



PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATOLICA
DE VALPARAISO



Kristofer Adolfo Bustos Lara

Modelado y simulación del mecanismo y comportamiento eléctrico de un motor de un compresor

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Eléctrico



Escuela de Ingeniería Eléctrica



PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATOLICA
DE VALPARAISO

Modelado y simulación del mecanismo y comportamiento eléctrico de un motor de un compresor

Kristofer Adolfo Bustos Lara

Tesis para el grado de Ingeniero Civil Eléctrico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. René Sanhueza Robles

Profesor Guía

Sr. Carlos Avila Muñostes

Segundo Revisor

Sr. Jorge Mendoza Baeza

Secretario Académico

Valparaíso, 26 de febrero de 2017

Agradecimientos

Agradezco enormemente a mis padres Miguel y Graciela, mis hermanos Rodrigo y Alejandra por la oportunidad siempre incondicional de desarrollar lo que me gustó desde un principio, a darme fuerzas y ánimo en los momentos que más lo necesitaba. Gracias familia!

Agradezco a Barbara Ahumada, mi amor, por aguantarme y quererme, por estar en los momentos más difíciles de mi carrera, gracias por estar conmigo.

Agradezco a mis profesores guías, Señor René Sanhueza Robles y al Señor Carlos Avila Muñostes.

Agradezco a mis profesores de la EIE, al Profesor Gonzalo Farias, al Profesor Jorge Medina, al Ingeniero Mecánico Marco Chappa y al profesor de la EIM Profesor Asier Bengoechea.

Agradezco a mis compañeros de carrera Karen Araya, Anibal Galindo, Camilo Inostroza, Victor Lizama, Paolo Sartori, Aldo Pizarro, Daniel Veas y todos con los que compartí.

Agradezco a mis amigos de siempre que nunca destiñeron Nicolas Angulo, Javiera Arroyo, Diego Bustos, Alfredo Cabrera, Alvaro Mena, Martin Meyer, Joaquin Veloso, Paula Zapata.

Agradezco a la escuela de Kung Fu Shaolin Chan Stgo.

Gracias.

Santiago, 26 de febrero de 2017

K. B

Resumen

El proyecto trata de principalmente del accionamiento electromecánico de un motor de inducción trifásico de un compresor de aire comprimido. Este proyecto se realizará mediante el uso del software MATLAB Simulink para simular todos los procesos que atienden al accionamiento.

El proyecto parte por explicar los procesos separados de los componentes que están involucrados en el sistema. Tales como el motor, el compresor, el tanque de almacenamiento y el variador de frecuencias.

Durante el proceso de simulación como es un sistema electromecánico las unidades de medición son Torque (Nm), Velocidad (rpm o Rad/s), intensidad de corriente (A), voltaje (V), presión (Bar), caudal (L/s) y nivel de estanque (L) . Estas unidades tendrán vital importancia en cada cambio que se haga al grueso del proyecto ya que de ellas se pueden alcanzar los objetivos.

Abstract

The project mainly is about the electro mechanic drive due an induction three phase motor on an air compressor. This project can be done through the use of the software MATLAB Simulink to simulate all kind of process that attend the drive action.

This inform starts with explaining the aspects of process separately that are involved in the main system. Such as the three phase motor, the compressor, the recipient and frequency variable.

During simulation process, as is an electro mechanic system, the units about to find and verify are Torque (Nm), Speed (rpm or Rad/S), current intensity (A), voltage (V), pressure (bar), air flow (L/s) and recipient level (L). This units makes highly important in each change make in the system, to make the object reachable.

Índice general

Introducción.....	1
Objetivos generales.....	2
1 Funcionamiento de un compresor de aire.	3
1.1 Funcionamiento del motor de inducción trifásico.	3
1.2 Funcionamiento del compresor de aire.....	4
1.2.1 Ciclo de compresión.	6
1.2.2 Ecuaciones y relaciones para el funcionamiento del compresor.	7
1.3 Funcionamiento del tanque de almacenamiento.....	13
1.4 Funcionamiento del variador de frecuencias.....	16
1.5 Diagrama de bloques conexión de partes del sistema.	18
2 Experimentación y simulación.....	19
2.1 Partida directa	19
2.1.1 Motor de inducción.....	19
2.1.2 Función matlab	20
2.1.3 Compresor sin retroalimentación de torque de compresor, torque constante de 20 (Nm).....	22
2.1.4 Compresor con retroalimentación de torque.....	28
2.1.5 Tanque de almacenamiento.....	30
2.2 Variador de frecuencia.	34
2.3 Simulación de accionamiento mediante variador de frecuencia.	37
2.3.1 Simulación de accionamiento utilizando variador de frecuencia a 50 (Hz).	37
2.3.2 Simulación de accionamiento utilizando variador de frecuencia a 20 (Hz).	39
2.3.3 Simulación de accionamiento utilizando variador de frecuencia a 10 (Hz)	41
3 Resultados de simulación	44
4 Discusión y Conclusiones.	46
5 Trabajos futuros	47
Bibliografía	51

A Apendice circuito completo 53

Introducción

Los compresores son máquinas ocupados en la nueva industria, y que son indispensable para una planta como minera, hasta la cotidianidad de inflar una rueda de bicicleta o el hecho de pintar una casa con una maquina sopladora de aire comprimido.

Los compresores tienen como finalidad hacer el aumento de presión, tomando el aire de la atmósfera, y mediante el proceso mecánico de la máquina accionada por un motor eléctrico se logra la presión deseada y el caudal necesario.

Su uso data de la época griega, aunque en ese tiempo no se llamaban compresores, sólo se llamaban fuelles para forjar armas o artículos de metal, aun así el efecto es el mismo ya que se necesitaba que el aire de salida del fuelle fuese a una presión mayor para avivar el fuego.

Uno de los primeros usos modernos de los compresores atmosféricos fue gracias a los buzos de mares profundos, quienes necesitaban un suministro de la superficie para sobrevivir. Los buzos que emplearon compresores atmosféricos tuvieron lugar en 1943. Los primeros mineros utilizaron motores de vapor para producir suficiente presión para operar sus taladros, incluso cuando dicho dispositivos probaban ser extremadamente peligrosos para los mineros.

Para luego en la década de los 50s a 60s se empieza con la carrera espacial donde un elemento familiar derivado del compresor sale al mundo, las turbo máquinas. Máquinas que ahora están insertas en un avión F-16A por ejemplo.

Existen diversos tipos de compresores, los cuales son utilizados dependiendo de la cantidad de caudal, la presión que se quieran ejercer, el costo económico que se está dispuesto a pagar. Los más comunes son los compresores de pistón, el de tornillo, el de paletas rotatorias y las turbo maquinas. Para el desarrollo del proyecto se eligió un compresor de 1 solo pistón, dado que el comportamiento será el mismo multiplicado por el número de pistones al final del proceso.

Para el accionamiento del compresor, se requiere un motor eléctrico, este tiene la finalidad de cambiar la energía eléctrica en energía mecánica, produciendo un movimiento giratorio en el eje del rotor del motor. El motor depende de la carga, a medida que la carga aumenta el torque es proporcional, haciendo que cueste más mover el eje del motor.

Existen varios tipos de motores, los cuales se mencionan los siguientes, el motor shunt, motor serie, motor compound que están catalogados en la malla de motores de corriente continua, y los motores asincrónicos o de inducción, motores sincrónicos y motores universales que están encasillados en la malla de motores de corriente alterna. La elección del motor se hace acorde a la utilización cotidiana de los motores hoy en día, donde la mayoría de los motores eléctricos ocupados por las empresas son motores de inducción.

El motor eléctrico será moderado por un variador de frecuencias, el que tiene como finalidad hacer variar las velocidades del movimiento del motor, este elemento se ocupa en este proyecto para la obtención de corrientes de arranque más atenuadas, esto es de gran beneficio, ya que a la larga una partida directa puede dañar los elementos internos del motor como las escobillas. El variador de frecuencias entonces es un agente importante en la industria moderna, donde se busca la eficiencia y el cuidado de las maquinas mecánicas y eléctricas. Cabe mencionar que al hacer variar la velocidad del motor, el resultado repercute en el compresor y los procesos que le preceden.

En Chile la gama de compresores de aire es muy variada, no sólo por el tipo de compresores sino también por la potencia que estos deben consumir, generalmente para aplicaciones domesticas en las cuales su uso se emplea en pintar una casa o inflar una rueda de bicicleta en una bencinera, la potencia requerida tiene un rango de acción entre los 0.5 y los 5 (HP), y para su uso de índole industrial los compresores consumen una potencia desde los 7 (HP) hasta los 50 (HP). El proyecto está situado en una potencia media de 10 (HP) para situarse en cualquiera de las dos aplicaciones, tanto domésticas como industriales. Durante el proceso de investigación sobre marcas de compresores de aire, las más reconocidas en la industria chilena son los compresores Kaesser, Pressure e Indura.

Objetivos generales

- Modelado y simulación del mecanismo y comportamiento eléctrico de un motor de un compresor.
- Estudiar el comportamiento del motor eléctrico en el accionamiento físico-mecánico de un sistema de aire comprimido.
- Estudiar la diferente gama de compresores.
- Estudiar el impacto en el mecanismo accionado por el variador de frecuencia.

1 Funcionamiento de un compresor de aire.

1.1 Funcionamiento del motor de inducción trifásico.

El motor asincrónico funciona según el principio de inducción mutua de Faraday. Al aplicar corriente alterna trifásica a las bobinas inductoras, se produce un campo magnético giratorio, conocido como campo rotatorio, cuya frecuencia será igual a la de la corriente alterna con la que se alimenta al motor. Este campo al girar alrededor del rotor en estado de reposo, inducirá corrientes en el mismo, que producirán a su vez un campo magnético que seguirá el movimiento del campo del estator, produciendo torque que hace que el rotor gire. No obstante, como la inducción en el rotor sólo se produce si hay una diferencia en las velocidades relativas del campo de estator y del rotor, la velocidad del rotor nunca alcanza a la del campo rotatorio. De lo contrario, si ambas velocidades fuesen iguales, no habría inducción y el rotor no produciría par. A esta diferencia de velocidad se la denomina deslizamiento y se mide en términos porcentuales, por lo que ésta es la razón por la cual a los motores de inducción se los denomina asincrónicos, ya que la velocidad rotórica difiere levemente de la del campo rotatorio. El deslizamiento difiere con la carga mecánica aplicada al rotor, siendo máximo con la máxima carga aplicada al mismo. Sin embargo, a pesar de esto, el motor varía poco su velocidad, pero el torque aumenta (y con ello la intensidad de corriente consumida) por lo que se puede deducir que son motores de velocidad constante.

En el momento del arranque, producto del estado de reposo del rotor, la velocidad relativa entre campo estatórico y rotórico es muy elevada. Por lo tanto, la corriente inducida en el rotor es muy alta y el flujo de rotor (que se opone siempre al del estator) es máximo. Como consecuencia, la impedancia del estator es muy baja y la corriente absorbida de la red es muy alta, pudiendo llegar a valores de hasta 7 veces la intensidad nominal.

Las siguientes ecuaciones ayudarán a entender el comportamiento de velocidad y su relación con el torque tanto eléctrico como mecánico.

$$T_{el} - T_{mec} = J \cdot \frac{dw}{dt} \quad (1-1)$$

Donde T_{el} es el torque eléctrico, T_{mec} es el torque mecánico, J es la inercia carga-motor y w velocidad.

Donde al despejar w ,

$$w = \frac{1}{j} \cdot \int T_{el} - T_{mec} \quad (1-2)$$

Entonces, la expresión (1-2) se puede deducir lo siguiente, la velocidad depende de la resta entre el torque eléctrico y torque mecánico. Lo que quiere decir, es que a medida que el torque producido por la carga, vale decir, el torque mecánico aumenta, este no debe ser superior al torque eléctrico. Al ser superior al torque eléctrico la integral quedaría negativa haciendo que la velocidad tenga una curva negativa, eso puede significar que el esfuerzo para mover la carga debe ser aún mayor que el actual aplicado, que el motor es de poca potencia, que exista un sistema de freno que hace que la maquina comience a frenar y eso provoca que la velocidad vaya disminuyendo.

El proyecto sólo se preocupará de la carga del compresor, entonces se esperara que la velocidad sólo sea positiva. Tampoco se verá la opción del frenado, en otras palabras cualquiera velocidad negativa en este proyecto está errónea.

1.2 Funcionamiento del compresor de aire.

El pistón es un conjunto de elementos que producen la variación de presión en un cilindro mediante el accionamiento del motor eléctrico que hace posible hacer funcionar, esta variación de presión se hace tomando la presión de aire de la atmósfera a la requerida.

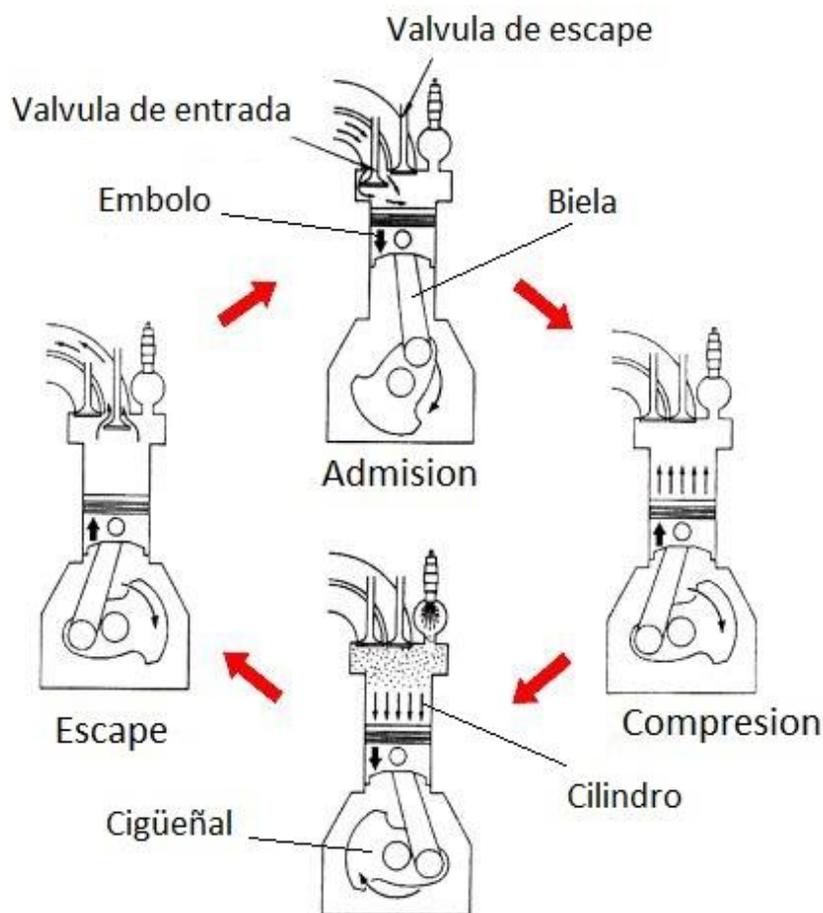


Figura 1-1 Movimiento pistón

Está constituido por los siguientes elementos:

- Cigüeñal: Elemento mecánico que transforma el movimiento rectilíneo alternativo en circular uniforme y viceversa.
- Biela: Elemento mecánico que es sometido a esfuerzos de tracción o compresión, transmite el movimiento articulando a otras partes de la máquina.
- Embolo: Elemento el cual se mueve verticalmente, haciendo variar la presión que existe en el cilindro. Existen dos posiciones importantes para este elemento, la BDC o punto muerto inferior y la TDC o punto muerto superior.
- Cilindro: Espacio donde se almacena el aire cuando el embolo está en la posición punto muerto inferior, posición en la cual se alcanza la máxima capacidad de aire en el cilindro. De modo contrario cuando alcanza el punto muerto superior, indica que el aire comprimido ha sido expulsado del cilindro.
- Válvulas: Se tienen dos válvulas, una de admisión y otra de escape. Cuando el pistón baja estando en punto muerto superior y con la válvula de admisión abierta succiona el aire

después de eso la válvula de admisión se cierra por medio de un eje de levas y el pistón vuelve a subir en este momento el aire se comprime. Luego de que el pistón baje por el efecto del motor y los elementos antes mencionados, en ese momento se abre la válvula de escape y el pistón sube expulsando el aire generado por la compresión.

1.2.1 Ciclo de compresión.

En el ciclo ideal el aire comprimido es 100%. El vector A-B representa el movimiento del stroke o carrera de succión en el cual el gas empieza a ingresar al cilindro a través de la válvula de succión hasta el volumen V_1 que es el volumen total del cilindro de compresión, durante éste movimiento la presión P_1 permanece constante y es igual a la presión en la succión o tubería de carga al compresor.

En el punto B, la fuerza del compresor actúa positivamente y comprime el gas hasta el punto C en el cual se alcanza la presión deseada de descarga P_2 y es éste el momento en el cual la válvula de salida se abre permitiendo la transferencia total del gas del cilindro de compresión al sistema en el punto D.

Como asumimos que estamos operando un compresor ideal o perfecto que nos permite hacer una compresión ideal, el punto D corresponderá a un volumen de cero cuando se cierran las válvulas de salida. Aquí empieza el retorno del pistón, pasando del punto D al punto A y de la presión P_2 a la presión P_1 idealmente, ya que al llegar al punto D, como el volumen es cero, no habrá moléculas remanentes de gas y la presión, en éste instante, no tendrá ningún valor, luego tan pronto se abran las válvulas de entrada de gas en el punto A la presión será la de carga o succión al compresor, P_1 , iniciándose nuevamente el ciclo de compresión.

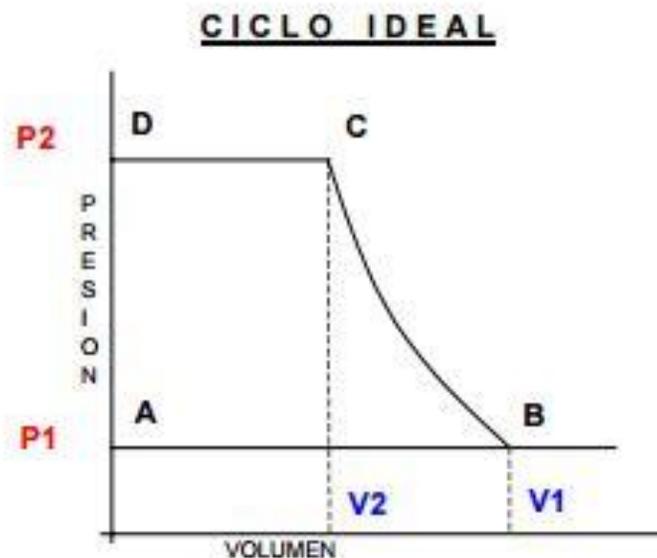


Figura 1-2 Ciclo ideal presión-volumen

En la realidad los equipos de compresión no son perfectos, ni se puede pensar en una compresión ideal, por lo que es mejor analizar el ciclo real que sucede en un compresor, donde no necesariamente todo el aire es expulsado del compresor, haciendo que exista una presión almacenada a diferencia del caso ideal.

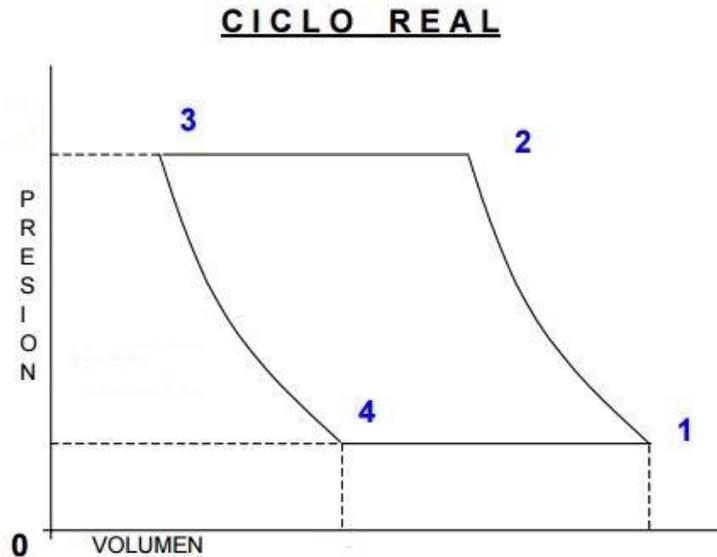


Figura 1-3 Ciclo real de presión-volumen

1.2.2 Ecuaciones y relaciones para el funcionamiento del compresor.

Para realizar este proyecto es necesario saber cuáles son las ecuaciones y relaciones que acompañan al sistema mecánico y eléctrico para su buen desempeño. Primero se verán las relaciones mecánicas y posteriormente las eléctricas. Las ecuaciones y relaciones que se utilizarán son obtenidas del libro guía Rober L. Norton <<Diseño de Máquinas>> para el caso 7A “Diseño preliminar de un tren para un compresor”.

La fuerza del que está sometida el cilindro es dependiente de la presión del gas comprimido, esta depende del mecanismo del cigüeñal y la ley de los gases (1-1):

$$p_1 \cdot v_1^k = p_2 \cdot v_2^k \quad (1-3)$$

Entonces p_1 será la presión atmosférica, el v_1 es el volumen del cilindro expandido en el punto muerto inferior y p_2, v_2 son la presión y el volumen del gas comprimido en el punto muerto superior. La constante de los gases k es dependiente del proceso y del tipo de fluido que se utilizara, para este tipo de compresor la constante será de 1.13.

De modo que al obtener la relación de entrada y de salida del gas, se tiene la expresión para el desplazamiento del pistón con referencia al punto muerto inferior.

$$y = \left(r \cdot \cos \theta + l \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \cdot \sin \theta\right)^2} - l + r \right) \quad (1-4)$$

Donde r es el radio del maneral del cigüeñal igual a 0.109 (m), l es la longitud de la biela de 0.2 (m) θ corresponde al ángulo del maneral del cigüeñal.

Al momento de evaluar la ecuación (1-4) haciendo variar el ángulo θ solamente, dado que las demás incógnitas son constantes. Se obtiene el siguiente patrón.

Tabla 1-1 Posición de pistón de acuerdo a grados

θ (Grados)	Posición de pistón
0	$2r$
$0 < \theta < 180$	$\sqrt{l^2 - r^2} + r - 1$
180	0
$180 < \theta < 360$	$\sqrt{l^2 - r^2} + r - 1$
360	$2r$

Lo que quiere decir que si nos ubicamos con punto de referencia en el punto muerto inferior, la posición para 0 grados es la más alejada del punto de referencia. Así para un ángulo $0 < \theta < 180$ la posición estará determinada su correspondiente relación, para 180 grados el valor de la posición es 0 dado que se encuentra en el punto de referencia, para finalizar nuevamente la relación $180 < \theta < 360$ es la misma que la expresada para $0 < \theta < 180$ y cumpliendo el ciclo de giro se llega nuevamente a la posición más alejada. Para visualizar gráficamente el proceso se puede relacionar la tabla (1-1) con la figura (1-1).

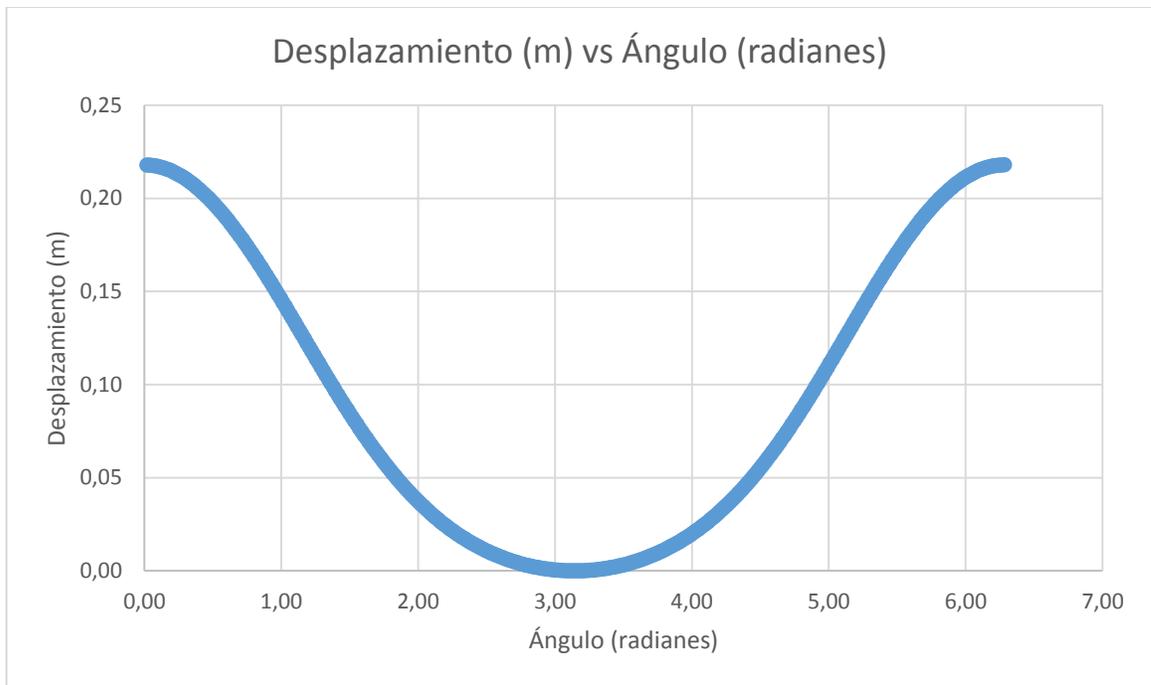


Figura 1-4 Desplazamiento de pistón

Luego para obtener la presión en el cilindro, se combinan las ecuaciones anteriores, de tal modo que la presión depende del ángulo del maneral del cigüeñal.

$$p \cong 924 \cdot \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^6 - 792 \cdot \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^7 \quad (1-5)$$

Reemplazando valores para el ángulo θ se obtiene la siguiente tabla.

Tabla 1-2 Presión del gas (bar)

θ (Grados)	Presión (bar)
0	Presión Máxima de salida
$0 < \theta < 180$	Presión media de entrada
180	Mínima presión - 0
$180 < \theta < 360$	Presión media de salida
360	Presión Máxima de salida

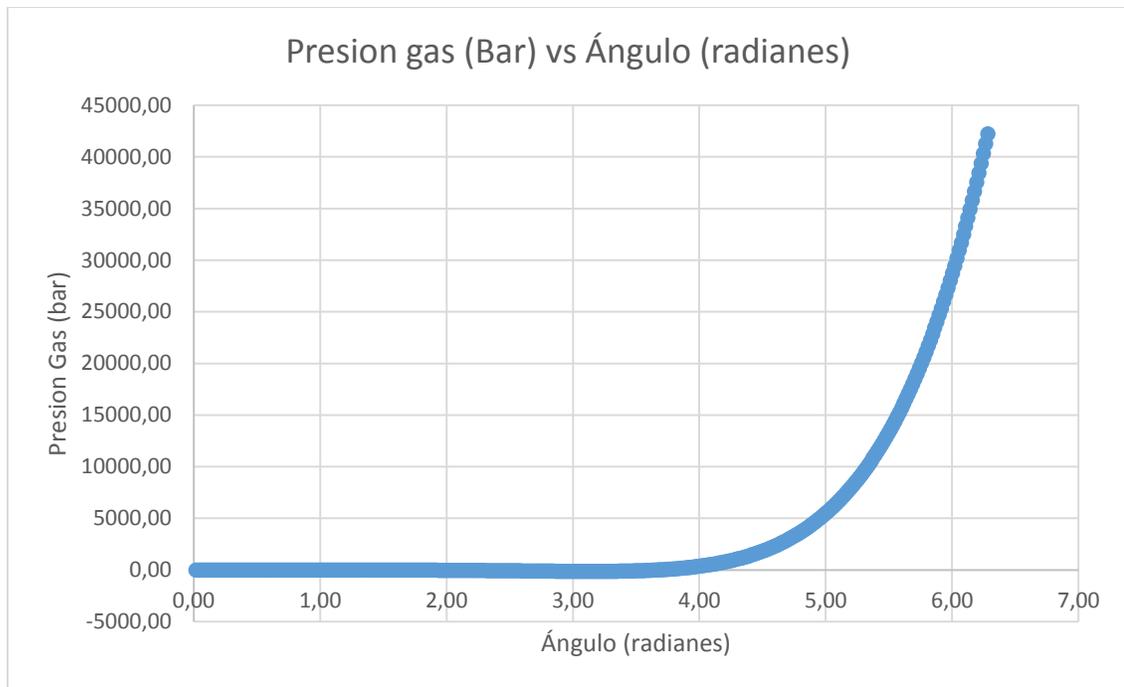


Figura 1-5 Presión del gas (bar) respecto a ángulo (radianes)

Ahora para obtener la fuerza sobre el pistón, que denominaremos F_g , se obtendrá en una combinación de presión y área utilizada por el pistón. De modo que:

$$F_g = p \cdot A_p = \frac{\pi}{4} \cdot p \cdot d_p^2 \quad (1-6)$$

Donde A_p es el área del pistón y d_p es el diámetro del pistón.

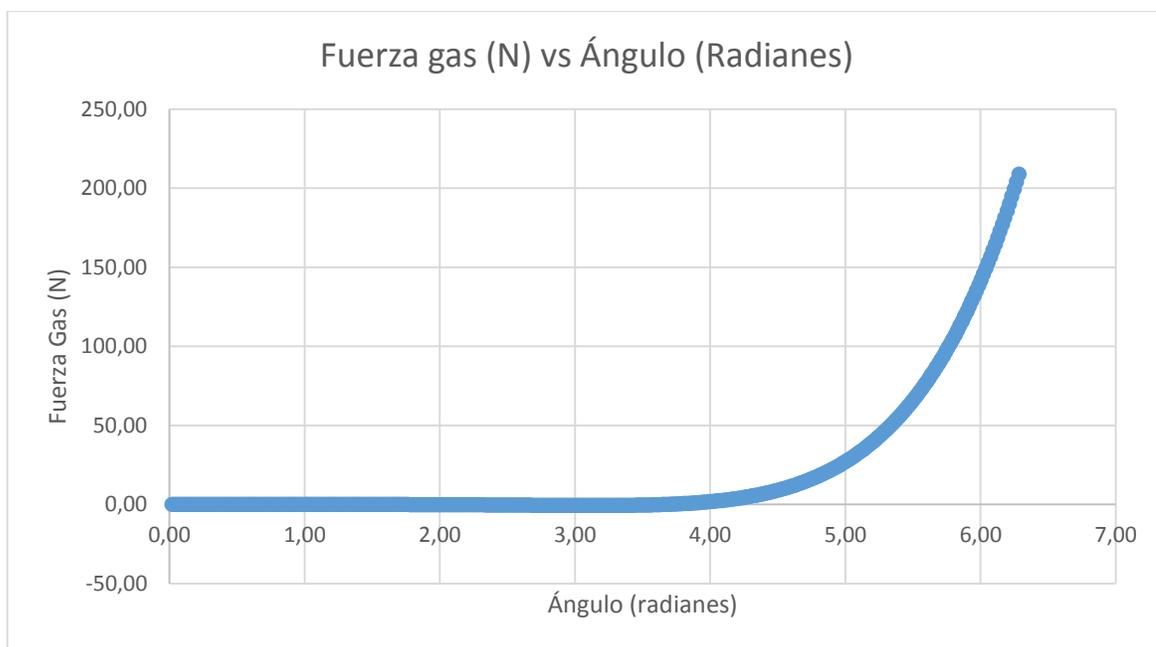


Figura 1-6 Fuerza gas (N) respecto a ángulo (radianes)

Ahora para el torque que se requiere para mover el cigüeñal del compresor, se necesitan de 2 componentes, una que proviene de la fuerza del gas F_g y el otro de las fuerzas de inercia F_i debidas a la aceleración.

$$T = T_g + T_i \quad (1-7)$$

Entonces

$$T_g \cong F_g \cdot r \cdot \sin \theta (1 + r/l \cdot \cos \theta) \quad (1-8)$$

$$T_i \cong \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \cdot \omega^2 \left(\frac{r}{2l} \cdot \sin \theta - \sin 2\theta - \frac{3r}{2l} \cdot \sin 3\theta \right) \quad (1-9)$$

Donde la masa m es la del pistón estimada en 2,7 (Kg) obtenida de libro guía.

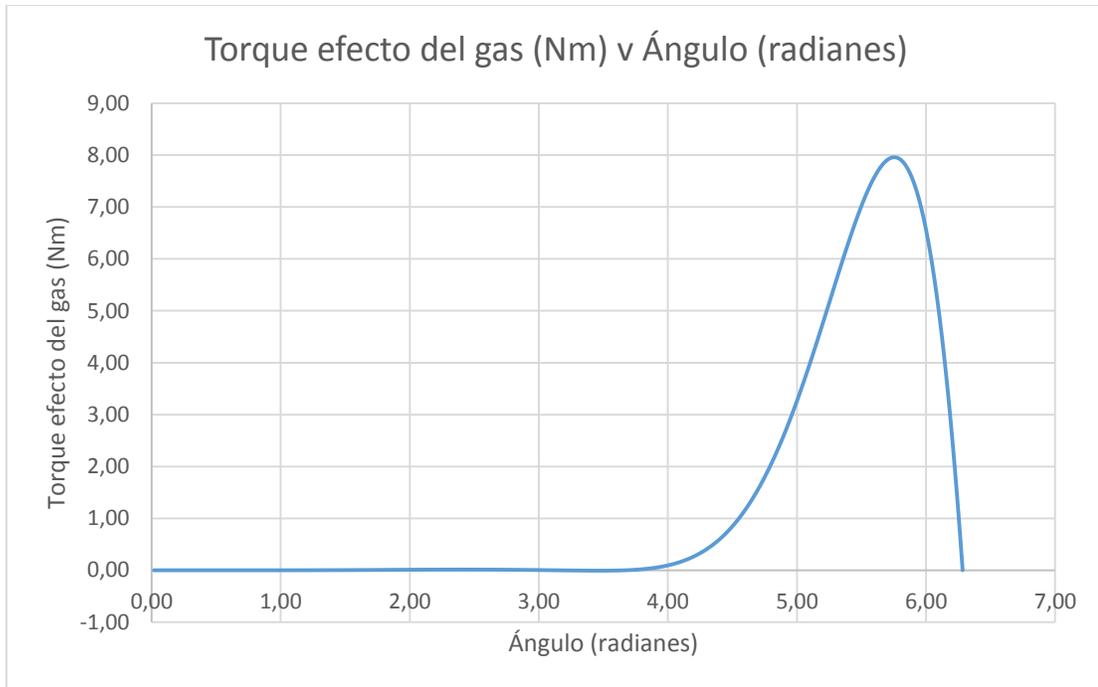


Figura 1-7 Torque del gas (Nm) respecto a ángulo (radianes)

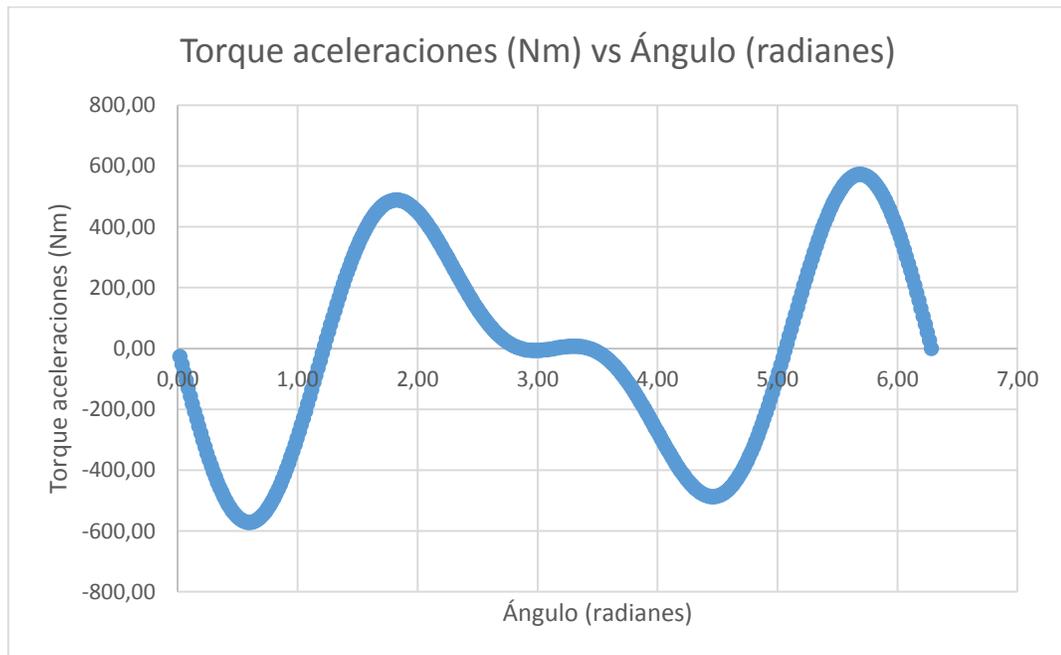


Figura 1-8 Torque de aceleraciones (Nm) respecto a ángulo (radianes)

El torque de aceleraciones es el producido por el efecto mecánico, para mover el pistón, este torque siempre será mayor que el torque del gas. Entonces al realizar la suma de las dos gráficas de torque producidos, se obtiene la siguiente forma de onda.

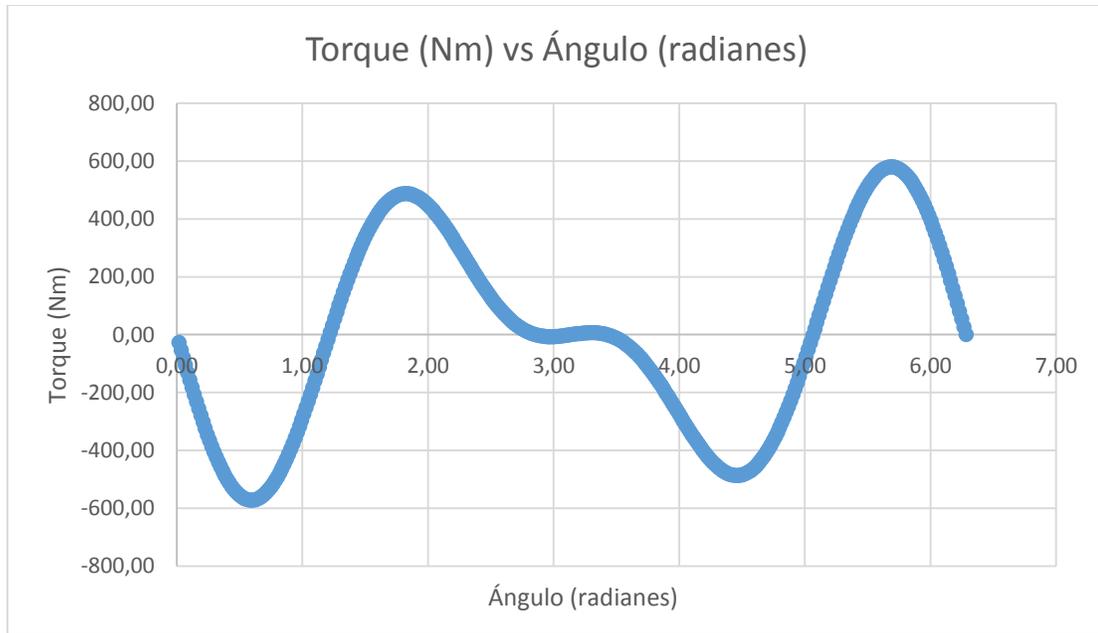


Figura 1-9 Torque final (Nm) respecto a grados (radianes)

Siendo ésta casi la misma que la anterior dado que las dimensiones entre el torque de aceleración y del gas son muy alejadas entre sí.

1.3 Funcionamiento del tanque de almacenamiento.

El tanque de almacenamiento es una parte fundamental para desarrollar el conjunto máquina compresora, este es el encargado de almacenar el aire comprimido en un estanque proveniente del compresor, este aire comprimido está regulado generalmente por un manómetro y por un termómetro, que miden la presión y la temperatura al interior del tanque de almacenamiento. El tanque tiene la particularidad que al llenarse, alcanzando su nivel máximo de volumen, no deja pasar más aire comprimido haciendo que el motor se detenga y que por lo tanto el compresor también lo haga. En caso de emergencia, pueden existir casos en que la señal es comandada pero el receptor no la recibió por interferencia o una mala conexión y el motor siga funcionando, haciendo el que el compresor siga entregando aire comprimido, para estos casos existe válvulas de escape que regulan mecánicamente el paso de caudal de aire eliminando el excedente entregado por el compresor.

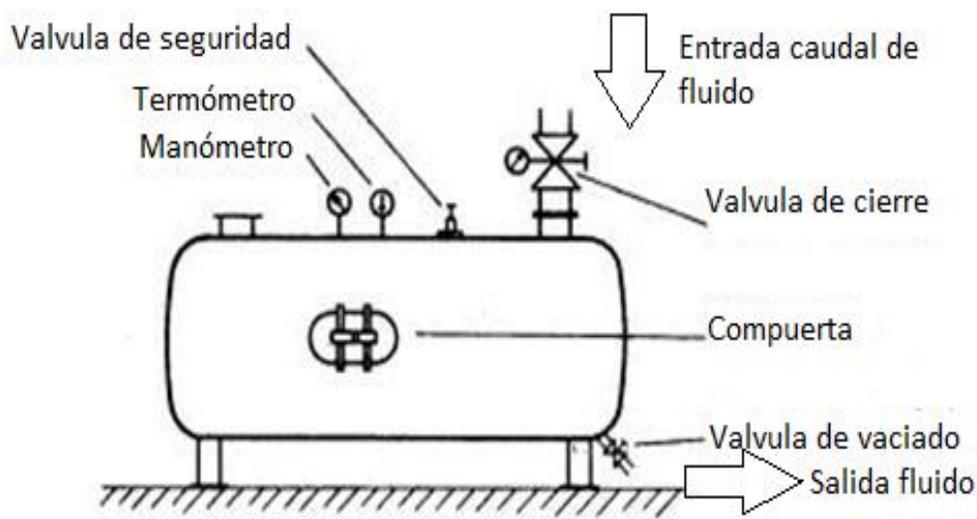


Figura 1-10 Tanque de almacenamiento (fuente: <http://www.construsur.com.ar>)

El tanque de almacenamiento al igual que el compresor genera un torque hacia el motor, este torque no es percibido por el motor dado que las mayores fuerzas las genera el movimiento del pistón, aun así este torque de tanque de almacenamiento se puede visualizar en el siguiente ejemplo, cuando se infla un globo común este en un principio no genera un esfuerzo significativo a la persona que lo infla, pero a medida que se alcanza el nivel máximo de presión y volumen se hace cada vez más dificultoso poder inflar el globo dado que existe una contrapresión desde el interior del globo hacia el exterior.



Figura 1-11 Representación explicación de contrapresión (fuente: <http://es.123rf.com>)

Una relación para visualizar este tipo de comportamiento que afecta el rendimiento del motor es la analogía de la carga de un condensador.

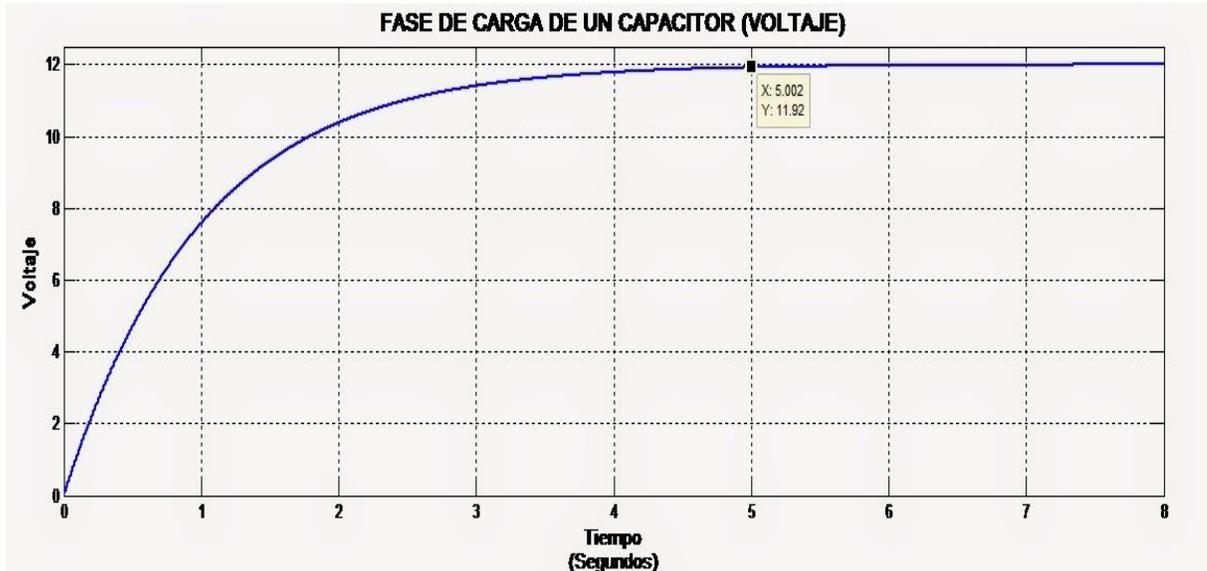


Figura 1-12 Analogía entre fase de carga de un capacitor con contrapresión (fuente: <https://galfama.blogspot.cl>)

Los tanques de almacenamiento tienen un tamaño específico para cada compresor, este tamaño generalmente depende de las conexiones y desconexiones que a nivel usuario son realizadas, vale decir, cuantas veces se requiere de aire comprimido. Por lo que existen tanques de pequeño volumen comúnmente usados domésticamente y los hay para grandes cantidades tipo industriales.

Para saber la capacidad del tanque de almacenamiento se requerirá de la siguiente formula:

$$Vd = \frac{15Qs}{Z \cdot \Delta p} \quad (1-10)$$

Donde Vd es el volumen en litros, Qs es caudal de suministro, Z es la frecuencia de desconexión por hora y Δp es la diferencia de presión de entrada con salida.

El tanque de almacenamiento al tener límites de capacidad, este funcionará siempre y cuando exista aire comprimido, es por eso que se determina un volumen de seguridad que comanda a la máquina compresora a funcionar y entregar aire, este nivel de seguridad generalmente es del orden del 10% de la capacidad del tanque, teniendo en cuenta las especificaciones antes dichas.



Figura 1-13 Niveles de tanque de almacenamiento

1.4 Funcionamiento del variador de frecuencias.

Se alimenta al variador de frecuencia con un voltaje de corriente alterna (CA), el equipo primero convierte la CA en corriente directa (CD), por medio de un puente rectificador (diodos o SCR's), este voltaje es filtrado por un banco de capacitores interno, con el fin de suavizar el voltaje rectificado y reducir la emisión de variaciones en la señal; posteriormente en la etapa de inversión, la cual está compuesta por transistores (IGBT), que encienden y apagan en determinada secuencia (enviando pulsos) para generar una forma de onda cuadrada de voltaje de CD a una frecuencia constante, y su valor promedio tiene la forma de onda senoidal de la frecuencia que se aplica al motor.

El proceso de conmutación de los transistores es llamado PWM "Pulse Width Modulation" Modulación por ancho de pulso.

El variador de frecuencia es un elemento electrónico capaz de modificar la velocidad de giro del eje del motor, haciendo por lo tanto variar la velocidad del compresor y por ende todas las variables involucradas en el sistema del compresor de aire.

Es por esto que el variador de frecuencia es un elemento fundamental al momento del accionamiento del motor, si no estuviera conectado el variador de frecuencia el motor partiría de manera directa recibiendo un golpe de torque y corriente, que frecuentemente es del orden de 3 a 6 veces la corriente en estado estacionario. Entonces el variador de frecuencia tiene la capacidad

1 Funcionamiento de un compresor de aire.

de hacer partir el motor suavemente o tenuemente, esto significa que lo acciona partiendo desde la una velocidad inicial 0 y luego aumenta conforme una rampa hasta la velocidad requerida.

Como consideración el motor al ser conectado y desconectado frecuentemente podría causar daños en el interior del motor produciendo que el rendimiento y la vida útil del motor se vean afectadas.

La velocidad máxima que puede alcanzar el motor de inducción está determinada por los pares de polos, pero por sobre todo la frecuencia a la cual el usuario controla el variador.

Esta velocidad de control corresponde a la velocidad sincrónica del motor:

$$n = 2\pi f / p \quad (1-11)$$

Donde n es la velocidad sincrónica del motor en revoluciones por minuto, f es la frecuencia y p son los pares de polos del motor.

Entonces con la ecuación (3-1) podemos tener ver los valores de velocidad para las distintas frecuencias.

Tabla 1-3 Frecuencias y velocidades para variador de frecuencias

f (Hz)	n (rpm)	n (rad/s)
50	1500	157
40	1194	125
30	898	94
20	592	62
10	296	31
0	0	0

Siendo para Chile una frecuencia de 50 (Hz) de trabajo, no se puede trabajar con una frecuencia que supere este límite por las especificaciones del motor.

1.5 Diagrama de bloques conexión de partes del sistema.

La siguiente figura logra explicar cómo estará compuesto nuestro sistema.

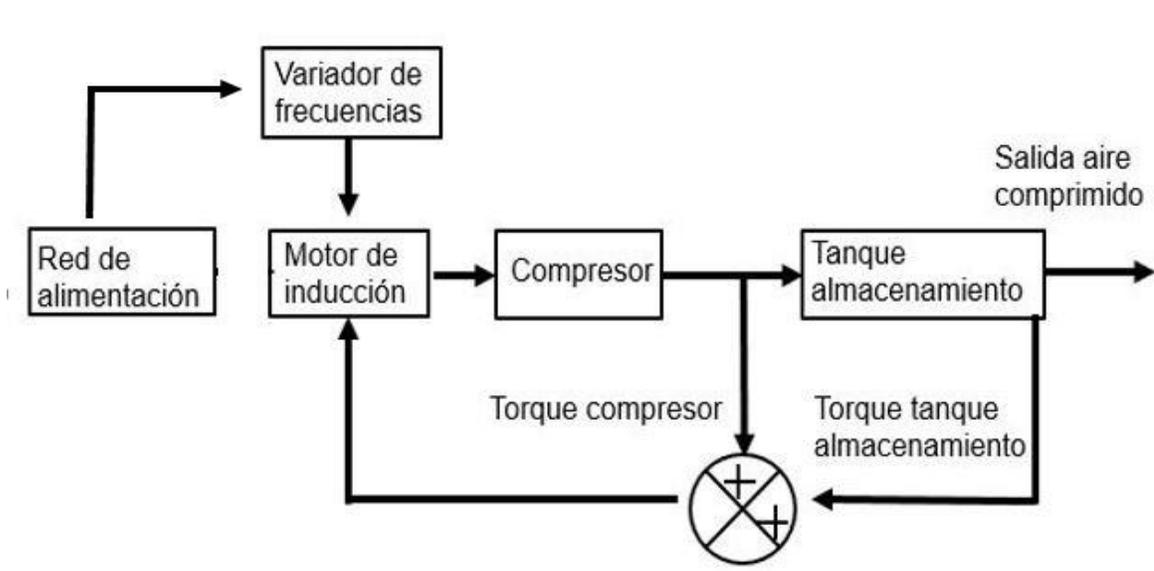


Figura 1-14 Diagrama de bloques

Lo que muestra la figura (2-1), es a la red de alimentación en conjunto con el variador de frecuencia hacen posible accionar el motor de inducción. Con el variador de frecuencia es posible variar la velocidad a la que funcionará el motor trifásico de inducción. El motor al ser accionado hace girar su eje de carga lo que hace posible que el compresor comience a funcionar.

Así es que cuando el compresor empieza a funcionar, este entrega un caudal de aire comprimido succionado a través de la válvula de succión desde la atmosfera, mediante el proceso de compresión el aire se expulsa del compresor a una presión superior a la de entrada pasando por la válvula de expulsión.

Luego el aire comprimido expulsado por el compresor ingresa al tanque de almacenamiento, este caudal de aire comprimido tiene directa relación con la velocidad a la que está funcionando el sistema. Entonces el caudal de entrada al estanque hace que la presión y el volumen vayan en alza hasta que se llegue al nivel máximo de volumen, lo que hará que el tanque de almacenamiento mande una señal al motor para que se detenga. El aire comprimido puede entonces ahora ser utilizado por el usuario.

Cuando este aire comprimido del tanque de almacenamiento es extraído por el usuario, el nivel del estanque desciende llegando al nivel de seguridad, haciendo que este mande una señal al motor para que empiece a funcionar al compresor, volviendo al ciclo nuevamente.

2 Experimentación y simulación.

2.1 Partida directa

2.1.1 Motor de inducción

El motor de inducción trifásico durante todo el proceso de simulación sufrió innumerables cambios debido a que en una primera instancia solo se veía el proceso mecánico, pero luego de obtener los resultados esperados en esa primera parte del proyecto se buscó un motor capaz de funcionar con la segunda variable que se insertaría luego al proyecto que es el variador de frecuencia dado que el programa Simulink no podía simular con motores pequeños. También como se explicó se buscó un motor para trabajar en un ámbito doméstico e industrial de modo que tanto en conexiones como en los parámetros del mismo, llegando finalmente a un motor con las siguientes especificaciones:

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA),Vn(Vrms),fn(Hz)]:

[7500 400 50]

Stator resistance and inductance [Rs(ohm) Lls(H)]:

[0.7384 0.003045]

Rotor resistance and inductance [Rr'(ohm) Llr'(H)]:

[0.7402 0.003045]

Mutual inductance Lm (H):

0.1241

Inertia, friction factor and pole pairs [J(kg.m²) F(N.m.s) p()]:

[0.0343 0.000503 1]

Initial conditions

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

Simulate saturation

Saturation Parameters [i1,i2,... (Arms) ; v1,v2,...(VrmsLL)]

24, 105.1337, 152.5532, 214.2421, 303.1917; 230, 322, 414, 460, 506, 552, 598, 644, 690]

Figura 2-1 Parámetros del motor

De modo que la conexión con los demás elementos será la establecida.

2.1.2 Función matlab

La siguiente función es una de las más importantes para desarrollar todos los pasos siguientes, dado que todo depende en qué posición esté el pistón, éste a su vez depende de los ángulos radianes. Esta función Matlab de la librería de bloques, hace posible obtener los ciclos para el funcionamiento del sistema, esto quiere decir, que a medida que aumentan los grados llegando a 2π este vuelve a 0, y así sucesivamente. Esta relación depende de la velocidad que se ingresa del motor.

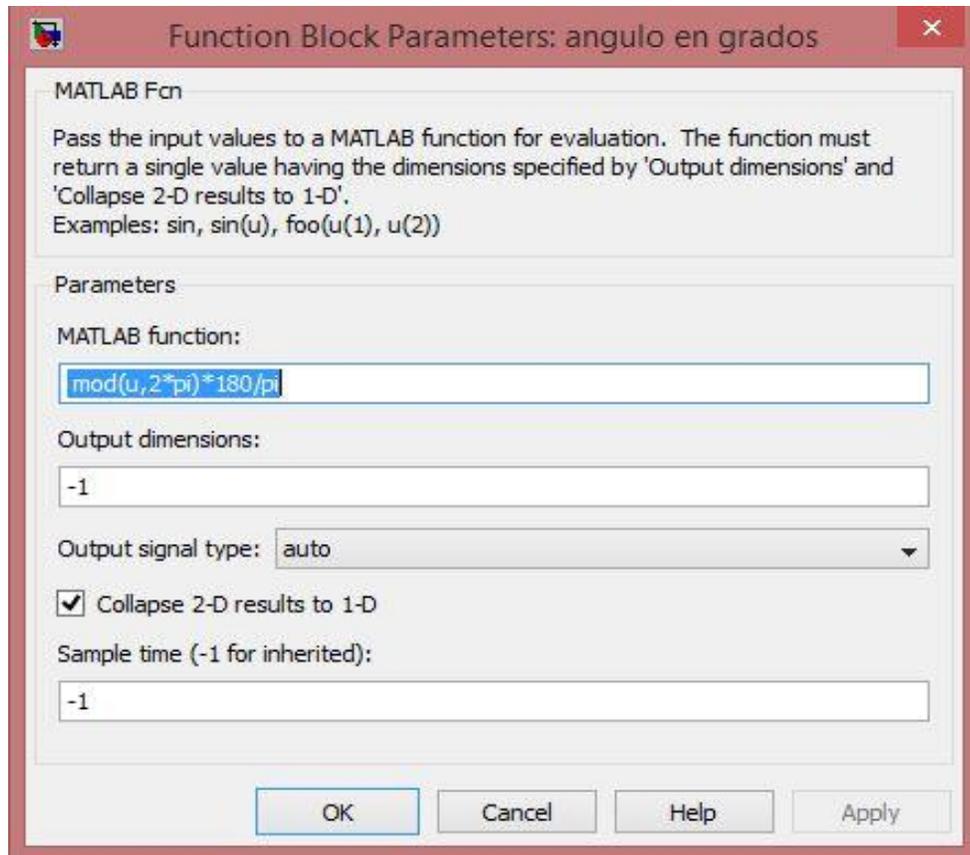


Figura 2-2 Función Matlab

El diagrama de bloques que representa esta función es el siguiente.

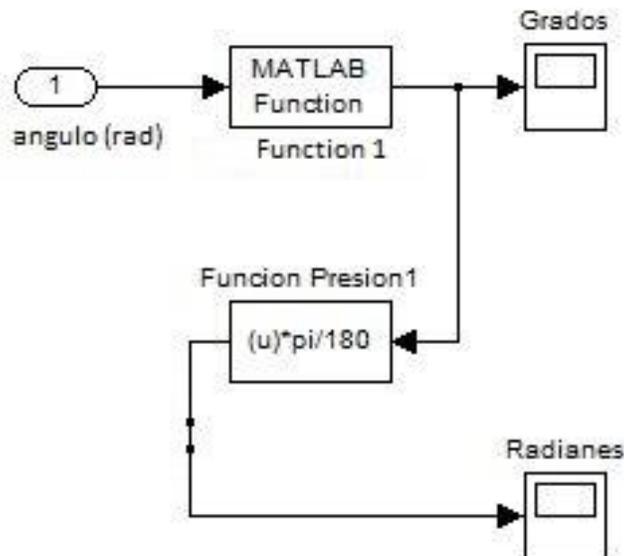


Figura 2-3 Diagrama de bloques simulink Matlab función

De modo que al pasar por el bloque Matlab función la forma de onda de los grados es la siguiente.

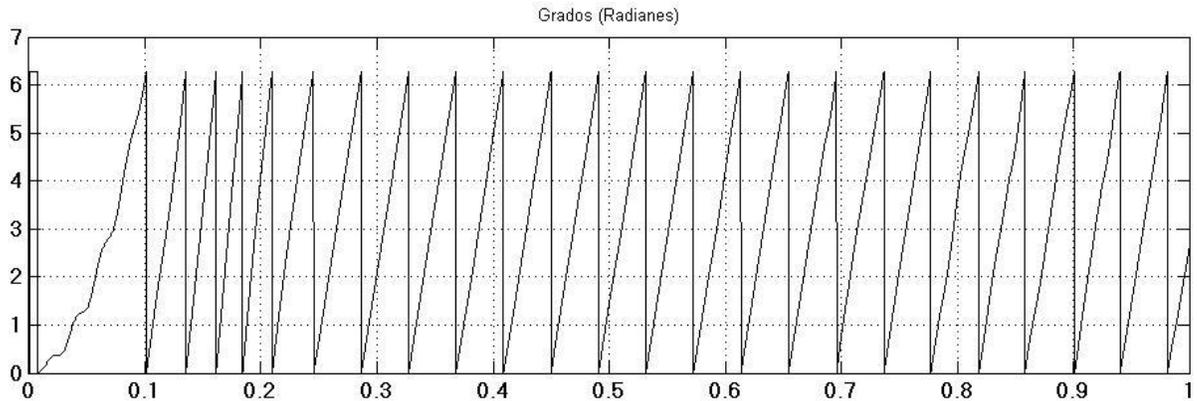


Figura 2-4 Grados (Radianes)

En esta figura se puede apreciar el comportamiento en ángulos por unidad de tiempo, de modo que cada cierto ciclo de tiempo el ángulo recorrido irá desde los 0 grados hasta los 6,28 (Rad) que corresponde a 2π , pudiendo así simular el efecto del movimiento circular del pistón. Sin esta función que hace posible la repetición de los ciclos, los ángulos se acumularían hasta el infinito lo que para las otras funciones todas dependientes del movimiento del pistón no serían congruentes con la realidad.

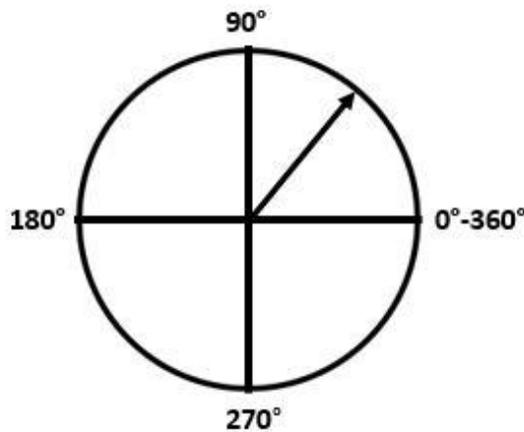


Figura 2-5 Grados

2.1.3 Compresor sin retroalimentación de torque de compresor, torque constante de 20 (Nm)

Durante este periodo se verifican las formas de onda de cada una de las funciones descritas en la fase de recopilación de información, desde el desplazamiento del pistón hasta el torque final ejercido por el compresor.

Primero se verificaron las ecuaciones (1-2) y (1-3) función de desplazamiento y presión respectivamente.

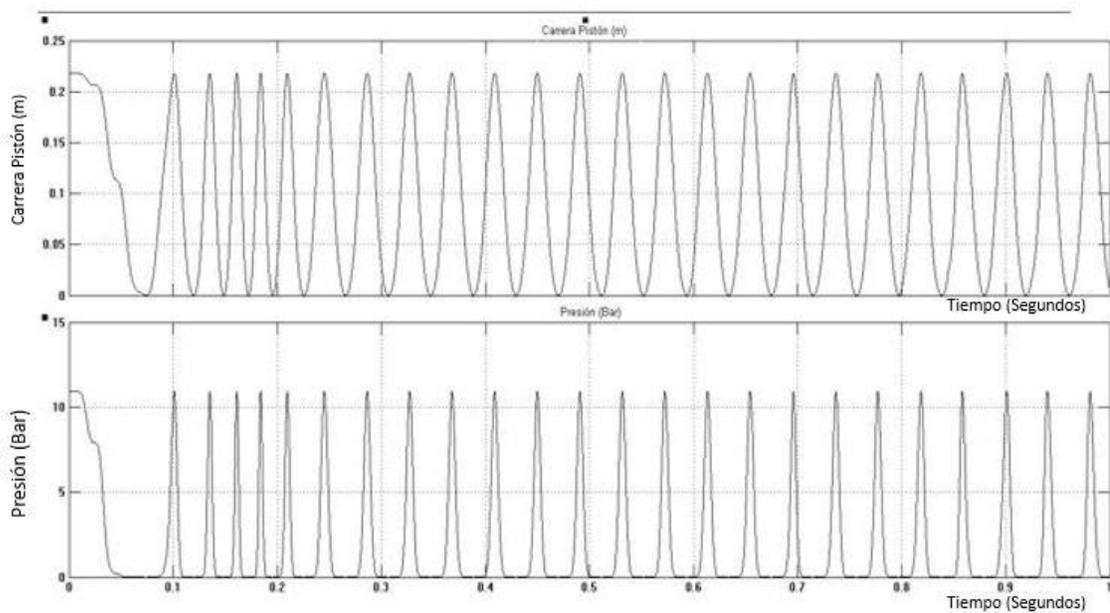


Figura 2-6 Desplazamiento (m) y presión (Bar)

La que tiene lógica debido a que su movimiento sinusoidal representa el movimiento desde el punto muerto inferior al punto muerto superior, explicado anteriormente. A su vez la presión presenta la misma forma de onda que la del desplazamiento dado que esta función depende del movimiento del desplazamiento.

La simulación de la figura anterior es mediante el siguiente proceso de bloques en Simulink, para el desplazamiento del pistón.

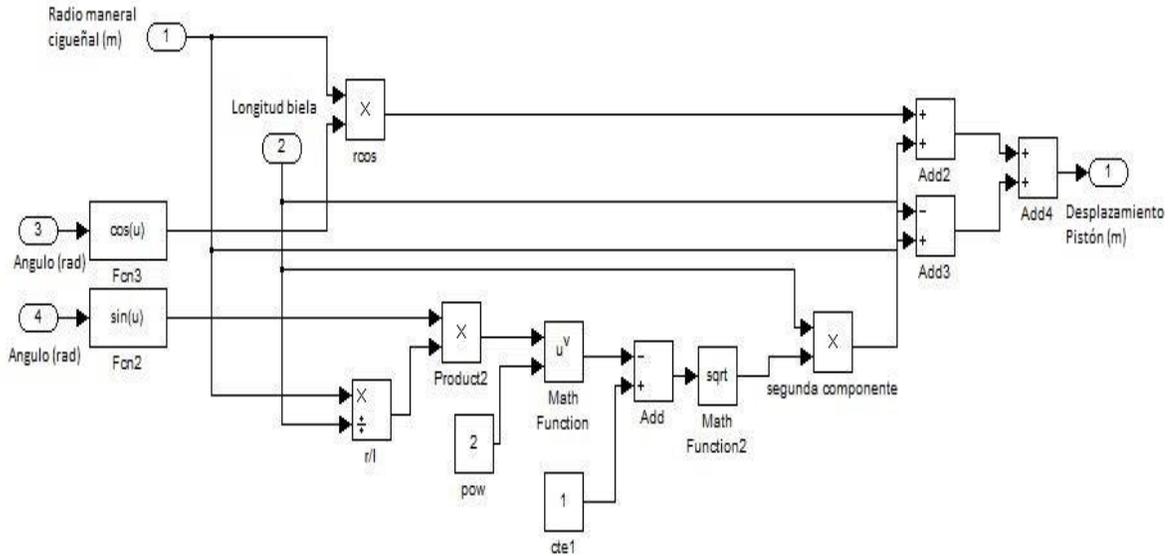


Figura 2-7 Diagrama de bloques simulink desplazamiento

Para la función presión, dependiente del desplazamiento se el diagrama de bloques es como se muestra a continuación.

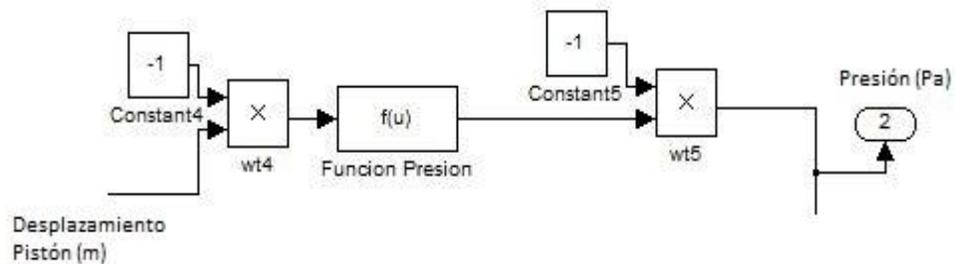


Figura 2-8 Diagrama de bloques simulink presión

Siguiendo con la verificación de las simulaciones, podemos simular la fuerza que se ejerce sobre el pistón siendo en la ecuación (1-4):

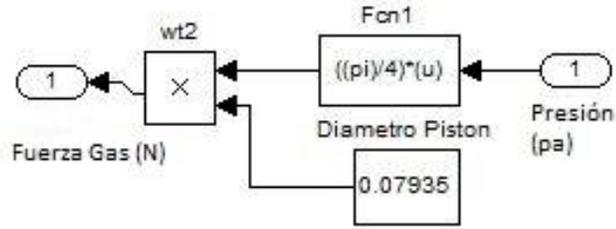


Figura 2-9 Diagrama de bloques simulink fuerza del gas

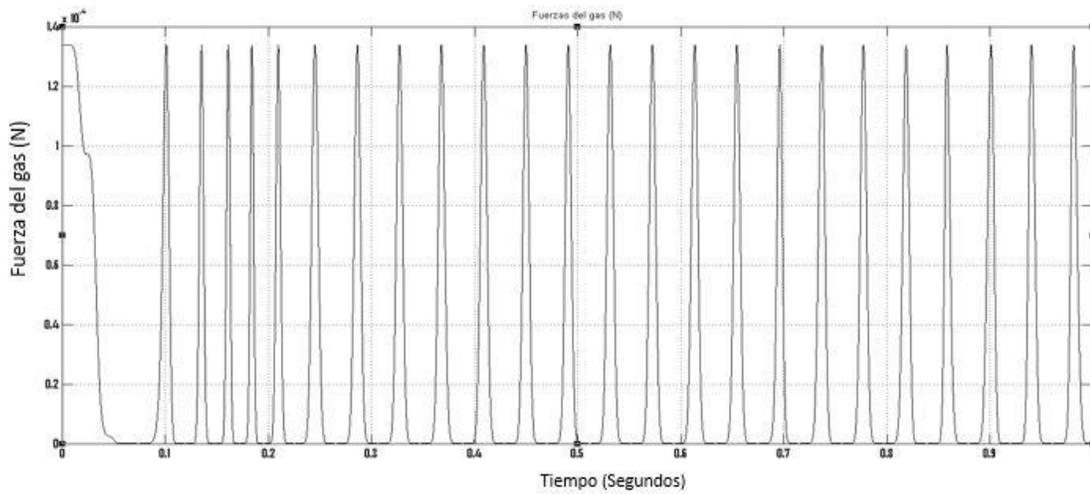


Figura 2-10 Forma de onda de fuerza del gas

Según esta forma de onda y viendo el orden de las unidades, esta fuerza aportará un torque pequeño al momento de la retroalimentación, proceso que se realizará más adelante.

Así llegamos a la parte final de las funciones que impactan en el compresor, siendo las últimas y las más importantes la de torque de aceleración (1-6) y torque del gas (1-7), obteniendo con ellas la suma de las dos la fórmula para el torque total del compresor (1-5).

Primero se simuló la ecuación correspondiente al torque de aceleración (1-7), donde su diagrama de bloques y correspondiente forma de onda se presenta de la siguiente forma.

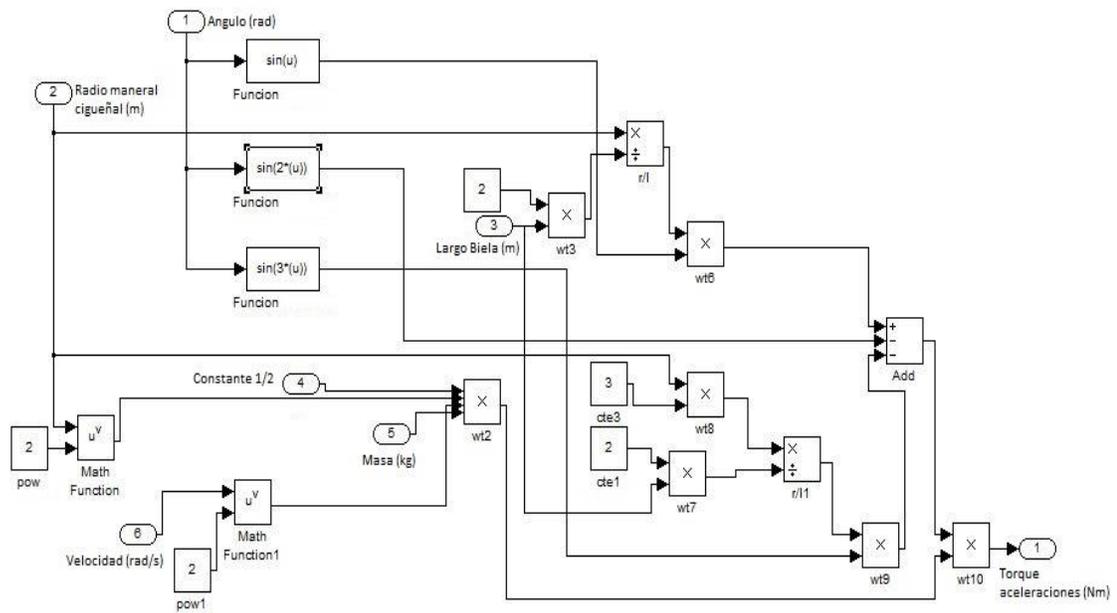


Figura 2-11 Diagrama de bloques simulink torque de aceleraciones

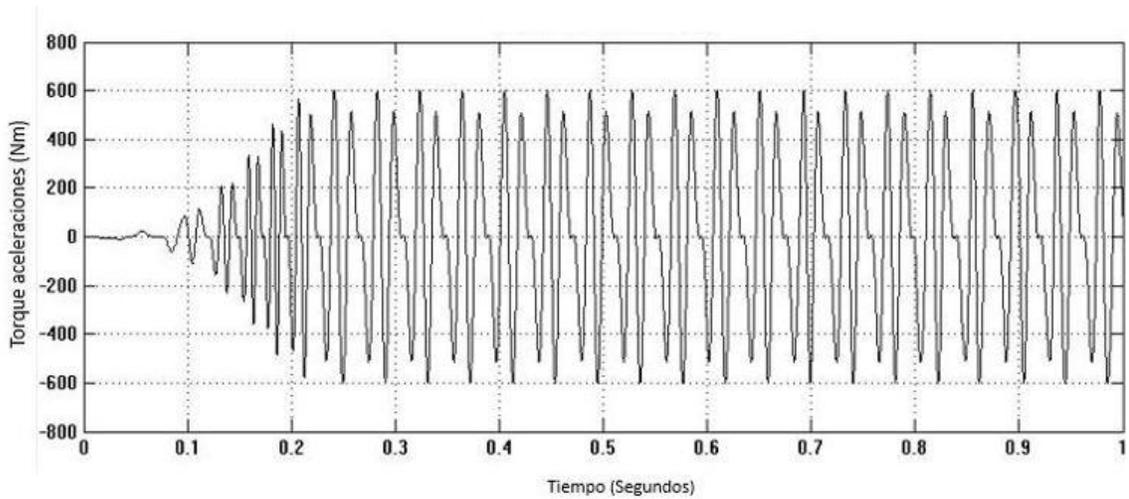


Figura 2-12 Forma de onda de torque de aceleraciones

Para el caso del torque del gas (1-6), se sigue con la función gas (1-4) y con los datos de compresor de manera que el diagrama de bloques y la curva sea de la siguiente forma:

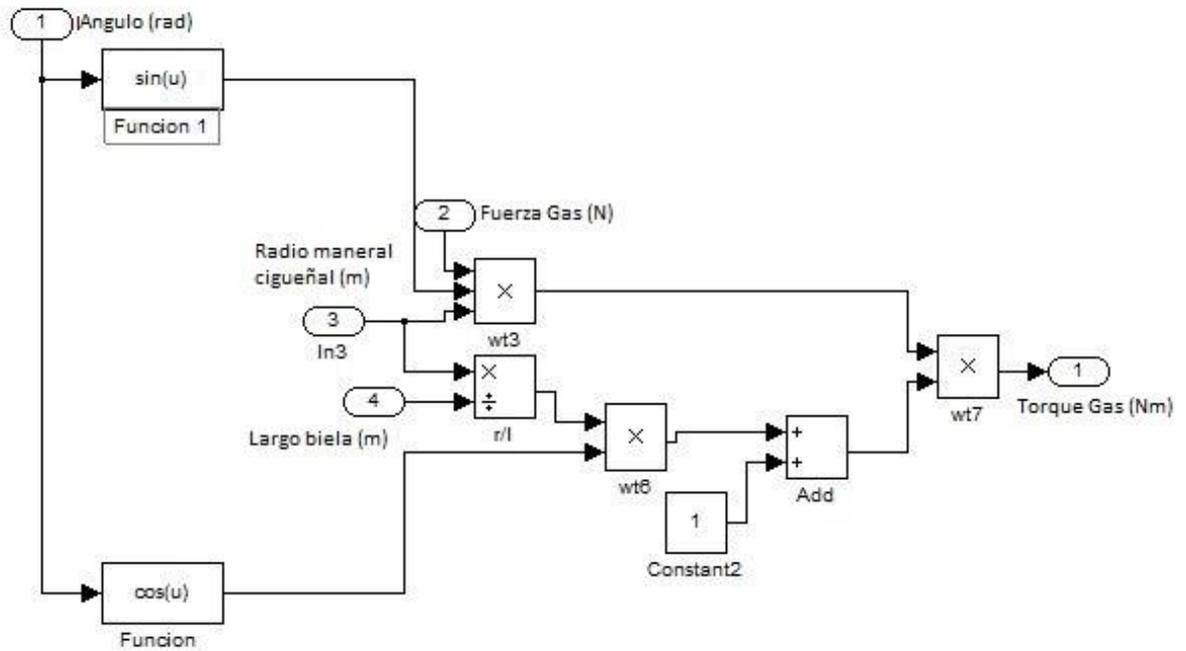


Figura 2-13 Diagrama de bloques simulink torque del gas

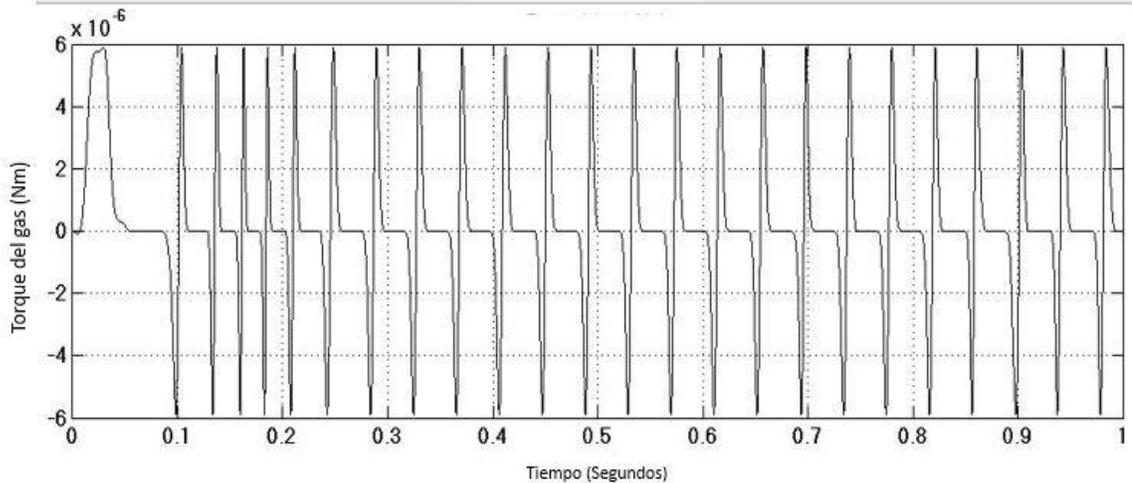


Figura 2-14 Forma de onda torque del gas

Así de manera simple se puede encerrar todo en un subsistema donde se colocan todas las ecuaciones y relaciones ocupadas anteriormente, donde ahora la entrada será la velocidad (rad/s), el radio del maneral del cigüeñal (m), el largo de la biela (m) y la masa (kg), obteniendo de salida la carrera del pistón (m), la presión (Pa). Out 3 y out 4 corresponden a los torques de aceleración y del gas respectivamente, para luego mediante un bloque suma obtenemos el torque final ejercido por el compresor

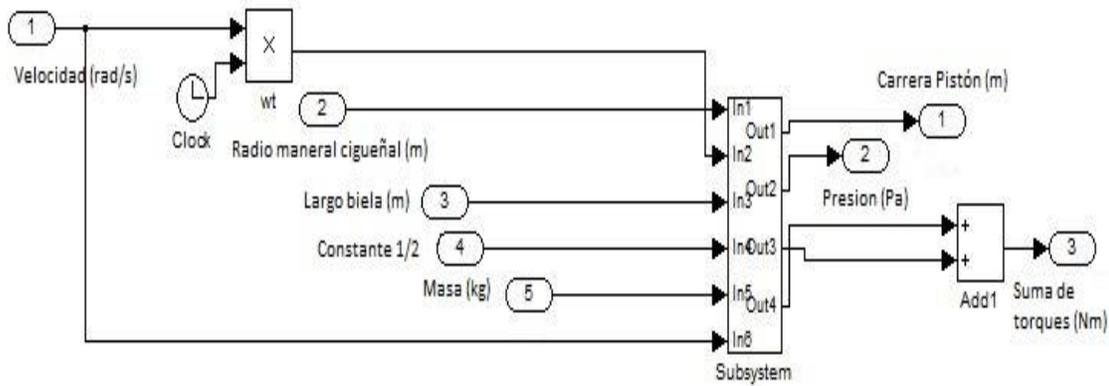


Figura 2-15 Diagrama de bloques simulink torque final

El torque final tiene la siguiente forma de onda, que es muy similar al de torque de aceleración debido a que el torque del gas casi no tiene repercusión sobre el torque final.

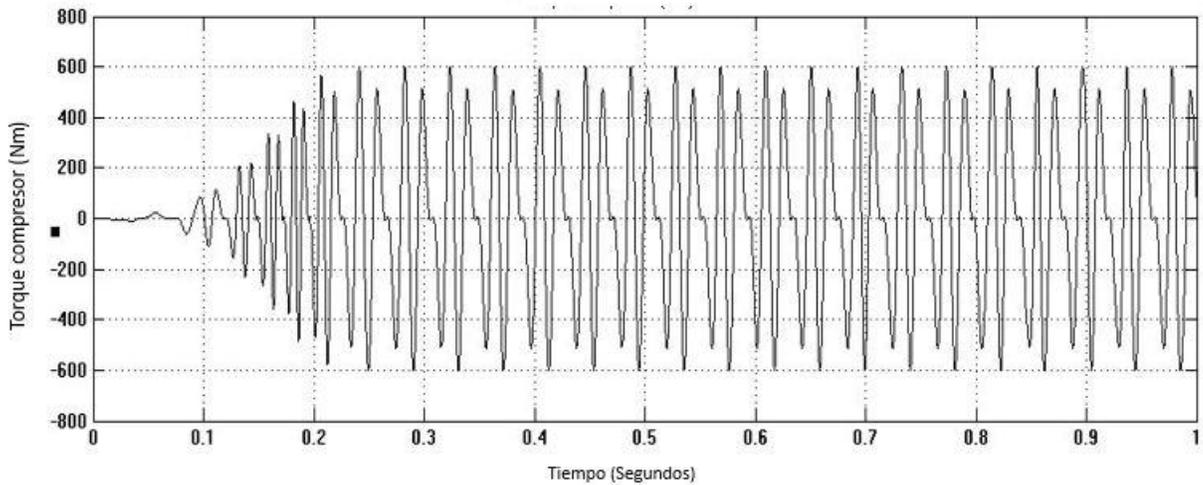


Figura 2-16 Forma de onda torque final

Si bien el valor de torque es demasiado grande, esto se debe a que la inyección de torque al motor es una constante de 20 (Nm).

2.1.4 Compresor con retroalimentación de torque.

En la sección 3.1.2 se mostró el comportamiento del compresor con un torque constante, esta operación es para verificar la teoría y las formas de onda empleadas en el libro Diseño de máquinas de Robert L. Norton. Pero en la realidad el compresor genera un torque que es ingresado al motor, haciendo el proceso de retroalimentación. El torque retroalimentado al motor genera las siguientes curvas. Este tipo de configuración se probó con motores de distinta potencia entregando formas similares pero que nunca fueron las obtenidas en la sección 3.1.2.

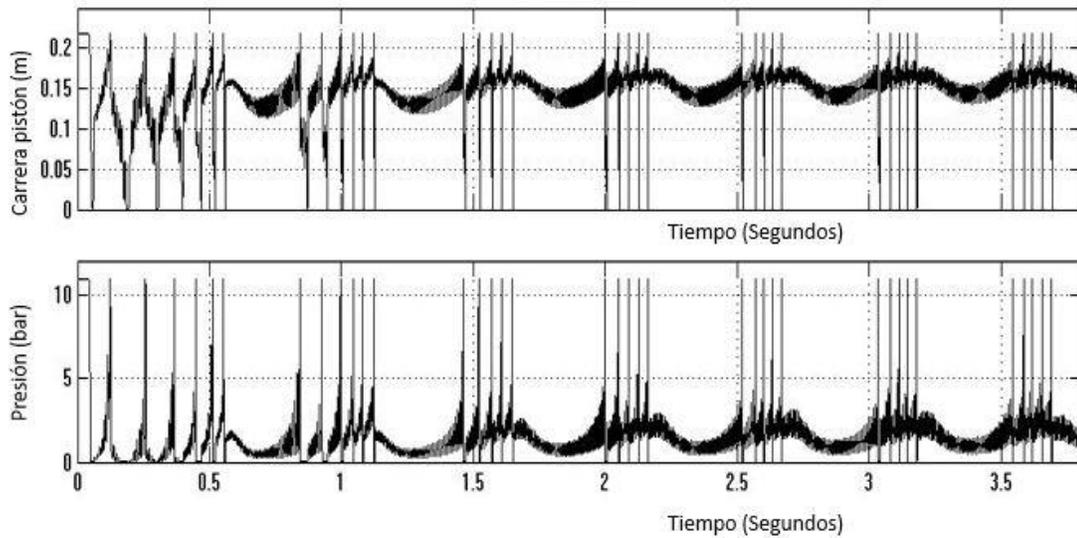


Figura 2-17 Carrera y presión de pistón

Como el proceso es de partida directa en la siguiente figura, se aprecia, que la velocidad tiene un alza de 0 a 80 (Rad/s) en 0.2 segundos. Siendo lo más importante la intensidad de corriente para hacer accionar el sistema partiendo de 0 (A) recorre, en forma de un semi-impulso, hasta llegar a los 100 (A). Este efecto que tiene la intensidad de corriente para con el motor no es recomendable, porque puede producir daños al interior del motor y acortar la vida útil.

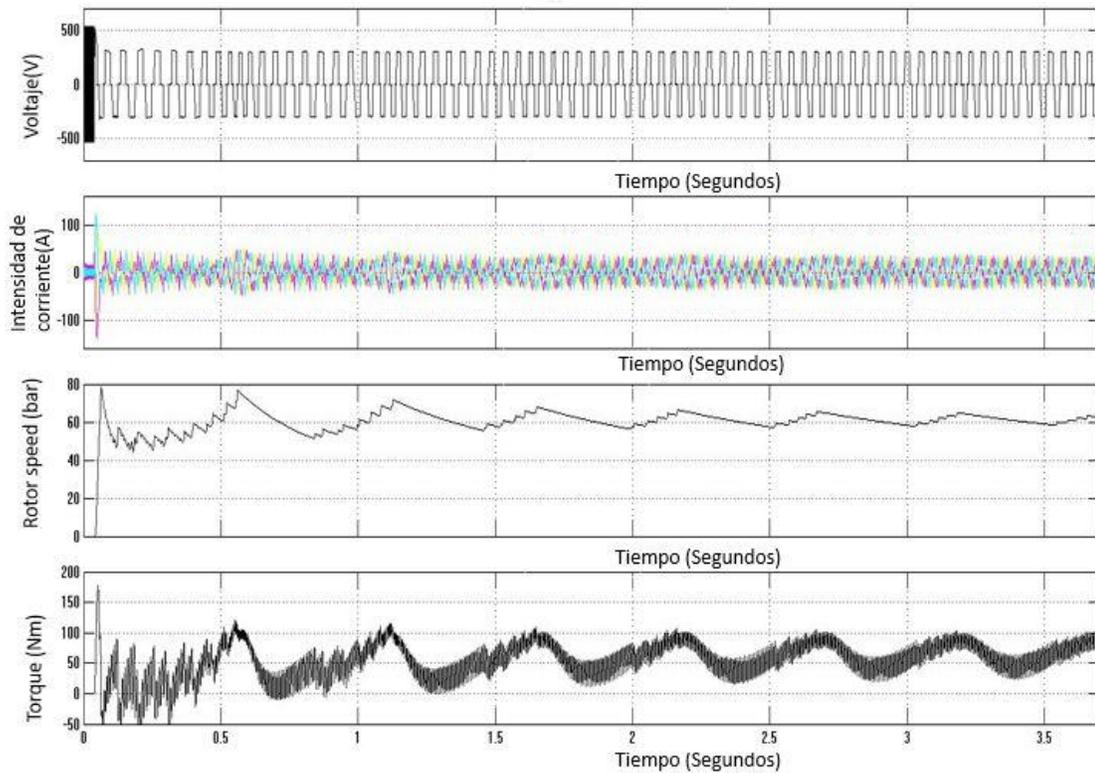


Figura 2-18 Formas de onda de scope variador de frecuencias

El torque ejercido oscila entre los 100 y los 0 (Nm), en el cual también se produce un fuerte incremento en el principio para luego empezar a tomar una forma más estable oscilando entre los 15 a 100 (Nm).

2.1.5 Tanque de almacenamiento

Para la simulación del llenado del tanque de almacenamiento, se necesitó calcular el caudal de entrada al estanque y tener en cuenta los niveles límites del estanque descritos anteriormente, para este caso el tanque de almacenamiento será un tanque de 25 (litros) según la formula (3-1).

$$Vd = \frac{15 \cdot Qs}{Z \cdot \Delta p} \tag{2-1}$$

$$Vd = \frac{15 \cdot 6.6}{2 \cdot (11 - 9)} = 25$$

El caudal suministrado es obtenido mediante la siguiente formula:

$$Qs = V \cdot n \cdot \eta \tag{2-2}$$

Donde V es el volumen de aire recorrido por el pistón en una carrera, desde el punto muerto inferior al punto muerto superior; n es la velocidad medida en revoluciones por minutos y

finalmente η es el rendimiento del compresor, al ser un compresor real no funciona al 100% de su capacidad.

La ecuación (3-2) puede reescribirse para la obtención del caudal en función de los parámetros del compresor. Donde V y η toman las siguientes funciones

$$V = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L \cdot i \cdot Z}{4} \tag{2-3}$$

$$\eta = 1 - c(r^{\frac{1}{k}} - 1) \tag{2-4}$$

Así para el caso del volumen recorrido queda en funciones de D que es el diámetro del embolo en (m), L es el largo de la carrera en (m), i representa si el pistón es de simple o doble efecto y Z es el número de cilindros.

Para (3-4) los parámetros del rendimiento son los siguientes, c corresponde al espaciamiento que existe entre cada carrera o cilindrada, se asume que esta entre un 6% y 12% de cada carrera, r es la relación de compresión y finalmente k es la relación de proporción entre el caudal suministrado y el caudal de salida por acción del usuario.

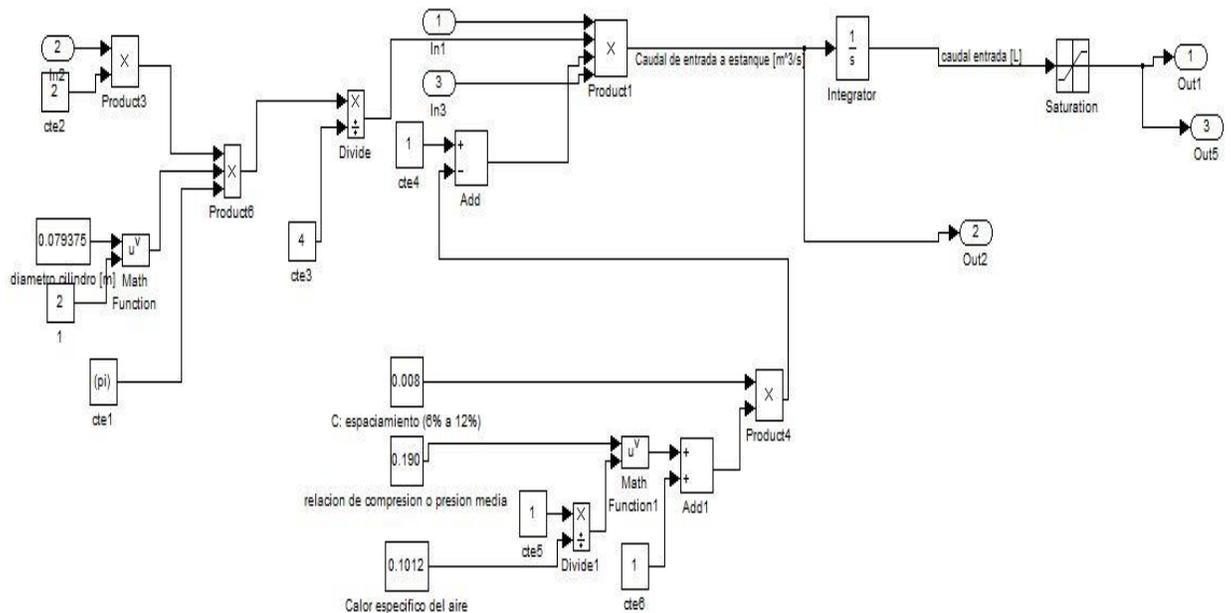


Figura 2-19 Diagrama de bloques simulink tanque de almacenamiento

Con estas ecuaciones se grafica el caudal de entrada al tanque de almacenamiento y siguiendo el procedimiento señalado en la figura anterior se obtienen las gráficas de caudal de entrada al estanque.

Como el caudal que está siendo ingresado tiene directa relación con la velocidad del motor, y teniendo en cuenta que el proceso sigue siendo de partida directa es que se tiene la siguiente forma de onda para el caudal de entrada al estanque.

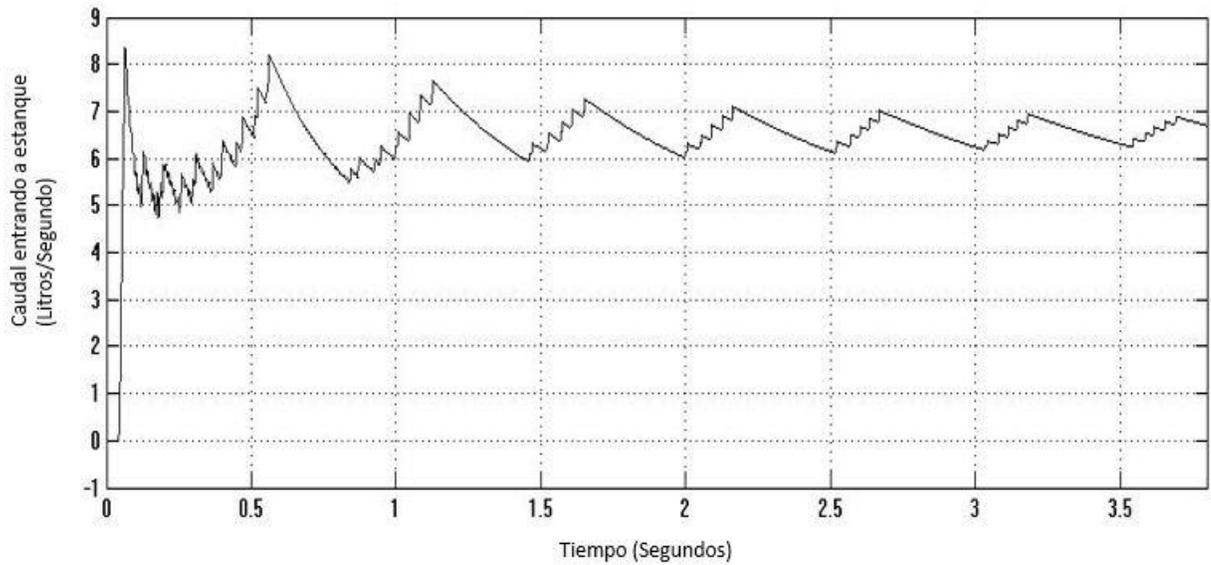


Figura 2-20 Forma de onda caudal ingresando a tanque de almacenamiento

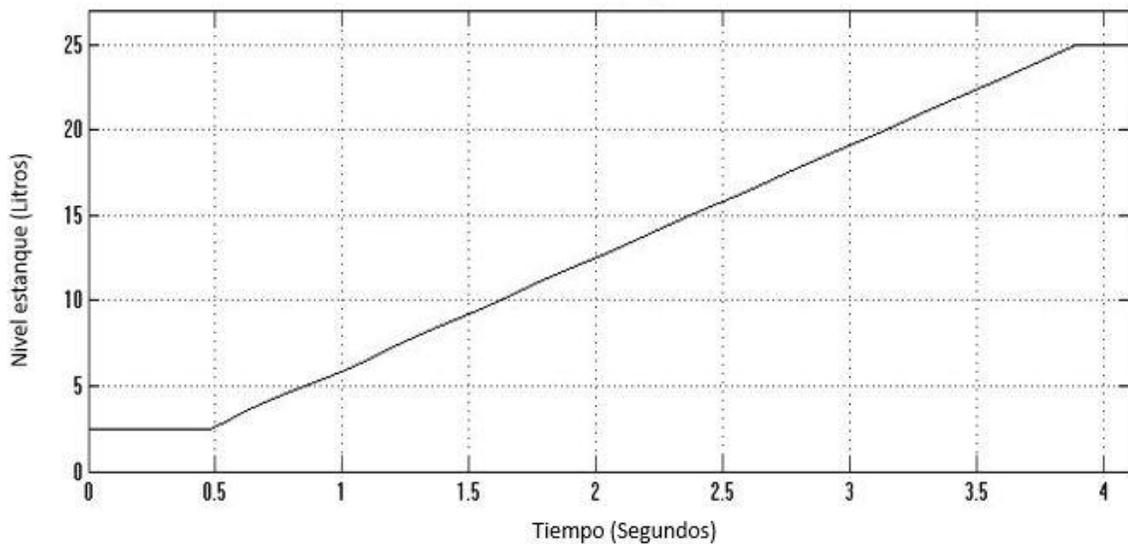


Figura 2-21 Forma de onda nivel de estanque

Como se explicó anteriormente el tanque de almacenamiento genera una contrapresión al compresor, produciendo un torque al motor, que si bien no es tan significativo es posible desarrollarlo mediante el siguiente diagrama de bloques.

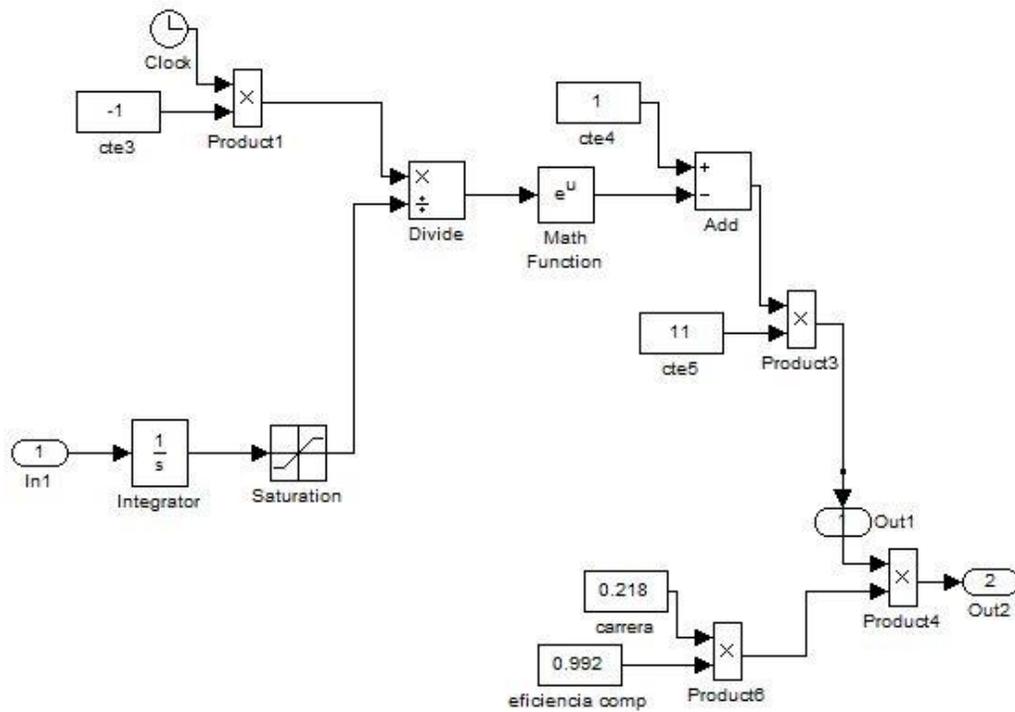


Figura 2-22 Diagrama de bloques simulink contrapresión y torque ejercido

Del cual las variables que se desean se visualizan en las siguientes figuras siendo, la presión acumulada y el torque producido por el tanque de almacenamiento respectivamente.

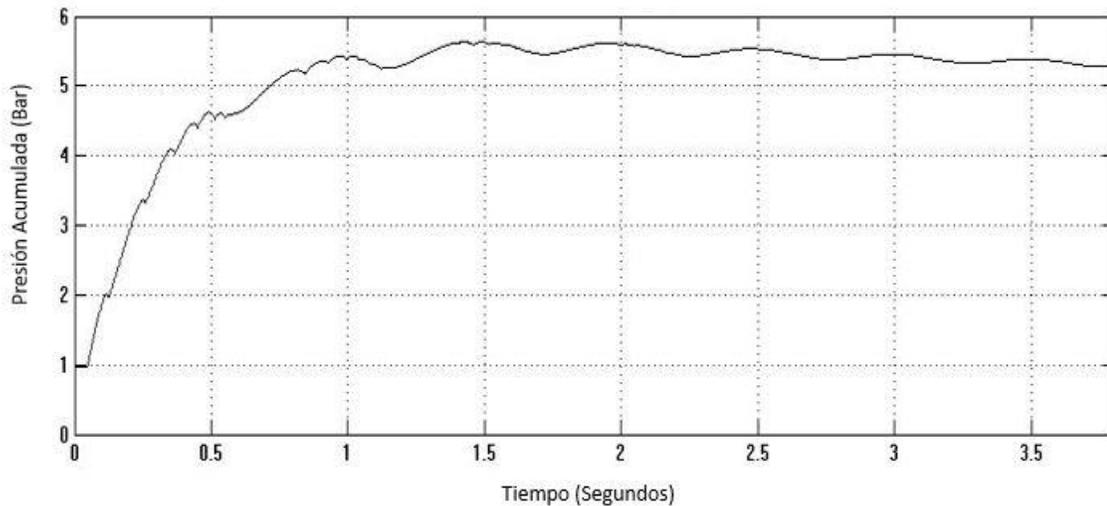


Figura 2-23 Forma de onda presión acumulada

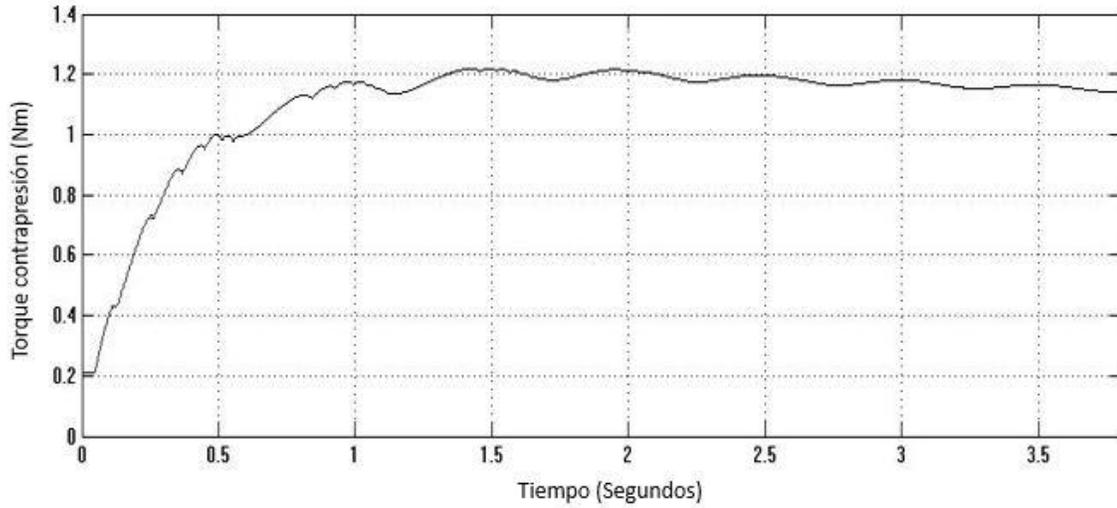


Figura 2-24 Forma de onda de torque contrapresión

2.2 Variador de frecuencia.

Como se explicó el variador de frecuencia es un elemento de electrónica que controla la velocidad del motor en este sistema y haciendo posible la atenuación de las corrientes de partida del motor.

Para representar al variador de frecuencias, el Profesor Guía Don Rene Sanhueza armó y conectó el variador de frecuencias que se utilizará en las fases siguientes del proyecto.

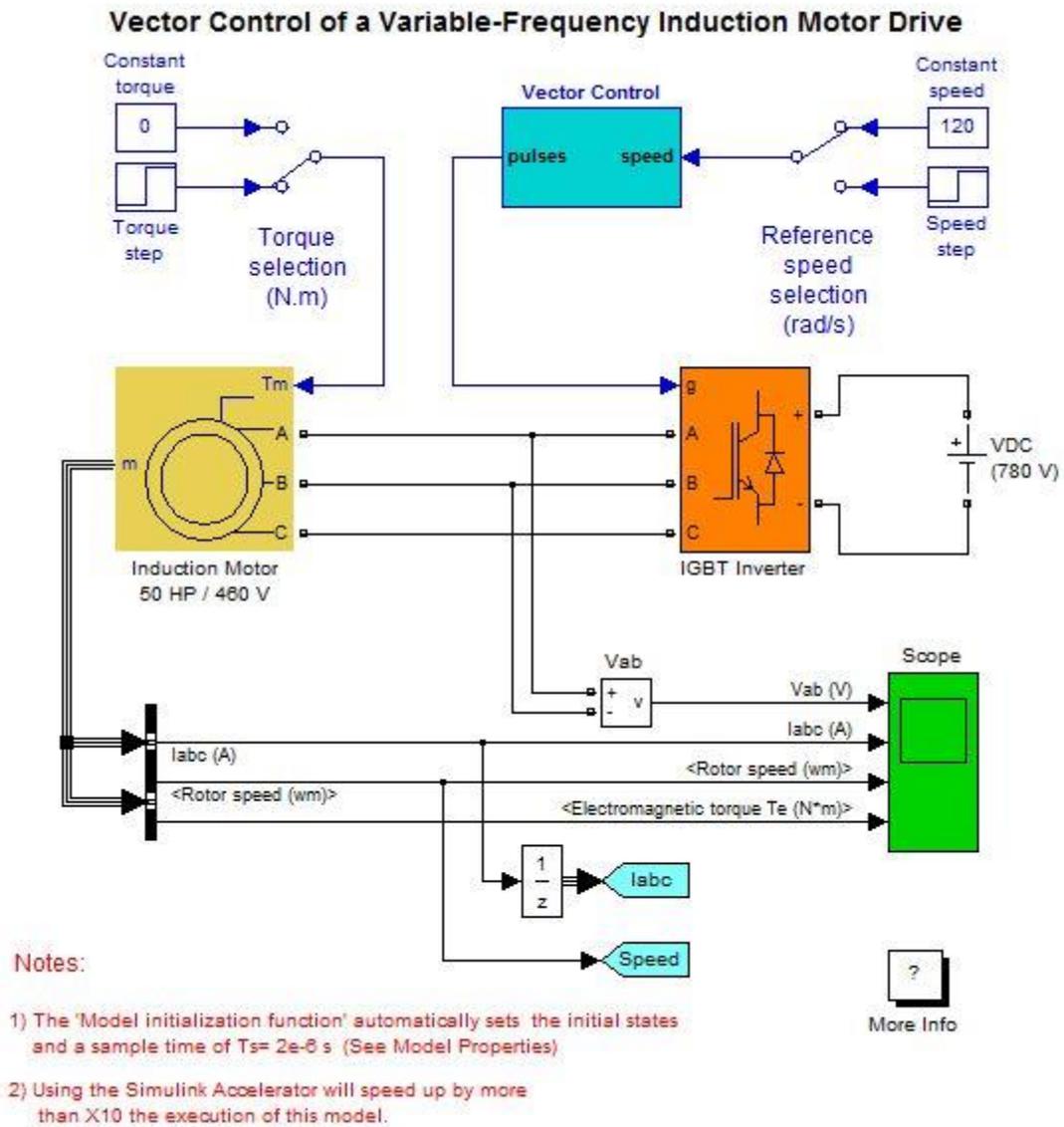


Figura 2-25 Variador de frecuencias Simulink

Las especificaciones de los elementos antes mostrados se detallan en las siguientes gráficas.

Para el inversor IGBT se tomaron los parámetros para su funcionamiento.

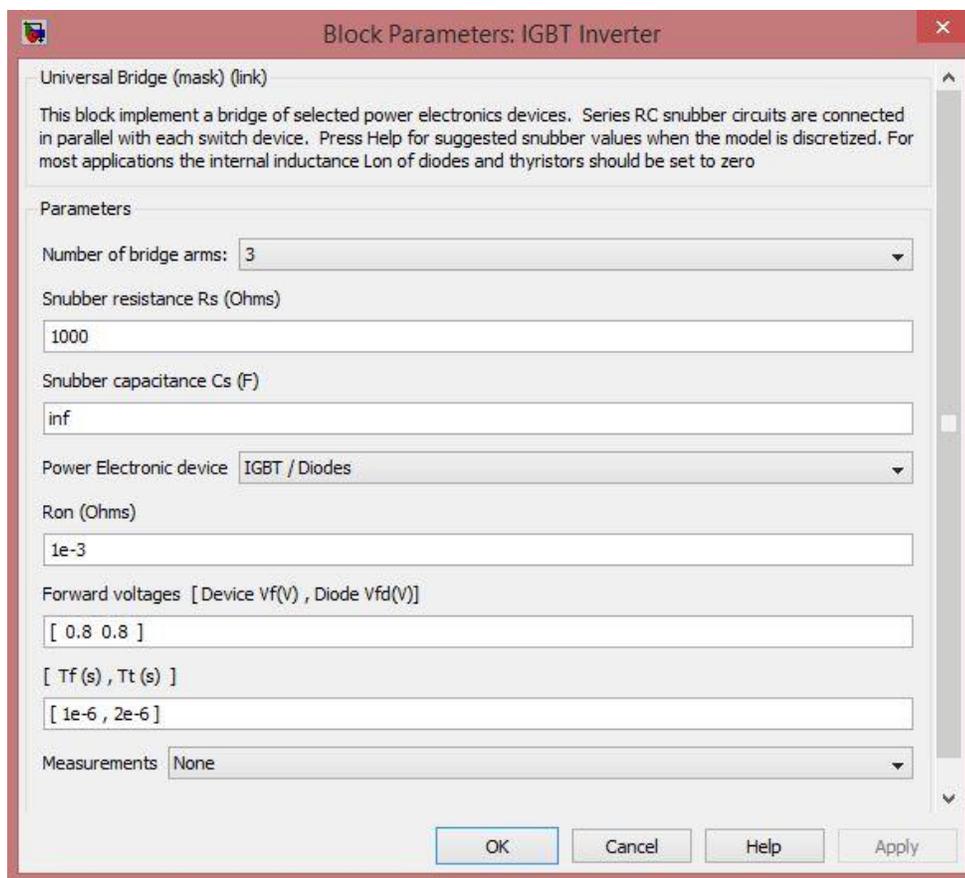


Figura 2-26 Parámetros inversor

Las variables que se miden en el scope del variador de frecuencias son la tensión de entrada al motor (V), las corrientes de estator (A), la velocidad (rpm) y el torque (Nm).

2.3 Simulación de accionamiento mediante variador de frecuencia.

Las simulaciones siguientes corresponden a las partidas del compresor mediante el uso del variador de frecuencia, estas partidas son relacionadas con las frecuencia a la que trabajará el sistema, vale decir, de 50 (Hz) a los 10 (Hz).

En esta sección del proyecto se notó que la frecuencia de accionamiento no varía de los 50 (Hz) hasta los 30 (Hz) esto puede ser debido al torque retroalimentado que ejerce el compresor, el tanque de almacenamiento y por un efecto del variador de frecuencia.

Así, entonces, las frecuencias evaluadas para esta sección solo serán las 50 (Hz), 20 (Hz) y 10 (Hz). Todas las simulaciones tienen la misma aceleración, es decir, la pendiente para la cual la velocidad parte en 0 (Rad/s) para que llegue a la velocidad de frecuencia, esta pendiente será de 40 (Rad/s²). Se escoge esta aceleración para ahorrar tiempo ya que sólo se demostrará el efecto del variador de frecuencias, por lo tanto a medida que se programe el variador de frecuencias para una aceleración menor, demorará más en llegar a la velocidad de la frecuencia que está trabajando la máquina.

2.3.1 Simulación de accionamiento utilizando variador de frecuencia a 50 (Hz).

Para la gráfica de las variables medidas por el scope del variador de frecuencia, se nota el cambio producido al notar que las corrientes al inicio son atenuadas por el efecto de la variación de velocidad, eliminando parcialmente la corriente de arranque que en partida directa existía. También se puede ver cómo avanza la velocidad, en forma de rampa, dada la configuración establecida. De modo final el torque también sufre un cambio y éste se representa al inicio el cual, se concluye que la velocidad al ser pequeña en un comienzo no logra mover el eje para hacer funcionar al compresor, así hasta que llega la velocidad a un estado constante de 60 (Rad/s) es que el torque logra tener una forma más parecida al estado estacionario de partida directa.

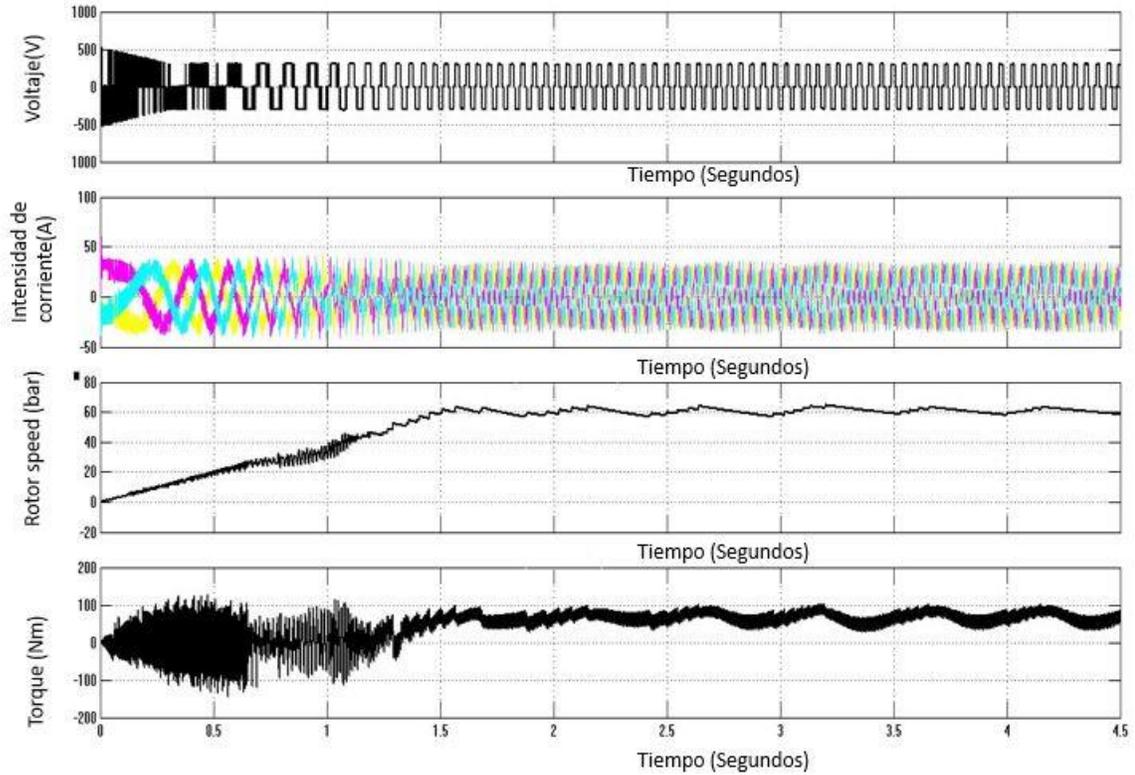


Figura 2-27 Formas de onda scope variador de frecuencias

El efecto del variador de frecuencias también repercute en el llenado del estanque de almacenamiento, haciendo que el caudal tenga en el comienzo una especie de rampa.

Con esta forma de onda de la velocidad y el torque podemos obtener la potencia en el eje de esta forma:

$$Peje = Torque \cdot Velocidad \tag{3-5}$$

Así con esta ecuación y reemplazando con los valores obtenidos de la simulación en la figura (3-28), se tiene:

$$Peje_{50hz} = 60 \cdot 80 = 4800 \text{ (W)} \tag{2-6}$$

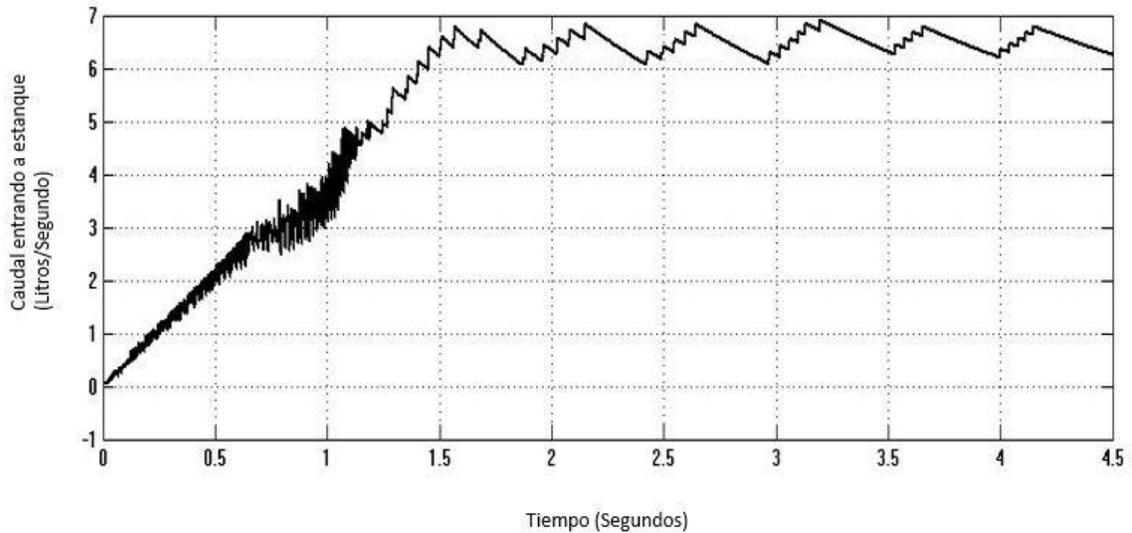


Figura 2-28 Forma de onda caudal de entrada a estanque de almacenamiento

El llenado del estanque sufre un pequeño cambio en el tiempo de llenado, dado que el caudal ahora no parte inicialmente con un caudal constante, hace que el llenado se demore.

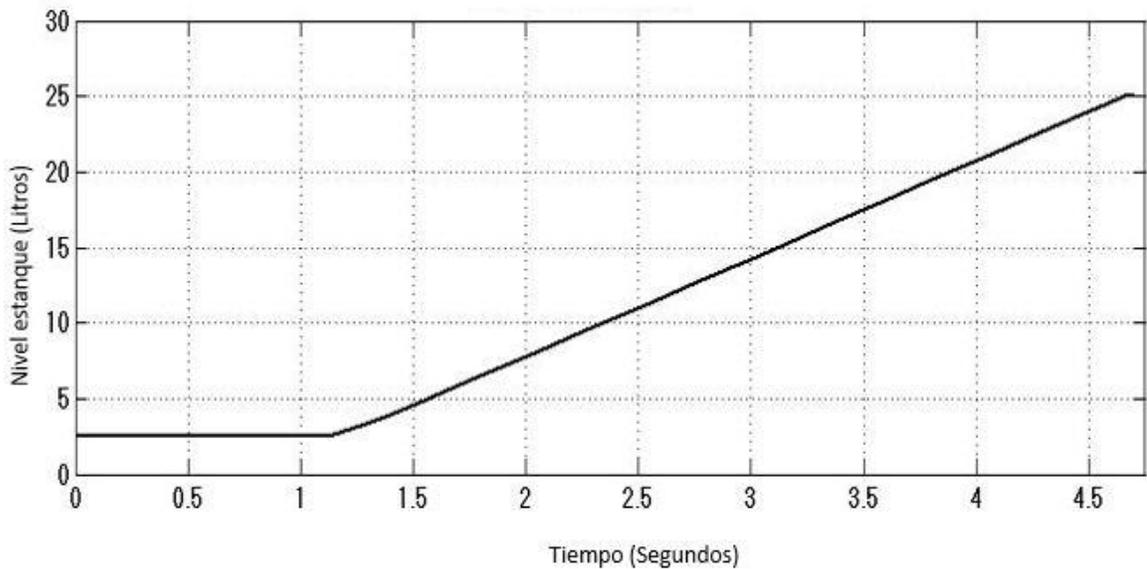


Figura 2-29 Forma de onda nivel de estanque

2.3.2 Simulación de accionamiento utilizando variador de frecuencia a 20 (Hz).

El efecto a 20 (Hz) en la velocidad hace que las corrientes se atenúen aún más, haciendo que los demás procesos también se hagan más lentos. Es así que la velocidad se ve reflejada en el scope del variador de frecuencias, si bien es casi similar es por el efecto que el torque mecánico alcanza al torque eléctrico, haciendo que se vea igual que en los 50 (Hz).

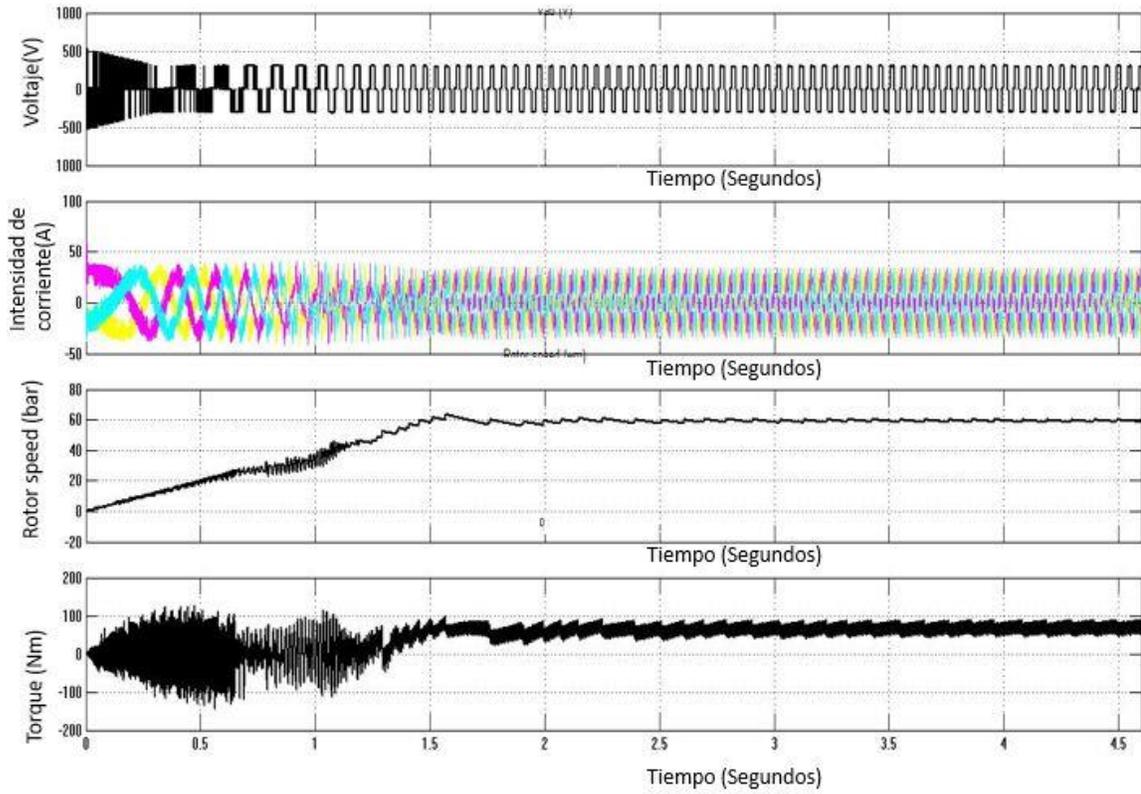


Figura 2-30 Formas de onda scope variador de frecuencias

Entonces ocupando la formula (3-5) podemos obtener la potencia en el eje. Así con esta ecuación y reemplazando con los valores obtenidos de la simulación en la figura (3-31), se tiene:

$$Peje a 20 (Hz) = 80 \cdot 60 = 4800 (W) \tag{2-75}$$

Las curvas para el llenado del estanque de almacenamiento y para el caudal de entrada, son similares que para el caso de 50 (Hz).

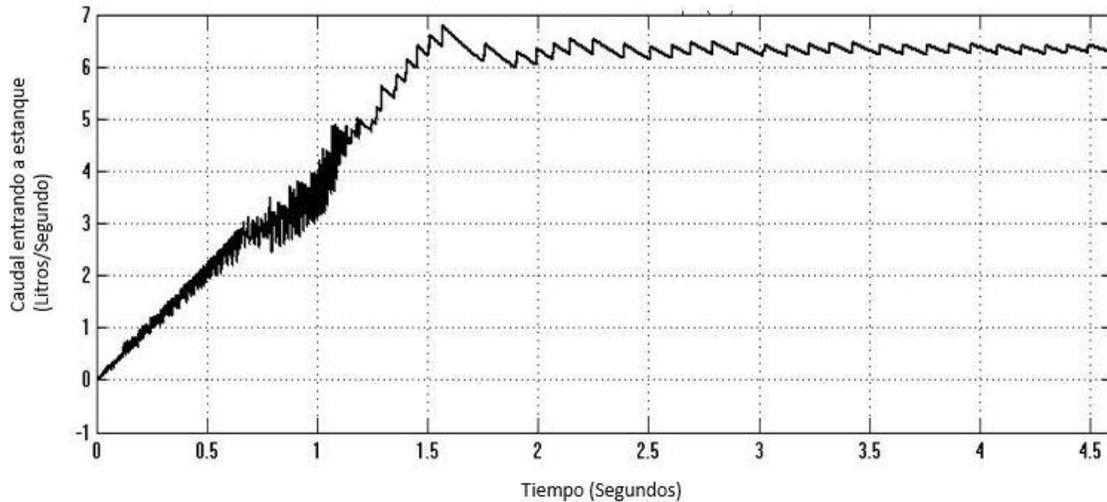


Figura 2-31 Forma de onda caudal entrada a estanque de almacenamiento

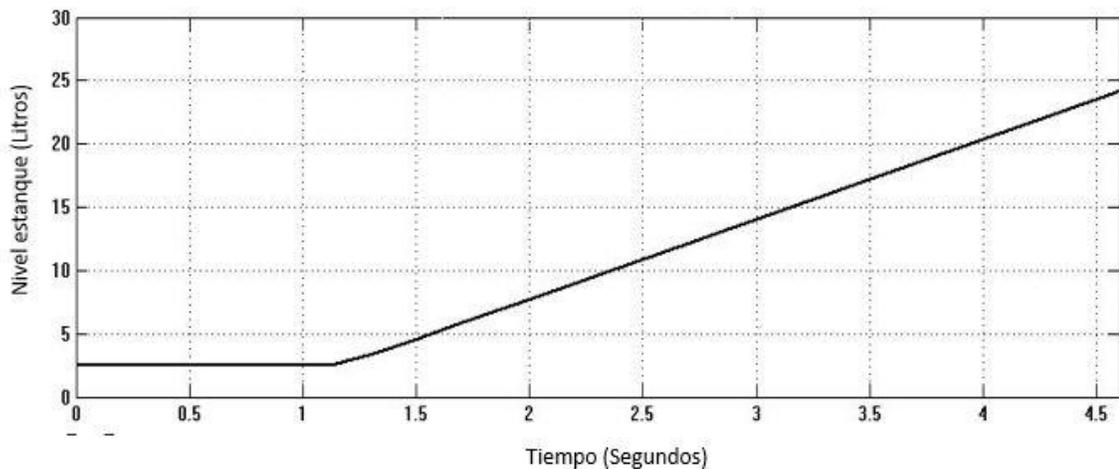


Figura 2-32 Nivel de estanque de almacenamiento

2.3.3 Simulación de accionamiento utilizando variador de frecuencia a 10 (Hz)

Donde más existió variación en los procesos mecánicos fue en el accionamiento a 10 (Hz). Esto se puede deber a que a los 31 (Rad/s) el comportamiento mecánico se vea afectado y no pueda funcionar de manera óptima. Aun así es posible tener los resultados requeridos.

El efecto que se produce al accionar la maquina a 10 (Hz) se ve claramente en el scope del variador de frecuencias, donde las corrientes continúan atenuadas por el efecto del cambio paulatino de velocidades de partida, la velocidad alcanza un límite de 31 (Rad/s) en estado estacionario, y finalmente el torque expresado tiene una parte inicial en la cual se ve afectada por el cambio de velocidades, hasta llega a un esta constante con una forma de onda que oscila entre los 80 (Nm) y -80 (Nm), obteniendo así un torque que tiende al valor 0 (Nm).

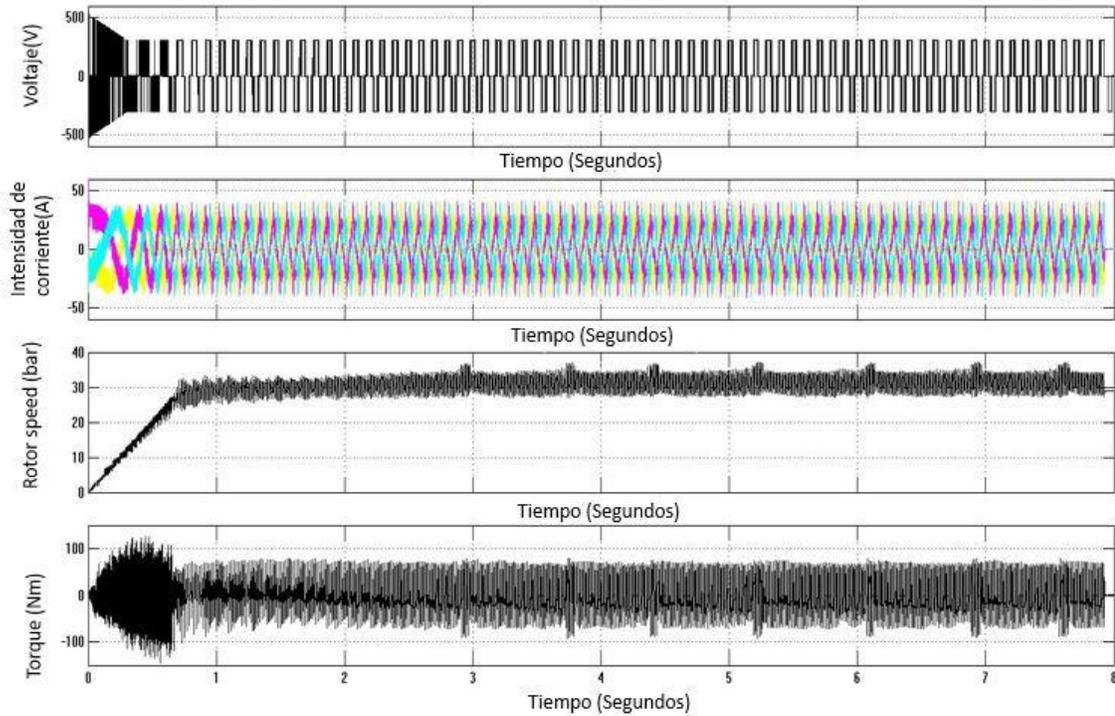


Figura 2-33 formas de onda de scope variador de frecuencias

Entonces ocupando la formula (3-5) podemos obtener la potencia en el eje. Así con esta ecuación y reemplazando con los valores obtenidos de la simulación en la figura (3-34), se tiene:

$$Peje a 10 (Hz) \approx 0 \cdot 30 \approx 0 (W) \tag{2-86}$$

Dado que la velocidad afecta el caudal de aire comprimido que ingresa al estanque de almacenamiento, al estar funcionando a 10 (Hz) el caudal es limitado hasta los 3.5 (L/s) haciendo que el llenado del estanque se demore más que en los casos anteriores.

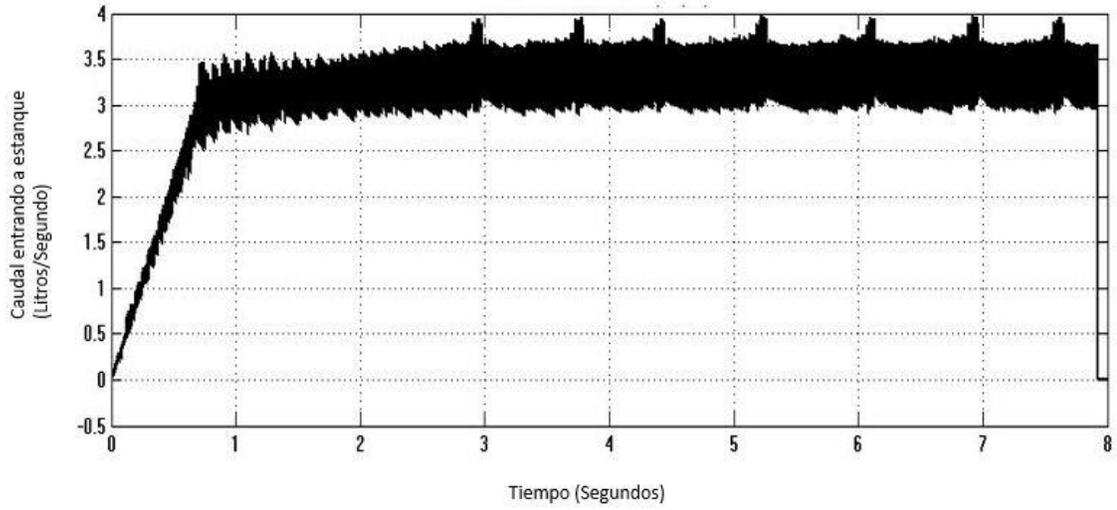


Figura 2-34 Caudal de entrada a estanque de almacenamiento

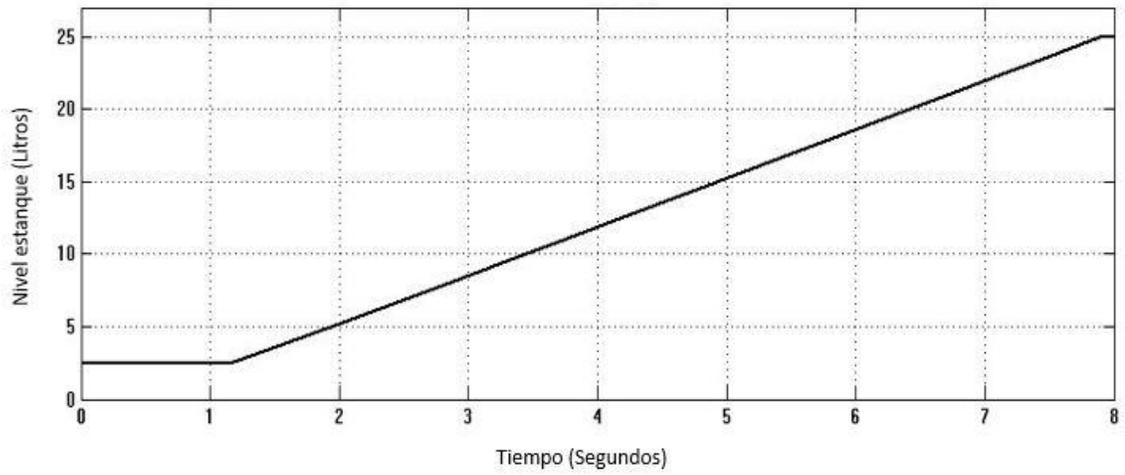


Figura 2-35 Nivel de estanque de almacenamiento

3 Resultados de simulación

Los resultados obtenidos son satisfactorios y muestran los objetivos a lograr, estos resultados muestran la dinámica mecánica como eléctrica del proyecto compresor de aire.

Los resultados más importantes son los referidos al scope del variador de frecuencia controlando al motor, donde se ve claramente el cambio cuando entre la partida directa, vale decir, sin el actuar del variador de frecuencias y cuando se utiliza el variador de frecuencias. Utilizando el variador de frecuencias se logró obtener curvas de intensidad de corriente más suaves, haciendo que la máquina parta paulatinamente sin correr riesgos de daños al interior del motor.

Esta diferencia se puede ver en las 3 mediciones que nos da el scope, la corriente trifásica, la velocidad y el torque. Estas diferencias se logran ver en el estado transitorio del accionamiento.

La primera figura (4-1) corresponde al accionamiento en partida directa y la segunda (4-2) corresponde al accionamiento mediante el variador de frecuencia.

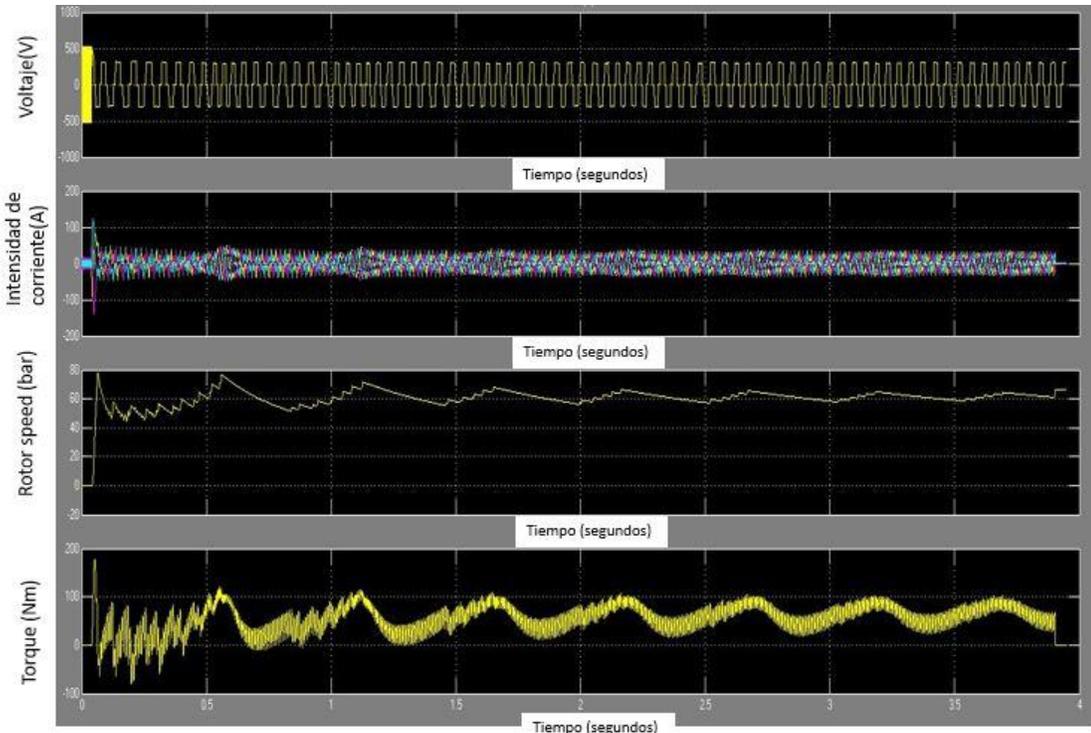


Figura 3-1 Formas de onda resultantes para partida directa

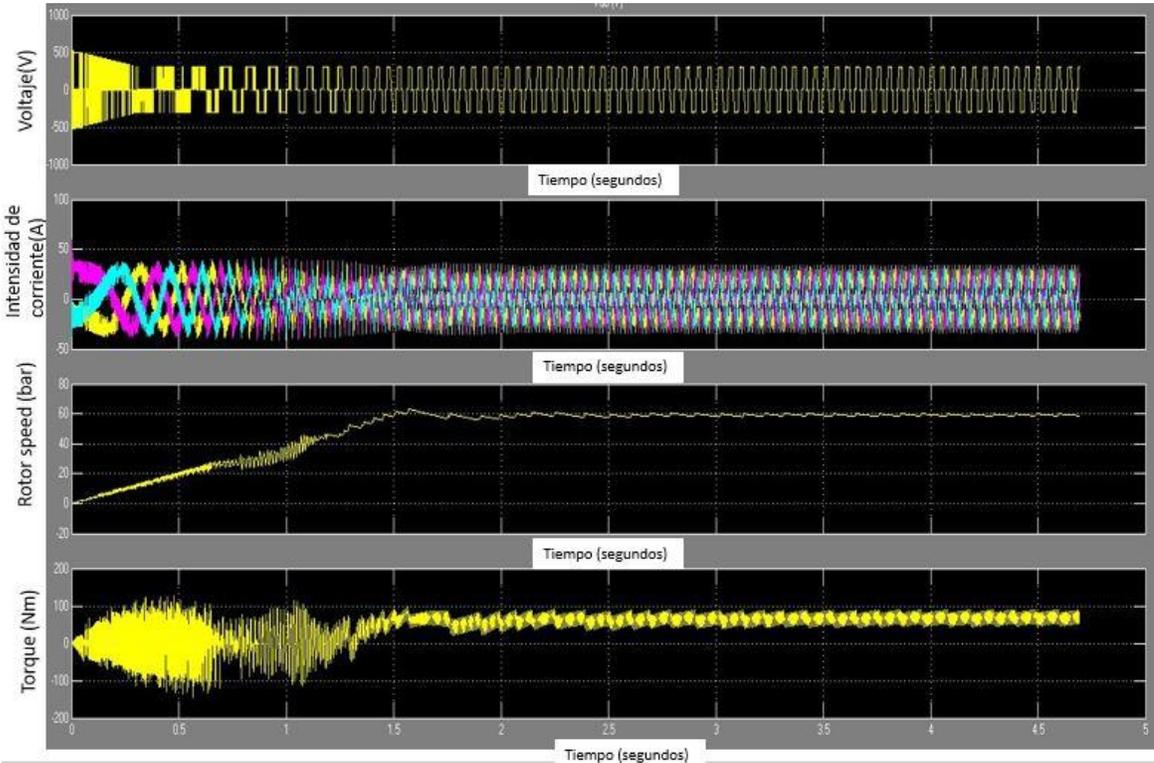


Figura 3-2 Formas de onda resultantes para partida accionada con variador de frecuencia

4 Discusión y Conclusiones.

A modo de concluir, el informe presentó los objetivos que se cumplieron en la etapa de experimentación haciendo posible atenuar las corrientes de partida gracias a la inserción del variador de frecuencias, sin duda esto es beneficioso para el cuidado y mantenimiento de los elementos del motor trifásico de inducción.

De manera concluyente en el proyecto presentado las velocidades que se alcanzan en estado estacionario demoran entre 1 y 4 segundos para llegar a una velocidad constante, esto depende del sistema propio, al cambiar la carga o el motor estas mediciones cambiarán y variarán dependiendo los cambios realizados.

Para optimizar el sistema completo, se recomienda ocupar un compresor de tipo doble acción, que al momento en que tanto el pistón recorra la distancia al punto superior como inferior este succione y expulse aire comprimido hacia el tanque de almacenamiento. Sin duda daría un grado de eficiencia a los movimientos, ya que uno podría pensar en poner una hilera de pistones de simple acción pero eso conlleva a la larga a tener más mantención y más cuidado traduciéndose en costos de operación que no son agradables para el bolsillo del cliente.

A medida disminuye la frecuencia la potencia en el eje será menor, esto dado que el motor consume una potencia que es dependiente de la velocidad controlada por el variador de frecuencia. Claro está que a menor potencia esto significa menores corrientes de arranque reduciendo el impacto en los elementos interiores del motor.

Si bien el sistema no es del todo perfecto dado que hay parámetros que no se establecieron como la temperatura, el proyecto muestra como en la realidad la máquina compresora funciona con la mayoría de sus variables.

5 Trabajos futuros

Primero tomar en cuenta la inserción de la temperatura en la parte mecánica, como afectaría esta variable al proceso.

Segundo sería ideal para la continuación de este proyecto, en la parte mecánica poder visualizar el comportamiento del sistema cuando se active por el usuario en 2 casos, cuando el tanque de almacenamiento este cargado al 100% de su capacidad y cuando se esté cargando. Para entender mejor los posteriores avances de este proyecto es que se hicieron simulaciones donde se podrán ver los cambios que se requieren.

Estas simulaciones corresponden a la siguiente situación, la carga se completa a los 1,2 segundos para luego dejar de funcionar debido a que se desactivó el motor. Luego entre 1,2 y 1,6 segundos se asume que el usuario ocupó el compresor haciendo que el nivel de estanque bajara, mandando así una señal al motor para que vuelva a funcionar cargándose desde los 1,6 a los 4,8 segundos.

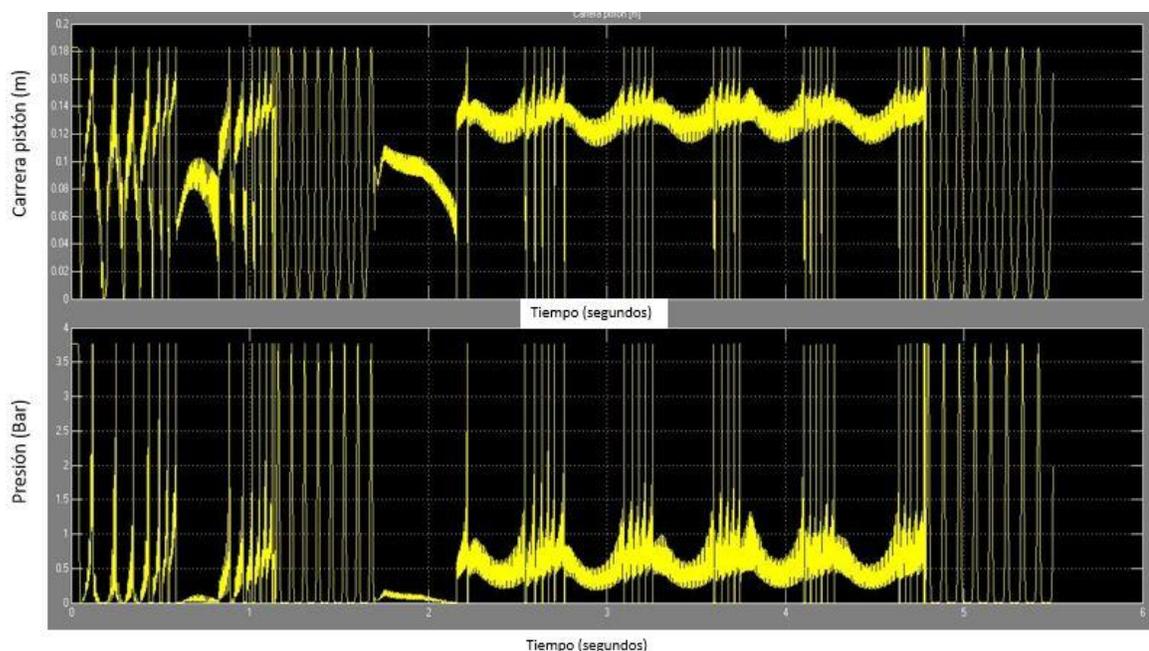


Figura 5-1 Desplazamiento y presión pistón

En el desplazamiento del pistón, el movimiento que éste desarrolla en un principio está aplicado a fuerzas que hacen que el movimiento sea tosco, y para cuando el motor se detiene a los 1,2 segundos este presenta la forma de onda sin torque o torque constante, produciendo un movimiento sinusoidal.

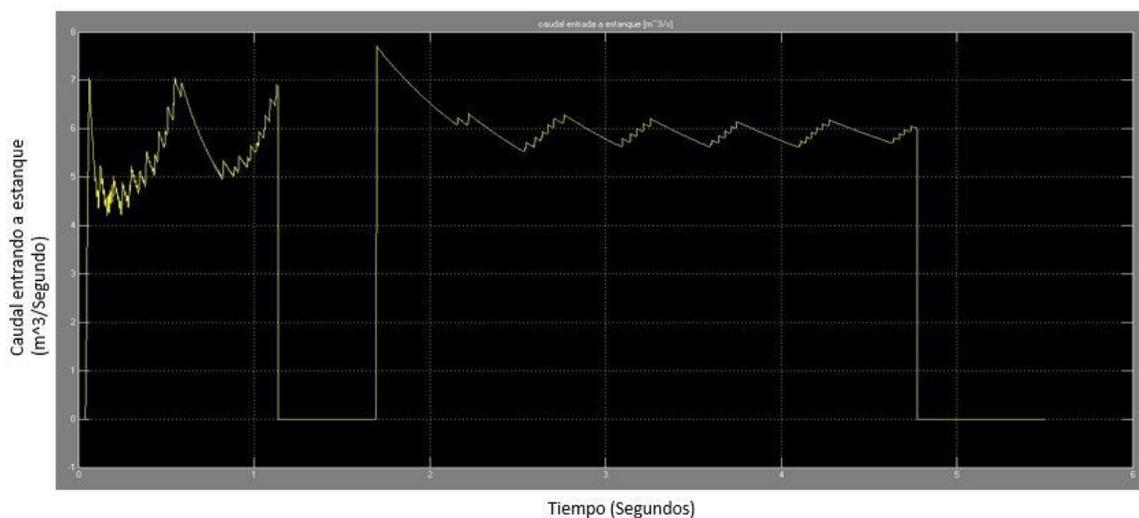


Figura 5-2 Entrada de caudal a tanque de almacenamiento

Para el caudal de entrada ocurre lo siguiente, como el pistón está siendo accionado por el motor que está funcionando en los periodos de tiempo dichos anteriormente, entre 1,2 y 1,6 segundos el motor deja de funcionar haciendo que el caudal en este periodo y en el final sea 0 (m^3/s).

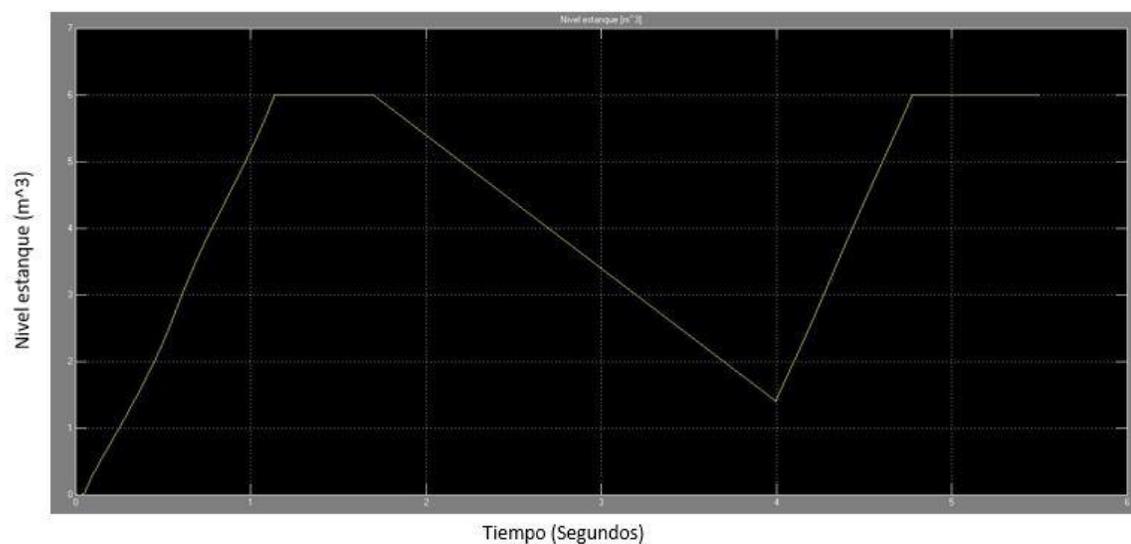


Figura 5-3 Nivel de estanque de almacenamiento

En el caso del tanque de almacenamiento se produce lo siguiente, si bien se ve claramente el máximo nivel de $6 \text{ (m}^3\text{)}$ que llega entre los 1,2 y 1,6 segundos y en la parte final del proceso, el nivel no se condice con el caudal de entrada, ya que la figura que muestra el caudal de entrada al tanque de almacenamiento entre el periodo de 1,6 y 4 segundos el sistema está diseñado para que el tanque de almacenamiento llegue al mínimo nivel, en este caso $2 \text{ (m}^3\text{)}$. Entonces el caudal en exceso es eliminado por las válvulas de seguridad hasta que llega al nivel mínimo, para que en 4 segundos vuelva a cargarse el tanque de almacenamiento, siendo esta carga entre 4 y 4,8 segundos.

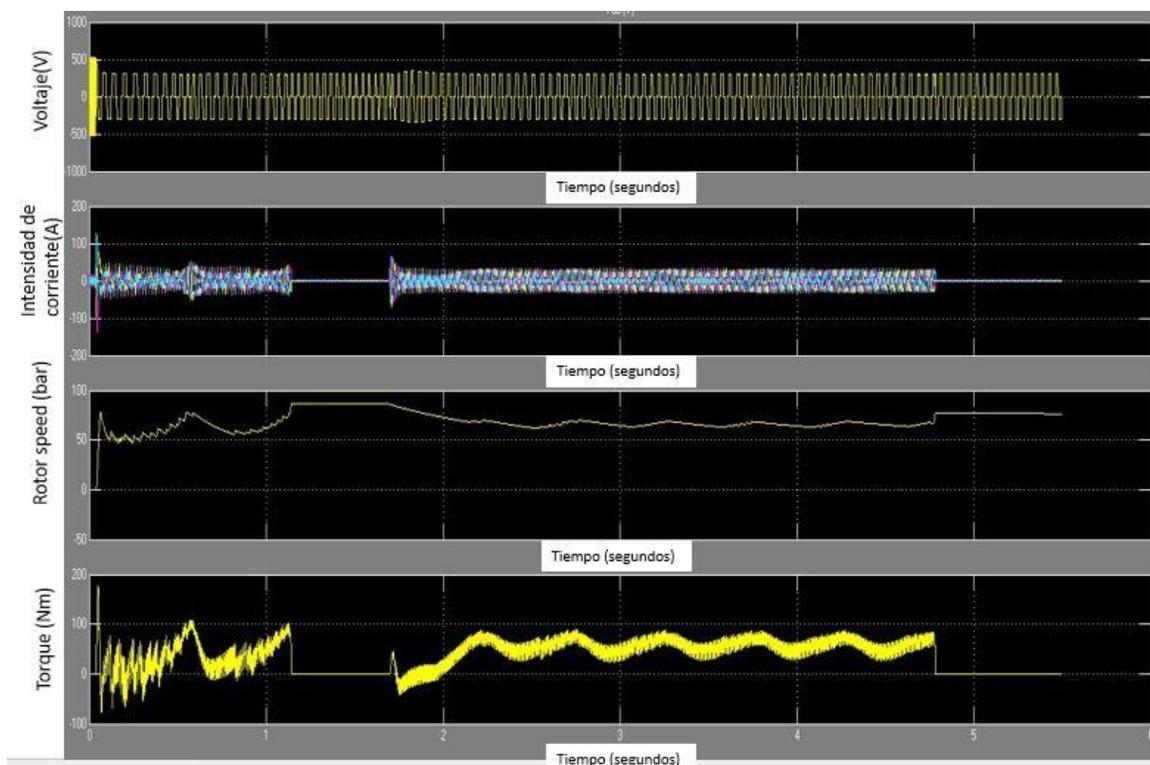


Figura 5-4 Formas de onda de scope variador de frecuencia

La simulación del scope del variador de frecuencia se puede notar mejor el proceso de carga y descarga. Partiendo por las corrientes trifásicas, estas en un principio siguen siendo las mismas en partida directa, pero luego a los 1,2 segundos cuando el motor debe detenerse, se abren los switch que conectan al motor haciendo que no se consuma corriente, es por eso que entre 1,2 y 1,6 segundos la corriente se mantiene en 0 (A), luego para volver a accionar el motor se nota que la corriente de arranque para este instante tiene un pico menor que al instante inicial del accionamiento, volviendo al estado transitorio para terminar siendo 0 (A) porque el motor deja de funcionar.

Si tomamos en cuenta la velocidad del motor, este en un principio también presenta la misma curva, llegando al instante de 1,2 segundos el motor deja de funcionar haciendo que la velocidad vaya disminuyendo a 0 (rad/s). Esto es correcto ya que el motor no frena en seco, sino que frena paulatinamente, siendo la manera ideal de frenar un motor en la práctica para reducir daños en su estructura.

Finalmente el torque, en el torque se ve claramente cuando el motor deja de funcionar y cuando está funcionando. Así cuando el torque es 0 (Nm) es que el motor deja de funcionar.

Bibliografía

- [1] Rober L. Norton, «Diseño de maquinas,» Printence Hall, 2000.
- [2] Jorge M. Hancke, «Accionamiento de Maquinas Electricas,» Pontifica Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Ingeniería Eléctrica, 2003.
- [3] Ingeniero Julio Alvarez, «Motor Trifasico de Inducción,» Diciembre de 2009.
- [4] Puska Aire comprimido, «Tarifa-Catalogo 2016,» Mayo 2016.
- [5] Centralair compresores, «Catalogo compresores de Pistón,» Abril 2016.
- [6] Rockwell Automation, «Conceptos básicos sobre el uso de los motores de inducción trifásicos,» 1996.
- [7] Ingeniero Industrial Pedro A. Gomez Rivas, «Diseño y calculo de compresores de aire,» Disponible: <http://es.slideshare.net/PAQC1990/curso-diseo-y-calculo-de-compresores>. [Último acceso: 08-09-2016]
- [8] Wikipedia, «Variador de Frecuencias,» Disponible en:https://es.wikipedia.org/wiki/Variador_de_frecuencia, [Último acceso: 08-09-2016]
- [9] Stephen J. Chapman, «Máquinas Eléctricas,» Tercera edición, Editorial McGrawhill, 2000.
- [10] Centro Integrado Politecnico ETI, «Producción y almacenamiento del aire comprimido,» Disponible en: <http://www.etitudela.com/profesores/ats/downloads/microsoftwordtema2.pdf> [Último acceso: 08-09-2016]
- [11] Cesar G. Tolmo, «Selección y Diseño de compresores centrifugos,» Universidad Carlos Iii De Madrid, Departamento De Térmica Y De Fluidos, Ingeniería Industrial, Enero 2013. Disponible en: <http://e->

archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/17046/PFC_Cesar_Gil_Tolmo.pdf?sequence=1
[Último acceso: 08-09-2016]

A Apendice circuito completo

En este apéndice se presentara el circuito completo. El circuito final se presenta en la figura A-1, el cual inicialmente comienza desde la fuente de alimentación trifásica de color blanco en color acompañada por una resistencia conectada en paralelo, esto se debe a que el simulador no funciona sin este elemento, luego la red entra al rectificador de color celeste que convierte la corriente alterna en continua, para continuar por los filtros capacitivos e inductivos, los que no alteran el proceso del sistema, luego el proceso continua con la aparición del puente de inversores de color celeste que vuelven a convertir a la corriente en una corriente alterna y al voltaje en una onda cuadrada mediante el PWM.

Continuando con la conexión luego del puente de inversores, estos se conectan al motor trifásico de inducción de color naranja el cual tiene conectados los breakers que son los switchs de poder que al momento de recibir la orden de cierre o apertura comandada por el tanque de almacenamiento actúan; por otro lado el motor tiene como salidas las variables de velocidad, corriente trifásica, voltaje línea a línea y el torque, estas variables ingresan al scope del variador de frecuencias de color verde donde en este scope se pueden visualizar.

De estas variables mencionadas 2 entran al variador de frecuencias que son la velocidad y las corrientes trifásicas. Luego como el controlador está relacionado con la velocidad, se diseña un proceso en el cual se puede establecer la velocidad a la que el motor está haciendo girar el eje y así poder mantener la velocidad deseada a la frecuencia requerida. Estas señales entran al gate del bloque IGBT.

Por otro lado la variable requerida para desarrollar todo el proceso mecánico del compresor es la velocidad, esta entra al compresor de color amarillo, también es la responsable de desarrollar el proceso en el tanque de almacenamiento de color gris o plomo. Luego obteniendo la presión del compresor se puede establecer la contrapresión y torque que se refleja en esta operación, donde esto ocurre en el bloque contrapresión de color rojo.

Para finalizar, obteniendo todos los torques que se involucran en el sistema se suman, y son retroalimentados, es decir, los torques generados por los procesos mecánicos son reingresados al motor, cumpliéndose el ciclo electromecánico.

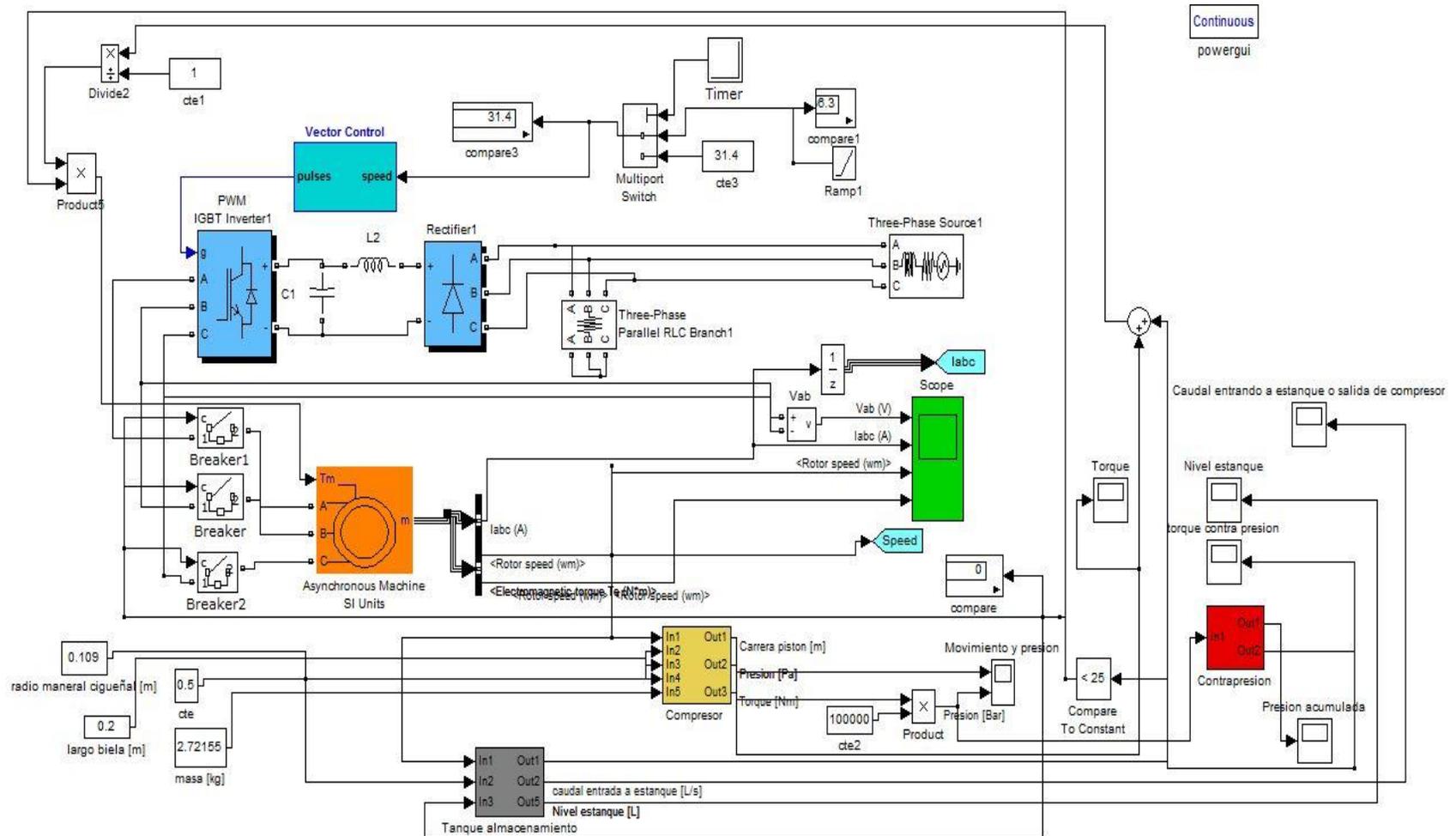


Figura A-1: Circuito final completo