

Modelado y simulación de un sistema de control de lubricación en una central de  
generación térmica con turbina de gas.

Jessica Juliana Camargo Figueredo

Aurelio José Hurtado Benítez

Trabajo de Grado para optar al título de Ingenieros Electricistas

Director

Javier Enrique Solano Martínez

Doctorado en Ingeniería Eléctrica

Codirector

Álvaro Bernardo Becerra Acevedo

Ingeniero Electrónico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Bucaramanga

2020

### **Dedicatoria**

*Este trabajo de grado va dedicado a Dios, a mis papás, mis hermanos, mis sobrinos y a todas esas personas que a lo largo de la carrera me acompañaron y me hicieron vivir la universidad como una de las experiencias más lindas.*

*También va dedicado muy especialmente a Daniel Gaviria por su acompañamiento en esta última etapa de la carrera, porque las fuerzas de nuestras convicciones asegurará nuestro éxito y sé que llegaremos lejos. Te amo.*

***Jessica Juliana Camargo Figueredo.***

### Dedicatoria

*Primero que todo, quiero agradecerle a Dios por darme la oportunidad de tener una hermosa familia, que me apoyó en cada paso a lo largo de este camino para llegar a la meta de obtener el título de ingeniero electricista.*

*A mis padres Aurelio Hurtado García y Nelly Benítez García por ser esas personas ejemplares y mostrarme el camino para ser la persona que soy hoy en día, por enseñarme el valor de la perseverancia, y por inculcar en mi ese sentimiento de querer ser mejor cada día.*

*A mis hermanas Ángela y Érika por brindarme siempre más que una relación de hermanos, fueron mis amigas, mis confidentes, mis psicólogas, y unos ángeles que Dios me coloco justo ahí a mi lado para guiarme, corregirme y apoyarme en los momentos en los que lo necesitaba.*

*A mi compañera de tesis Jessica Camargo por entregar la mejor disposición al momento de realizar este trabajo de grado.*

***Aurelio José Hurtado Benitez.***

### Agradecimientos

*Gracias a mis padres por ser la base de todo lo que soy hoy en día. A mi mamá por su apoyo, amor y entrega incondicional, porque cada mañana en estos años de universidad siempre se levantó y me despidió con una sonrisa, porque cada vez que desistía me impulsó a ser mejor. A mi papá porque hoy le demuestro que todos esos esfuerzos que hizo día a día valieron la pena, me enseñó que con disciplina se puede llegar lejos. Son personas integras, llenas de valores, principios y merecen el cielo por todo lo que construyeron.*

*Gracias a mis hermanos por su ejemplo. A mi hermano Raúl por guiarme desde un principio, por brindarme sus consejos y hacerme ver la vida de una forma diferente. A mi hermano Jonathan porque día a día me demuestra que si se puede cambiar y ser mejor persona.*

*A mis sobrinos que se convirtieron en la motivación más linda.*

*A mi director Javier Solano y mi codirector Álvaro Becerra, por su paciencia y por cada una de las correcciones ya que me enseñaron la ética profesional ante cada proyecto.*

*A lo largo de mi carrera conocí y compartí con personas las cuales recordaré siempre, gracias por esas traspasadas, por esas risas, por cada momento vivido porque fue increíble, quisiera nombrarlas a todas pero ya se me acabará la hoja.*

*Gracias Tat y Aure por sus consejos en esta última etapa de la universidad, por la paciencia y porque por fin podemos decir que lo logramos. Los quiero mucho <3*

***Jessica Juliana Camargo Figueredo.***

### **Agradecimientos**

*A mi director el Dr. Javier Enrique Solano y co-director Ing. Álvaro Bernardo Becerra por el tiempo empleado y la experiencia que me transmitieron a lo largo de este proyecto, a su manera amena de explicar paso a paso las dudas e inquietudes que me surgían para ejecución del mismo.*

*Aurelio José Hurtado Benitez.*

**Tabla de Contenidos**

Introducción ..... 15

1. Objetivos ..... 17

1.1 Objetivo general ..... 17

1.2 Objetivos específicos ..... 17

2. Modelo del sistema ..... 18

2.1 Motores ..... 19

2.1.1 Motor de inducción tipo jaula de ardilla ..... 20

2.1.1.1 Modelo eléctrico. .... 20

2.1.1.2 Modelo mecánico ..... 22

2.1.2 Motor de corriente continua tipo imanes permanentes ..... 23

2.1.2.1 Modelo eléctrico ..... 24

2.1.2.2 Modelo mecánico ..... 25

2.2 Protecciones ..... 25

2.2.1 Modelo de relé de sobrecorriente de tiempo inverso ..... 26

2.2.2 Modelo de protección térmica ..... 27

2.2.3 Modelo de protección de sobrecorriente de tiempo definido ..... 28

3. Implementación del modelo de simulación en Matlab-*SIMULINK* ..... 29

3.1 Motores ..... 30

3.1.1 Representación del motor de inducción jaula de ardilla en Simulink..... 30

3.1.2 Representación del motor DC de imanes permanentes en Simulink ..... 32

3.2 Validación del modelo ..... 33

3.3 Protecciones ..... 35

3.3.1 Modelo de relé de sobrecorriente de tiempo inverso ..... 35

3.3.2 Modelo de protección térmica ..... 36

3.3.3 Modelo de protección de sobrecorriente de tiempo definido..... 37

3.4 Lógica ..... 40

4. Caso de estudio ..... 41

4.1 Motores del sistema de lubricación..... 41

4.1.1 Parametrización del motor de inducción jaula de ardilla..... 42

4.1.2 Parametrización del motor DC de imanes permanentes ..... 44

4.2 Protecciones ..... 46

4.3 Lógica ..... 46

4.4 Análisis de resultados ..... 50

4.4.1 Condición de operación normal ..... 51

4.5.2 Condición de operación bajo falla .....	53
5. Conclusiones .....	61
Referencias bibliográficas.....	64

Lista de figuras

**Figura 1.** Circuito eléctrico equivalente del motor de inducción..... 20

**Figura 2.** Circuito eléctrico equivalente del motor de corriente continua de imanes permanentes.  
..... 24

**Figura 3.** Gráfica de protección de tiempo definido. .... 28

**Figura 4.** Dieagrama de bloques de la ecuación 3. .... 29

**Figura 5.** Representación mediante diagramas de bloques del motor de inducción. .... 30

**Figura 6.** Representación en diagrama de bloques del motor de corriente continua. (a) modelo eléctrico, (b) modelo mecánico..... 32

**Figura 7.** (a) Corriente de armadura teórica vs corriente de armadura simulada, (b) Velocidad mecánica teórica vs velocidad mecánica simulada. .... 34

**Figura 8.** Representación del modelo de relé de sobrecorriente de tiempo inverso en Simulink.36

**Figura 9.** Representación del modelo de protección térmica en Simulink. .... 37

**Figura 10.** Representación del modelo de protección de tiempo definido en Simulink. .... 38

**Figura 11.** Bloque integrador con condición external reset tipo level. .... 38

**Figura 12.** Conjunto de protecciones para la bomba DC, captura de Matlab-Simulink..... 39

**Figura 13.** GRAFCET de los ventiladores..... 48

**Figura 14.** (a) Perfil de temperatura, (b) Estado de operación de los ventiladores..... 49

**Figura 15.** Gráfica de velocidad del rotor vs tiempo de los extractores. .... 51

**Figura 16.** Gráfica de corriente de armadura vs tiempo de los extractores. .... 52

**Figura 17.** Gráfica señal digital 52 para el primer caso. .... 54

**Figura 18.** Gráfica de la corriente de armadura. .... 55

**Figura 19.** Gráfica del voltaje aplicado..... 55

**Figura 20.** Gráfica señal digital 52 para el segundo caso. .... 56

**Figura 21.** Gráfica de corriente de armadura. .... 57

**Figura 22.** Gráfica de voltaje aplicado..... 57

**Figura 23.** Gráfica de velocidad..... 58

**Figura 24.** Gráfica de la señal digital 52 para el último caso..... 59

**Figura 25.** Gráfica de la corriente de armadura. .... 60

**Figura 26.** Gráfica del voltaje aplicado..... 60

**Figura 27.** Gráfica de la velocidad..... 61

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1.</b> Límites de operación.....	40
<b>Tabla 2.</b> Datos de los motores y cálculo del número de polos de los motores de inducción.....	43
<b>Tabla 3.</b> Parámetros de cada motor de inducción del sistema de lubricación.....	44
<b>Tabla 4.</b> Datos de placa del motor de corriente continua del sistema de lubricación. ....	45
<b>Tabla 5.</b> Parámetros del motor de corriente continua del sistema de lubricación.....	45
<b>Tabla 6.</b> Límites de operación de los ventiladores.....	47

### **Glosario**

**CARGO POR CONFIABILIDAD** es un mecanismo empleado para garantizar que se supla la demanda del sistema ante cualquier falla o salida de un generador.

**CICLO ABIERTO** en el caso de las centrales térmicas hace referencia que el gas generado por la combustión, luego del proceso es liberado a la atmósfera.

**GRAFCET** por sus siglas en francés (Graphe Fonctionnel de Commande Etape Transition) que significa diagrama de control con etapas y transiciones. Es una herramienta útil para expresar la lógica de operación.

## Resumen

**Título:** MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE LUBRICACIÓN EN UNA CENTRAL DE GENERACIÓN TÉRMICA CON TURBINA DE GAS.<sup>1\*</sup>

**Autores:** Aurelio José Hurtado Benítez, Jessica Juliana Camargo Figueredo.<sup>2\*\*</sup>

**Palabras clave:** Sistema de lubricación, simulación, motor de inducción, motor de corriente continua.

### Descripción:

Este trabajo de grado se enfoca en el modelado y simulación del sistema de lubricación de una planta típica de generación a gas de ciclo abierto. Siendo este sistema parte de uno de los subsistemas de una planta de generación térmica y el encargado de la lubricación del generador síncrono y de los rodamientos de la turbina, útiles para el adecuado funcionamiento de la planta generadora; está compuesto por diversas máquinas que cumplen funciones de bombeo de aceite, ventilación para control la temperatura y extracción de vapor. Teniendo en cuenta lo anterior, cada una de ellas es ejecutada por un conjunto de motores eléctricos trifásicos con su respectivo sistema de medida, protecciones y lógica de control. Lo mencionado anteriormente se lleva a cabo a través del programa de simulación Matlab-SIMULINK, para esto se debe tener un modelo matemático de cada uno de los elementos que intervienen en este sistema de lubricación. A lo largo de este documento se mostrará de forma detallada como se realiza el modelado y la simulación para cada componente del sistema, y la respectiva conexión de los mismos. A partir de un caso de estudio se evalúan los resultados obtenidos en la simulación con datos reales de operación.

---

<sup>1\*</sup> Trabajo de grado

<sup>2\*\*</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: PhD. Javier Enrique Solano Martínez. Codirector: Ing. Álvaro Bernardo Becerra Acevedo

### Abstract

**Title:** MODELING AND SIMULATION OF LUBRICATION CONTROL SYSTEM IN A THERMAL CENTRAL OF GENERATION WITH GAS TURBINE. <sup>3\*</sup>

**Author:** Aurelio José Hurtado Benítez, Jessica Juliana Camargo Figueredo. <sup>4\*\*</sup>

**Keywords:** Lubrication system, simulation, induction motor, direct current motor.

**Description:**

The career project focuses on the modeling and simulation of the lubrication system of a typical open cycle gas generation plant. This system being part of one of the subsystems of a thermal generation plant and has the function of lubricating the synchronous generator and the turbine bearings, useful for the proper operation of the generating plant; It is made up of various machines that perform functions of pumping oil, ventilation to control temperature and extraction of steam. Taking into account the above, each one of them is executed by a set of three-phase electric motors with their respective measurement system, protections and control logic. The aforementioned is carried out through the MATLAB-SIMULINK simulation program, for this you must have a mathematical model of each of the elements that intervene in this lubrication system. Throughout this document, it will be shown in detail how the modeling and simulation are carried out for each component of the system, and their respective connection. Starting from a case study, the results obtained in the simulation are evaluated with real operating data.

---

<sup>3\*</sup> Bachelor Thesis

<sup>4\*\*</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: PhD. Javier Enrique Solano Martínez. Codirector: Ing. Álvaro Bernardo Becerra Acevedo

## Introducción

Las centrales termoeléctricas tomaron un papel importante en Colombia a raíz de la crisis energética que atravesó en 1992 por el fenómeno de El Niño. Esta problemática ambiental ocasionó razonamientos periódicos de energía, debido a que en este contexto las centrales hidroeléctricas representaban el 78 % de generación eléctrica en el país (NARARNJO M., 2012), y se vieron gravemente afectadas por la sequía y la disminución en los niveles hídricos de sus embalses. Por esta razón, se tomó la decisión de construir plantas alternativas que basaran su generación en una fuente diferente a la hídrica, para que ante cualquier fenómeno o problemática las necesidades energéticas del país no se vieran insatisfechas. Una de las alternativas fueron las centrales termoeléctricas, estas utilizan fuentes de energía no renovables que a diferencia de las renovables su capacidad de generación no depende de las condiciones climatológicas. De ese modo, estas centrales cobraron una gran importancia en la generación de energía, y después de esta crisis manejan el cargo por confiabilidad, basado en la disponibilidad que tienen ante cualquier fenómeno, falla o necesidad de suplir la demanda del sistema nacional.

Las centrales termoeléctricas están compuestas por un sistema de generación, que se constituye de subsistemas encargados de diferentes funciones para el control y el adecuado funcionamiento de la central, algunos de estos son: el sistema de arranque,

sistema de gas combustible, sistema de aceite lubricante, sistema de aire de enfriamiento, sistema de aire de instrumentos, sistema de aceite de control (hidráulico), sistema de control climático y sistema contraincendios.

En específico, este proyecto hace énfasis en el sistema de aceite lubricante o sistema de lubricación del generador síncrono, el cuál es el encargado de llevar aceite a través de ductos con el fin de lubricar las diferentes partes del sistema de generación. En este caso los extractores, ventiladores y bombas, son los componentes que se representan por medio de la simulación en el programa Matlab-*SIMULINK*, permitiendo así un estudio ante diferentes casos de operación.

Este trabajo se divide en 5 capítulos que se organizan de la siguiente manera: el primer capítulo está compuesto por los objetivos generales y específicos del trabajo de grado. El segundo capítulo presenta los modelos eléctricos y mecánicos de los motores y los modelos de los tipos de protecciones del sistema de lubricación. En el tercer capítulo se encuentra la implementación de los modelos del capítulo 2 en Matlab-*SIMULINK* y además, el GRAFCET que contiene la lógica del sistema. El cuarto capítulo implementa todo lo trabajado en los capítulos anteriores para una planta de generación térmica de ciclo abierto ubicada en el oriente colombiano. Por último, el capítulo 5 que presenta las conclusiones del trabajo.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Implementar un modelo de simulación en MATLAB-Simulink de un sistema de lubricación compuesto por 8 motores para ser utilizado por un generador síncrono.

### **1.2 Objetivos específicos**

Implementar el modelo de simulación para cada máquina del sistema de lubricación.

Implementar el modelo de simulación para la lógica de conexión/desconexión y funciones de protección para cada máquina.

Implementar el modelo de simulación del GRAFCET de las secuencias de arranque y parada de cada uno de los motores.

Evaluar mediante simulaciones la operación del sistema en condiciones normales y en condiciones de falla.

## 2. Modelo del sistema

El sistema de lubricación está compuesto por tres componentes: extractores, ventiladores y bombas. Este sistema cumple la función de aceitar los rodamientos de la turbina, el generador y el paquete de arranque, por medio de aceite limpio, filtrado, a temperatura y presión apropiada para una adecuada lubricación. El aceite que es enviado para la lubricación de los elementos se encuentra en un reservorio, el cual está dentro del paquete mecánico.

En el paquete mecánico de la turbina de combustión se encuentra el sistema de lubricación, que cuenta con interruptores, indicadores y el reservorio de aceite, donde este último es parte integral de la base estructural del paquete mecánico. El reservorio de aceite está diseñado con conexiones de llenado y drenado. Además, contiene la cantidad suficiente de aceite lubricante para la operación de la turbina a gas.

El reservorio está equipado con: los extractores de vapor que cumplen la función de sacar el vapor/niebla y mantener el nivel de presión de vacío a condiciones normales de operación, los ventiladores se encargan de disminuir la temperatura del aceite a niveles normales de operación y, por último, las bombas se encargan de suministrar la presión de descarga a niveles normales de operación, a través de la tubería que transporta el aceite lubricante hacia los rodamientos de la turbina, el generador y el paquete de arranque.

El control que se realiza en el sistema de lubricación consiste en suministrar aceite bajo ciertas condiciones, es decir cuando la referencia de control de los componentes lo

indique este va operar. En estos sistemas todos los motores operan en lazo abierto, esto significa que solo tiene dos modos de operación encendido o apagado.

Para llevar a cabo la simulación del subsistema de lubricación de una central térmica, en principio se necesita modelar 2 elementos, estos son: los motores y las protecciones.

## **2.1 Motores**

El modelo matemático de los motores se lleva a cabo mediante ecuaciones diferenciales que representan el comportamiento tanto interno como externo de la máquina. Se basan principalmente en las leyes de la dinámica que involucra las fuerzas que intervienen en el movimiento del rotor, y las leyes de Ohm y Kirchhoff que son la relación eléctrica del funcionamiento interno del motor.

El modelo eléctrico se realiza mediante la representación del motor en un circuito equivalente (Gurú & Hiziroglu, 2003). En este se puede analizar el comportamiento interno del motor de una forma simple que conserva todas sus características. Esta representación es un circuito eléctrico que contiene la configuración y los parámetros propios del motor como lo son resistencias e inductancias. Los circuitos eléctricos difieren dependiendo del tipo de motor, de igual forma las ecuaciones electromecánicas.

El modelo mecánico relaciona las fuerzas presentes en el eje y es aplicable a cualquier motor. Se logra utilizando la segunda ley de Newton o la ley fundamental de la dinámica.

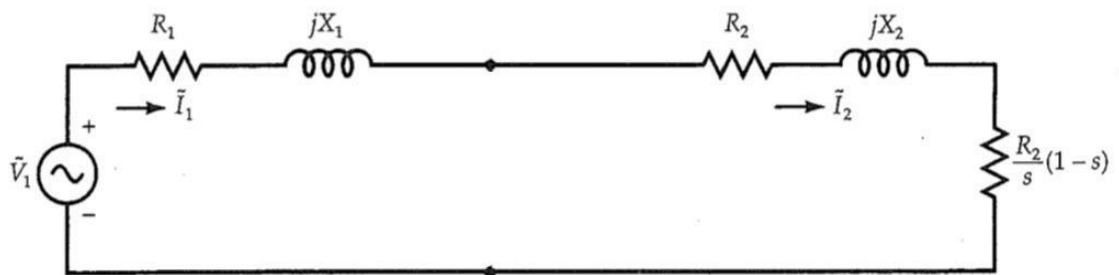
**2.1.1 Motor de inducción tipo jaula de ardilla**

El sistema de lubricación está compuesto por motores AC, denominados así ya que tanto el rotor como el estator portan corriente alterna. Estos motores tienen la característica de un rotor que no recibe energía por conducción sino por inducción, por tanto, también se denominan motores de inducción (Gurú & Hiziroglu, 2003).

**2.1.1.1 Modelo eléctrico.** El modelo de la figura 1, presenta el circuito equivalente exacto del libro (Gurú & Hiziroglu, 2003), para el motor de inducción tipo jaula de ardilla.

**Figura 1.**

*Circuito eléctrico equivalente del motor de inducción.*



Nota. Se desprecia la rama de magnetización porque son motores de gran potencia además para cálculos prácticos, por tanto  $I_1 = I_2$

Del circuito equivalente se tiene que:

$V_1$  = tensión aplicada por fase [V].

R1= resistencia por fase del devanado del estator [ $\Omega$ ].

X1= reactancia por fase del devanado del estator [ $\Omega$ ].

R2= resistencia del rotor referido al estator [ $\Omega$ ].

X2= reactancia del rotor referido al estator [ $\Omega$ ].

s= deslizamiento.

Y

$$s = \frac{N_s - N_m}{N_s} \quad (1)$$

Siendo  $N_s$  la velocidad síncrona del campo rotatorio y  $N_m$  la velocidad de operación del motor en r.p.m, expresadas como:

$$N_s = \frac{120 f}{P} \quad (2)$$

Donde

f = frecuencia del sistema [Hz].

P = número de polos.

Aplicando la ley de mallas de Kirchhoff se obtiene

$$V_1 - (R_1 * I) - V_l - \left(\frac{R_2}{s} * I\right) = 0 \quad (3)$$

Donde

$$V_l = L * \frac{dI}{dt} \quad (4)$$

Por tanto, reemplazando (4) en (3) se tiene

$$V_1 - (R_1 * I) - (L_1 + L_2) * \frac{dI}{dt} - \left(\frac{R_2}{s} * I\right) = 0 \quad (5)$$

Organizando la ecuación se tiene

$$\frac{dI}{dt} = \left(\frac{1}{L_1 + L_2}\right) * \left(V_1 - \left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right) * I\right) \quad (6)$$

Esta es la expresión de la ecuación eléctrica.

**2.1.1.2 Modelo mecánico.** Este modelo relaciona las fuerzas presentes en el eje y es aplicable a cualquier motor. Se logra utilizando la segunda ley de newton o la ley fundamental de la dinámica de la siguiente manera:

$$\sum T = J \frac{dW}{dt} \quad (7)$$

$$T_d - T_l - DW = J \frac{dW}{dt} \quad (8)$$

Donde

$T_d$ =Par desarrollado por la máquina (ecuación electromecánica) [ $Nm$ ]

$T_l$ =Par de carga (entrada externa) [ $Nm$ ]

$D$ =coeficiente de fricción viscosa [ $Nms$ ]

$W$ =Velocidad mecánica [ $\frac{rad}{s}$ ]

$J$ =Momento de inercia de los elementos giratorios [ $\frac{kg}{m^2}$ ]

El par desarrollado por el motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla es:

$$T_d = \frac{3I^2R_2}{sW_s} \quad (9)$$

Y reemplazando (9) y organizando en (8), se obtiene:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{1}{J} \left( \frac{3I^2R_2}{sW_s} - T_l - DW \right) \quad (10)$$

Esta es la expresión de la ecuación mecánica.

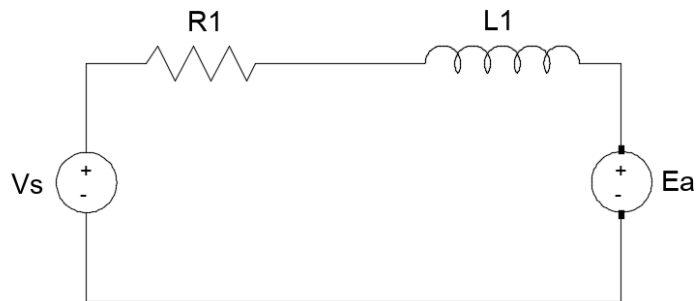
### ***2.1.2 Motor de corriente continua tipo imanes permanentes***

El sistema de lubricación posee un motor de emergencia en caso de falla de los motores principales; este, es un motor de corriente continua ya que convierte energía eléctrica que no varía en el tiempo en energía mecánica. Además, no necesita corriente alterna ya que los motores principales requieren de esta y en caso de ausencia o pérdida de presión de descarga entra el motor DC a operar (Gurú & Hiziroglu, 2003).

**2.1.2.1 Modelo eléctrico.** El modelo de la figura 2, presenta el circuito equivalente del libro (Gurú & Hiziroglu, 2003), para el motor de corriente continua tipo imanes permanentes.

**Figura 2.**

*Circuito eléctrico equivalente del motor de corriente continua de imanes permanentes.*



Aplicando la ley de mallas de Kirchhoff se obtiene

$$V_s - (R_1 I_a) - V_l - E_a = 0 \quad (11)$$

Donde

$$V_l = L \frac{dI_a}{dt} \quad (12)$$

Y

$$E_a = k W \quad (13)$$

Por tanto, reemplazando (13) y (12) en (11) se tiene

$$V_s - (R_1 I_a) - L \frac{dI_a}{dt} - k W = 0 \quad (14)$$

Organizando la ecuación se tiene

$$\frac{dI}{dt} = \left(\frac{1}{L_1}\right) * (V_s - k W - R_1 I_a) \quad (15)$$

Esta es la expresión de la ecuación eléctrica.

**2.1.2.2 Modelo mecánico.** El par desarrollado por el motor de inducción jaula de ardilla es:

$$T_d = k I_a \quad (16)$$

Y reemplazando (16) y organizando en (8), se obtiene:

$$\frac{d W(t)}{dt} = \frac{1}{J} ( k I_a - T_l - DW ) \quad (17)$$

Esta es la expresión de la ecuación mecánica.

## 2.2 Protecciones

Los motores eléctricos están diseñados para operar bajo ciertas condiciones, teniendo en cuenta que poseen limitaciones como pueden ser la corriente que soportan sus conductores. Para obtener un buen funcionamiento se debe controlar y proteger adecuadamente. Estos requieren protecciones, entre ellas están por sobrecorriente debido a fallas en su aislamiento o un par de carga grande.

Para implementar lo mencionado anteriormente, se realiza el modelo del sistema de protecciones mediante las curvas características dependiendo del modelo IEEE, en el caso del modelo de sobrecorriente de tiempo instantáneo, inverso y definido. (Wester, 2008)

### 2.2.1 Modelo de relé de sobrecorriente de tiempo inverso

Esta protección actúa en presencia de altas corrientes, ya que puede producir fallas o daños en el motor que influyen en la correcta operación del sistema de lubricación. Este relé también es llamado protección 51 de sobrecorriente de tiempo inverso. La ecuación matemática del modelo de sobrecorriente de tiempo inverso del estándar IEEE C37.112 *Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays*, es:

$$t(I) = \frac{A}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^2 - 1} \quad (18)$$

Reorganizando (18) se tiene

$$\int_0^{T_0} \frac{1}{t(I)} dt = 1 \quad (19)$$

Se tiene que:

$I$  = Corriente de armadura

$I_p = sf * I_{nom}$

sf = factor de servicio de la maquina(datos de placa)

$I_{nom}$  = Corriente nominal de la máquina (datos de placa)

A = Constante

### 2.2.2 Modelo de protección térmica

Esta protección actúa ante sobrecargas, ya sea por un par de carga mayor que el nominal, o por presencia de fallas en el aislamiento que sobrecarguen los conductores y cause recalentamiento del motor. La ecuación matemática del modelo térmico del estándar IEEE C37.112, es:

$$I_{pu}^2 = \tau \frac{dU}{dt} + U \quad (20)$$

Se tiene que:

$$I_{pu} = \frac{I}{I_{nom}} \text{ Corriente de armadura en por unidad}$$

$I_{nom}$  = Corriente nominal de la máquina (datos de placa)

$\tau$  = Constante de tiempo térmico

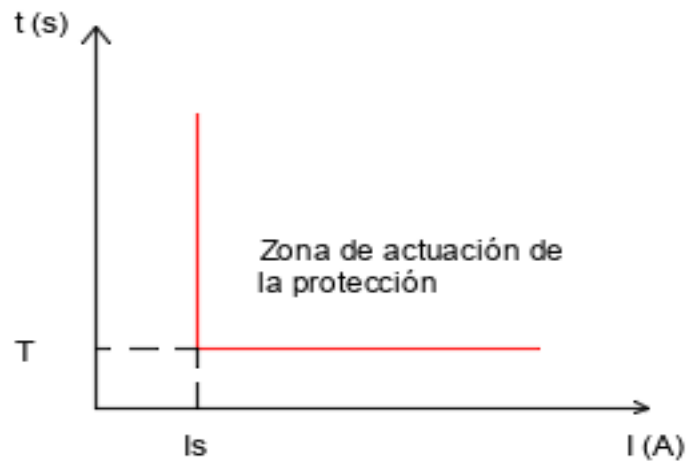
U = temperatura

**2.2.3 Modelo de protección de sobrecorriente de tiempo definido**

Esta protección funciona cuando la corriente sensada supera la magnitud programada en un tiempo determinado. Es decir, la corriente sobrepasa un valor, se inicia un contador y al llegar a un tiempo definido por el usuario (el cual puede ser igual a 0), la protección opera, es decir envía orden de apertura del interruptor.

**Figura 3.**

*Gráfica de protección de tiempo definido.*



Se tiene que:

$I_s$  = Umbral de intensidad [A]

$I_a$  = Corriente de armadura [A]

$T$  = Retardo de actuacion de la proteccion[segundos]

(Silva & Solano )

### 3. Implementación del modelo de simulación en Matlab-SIMULINK

Una de las bases estructurales de este proyecto son los diagramas de bloques, estos nos permiten comprender más fácil las operaciones y relaciones del sistema. Para la construcción del diagrama de bloques, se debe empezar por la señal de salida y se buscan las relaciones que la involucren. Ejemplo

$$x'(t) - v(t) = 0 \tag{21}$$

En diagrama de bloques la anterior ecuación se vería representada como:

**Figura 4.**

*Dieagrama de bloques de la ecuación 3.*



Este proyecto se realiza mediante el modelado de cada uno de los componentes que interactúan en el sistema de lubricación mediante el programa Matlab-SIMULINK, en el cual se puede emplear diagramas de bloques. Estos diagramas consisten en aplicar la relación entre las ecuaciones diferenciales y su representación a través de los bloques funcionales que enlazan las variables del sistema. Cada bloque simboliza una operación matemática con un sentido causal. (Silva & Solano )

Cabe aclarar que el conocimiento y estudio previo del programa Matlab-SIMULINK, no hace parte del alcance de este proyecto, si no se domina debe remitirse a [<https://la.mathworks.com/videos/introduction-to-simulink-100416.html>]

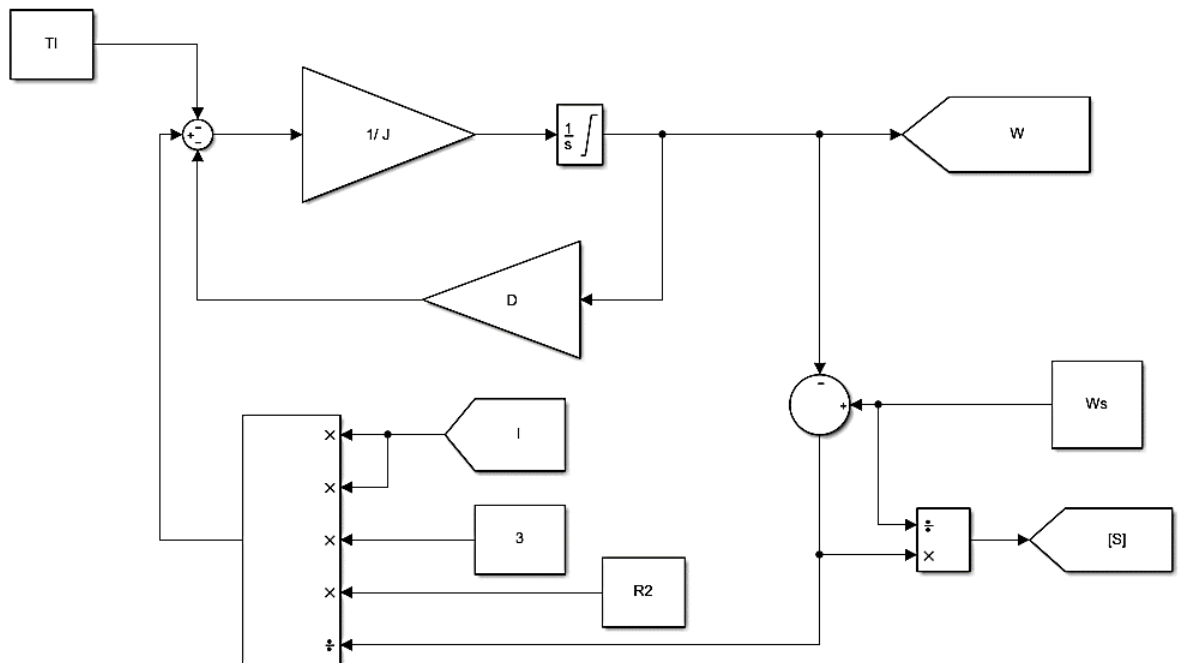
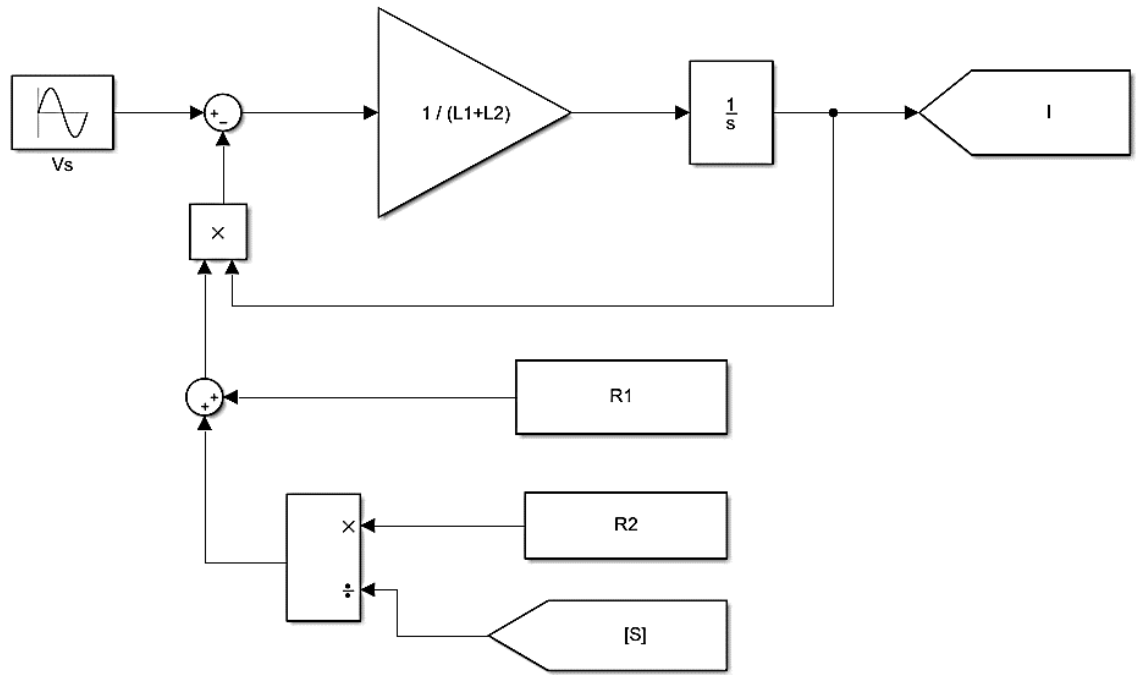
### **3.1 Motores**

#### ***3.1.1 Representación del motor de inducción jaula de ardilla en Simulink***

Para realizar el diagrama de bloques se necesita relacionar la ecuación eléctrica (6), con la mecánica (10). Cada unos de los parámetros que se encuentran dentro de estos bloques están explicados de manera detallada en el capítulo 2.1.1. De esta forma, se obtiene la figura 5:

#### **Figura 5.**

*Representación mediante diagramas de bloques del motor de inducción.*

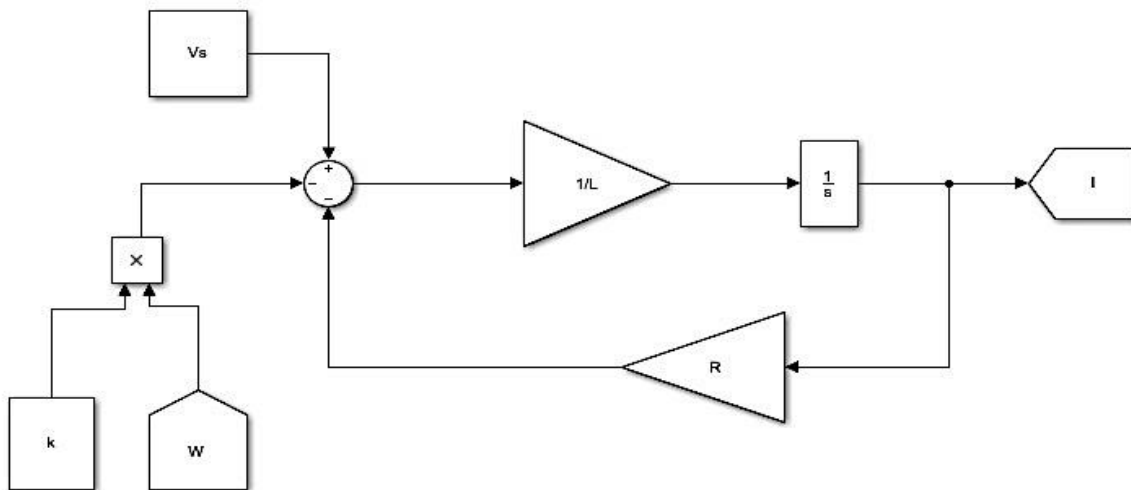


**3.1.2 Representación del motor DC de imanes permanentes en Simulink**

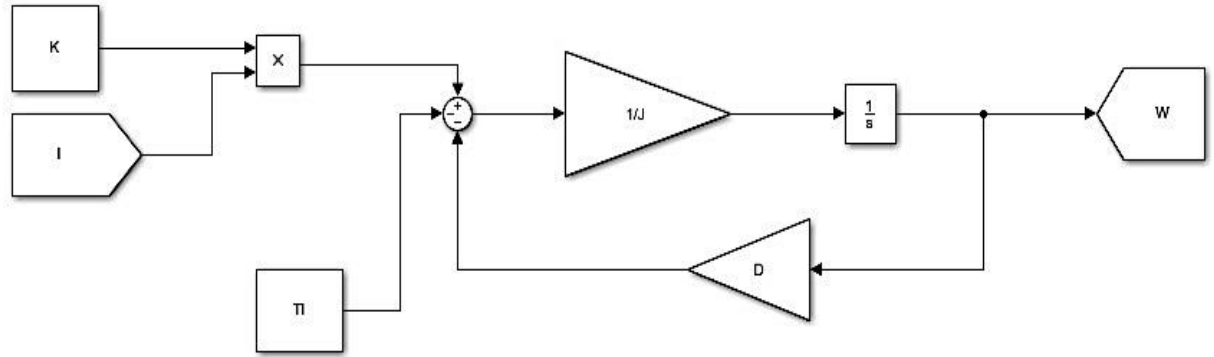
Para realizar el diagrama de bloques se necesita relacionar la ecuación eléctrica (15), con la mecánica (17). Cada uno de los parámetros que se encuentran dentro de estos bloques están explicados de manera detallada en el capítulo 2.1.2. De esta forma, se obtiene la figura 6:

**Figura 6.**

*Representación en diagrama de bloques del motor de corriente continua. (a) modelo eléctrico, (b) modelo mecánico..*



(a)



(b)

### 3.2 Validación del modelo

La validación de este modelo se realizó con base en el ejemplo 11.1 del (Guru) capítulo 11 Dinamica de las maquinas eléctricas el cual presenta los siguientes datos

$$V_s=240 \text{ [V]}$$

$$R_a=1.43[\Omega]$$

$$L_a=10.4 \text{ [mH]}$$

$$K_a=1.8$$

$$D=0.027 \text{ [Nms]}$$

$$J=0.068 \text{ [kg*m}^2\text{]}$$

$Tl=0$  [Nm]

La solución teórica que el texto emplea es por el método de Laplace:

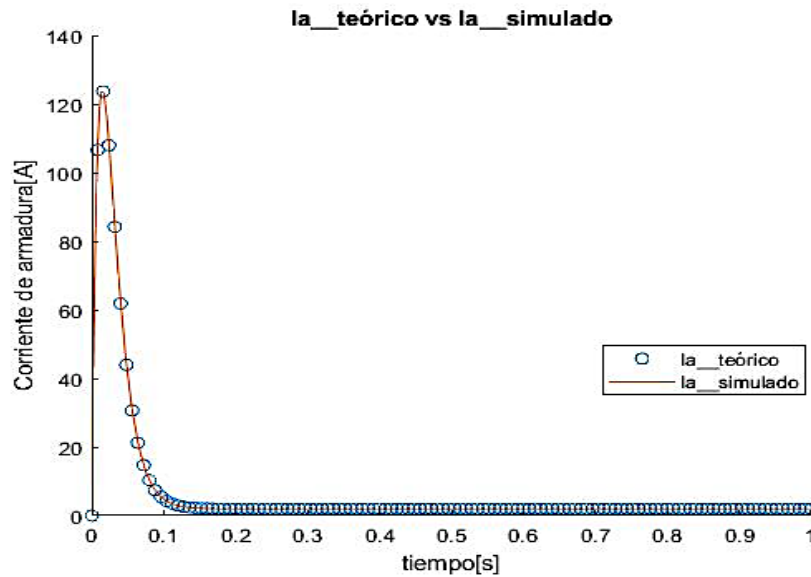
$$W = 131.74 + 351.87e^{-79.84t} - 483.56e^{-58.10t} \left[ \frac{rad}{s} \right] \tag{22}$$

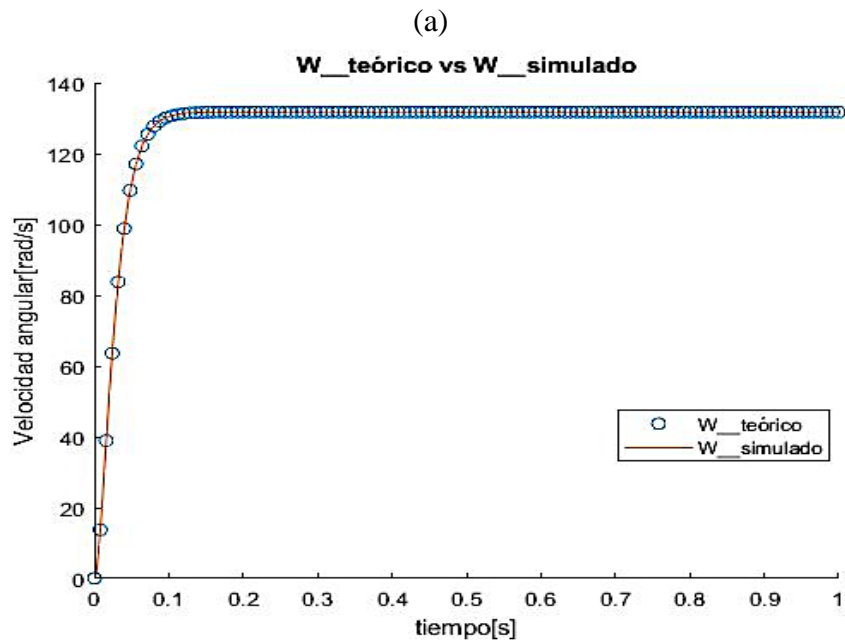
$$I = 2 + 1054e^{-58.10t} - 1056e^{-79.84t} [A] \tag{23}$$

Graficando la solución teórica del libro con la obtenida en la simulación se tiene:

**Figura 7.**

(a) *Corriente de armadura teórica vs corriente de armadura simulada, (b) Velocidad mecánica teórica vs velocidad mecánica simulada.*





(b)

Nota. Se observa que la solución obtenida en la simulación es igual a la solución teórica, por tanto se puede afirmar que es válido utilizar el modelo de simulación.

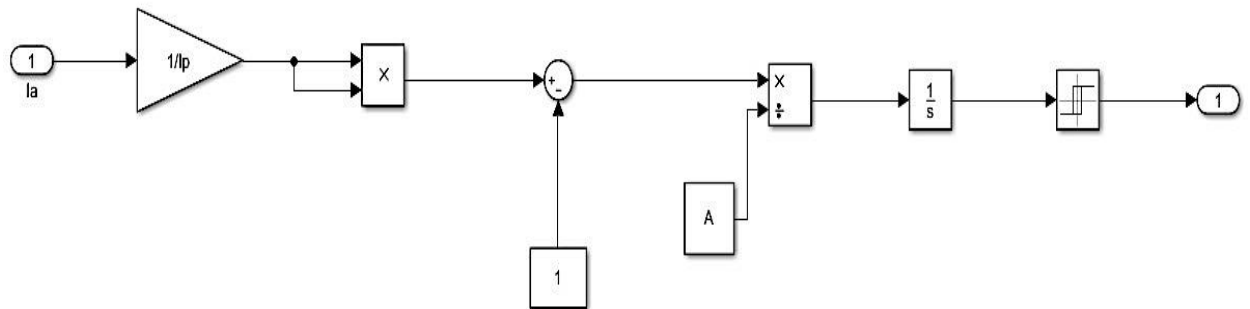
### 3.3 Protecciones

#### 3.3.1 Modelo de relé de sobrecorriente de tiempo inverso

La figura 8, presenta el diagrama de bloques del modelo de protección de sobrecorriente de tiempo inverso, expresada por la ecuación 19.

**Figura 8.**

*Representación del modelo de relé de sobrecorriente de tiempo inverso en Simulink.*



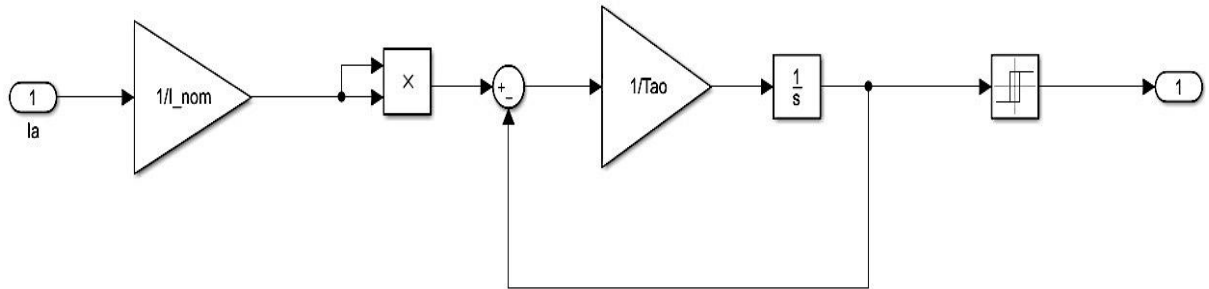
La protección se activa cuando la salida del integrador es igual a 1, si esta condición se cumple el relé configurado se activa y enclava entregando una salida digital constante de salida igual a 1, esta señal es conectada al switch de entrada de tensión para detener la maquina instantáneamente.

### **3.3.2 Modelo de protección térmica**

La figura 9, presenta el diagrama de bloques del modelo de protección térmica, expresada por la ecuación 20.

**Figura 9.**

*Representación del modelo de protección térmica en Simulink.*



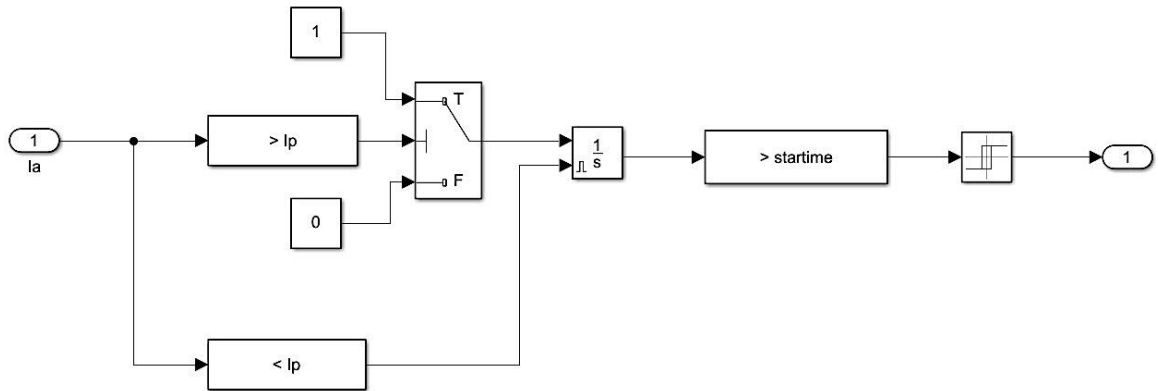
La protección se activa cuando la salida del integrador sea igual a 1, si esta condición se cumple el relé configurado se activa y enclava entregando una salida digital constante de salida igual a 1, esta señal es conectada al switch de entrada de tensión para detener la maquina instantáneamente.

### ***3.3.3 Modelo de protección de sobrecorriente de tiempo definido***

La figura 10, presenta el diagrama de bloques del modelo de protección de sobrecorriente de tiempo definido.

**Figura 10.**

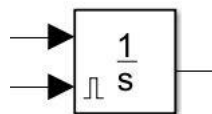
*Representación del modelo de protección de tiempo definido en Simulink.*



Esta protección funciona a medida que la corriente sensada supere la magnitud programada en un tiempo determinado, si esto sucede el relé se activara. Para este modelo se utiliza un integrador con la opción *external reset\_level*. Esto hace que el integrador se reinicie, es decir pierda la cuenta de las operaciones anteriores cuando la condición de corriente se normalice, si esta se hace antes del tiempo configurado el relé no se activara.

**Figura 11.**

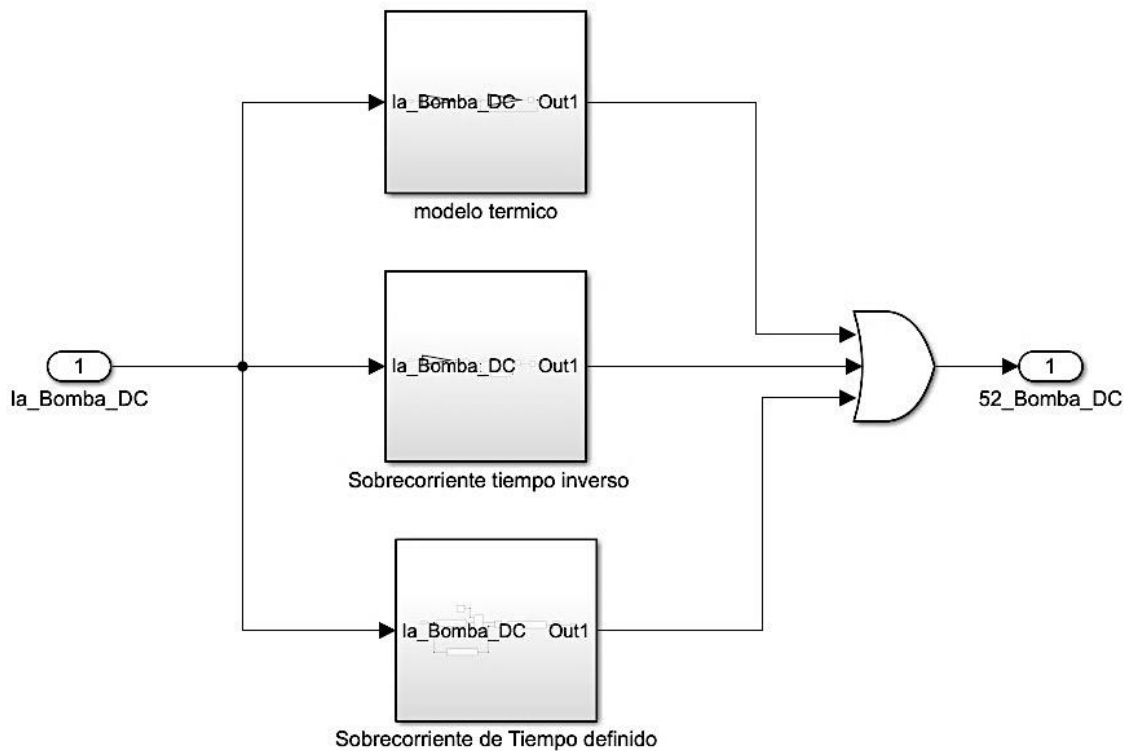
*Bloque integrador con condición external reset tipo level.*



La protección actúa cuando la salida del integrador sea igual a starttime [s], si esta condición se cumple, el relé configurado se activa y enclava entregando una salida digital constante de salida igual a 1, esta señal es conectada al switch de entrada de tensión para detener la maquina instantáneamente.

**Figura 12.**

*Conjunto de protecciones para la bomba DC, captura de Matlab-Simulink.*



El sistema de protecciones de cada uno de los componentes se encuentra conectado a una compuerta lógica OR, esta permite enviar una señal que va conectada a la entrada de tensión de cada motor. La primera falla que se active hará que el motor se apague

instantáneamente. En el caso ejemplo de la figura 11, se observa que la salida de la compuerta or está conectada a la señal **52\_Bomba\_DC** y que a su vez se encuentra conectada a una señal de entrada de tensión, ya nombrada en cada una de las protecciones explicadas anteriormente.

### 3.4 Lógica

La lógica de conexión y desconexión en una central térmica depende de los límites estipulados por el sistema de generación. Como se observa en la tabla 1, T1, T2 y T3, son los valores de los límites de operación de las máquinas que asigna un estado de operación a cada una, ya que cada componente debe dar respuesta rápida por medio de una señal que indique el modo de operación en el que se encuentre.

**Tabla 1.**

*Límites de operación*

Nombre	Estado	Temperatura[°C]		
		T1	T2	T3
Máquina_1		OFF	ON	ON
Máquina_2		OFF	OFF	ON
Máquina_3		OFF	OFF	OFF

Nota. Los límites de la tabla 1 se modelan por medio de operaciones lógicas que responden a señales analógicas emitidas por sensores de presión y temperatura.

Una forma de representar la lógica de operación del sistema de lubricación es el GRAFCET.

Se representa la lógica de los componentes y sus modos de operación a través de un diagrama de control con etapas y transiciones **GRAFCET**. De manera resumida se observa las entradas, las salidas y su modo de operación del sistema lógico en cada bloque. Simulink tiene la herramienta Stateflow la cual permite ‘simular lógica de decisión combinatoria y secuencial que se puede simular como un bloque dentro del modelo de Simulink’, (MathWorks, s.f.) (Peña)

#### **4. Caso de estudio**

Todo lo mencionado anteriormente se aplica en una planta térmica ubicada en el nororiente colombiano, con capacidad de 167 [MW] y una unidad de generación. El sistema de lubricación de esta planta cuenta con 8 motores que son los encargados de cumplir las funciones de los componentes del sistema.

##### **4.1 Motores del sistema de lubricación**

Este caso de estudio emplea 7 motores de inducción trifásicos tipo jaula de ardilla y 1 motor DC de imanes permanentes. A continuación de manera más detallada se tiene los parámetros necesarios para la simulación.

**4.1.1 Parametrización del motor de inducción jaula de ardilla**

Los parámetros de los 7 motores de inducción del sistema de lubricación son modelados por el diagrama de bloques de la fig(6). ‘Se consigue parametrizar los componentes del circuito equivalente por fase de un motor trifásico de inducción, de manera que podamos saber cómo será el comportamiento de dicho motor sin tener que realizar ningún tipo de ensayo en el laboratorio.’ (Peña)

Resulta útil este estudio pues no se tuvo la posibilidad de realizar esta toma de datos en las máquinas reales. Por esto, se encuentra un trabajo de grado que permite estimar los parámetros mediante la potencia de los motores. Se tiene la excepción de las bombas AC ya que en el estudio no se puede estimar los parámetros para esta potencia, por tanto, se asumen los mismos parámetros de los extractores de vapor, esto no altera en nada la composición de la simulación pues el único cambio que presenta es el valor de los parámetros.

Con base en la potencia nominal y el número de polos de los motores se pueden estimar los parámetros eléctricos y mecánicos, mediante un ajuste matemático que relaciona las características de las máquinas.

El ajuste matemático se encuentra de manera específica en (Peña), dependiendo del número de polos de los motores. Se hallan con la siguiente ecuación.

$$N_s = \frac{120 * f}{P} \tag{24}$$

Donde:

$N_s$  = Velocidad síncrona. [r.p.m]

$P$  = Número de polos.

$f$  = Frecuencia. [Hz]

**Tabla 2.**

*Datos de los motores y cálculo del número de polos de los motores de inducción.*

Datos cálculos		$N_s$ [r. p. m.]	$P$ [kW]	Número de polos
<b>Motores del sistema de lubricación</b>				
Bomba AC #1		3600	74.57	2
Bomba AC #2		3600	74.57	2
Extractor vapor #1	de	3600	5.5928	2
Extractor vapor #2	de	3600	5.5928	2
Ventilador #1		1800	7.457	4
Ventilador #2		1800	7.457	4
Ventilador #3		1800	7.457	4

El número de polos de una máquina siempre debe ser un valor par y se debe aproximar al valor más cercano, de tal forma que al reemplazar de nuevo en la fórmula de la velocidad síncrona, dé un valor mayor que el de la velocidad mecánica del motor, ya que este es el efecto del deslizamiento.

A través del número de polos y la potencia del motor se escoge la ecuación correspondiente para hallar los parámetros como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 3.**

*Parámetros de cada motor de inducción del sistema de lubricación.*

<b>Parámetros</b>	<b><math>J</math> [<math>kg \cdot m^2</math>]</b>	<b><math>R_1</math> [<math>\Omega</math>]</b>	<b><math>R_2</math> [<math>\Omega</math>]</b>	<b><math>X_{d1} = X_{d2}</math> [<math>\Omega</math>]</b>
<b>Motores del sistema de lubricación</b>				
Bomba AC #1 de aceite	$3.7602 \cdot 10^4$	0.9207	0.6358	1.2023
Bomba AC #2 de aceite	$3.7602 \cdot 10^4$	0.9207	0.6358	1.2023
Extractor de vapor #1	$3.7602 \cdot 10^4$	0.9207	0.6358	1.2023
Extractor de vapor #2	$3.7602 \cdot 10^4$	0.9207	0.6358	1.2023
Ventilador #1	0.0307	0.4390	0.5949	0.9321
Ventilador #2	0.0307	0.4390	0.5949	0.9321
Ventilador #3	0.0307	0.4390	0.5949	0.9321

**4.1.2 Parametrización del motor DC de imanes permanentes**

Los parámetros del motor DC se obtienen a través de los datos de placa del motor DC imanes permanentes marca HAMPDEN modelo DM-300 [Modelo matemático motor

DC conexión independiente” Francisco Mesa Weber, Paolo Ramos Morales”], ya que no es posible tomar los datos en la planta. Se encuentran los siguientes:

**Tabla 4.**

*Datos de placa del motor de corriente continua del sistema de lubricación.*

Datos de placa	$V_a$ [V]	$I_a$ [A]	$N_m = 1800$ [r.p.m.]	P [kW]
<b>Motores del sistema de lubricación</b>				
Bomba de aceite de emergencia DC	125	23	1800	2

**Tabla 5.**

*Parámetros del motor de corriente continua del sistema de lubricación.*

Parámetros	$J$ [kg.m <sup>2</sup> ]	$R_1$ [ $\Omega$ ]	$L_1$ [H]
<b>Motores del sistema de lubricación</b>			
Bomba de aceite de emergencia DC	0.0432	0.54	0.01

El modelo de la fig 6, se reemplaza con los datos obtenidos en la tabla 5.

## 4.2 Protecciones

Los parámetros que se utilizan para el modelo de simulación son:

$A = 190$ , se escoge este valor respecto al paper (Jon, 2013)

$I_{nom} =$  Depende de los datos de placa del motor.

$I_p = 1.15 * I_{nom}$ , se escoge el 1.15 por el factor del servicio del motor.

$T_{ao} = 3750$ , se escoge este valor respecto al paper (Jon, 2013)

## 4.3 Lógica

En este caso de estudio se trabaja con tres componentes: las bombas, los extractores y los ventiladores. Cada uno de ellos con su respectiva lógica de funcionamiento, que indica cuando debe operar el motor principal, cuando opera el motor de respaldo, y en el caso de las bombas, cuando opera su bomba de emergencia DC.

Las bombas principales de aceite de lubricación son bombas centrífugas AC de 100 [HP], tienen el fin de llevar aceite a todo el sistema. Una de ellas se encuentra en operación y la otra en *stand-by*, mientras que la presión de descarga no disminuya de 6 [bar]; de ser así, automáticamente la bomba en *stand-by* entra en operación. En caso de presentar pérdida de operación de las bombas principales, es decir ausencia total de energía eléctrica de corriente alterna o una inminente pérdida de presión, debido a que cae por debajo de 5.52 [bar], la bomba de emergencia DC arranca automáticamente.

Los extractores de vapor/niebla de aceite del reservorio son dos: uno que se encuentra en operación manteniendo la presión de vacío de 8 a 18 pulgadas de agua, y el otro que arranca automáticamente la presión de vacío disminuya a 2 pulgadas de agua.

Por último, los 3 ventiladores que están encargados de controlar la temperatura del aceite limitan su funcionamiento por valores de temperatura estipulados. El primer ventilador entra a operar cuando la temperatura se incrementa de 49°C, el segundo arranca si la temperatura sigue aumentando y supera los 54°C, el último ventilador arranca cuando la temperatura del aceite sea mayor a 57°C. Esta temperatura es sensada a la salida del regulador de presión.

**Tabla 6.**

*Límites de operación de los ventiladores.*

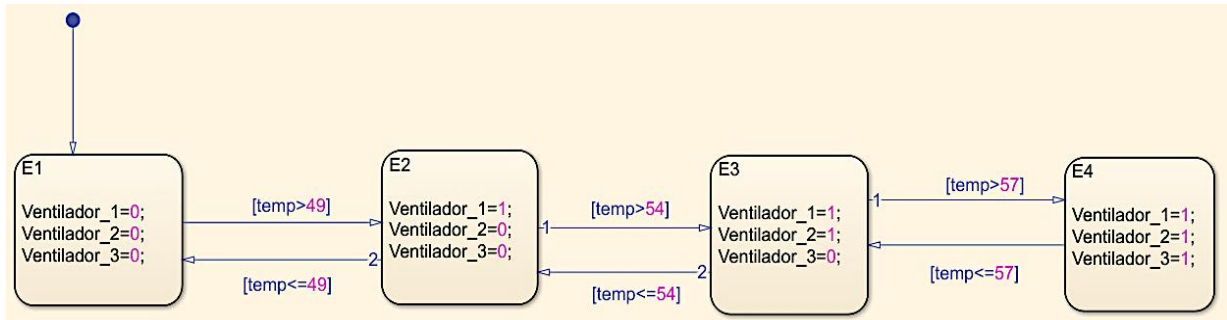
Nombre /Estado	Temperatura[°C]			
	<49	50-53	54-56	>57
Ventilador_1	OFF	ON	ON	ON
Ventilador_2	OFF	OFF	ON	ON
Ventilador_3	OFF	OFF	OFF	ON

Nota. La lógica de operación de los ventiladores cuenta con dos condiciones operativas para cada ventilador, siendo OFF=0 y ON=1.

De esta forma se representa a continuación:

**Figura 13.**

*GRAF CET de los ventiladores.*



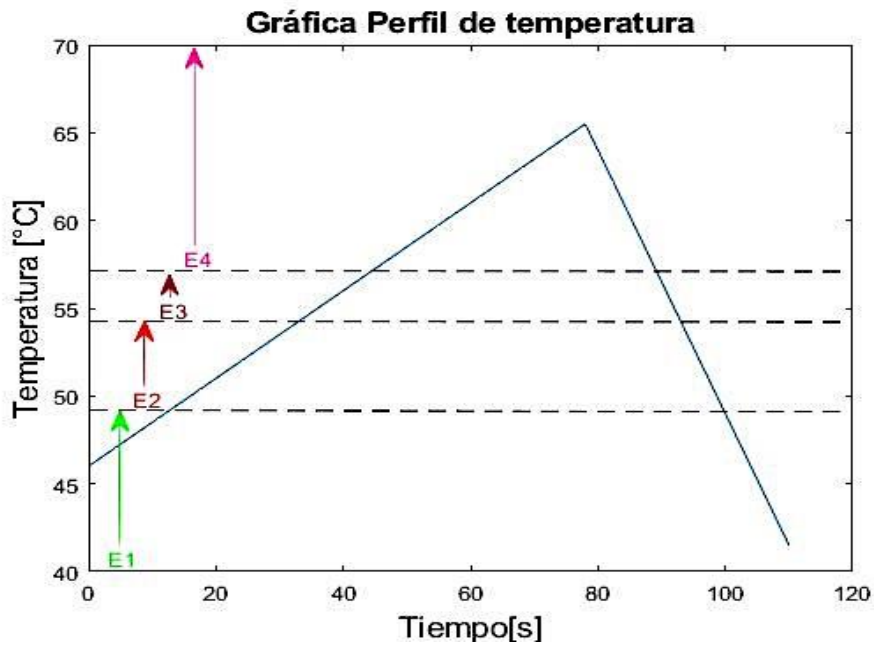
En la figura 13 la lógica de los ventiladores está constituida por 4 estados de operación presentes en la tabla 6. La transición entre ellos presenta un cambio en la operación de los motores, donde el estado 1 presenta todos los motores apagados y el estado 4 todos los motores encendidos. Dependiendo del valor sensado de temperatura que tenga el aceite da un conjunto de salidas digitales, Ventilador\_1, Ventilador\_2 y Ventilador\_3, estas señales están conectadas a un multiplicador que está situado en la entrada de tensión de cada uno, encendiéndolos o apagándolos automáticamente dependiendo del estado de operación en el que se encuentre el sistema.

La misma analogía se emplea para los extractores de vapor, sus estados de operación dependen de la presión de vacío sensada en el reservorio. El estado de operación de las bombas depende de la presión de descarga sensada en las tuberías.

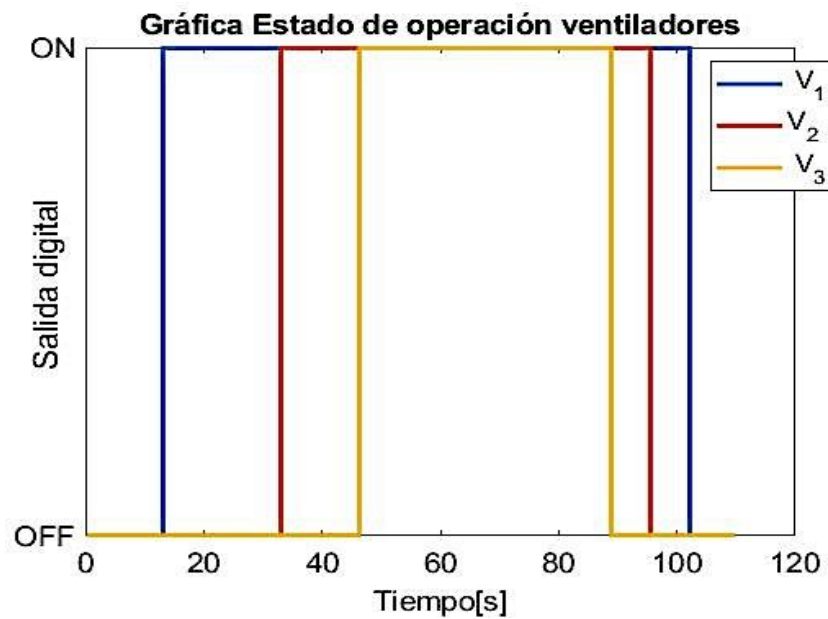
Se simula un perfil de temperatura que trascienda por todos los estados de operación. Se observa la respuesta de la lógica de control, y las salidas lógicas entregadas por el estado de operación de los ventiladores del sistema.

**Figura 14.**

(a) *Perfil de temperatura, (b) Estado de operación de los ventiladores.*



(a)



(b)

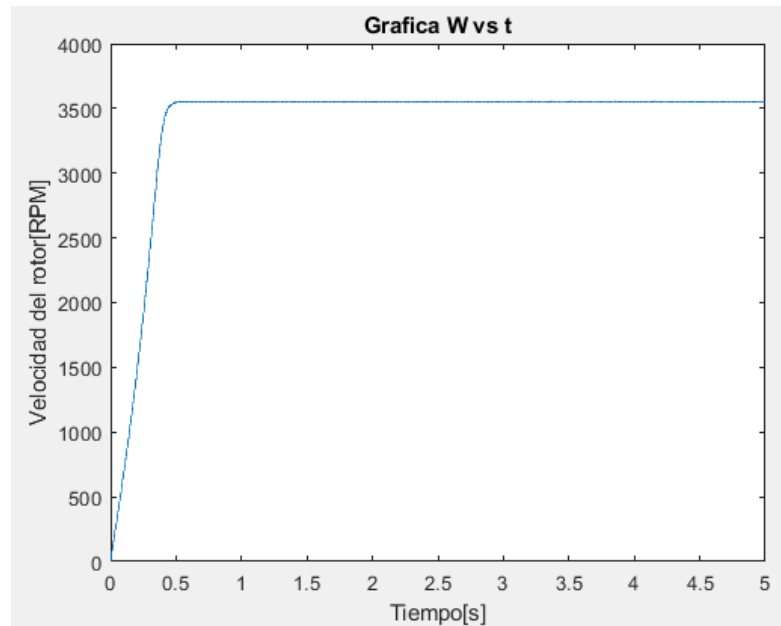
#### 4.4 Análisis de resultados

Se aplican las pruebas de simulación a los componentes del sistema de lubricación. Se comparan los datos obtenidos en la simulación bajo condiciones de operación normal, con los datos suministrados por la planta. Los datos suministrados está organizados en un informe, que muestra día a día los valores de corriente en cada una de las fases y la velocidad para cada uno de los componentes del sistema. Se escoge el día 8 de enero del 2009 como los datos aleatorios para realizar la comparación. Además, se elige el Extractor\_1 como el componente a mostrar los resultados obtenidos, ya que siempre se encuentra en operación.

#### 4.4.1 Condición de operación normal

**Figura 15.**

*Gráfica de velocidad del rotor vs tiempo de los extractores.*

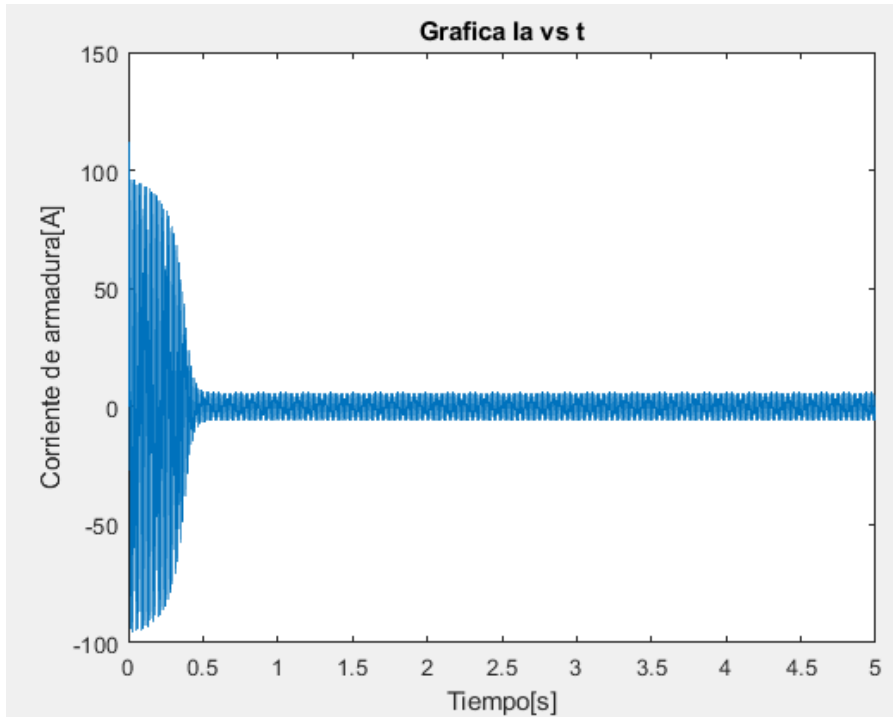


La velocidad del motor dada por los datos de la planta es de 3550 [r.p.m], y el valor de velocidad obtenido en la simulación es de 3553 [r.p.m], figura 14. De esta forma, se realiza una comparación entre estos dos valores para observar que tan inexacta es la simulación y se obtiene:

$$\%E = \frac{(3553 - 3550)}{3550} = 0.08\%$$

**Figura 16.**

*Gráfica de corriente de armadura vs tiempo de los extractores.*



Para la corriente de armadura se realiza el mismo procedimiento. En este caso, primero se halla la corriente promedio de todas las fases con los datos dados por la planta.

El promedio de la corriente medida en cada fase es:

$$I_{a\_prom} = \frac{5.7 + 5.4 + 4.4}{3} = 5.17$$

La comparación entre el valor de corriente promedio y el obtenido en la simulación como se muestra en la figura 16 es:

$$\%E = \frac{5.77 - 5.17}{5.17} = 11.60\%$$

Este porcentaje de error se da porque no contamos con los datos precisos de los parámetros, ya que no se realizaron pruebas sino una estimación basada en (Peña). Por otro lado, el modelo escogido fue el circuito equivalente aproximado y no el exacto. Aparte de lo anterior, también despreciamos la rama de magnetización. Y como una última observación, las sensibilidades de los instrumentos de medición usados en los motores de la planta influyen en este porcentaje.

#### ***4.5.2 Condición de operación bajo falla***

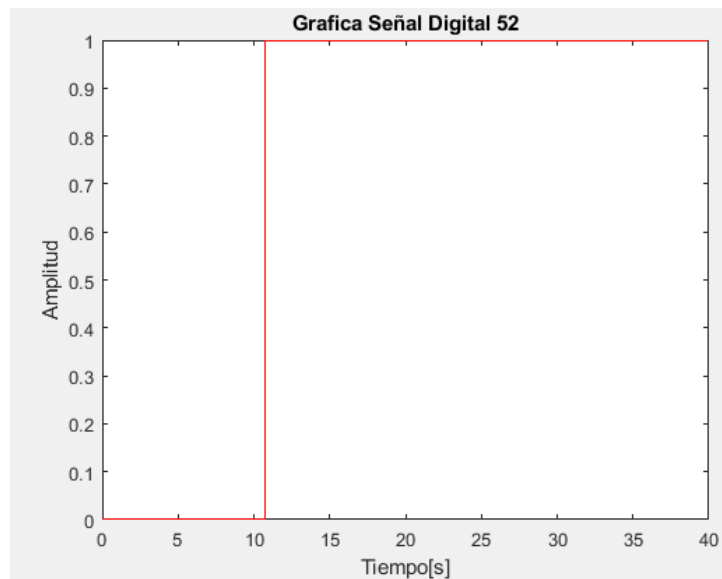
Se realizan las pruebas de simulación para el caso de estudio ante operaciones bajo falla y se observa la respuesta del sistema, de esta forma se obtiene:

En el primer caso se simula una falla por sobrecorriente hallada por la protección de tiempo definido en el arranque, para ello se aplica un par de carga en el eje mayor que el nominal, este varía dependiendo de los valores nominales de cada máquina. De esta forma, la máquina debe generar una corriente alta para su movimiento rotativo. Los datos

de la simulación son los mismos de condición operativa normal exceptuando el aumento del par de carga:

**Figura 17.**

*Gráfica señal digital 52 para el primer caso.*

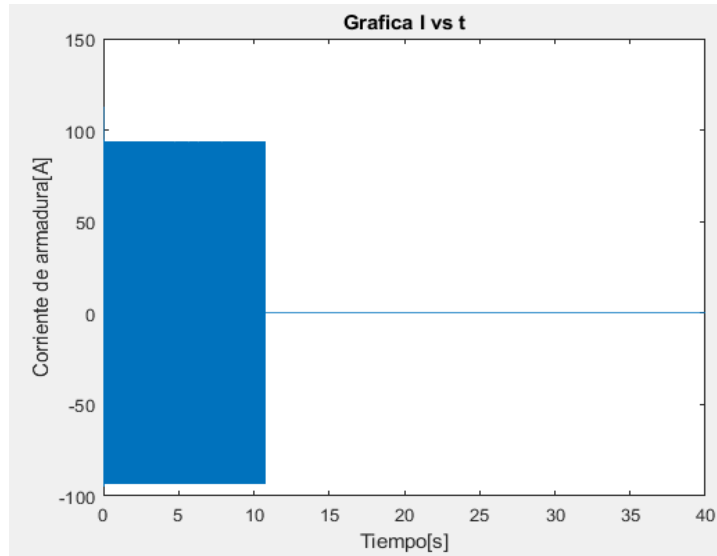


$$T_l = 10 [Nm]$$

En esta gráfica se observa el instante cuando se activa la señal digital 52 que se encuentra a la salida de la protección ya explicada anteriormente.

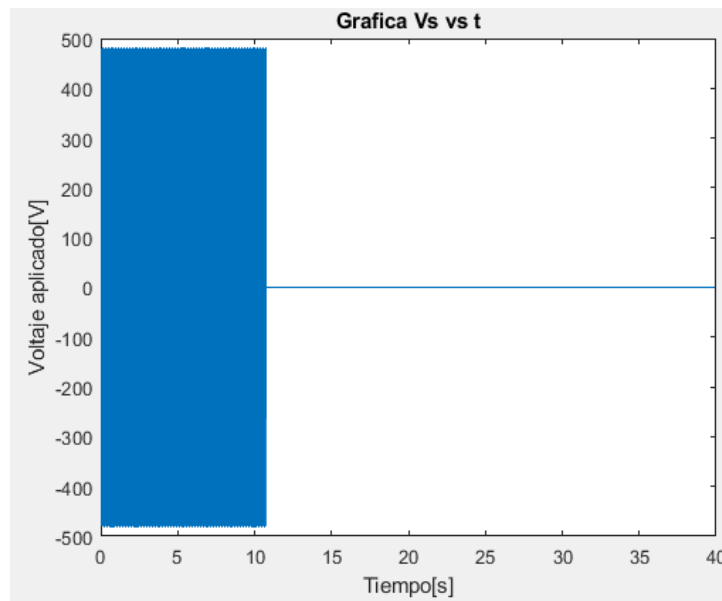
**Figura 18.**

*Gráfica de la corriente de armadura.*



**Figura 19.**

*Gráfica del voltaje aplicado.*



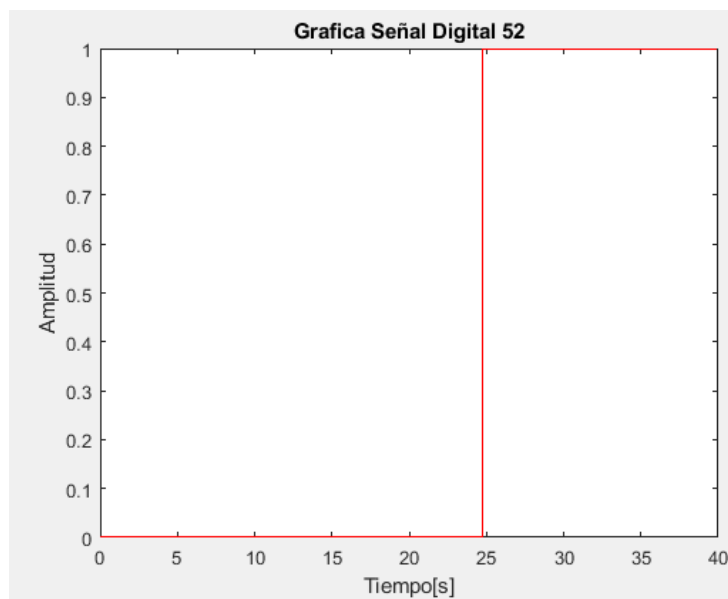
Debido al par de carga elevado se presenta una corriente de arranque alta durante 10 segundos que es el tiempo configurado, momento en el cual se activa la protección y se apaga la máquina *Figura 17*.

En el segundo caso se simula una falla por sobrecorriente hallada por la protección de sobrecorriente de tiempo inverso en un instante, para ello se aplica un par de carga mayor al nominal en el eje. De esta forma, la máquina debe generar una corriente alta para su movimiento rotativo. Los datos de la simulación son los mismos de condición operativa normal exceptuando el aumento del par de carga:

$$T_l = \text{step activado en } t = 20 \text{ [s], con amplitud de } 10$$

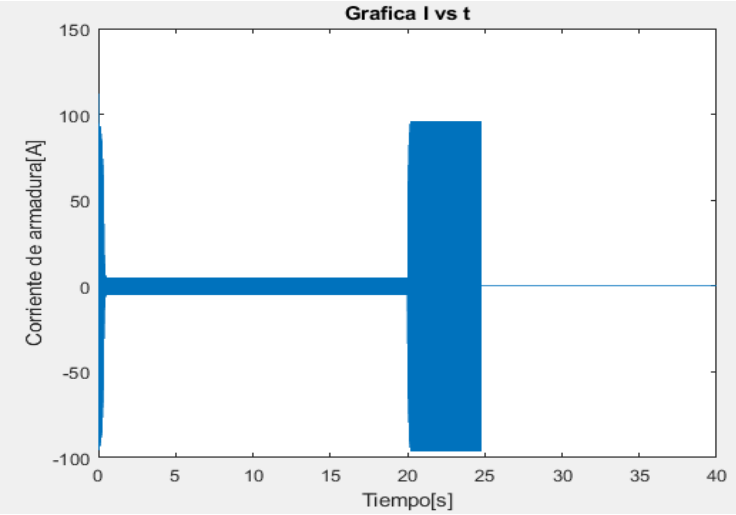
**Figura 20.**

*Gráfica señal digital 52 para el segundo caso.*



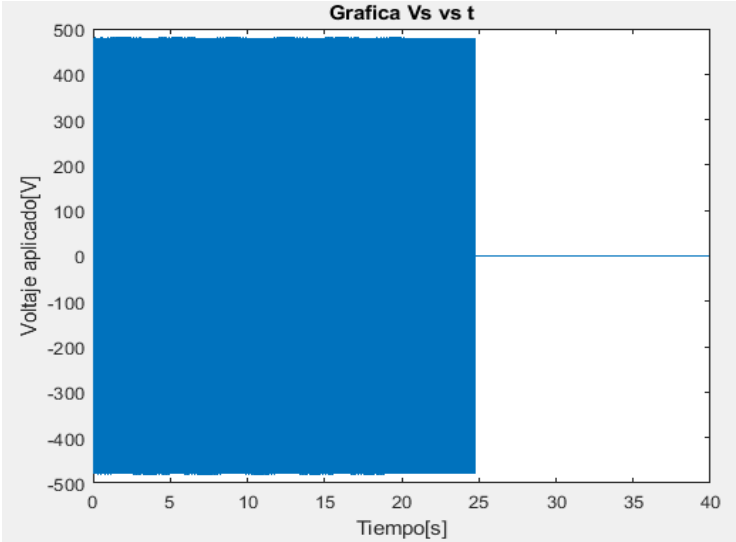
**Figura 21.**

*Gráfica de corriente de armadura.*



**Figura 22.**

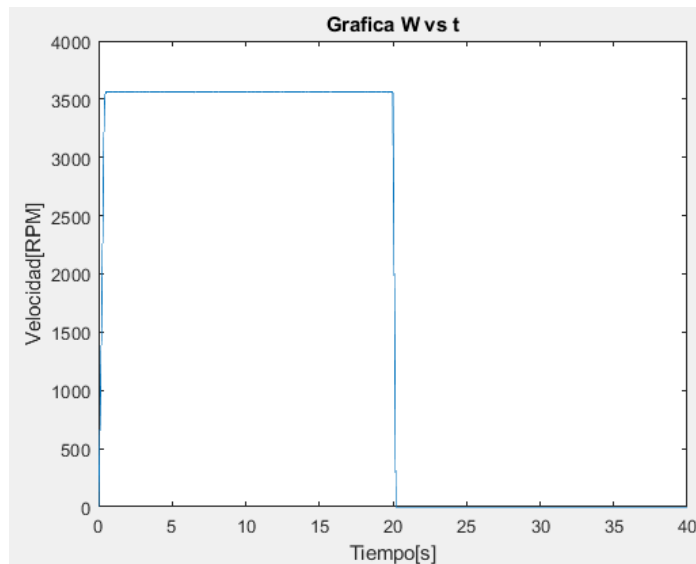
*Gráfica de voltaje aplicado.*



Se muestra que el extractor opera de manera normal en los primeros segundos. A los 20 segundos presenta una elevación abrupta del par de carga que ocasiona un incremento en la corriente *Figura 21*, está activa la protección 5 segundos después y apaga el extractor. *Figura 20*

**Figura 23.**

*Gráfica de velocidad.*



La velocidad del extractor opera normal durante los primeros segundos. Luego de la perturbación del par el eje se detiene debido a que este es muy elevado.

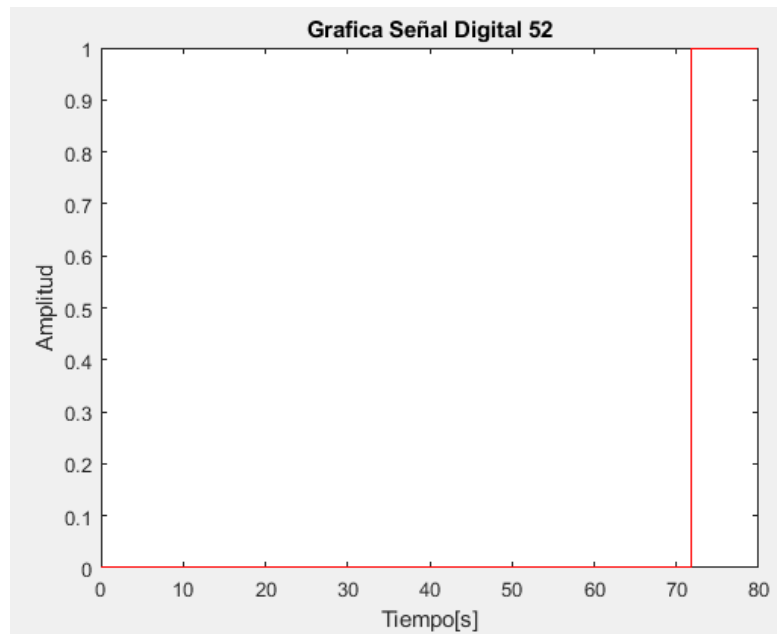
Y en el último caso se simula una falla térmica hallada por la protección térmica, para ello se aplica un par de carga mayor al nominal en el eje. De tal forma, la máquina debe generar una corriente alta que calienta los devanados del motor. Los datos de la

simulación son los mismos de condición operativa normal exceptuando el aumento del par de carga:

$$T_l = \text{step activado en } t = 5 \text{ [s], con amplitud de } 10$$

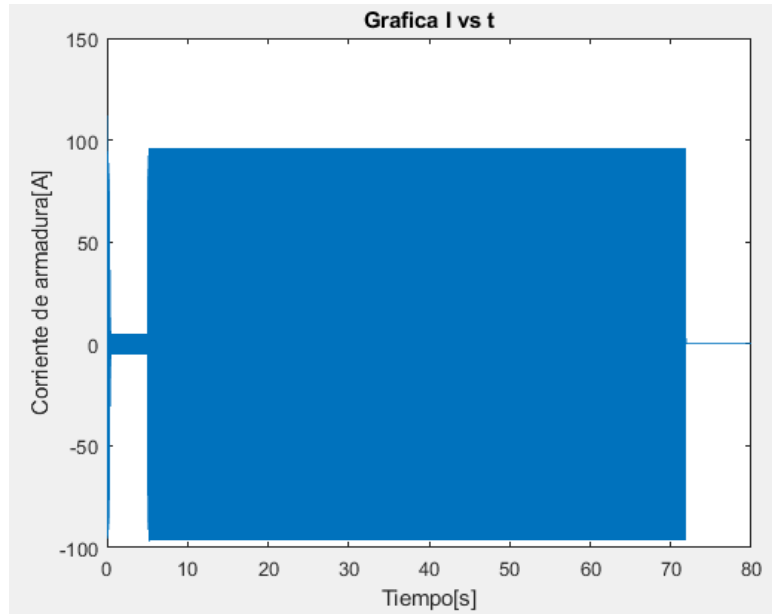
**Figura 24.**

*Gráfica de la señal digital 52 para el último caso.*



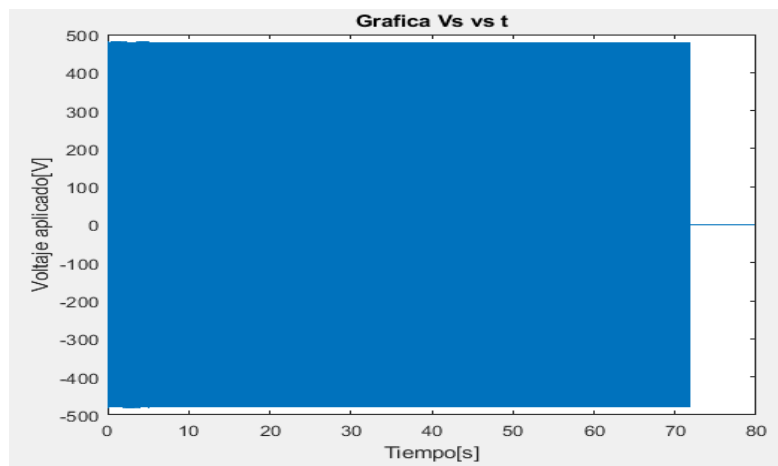
**Figura 25.**

*Gráfica de la corriente de armadura.*



**Figura 26.**

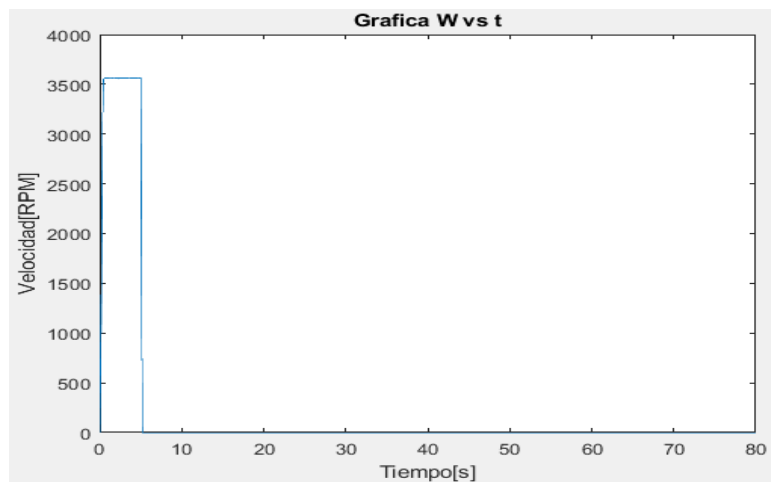
*Gráfica del voltaje aplicado.*



El extractor a los 5 segundos se somete a un par de carga mayor que el nominal, esto produce una elevación de la corriente por ende un calentamiento excesivo de los devanados. La protección se activa varios segundos después de presentado este par y ocasiona el apagado del extractor Figura 24.

**Figura 27.**

*Gráfica de la velocidad.*



La velocidad del extractor cae a 0 debido a que el par de carga es mucho mayor al nominal.

## 5. Conclusiones

El caso de estudio permite hacer una comparación entre el sistema real y el simulado para la condición normal de operación. Se obtiene así un error del 11.60% en la

corriente de armadura entre los datos suministrados por la planta y los resultados de la simulación, en el caso de la velocidad mecánica del 0.08%, entre los datos de placa del motor con los datos obtenidos en la simulación. Por lo anterior, se tiene que la corriente de armadura presenta un porcentaje de error alto en comparación con el de la velocidad, esto es debido a que no se obtuvieron los datos precisos de los parámetros de los motores. Se puede afirmar que el modelo implementado cumple con cada una de las especificaciones técnicas provista por la planta real, es decir sus modos de operación, su función ante fallas, su lógica de control de arranque/parada según el entorno al que esté sometido, ejecutando la acción indicada que supondría un evento en la realidad según el manual de operación que fue suministrado.

Se obtiene una simulación flexible de tal manera que los valores de entrada son modificables de forma modular, así se observa el comportamiento del sistema en un tiempo determinado, de tal forma que la persona que quiera analizar los comportamientos para otra planta lo pueda hacer cambiando los límites de operación, los parámetros, y valores de entrada de las máquinas. Esto significa que se podrá analizar la respuesta de cada componente ante cambios en las entradas como tensión de los motores y el par de carga aplicado.

Este modelo de simulación permite el estudio del sistema de lubricación con más detalle, comprendiendo así cada uno de los elementos, dimensiones y funcionamiento a la hora de acoplar cada una de las máquinas. Implementar el funcionamiento por medio de la

lógica de operación de los componentes del sistema, se vuelve un poco complejo ya que requiere varios bloques con operaciones lógicas y límites de operación. Por lo anterior, el GRAFCET se vuelve una herramienta útil a través del stateflow que permite expresar la lógica de decisión de manera más resumida y fácil.

Matlab y su herramienta simulink facilita la simulación de cualquier tipo de motor eléctrico siempre y cuando se tenga un modelo correcto, dejando abierta la posibilidad de seguir trabajando en este tipo de proyectos para diferentes procesos industriales que involucren motores eléctricos.

### Referencias bibliográficas

Gurú, B. S., & Hiziroglu, H. R. (2003). *Máquinas eléctricas y transformadores*. México:

OXFORD UNIVERSITY PRESS.

Jon, S. S. (2013). Stator Thermal Time Constant. *IEEE*.

MathWorks. (s.f.). *MathWorks*. Obtenido de MathWorks Stateflow:

<https://la.mathworks.com/products/stateflow.html>

Naranjo M, S. A. (1 de Mayo de 2012). Hace 20 años Colombia sufrió el apagón. *El Colombiano* .

Peña, S. C. (s.f.). *Estudio de los datos del catálogo en motores de inducción trifásicos*.

Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.

Silva, L., & Solano , J. (s.f.). *Herramientas de Modelado y Simulación de Sistemas Continuos*.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RAFAELA.

Wester, C. (2008). Motor Protection Principles. *IEEE Xplore*.