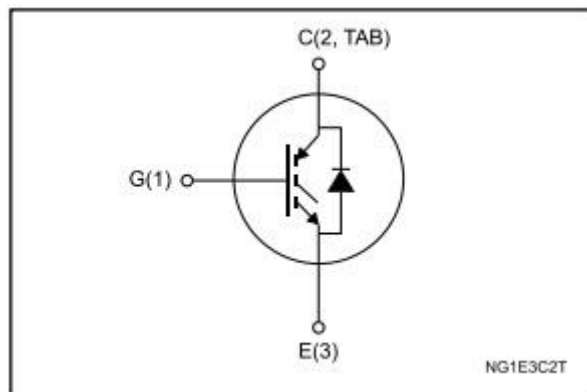
2.1.2 Características del IGBT

En la búsqueda de un IGBT se debe tener presente varios parámetros que el dispositivo de conmutación elegido tiene que cumplir, el voltaje máximo que soporta entre colector y emisor el IGBT debe ser mayor que la tensión ingresada por su colector, esto es debido a que puede causar la destrucción del componente. También se considera que el componente trabaje dentro del rango de frecuencia que se utiliza en la señal de control para que no se produzcan distorsiones o ruido en la generación de la onda de salida.

El IGBT que se utiliza en esta simulación es el modelo STGF10NC60KD de la marca ST microelectronics. Siendo un dispositivo de rápida conmutación y baja pérdida en VCE en estado activo.

Características principales del IGBT:

- Voltaje Colector-Emisor (VCE): 600V
- Corriente Colector (IC): 20A
- Voltaje Gate-Emisor (VGE): $\pm 20V$
- Potencia total disipada: 65W



Fuente: <http://www.st.com/resource/en/datasheet/stgp10nc60kd.pdf>

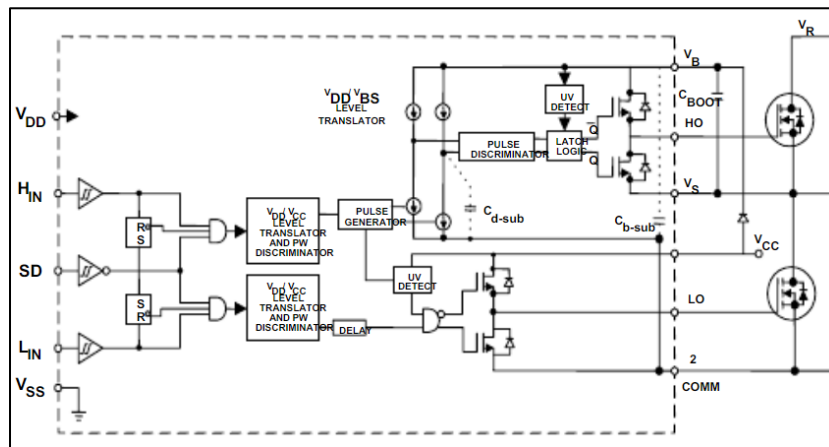
Figura 0-12 Diagrama de la estructura interna

2.2 DRIVER

El IR2110 es un controlador de alta velocidad para IGBT's y MOSFET's. El trabajo de este circuito integrado es amortiguar la señal que entran a los IGBT's y además permite la conmutación efectiva de estos. Este dispositivo es apto para uso en aplicaciones de alta frecuencia. El canal flotante se puede usar para conducir un MOSFET's o IGBT's de potencia de canal N en la configuración del lado alto que opera hasta 500 o 600 voltios dependiendo de qué driver se utiliza.

Consultando el datasheet del driver, aparece una configuración típica donde externamente se observa un circuito Bootstrap. Este circuito aprovecha la carga de un capacitor, para usarlo como fuente flotante en la activación y desactivación del dispositivo principal de conmutación en el lado alto del circuito.

La configuración que se implementa es la mostrada en la figura 2-4. Esta configuración es la que se utiliza en un driver con sus respectivos IGBT's para la simulación del puente, donde la función es conocer los componentes reales del camión.



Fuente: <https://es.scribd.com/doc/79116023/an-978>

Figura 0-13 Diagrama de conexión driver IR2110

El condensador de bootstrap contiene suficiente energía para suministrar la salida del circuito que impulsa el "HO" mientras que LO está apagado. Mientras que LO está activado (y HO apagado), el condensador se carga desde V_{CC} . Cuando LO está apagado y HO encendido, la energía almacenada debe suministrar el circuito del lado alto.

Este circuito es bastante común cuando se usan MOSFET's e IGBT's de canal n. Requiere frecuencias de conmutación suficientemente altas y tiempos de activación no demasiado altos del HO.

Como se dijo el diodo de arranque y el condensador son los componentes externos estrictamente necesarios para el funcionamiento en una aplicación PWM. El voltaje que observa el condensador bootstrap es solo el suministro de V_{CC} . Para el cálculo mínimo del condensador se puede observar en la siguiente ecuación entregada por el fabricante.

$$C \geq \frac{2 \left[2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{cbs(leak)}}{f} \right]}{V_{CC} - V_f - V_{ls} - V_{min}}$$

Donde:

Q_g = capacitancia de gate del IGBT del lado alto.

F = frecuencia de operación.

$I_{cbs(leak)}$ = corriente de fuga del condensador de Bootstrap.

$I_{qbs(max)}$ = corriente máxima de reposo.

V_{CC} = fuente de tensión de la sección lógica

V_f = tensión directa a través del diodo de Bootstrap.

V_{ls} = caída de tensión en el IGBT o carga del lado bajo.

V_{min} = mínima caída de tensión entre VB y VS.

Q_{ls} = Se requiere una carga de cambio de nivel por ciclo (normalmente 5 nC para 500 V / 600 V)

Considerando que los elementos a utilizar es un diodo 1n4148 ubicado en el pin VCC y VP, se hace el cálculo práctico, consultando los respectivos datasheet de los elementos a utilizar.

$$C_{bootstrap} = 0.1 \mu F$$

2.3 AISLACIÓN ETAPA DE CONTROL DE POTENCIA

Existen sistemas digitales controladores que deben realizar funciones en etapas de potencias, en base a IGBT para actuar sobre los motores de inducción. El manejo de estas potencias implica que se debe tener en consideración la seguridad eléctrica para los operarios y de protección para el sistema digital.

Lo que normalmente se utiliza son contactores, interruptores chopper, entre otros dispositivos que llegan al mismo objetivo, de aislar la etapa de potencias con los sistemas digitales controladores.

En el camión existe un Panel de Control Integrado (ICP), que está compuesto de 3 tarjetas de control: El PSC, el TCI y el TMC, cada una de estas se comunica a través de fibra óptica entre ella y otros sistemas. Este es un claro ejemplo que estos sistemas digitales controladores están en contacto indirectamente con su correspondiente sistema de potencia, esto es debido a que posee esta dicha aislación de etapas, asegurando la extensión de vida útil de las tarjetas del panel.

2.3.1 Fibra óptica

La comunicación que se realiza en el camión entre algunas tarjetas es a través de la fibra óptica, siendo una de las más importantes las tarjetas de fibra óptica para el control de los IGBT's.

La fibra óptica consiste en unos cables finos transparentes de vidrio o materiales plásticos, por el que se envían pulsos de luz que representan los datos de transmisión, esto conlleva a tener una comunicación instantánea en los controladores con los conmutadores y una gran cantidad de beneficios, por ejemplo, permite flujos muy elevados (del orden del GHz), debido a su gran ancho de banda, ocupa poco espacio ya que posee un tamaño pequeño y posee gran flexibilidad lo que facilita la instalación.

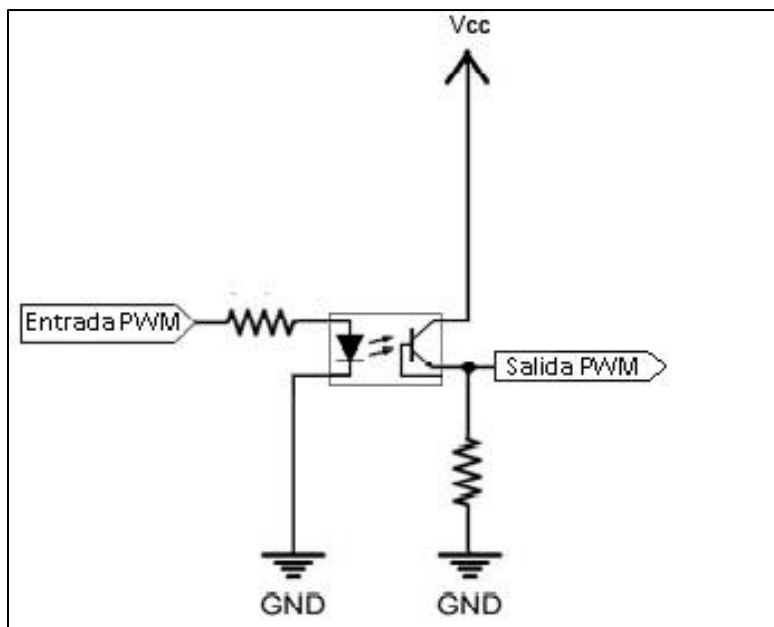
A pesar de los beneficios anteriormente mencionados, donde realmente juega un rol fundamental, es proveer gran seguridad a perturbaciones de origen electromagnético debido a que no es afectada por ellas por lo tanto no se producen interferencias. Estas características hacen que la fibra óptica no solo es considerada como buen sistema de comunicación, si no también buen aislador de etapas.

2.3.2 Optocoplador

En base a lo anteriormente mencionado, para separar la etapa de control al driver de los IGBT's, se piensa en un dispositivo llamado optocoplador. Mediante este dispositivo se obtiene un acoplamiento óptico y al mismo tiempo un aislamiento eléctrico. Este acoplamiento se realiza en el espectro infra-rojo con dispositivos emisores de luz, que actúan como emisores y los dispositivos detectores de luz o mejor dicho optodetectores, actúan como receptores.

La razón esencial para efectuar el acoplamiento óptico y aislamiento eléctrico es por protección del sistema generador de PWM, es por si en la etapa de potencia se produce un cortocircuito, o cualquier otro tipo de anomalía eléctrica, el optocoplador protege a los sistemas digitales de control.

El dispositivo encargado para realizar la protección es el 4n26. La configuración que se realiza para la conexión se observa en la figura 2-5, donde el microcontrolador envía el PWM que entra por la resistencia de entrada y produce una corriente activando el fotodiodo que envía la señal de luz internamente hasta la salida. Considerando $V_{CC} = 12V$, en la salida se puede observar que se utiliza la configuración emisor seguidor para conservar la fase del PWM en la salida.



Fuente: <https://www.vishay.com/docs/83725/4n26.pdf>

Figura 0-14 Esquema interno del 4n26

Para el cálculo de la resistencia de entrada, se observa el datasheet del dispositivo y se observa que el voltaje del diodo es 3V y la corriente máxima que puede pasar por él, es de 60 mA.

Sabiendo que el microcontrolador entrega una tensión de 5V, se desarrolla una ecuación a través leyes de kirchhoff de voltaje, entonces:

$$5V - I \cdot R_{entrada} - 2 = 0$$

Sabiendo que debe fluir una corriente menor a 18mA, la corriente se considera 9 mA ($I=9\text{mA}$), entonces.

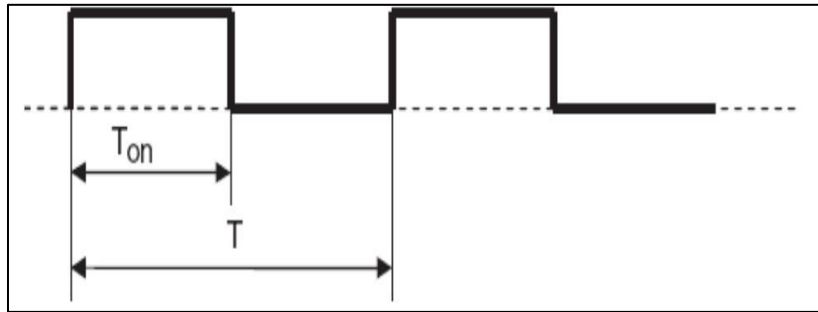
$$R_{entrada} = 220\Omega$$

Para el cálculo de R_1 , se considera que $V_{DD} = 12V$ debido a que es la tensión aproximada para poder realizar el disparo de los IGBT's a través de los drivers. Entonces se considera R_2 como una resistencia alta, para producir baja corriente que en la entrada del IR2110, entonces.

$$R_{salida}=220K\Omega$$

2.4 SEÑAL DE CONTROL

Las señales de control de la presente simulación son enviadas desde el microcontrolador encargado hasta el controlador del motor paso a paso, la primera señal está compuesta de 2 estados, un nivel alto y un nivel bajo donde se modifica la frecuencia para cumplir con el objetivo de variar la velocidad del motor a utilizar.



Fuente: <http://sistemaselectricosdelautomovil.com/wp-content/uploads/2015/02/Se%C3%B1al-PWM-1.jpg>

Figura 0-15 Señal PWM

Como se puede observar en la figura 2-6 los valores son t_{on} que es el tiempo de encendido con un nivel alto y el t_{off} es el tiempo de apagado donde se envía un nivel bajo, la suma de estos 2 tiempo se obtiene el periodo de la señal a generar, mientras menor es el valor del periodo, mayor será la frecuencia por lo tanto es inversamente proporcional.

$$\text{Entonces: } f = \frac{1}{T}$$

La segunda señal de control que envía el microcontrolador es el sentido de giro, donde dependiendo del nivel que se reciba en el controlador será la dirección en que se moverá el motor paso a paso, si se envía un nivel alto el motor tendrá sentido de giro hacia la derecha y cuando sea un nivel bajo el sentido de giro será hacia la izquierda.

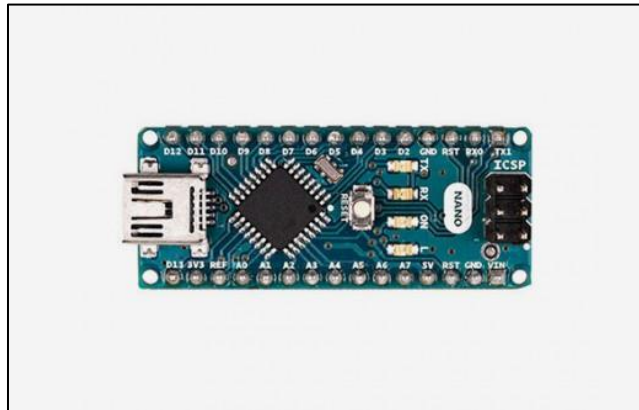
2.5 DISPOSITIVO DE CONTROL

El dispositivo encargado de generar las señales de control para disparar los IGBT's es un ARDUINO nano, siendo esta una plataforma electrónica que permite el uso del software y hardware con características necesarias para cumplir dicha función.

Este dispositivo tendrá la función dentro de la simulación de representar la tarjeta TMC que se encuentra en panel de control del camión.

Las características principales del Arduino son:

- Microcontrolador ATmega328.
- Voltaje de operación 5V.
- Voltaje de entrada 7-12V.
- 14 pines digitales de I/O (6 salidas PWM).
- 8 entradas análogas.
- 32k de memoria Flash.
- Reloj de 16MHz de velocidad.



Fuente: arduino.cl/arduino-Nano/

Figura 0-16 Arduino Nano

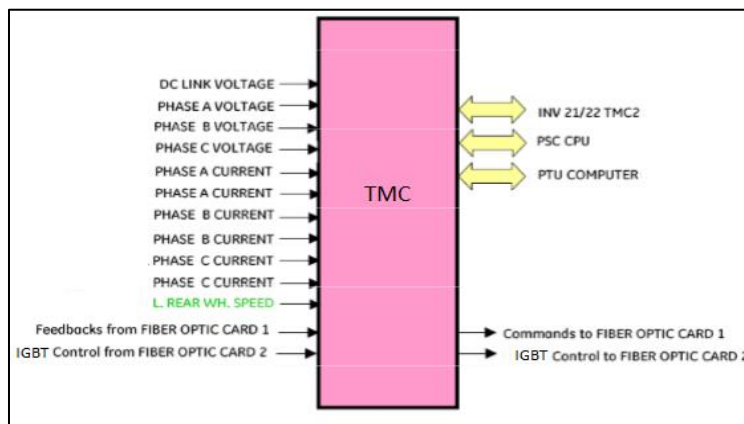
Como se ha mencionado anteriormente el ARDUINO Nano tiene entradas analógicas que gracias a los conversores analógico/digital puede entender ese valor el microcontrolador, pero no tiene salidas analógicas puras y para solucionar esto, usa la técnica de PWM.

El conversor tiene una resolución de 10 bits, devolviendo enteros entre 0 y 1023. Los pines analógicos de Arduino también tienen todas las funcionalidades de los pines digitales, por lo tanto, si se necesitan más pines digitales es posible usar los pines analógicos.

2.5.1 TMC

El sistema de control ICP (Panel de Control Integrado) de la maquinaria consta de una tarjeta que controla la velocidad de los motores, el TMC (Controlador de Inversores), básicamente es la CPU de los inversores, y cada motor necesita uno.

La tarjeta puede recibir y enviar datos dependiendo de lo que el motor requiera. A continuación, se presenta en la figura 2-10, una de las tarjetas con sus respectivas entradas y salidas.



Fuente: https://drive.google.com/file/d/1yCcEM_DJ_A_pJCgG2h0EqsdA4Su1ofzu/view

Figura 0-17 Esquema de la tarjeta TMC del camión

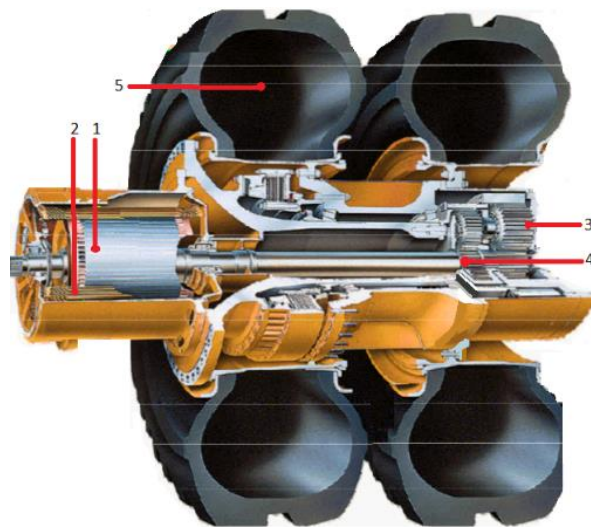
Esta tarjeta recibe señales de voltaje de enlace, detención de voltajes y corrientes por fases, velocidad del motor, retroalimentaciones de las tarjetas de fibra óptica y para el control del sistema de los inversores. Así mismo es capaz de comunicarse con otros sistemas como, por ejemplo, con las otras tarjetas de los inversores para la total sincronización de los sistemas, también con el sistema PSC, determina las velocidades óptimas de operación y el interfaz PTU que es el sistema de comunicación del técnico con el camión.

Esta tarjeta se entiende que es fundamental ya que es el controlador de los IGBT's, por lo cual la velocidad de repuesta debe ser rápida. Esta tarjeta posee fibra óptica y es la encargada de comunicar todos los datos a los IGBT's, lo que se transforma en la eliminación de los indeseados retardos, ya que se transportan los datos a través de señal luminosa.

2.6 MOTOR DE TRACCIÓN POR INDUCCIÓN AC

El encargado de realizar los movimientos del camión son los 2 motores de tracción traseros, estos son fundamental debido a que todas las etapas anteriores son realizadas para poder energizarlos y tener completo control sobre ellos, sin mencionar la cantidad de tarjetas eléctricas y de sensado que dependen de estos.

El motor por inducción de AC es el encargado de transformar energía eléctrica en mecánica. Considerando las dimensiones del camión y el peso de transporte del mismo, el motor fue creado para estas características, por eso el motor posee algunos elementos importantes que se presentan a continuación en la figura 2-9, donde posteriormente serán explicadas con detalle.



Fuente: https://drive.google.com/file/d/1yCcEM_DJ_A_pJcG2h0EqsDA4Su1ofzu/view

Figura 0-18 Motor de tracción

Rotor Jaula de ardilla: Un motor eléctrico con un rotor de jaula de ardilla también se llama "motor de jaula de ardilla". En su forma física, es un cilindro montado en un eje. Internamente contiene barras conductoras longitudinales de aluminio o de cobre con surcos y conectados juntos en ambos extremos poniendo en cortocircuito los anillos que forman la jaula. La base del rotor se construye con láminas de hierro apiladas.

Su funcionamiento comienza cuando se energizan las bobinas del estator, estas excitan al campo magnético a rotar alrededor del rotor. El movimiento relativo entre este campo y la rotación del rotor induce corriente eléctrica, un flujo en las barras conductoras. Alternadamente estas corrientes que fluyen en los conductores que reaccionan con el campo magnético del motor producen una fuerza que actúa en el rotor, dando como resultado una fuerza para dar vuelta al eje. El rotor gira por medio del campo magnético, pero en un índice levemente más lento de la rotación. La diferencia en velocidad se llama "deslizamiento" y aumenta con la carga.

Los rotores para la red trifásica tienen variaciones en la profundidad y la forma de las barras para satisfacer los requerimientos del diseño.

Bobinas del estator: Estas bobinas son trifásicas y están desfasadas entre sí 120° en el espacio. Cuando por estas bobinas circulan corrientes trifásicas equilibradas, cuyo desfase en el tiempo es equivalente a 120° , se induce un campo magnético giratorio que envuelve al rotor. Este campo magnético variable va a inducir una tensión eléctrica en el rotor según la Ley de inducción de Faraday.

Piñón solar: Es una rueda dentada, destinada a ser la principal responsable de los movimientos del engranaje planetario.

Engranaje planetario: Un engranaje planetario o engranaje epicicloidal es un sistema de engranajes que consiste en uno o más engranajes externos o planetas que rotan sobre el piñón central o solar.

Neumáticos: Su función principal es permitir un contacto adecuado por adherencia y fricción con el pavimento, posibilitando el arranque y el frenado.

2.7 MOTOR PASO A PASO

El motor paso a paso con su controlador son parte de la carga de esta simulación, ejecutando la función de ser el motor de propulsión. Se busca el monitoreo del buen funcionamiento como se realiza en el camión AC de minería.

Estas son algunas de las características importantes del motor paso a paso.

Corriente: 1.2 Amperios por bobinado.

Tensión: 4 V.

Resistencia: 3.3 Ohm por bobina.

Torque: 3.2 kg/cm (44 oz-in).

Inductancia: 2.8 mH por bobina.

En la figura 2-10 se muestra el motor paso a paso modelo 42SHD01, donde se observan los cables a sus bobinas donde a través del driver A4988 puede ejecutar los movimientos.



Fuente: <http://www.mcielectronics.cl/shop/product/motor-paso-a-paso-9804>

Figura 0-19 Motor paso a paso

El controlador A4988 es el encargado del manejo del motor de propulsión de la simulación, las señales de control son para la velocidad de giro que son generadas y enviadas por el microcontrolador. En la figura 2-11 se observa el controlador A4988 en un pequeño formato.

Estos controladores permiten la utilización de voltajes entre 35V a 45V e intensidades de 2A hasta 2.5A, que son requeridos por estos motores y también limitar la corriente que circula por el motor.

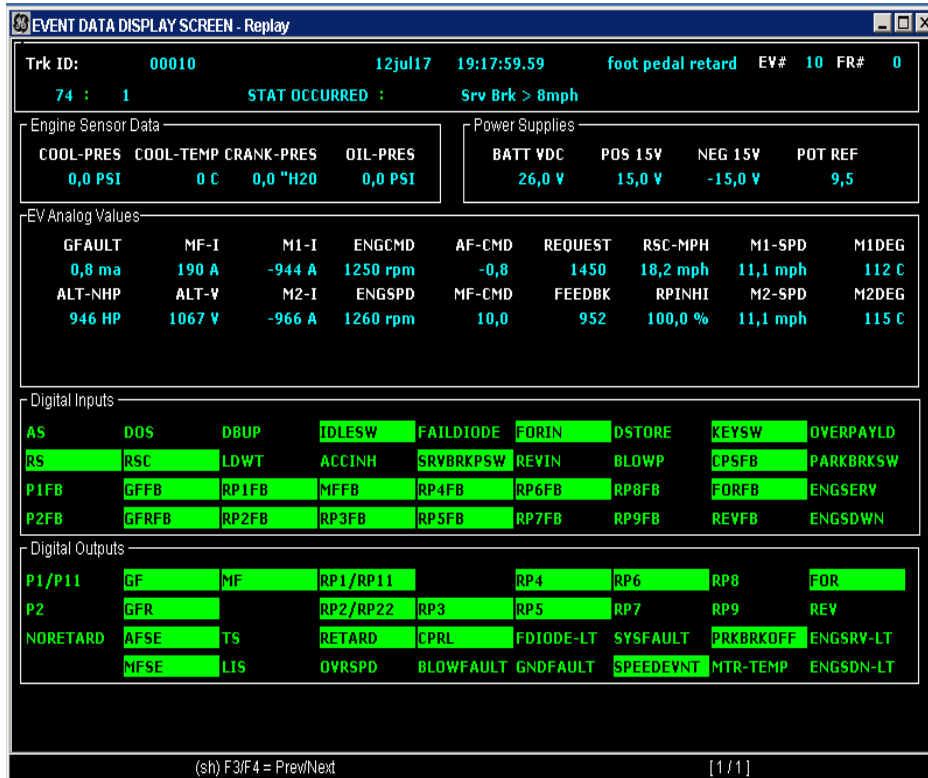
CAPÍTULO 3: INTERFAZ AL USUARIO Y COSTOS DE LA SIMULACIÓN

3.1 INTERFAZ DEL CAMION AC

El camión AC tiene incorporado paneles electrónicos computarizados, y son los encargados de llevar registro de todo tipo de sensado de la maquinaria. También posee una base de datos con valores análogos y digitales del camión. Conocer estos datos es fundamental debido a que, por ejemplo, un componente falla en un determinado tiempo y se desconoce por el operador, puede que el camión no trabaje a su máxima funcionalidad y en los peores casos la maquinaria deje de funcionar, esto se transformaría en costos por mantención y pérdida de producción.

Para acceder a los datos del camión existe un software que facilita el análisis de los parámetros debido a que esta fue diseñada con el propósito de registrar fallas automáticamente y se almacenen, donde posteriormente puede ser recuperada por el técnico de mantenimiento. El personal de mantenimiento puede establecer comunicación con la maquinaria mediante el uso de un computador portátil que posea el software, utilizando para ello el acceso por el puerto serial de comunicación ubicada en la cabina del operador a través de un cable serial RS-23. En los camiones mineros marca Komatsu que utilizan motores y alternadores de General Electric poseen el software "Wptu" creada por la misma marca para el sensado y monitoreo de la base de datos del camión. En la figura 3-1 se observa el software que se utiliza para detectar eventos en el camión AC.

En este software se pueden observar 6 cuadros. En un principio se encuentra la identificación del camión, el cual se lleva un registro de que camión se analiza, fecha, y que tipo de evento (falla) posee registrada la base de datos. Posteriormente se observa dos cuadros que poseen los datos de los sensores del motor y el sensor de la batería, en los sensores del motor los datos son entregados en temperatura y presión mientras que en los sensores de la batería son datos entregados en tensión.



Fuente: Propia conseguida en la práctica profesional para fines del trabajo de título

Figura 0-1 Software "Wptu" de General Electric

Debajo de los datos de los sensores de batería y motor se encuentran los valores análogos del motor, alternador, rectificador entre otros, donde sus datos son expresados en tensión, corriente, velocidad (RPM y MPH), temperatura (°C) y potencia (HP). Al final en los 2 últimos cuadros se encuentran los datos entrada y salida digital. En estos cuadros existen acciones que realiza o le suceden al camión donde los cuadros cambian de color verde cuando pasa.

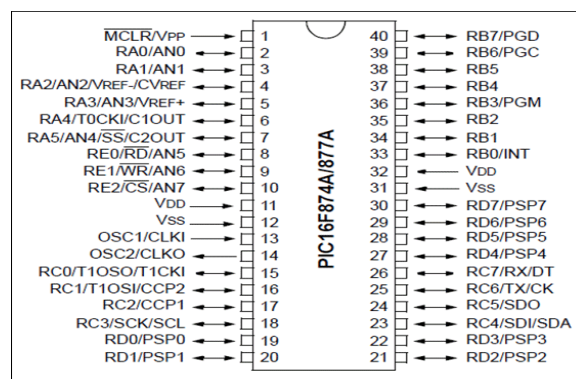
Gracias a esta interfaz el personal de mantenimiento fácilmente puede realizar un análisis profundo sobre los problemas del camión y poder localizar cual es la real falla para inmediatamente dar aviso y se solucionen los eventos.

3.2 INTERFAZ AL USUARIO DE LA SIMULACIÓN

La interfaz al usuario que se desarrolla en esta simulación tiene como objetivo la comunicación del operador con el microcontrolador principal, así poder comandar las funciones de encendido del sistema, visualización de información en la pantalla LCD, controlar el Arduino generador de PWM y detector de voltaje.

3.2.1 Controlador principal

El microcontrolador principal es el PIC16F877A de Microchip el cual pertenece a la familia de los microcontroladores de 8 bits, siendo parte de la gama media de los controladores donde se encuentran los modelos desde 18 hasta 68 pines. Las características principales de la gama media son las siguientes.: Arquitectura Harvard, Tecnología CMOS. En la figura 3-2 se puede apreciar el controlador PIC16F877A y sus pines de conexión.



Fuente: https://components101.com/sites/default/files/component_pin/PIC16F877A-Pinout.png

Figura 0-2 Microcontrolador "Pic 16877A"

Características generales:

CPU de arquitectura RISC (reduced instruction set computer).

Set de 35 instrucciones.

Todas las instrucciones se ejecutan en un único ciclo de instrucción.

Frecuencia de reloj de hasta 20Mhz.

Hasta 8k x 14 palabras de memoria de programa FLASH.

Hasta 368 x 8 bytes de memoria de datos de tipo RAM.

Hasta 246 x8 bytes de memoria de datos tipos EEPROM.

Modo de bajo consumo (sleep).

Rango de voltaje de operación desde 2,0 v a 5,5 v.

La programación del interfaz se realiza con un programa llamado PIC C COMPILER.

3.2.2 Oscilador

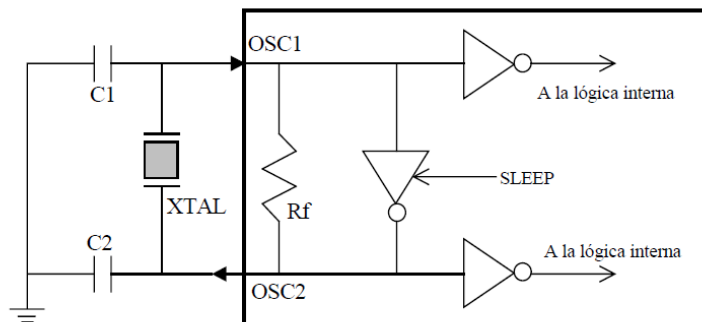
Los tres modos LP, XT y HS usan un cristal o resonador externo, la diferencia sin embargo es la ganancia de los drivers internos, lo cual se ve reflejado en el rango de frecuencia en el que trabaja y la potencia consumida. En la figura 3-3 se observan los rangos de frecuencia y sus capacitores recomendados para un oscilador.

Modo	Frecuencia típica	Capacitores recomendados	
		C1	C2
LP	32 khz	68 a 100 pf	68 a 100 pf
	200 khz	15 a 30 pf	15 a 30 pf
XT	100 khz	68 a 150 pf	150 a 200 pf
	2 Mhz	15 a 30 pf	15 a 30 pf
	4 Mhz	15 a 30 pf	15 a 30 pf
HS	8 Mhz	15 a 30 pf	15 a 30 pf
	10 Mhz	15 a 30 pf	15 a 30 pf
	20 Mhz	15 a 30 pf	15 a 30 pf

Fuente: <http://4.bp.blogspot.com/-Oj3wqeGgwog/UW5EOfnzY1I/AAAAAAAAAJY/F8TfqI5qDLc/s1600/frecuencia.PNG>

Figura 0-3 Tabla de osciladores con frecuencias y condensadores típicos

El modo de oscilador que se utiliza es el XT, trabajando a una frecuencia de 4Mhz y con capacitores cerámicos de 15pf. La conexión que se realiza con el cristal y los capacitores al PIC es en los pines 13 y pin 14, como se muestra en la figura 3-4.



Fuente: http://2.bp.blogspot.com/_OZN1v28i-z4/TG9Oq93VaQI/AAAAAAAAACE/QLtjMtnKNG/s1600/Captura.PNG

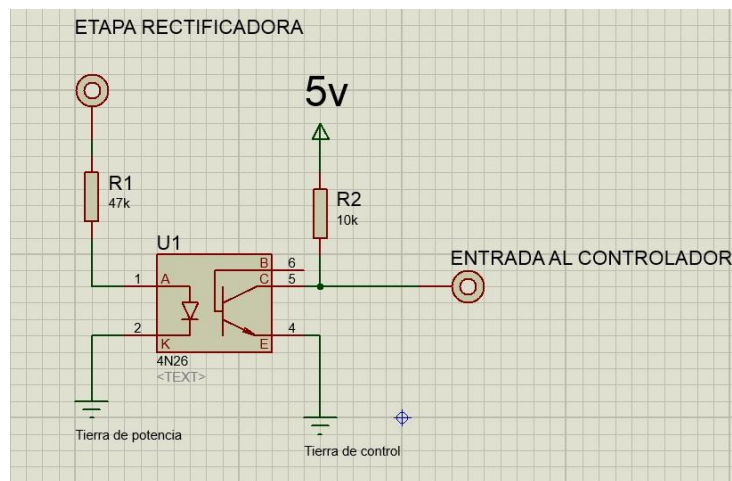
Figura 0-4 Conexión del XTAL con los condensadores al microcontrolador

3.2.3 Control de la alimentación

El control de la etapa de generación del sistema que es reemplazado por la alimentación de la red de 380V, es manejado por el microcontrolador principal, éste a través de un circuito acondicionador de señal, controla el encendido/apagado de la alimentación.

3.2.4 Señalización de voltaje

La detección de voltaje se encuentra después de la etapa de rectificación, señalizando si hay un voltaje en la carga de esta etapa. Esto es posible gracias a un optocoplador en serie a una resistencia de 47K Ω que van conectadas en paralelo a la resistencia de carga. Cuando se detecta la presencia de voltaje, el diodo emite una señal de luz que activa el transistor del lado de baja potencia del optocoplador, enviando una señal al microcontrolador. En la figura 3-5 se observa el circuito utilizado para sensar el voltaje en la etapa rectificadora.



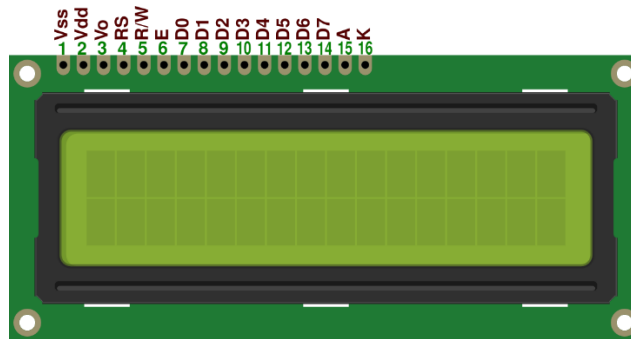
Fuente: propia obtenida en Proteus 8 con fines para trabajo de título.

Figura 0-5 Simulación del optocoplador para etapa de señalización de voltaje

3.2.5 Pantalla de visualización

La pantalla que se integra a la interfaz tiene como propósito entregar información que le solicite el operador, esta información son detalles del sistema en tiempo real, donde se visualiza datos de encendido/apagado de la etapa de alimentación, estado de la etapa de control de motor y sentido de giro del motor.

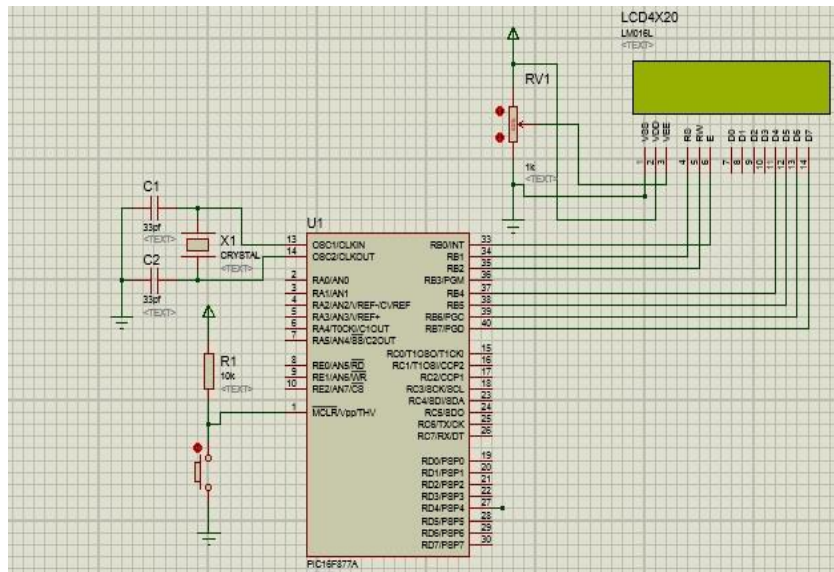
El módulo display que se utiliza es de 16 caracteres x 2 líneas de escritura con una pantalla de color azul de la marca “Farnell”, este módulo es compatible para comunicarse con el “PIC16F877A”.



Fuente: <https://paulvollmer.net/FritzingParts/parts/lcd-GDM1602K.html>

Figura 0-6 Pantalla LCD de 2X16 modelo GDM160k

La pantalla se conecta al PIC a través del pin RS para selección de registro al pin B1, RW para escritura o lectura al pin B2, E para habilitar la pantalla va al pin B0 y los pines D4, D5, D6 y D7 de la pantalla a los pines del PIC B4, B5, B6 y B7 donde se envía el dato que se muestra en el display. A continuación, se puede observar la conexión física ya explicada anteriormente en la figura 3-7.



Fuente: propia obtenida en proteus 8 con fines para trabajo de título.

Figura 0-7 Simulación de pantalla LCD a través del "PIC16f887A"

3.2.6 Modo de uso

La interacción del usuario con el microcontrolador es a través de interruptores con resistencias en configuración de pull-up, esta configuración tiene 2 estados definidos como ALTO y BAJO (HIGH/LOW) y así se evita tener lecturas erróneas por ruido en la entrada del dispositivo de control.

Interruptor 1: Tiene la función de controlar el encendido/apagado del módulo de alimentación de la red.

Interruptor 2: Activa al microcontrolador encargado de generar el PWM de la etapa inversora.

Interruptor 3: Designado para el sentido de giro del motor.

3.3 ANÁLISIS DE COSTOS

Para la realización del presente trabajo de título basado en una investigación aplicada, se requiere de materiales con un costo monetario asociado. Existen materiales y componentes utilizados que se obtuvieron del pañol de la carrera, como también existen materiales que se compran al extranjero y en tiendas locales. Ahí se debe entender la disponibilidad de tiempo, debido a que las compras al extranjero se hacen bajo el concepto que es más económico, pero se demoran en llegar y las compras realizadas localmente se realizaron bajo la urgencia de los materiales.

3.3.1 Hardware utilizado

Es importante determinar todos los componentes físicos para dar análisis a los costos totales del proyecto. En la tabla 3-1 se presentan los materiales y componentes y su costo final asociado.

Tabla 3-1 materiales utilizados para la creación de la simulación

Materiales y componentes	Cantidad	Costo asociado final (\$)	Costo asociado final (UF)
Módulos de accionamiento de energía trifásica	1	-	-
Diodos rectificadores	6	200	0.01
Condensador filtro	1	-	-
Optocoplador "4n26"	3	221	0.01
Resistencia de 47Kohm 1W	1	-	-

IGBT "STGF10NC60KD"	2	4.106	0.15
Driver "IR2110"	1	3.172	0.12
Diodos schottky "1n5817"	1	50	0.001
Condensador Bootstrap "0,1 μF "	1	20	0.0007
Transistores "2n2222a"	1	360	0.02
Arduino nano	1	6.050	0.22
Motor paso a paso	1	-	-
Pic 16F877A	1	2.030	0.07
Pantalla LCD	1	-	-
Relé de 24V/60mA.	1	-	-
Total		16.209	0.6

Fuente: propia creada con fines explicativos para el trabajo de título.

Los valores de las tablas que están en unidad de fomento (UF), son los del valor actual para el día martes 10 de julio del 2018 donde el valor de la unidad es CL\$ 27.184,07. Cabe mencionar que los elementos que no poseen costo final asociado son aquellos facilitados por pañol y/o ya se tenía, por lo que no se consideran dentro del costo final del proyecto.

3.3.2 Software utilizado

En el proyecto como tal se utilizan microcontroladores que tienen la importante función de tener el control de sensado completo, utilizado por el PIC 16F877A y para el generador de la señal de control para disparar los IGBT's se utiliza el Arduino.

Estos controladores poseen un lenguaje en específico y mediante un software se pueden realizar la programación.

Estas plataformas se pueden conseguir fácilmente por la web debido a que son educativos y no tienen costos. A continuación, en la tabla 3-2 se presenta el costo asociado a los programas y el lugar donde conseguirlo.

Tabla 3-2 software utilizados para la creación de la simulación

Software	Dirección web	Costo asociado final (\$)
Arduino	http://arduino.cl/	0
Mplab	http://www.microchip.com	0

Fuente: propia creada con fines explicativos para el trabajo de título.

3.3.3 Horas Hombres

Las horas hombres o también denominada horas-personas, es la unidad de medida que se relaciona directamente con gestión de proyectos y esta sirve para medir los esfuerzos necesarios para finalizar una tarea.

Se considera 1 hora hombre es igual a un trabajo completado en una hora de esfuerzo ininterrumpido por un trabajador.

Calcular horas hombre es la base para poder medir el coste final del proyecto, por eso, además de los materiales, componentes electrónicos y software también se necesita conocer esta unidad de medida importante.

A continuación, en la tabla 3-3 se presenta tareas reflejadas en horas que se requieren para la finalización del proyecto.

Tabla 3-3 Tiempo utilizado para la generación de la simulación

Tarea	Tiempo (Hrs)
Adquisición de componentes	2
Prueba de componentes	1
Armado de bloques del proyecto	5
Programación	6
Interconexión de bloques	6
Pruebas finales	3
Implementación final	5
Total	28

Fuente: propia creada con fines explicativos para el trabajo de título.

Un TÉCNICO UNIVERSITARIO EN ELECTRÓNICA, al cuarto año de egreso, tiene un ingreso de \$5.555 por hora, según la paginan mifuturo.cl. En la siguiente figura se toma referencia lo anteriormente mencionado para calcular el valor en horas hombre. En la tabla 3-4 se muestra el tiempo total y su costo asociado.

Tabla 3-4 Tiempo total con su respectivo costo asociado

Tareas	Tiempo (Hrs)	Costo asociado (\$)	Costo asociado (UF)
Tiempo total	28	155.540	5,72

Fuente: propia creada con fines explicativos para el trabajo de título.

Como se puede apreciar el costo asociado final de las horas hombre aplicadas al proyecto es de \$155.540, donde este valor es considerado en el costo final asociado al proyecto.

3.4 COSTO ASOCIADO FINAL DE LA SIMULACIÓN

Ya con todos los valores obtenidos de hardware, software y horas-hombres utilizadas, se procede a realizar el cálculo del costo asociado final del proyecto. El detalle se presenta en la tabla 3-5.

Tabla 3-5 Costo asociado final de la simulación

	Costo asociado final (\$)	Costo asociado final (UF)
Hardware	16.209	0,6
Software	0	0
Horas Hombre	155.540	5,72
Total	171.749	6,32

Fuente: propia creada con fines explicativos para el trabajo de título.

El costo asociado final de la simulación tiene un valor de \$171.749 y su valor en unidad de fomento es 6,32 UF. Todos estos valores fueron expresados en UF, esta es la unidad de cuenta reajutable de acuerdo a la inflación, por el motivo de tener una estimación del valor variable en la economía chilena.

3.5 TERCERA ETAPA DE SIMULACIÓN

En la parte final de este trabajo se implementa la interfaz, donde el usuario interactúa con la simulación controlando las distintas etapas del sistema, la parte de control está compuesta por el microcontrolador principal el que tiene conectados interruptores los que comandan el encendido/apagado de la etapa de alimentación, encendido/apagado del motor paso a paso y el sentido de giro. Tiene incorporado un potenciómetro que estará encargado de la velocidad de giro del motor de carga.

Los datos del estado del sistema están disponibles en una pantalla para que el usuario tenga conocimiento del estado actual de la simulación, la información que se visualiza en el display es el estado de la etapa de rectificación, el estado en el que está el microcontrolador encargado de generar la señal de control y también indicar el sentido de giro del motor paso a paso.

Observaciones y conclusiones

La investigación realizada y ejecutada en el presente trabajo de título es gracias a la práctica profesional realizada en la empresa “Electrans” ubicada en Antofagasta. Esta empresa dedicada a servicios de mantenimiento, reparación del sistema de propulsión general de los camiones con tecnología AC y DC, es la encargada de entregar conocimiento sobre la electrónica en la área minera.

A los alumnos en la práctica profesional se le presentan una serie de desafíos, por diferentes motivos y circunstancias en el trabajo diario, donde deben aplicar conocimientos sobre electrónica y valores adquiridos en los dos años de estudio en la carrera T.U Electrónica, a través de sus diversas asignaturas, talleres y competencias, los cuales fueron impartidos por la Universidad Técnica Federico Santa María sede José Miguel Carrera. Esto conlleva al alumno a adquirir habilidades para el trabajo en equipo y la resolución de problemas con rapidez y profesionalismo.

En síntesis, el presente trabajo de título consiste en implementar la simulación del funcionamiento del sistema de control y propulsión eléctrica de un camión AC a baja escala. Donde en cada capítulo se centra en una investigación específica del camión para poder simular con materiales y componentes en el estudio de la electrónica.

BIBLIOGRAFÍA

- P NUGRAHA., Arduino nano [en línea]. [Consulta 26 de marzo de 2018].
Disponible en: < <https://www.es.co.th/Schemetic/PDF/ARMB-0022.PDF> >.
- Diodes incorporated., diodo rectificador [en línea]. 2014 [Consulta 30 de marzo de 2018].
Disponible en: < <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ds28007.pdf> >.
- General Electric., Condensador de filtro [en línea]. 2018 [Consulta 20 de abril de 2018].
Disponible en : < <https://www.ebay.com/itm/GENERAL-ELECTRIC-GE-28F1957-FA-68A7178P7-CAPACITOR-20UF-330V-AC-600V-DC-D586347-/382297679968> >.
- STMicroelectronics., IGBT [en línea]. 2017 [Consulta 17 de abril de 2018].
Disponible en: < <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/bb/1b/ca/f3/e3/b6/4e/02/CD00058414.pdf/files/CD00058414.pdf/jcr:content/translations/en.CD00058414.pdf> >.
- International Rectifier, Driver IR2110 /2113 [en línea]. 2015 [Consulta 17 de

abril de 2018]. Disponible en:< <https://www.infineon.com/dgdl/ir2110.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c80333167e> >.

- Diodes incorporated, Diodo schottky [en línea]. [Consulta 20 de abril de 2017]. Disponible en: < <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ds23001.pdf> >.
- P NUGRAHA., condensador de bootstrap tantaló [en línea]. [Consulta 20 de marzo de 2018]. Disponible en: < <https://www.electronicaembajadores.com/es/Productos/Detalle/COTA01UV35/condensadores/condensadores-tantaló-convencional/condensador-electrolítico-de-tantaló-0-1uf-35v> >.

ANEXO A: GLOSARIO

- HARDWARE** : Es la parte física de un ordenador o sistema informático.
- MICROCONTROLADOR** : Es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria.
- INVERSOR** : Dispositivo que cambia o transforma un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna.
- SIMULACIÓN** : Es una técnica que permite recrear situaciones o establecer la factibilidad de un experimento.
- RECTIFICACIÓN** : Elemento o circuito que permite convertir la corriente alterna en corriente continua.
- MOTOR** : Parte de una máquina capaz de transformar algún tipo de energía (eléctrica, combustibles), en energía mecánica.
- SOFTWARE** : Conjunto de programas y rutinas que permiten a la computadora realizar determinadas tareas.
- PROCESADOR** : Componente electrónico donde se realizan los procesos lógicos que se le han programado y cargado en su memoria.