

Simulación del Sistema Eléctrico de una Caldera Acuotubular

Jeimy Tatihana Vásquez Bejarano

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniera Electricista

Director

Javier Enrique Solano Martínez

Doctor en Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado con especial cariño a mi padre, Pablo Vásquez Rodríguez, por su infinito amor, por ser un gran ejemplo de sabiduría, por su constancia día a día a lo largo de esta etapa de mi vida, por su apoyo incondicional en la parte moral y económica para llegar a ser profesional. Este triunfo es gracias a ti y para ti.

¡Tú eres mi fuente de inspiración, Padre!

Agradecimientos

A mi padre, Pablo, por comprender cada etapa de este proyecto y darme ánimo para nunca desistir. Porque día a día trabajó arduamente por mí y mis hermanos, y hoy le demuestro que todos los esfuerzos que hizo valieron la pena. Gracias porque me brindó todo su amor y me apoyó en cada decisión que tomé durante este proceso, porque desde la distancia hizo todo lo imposible para que yo estuviera bien. Indudablemente sin su compañía nada de esto hubiera sido posible.

A mi hermana Judith por su apoyo incondicional, por su compañía desde la infancia, porque gracias a ella aprendí que con perseverancia y buena actitud se puede salir de cualquier adversidad.

A mi compañero de vida, amigo y novio, Vladimir, porque inexplicablemente le dio un giro a mi vida inspirándome a dar la mejor versión de mí como persona y como estudiante. Gracias a sus palabras de ánimo porque a pesar de que este no ha sido un camino fácil, siempre fue muy incondicional. Gracias por la paciencia en mis ausencias y por recordarme cada día que todo es más sencillo y bonito cuando somos dos.

A mi mamá Jackeline, que desde la distancia siempre me apoyó y me envió su amor.

A mis sobrinos Sofía, Santiago y Samuel, porque con cada visita me alegraban el corazón y me recargaban de buenas energías. Gracias por las cartas llenas de amor que me escribían en cada encuentro. Ellos son parte de mi motivación para ser una gran profesional.

Gracias a mi mami María por ayudar a mi padre a escoger y empacar los mercados que me enviaba con tanto amor. Porque como dice el dicho “A barriga llena, corazón contento”, y bien contenta sí me mantenían.

A mi buena amiga Yeina por sus consejos, por su compañía, por estar ahí siempre que la necesité. Y por supuesto, por su deliciosa comida que siempre me alegró el corazón.

La universidad me deja excelentes amigas, y una de ellas mi amiga Nicole; gracias por las tardes llenas de risas y estudio, gracias por compartir conmigo esas tardes de pastelería... ¡no había torta que nos quedara fea! Gracias a mi amiga Jess que estuvo incondicionalmente en el último proceso de mi formación, siempre tan amable y amorosa. Las quiero mucho.

En el transcurso de mi carrera conocí a personas increíbles que me aportaron mucho y siempre llevaré en mi corazón. Gracias por compartir su conocimiento, compañía y amor.

Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Modelo del sistema	13
1.1. Motor de inducción	13
1.2. Protecciones eléctricas	17
1.2.1 Protección de sobrecorriente [51]	18
1.2.2. Protección térmica	19
2. Modelo de simulación.....	22
3. Lógica de control con Grafcet.....	24
4. Caso de estudio y resultados	26
4.1. Parámetros.....	26
4.2. Estado de operación	29
4.3. Resultados	33
5. Conclusiones	38
Referencias bibliográficas.....	40

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Circuito equivalente monofásico.....	14
Figura 2. Representación en diagrama de bloques de las ecuaciones de estado.....	17
Figura 3. Diagrama de bloques de protección (51).....	19
Figura 4. Diagrama de bloques protección térmica.	21
Figura 5. Sistema general comprendido por los subsistemas donde se encuentra el modelo de las máquinas y la lógica de control.	23
Figura 6. Subsistema del motor construido por su modelo matemático y respectivas protecciones.	23
Figura 7. Subsistema de protecciones.....	24
Figura 8. Chart con sus respectivas entrada y salida.	25
Figura 9. Bloques de estado con una transición.....	25
Figura 10. Resultado obtenido del Grafcet.	26
Figura 11. Estado de operación de la bomba de agua.....	28
Figura 12. Estado de operación del ventilador de tiro.	28
Figura 13. Estado de operación del ventilador primario.....	30
Figura 14. Estado de operación del alimentador de carbón.....	30
Figura 15. Lógica de control a partir de bloques de estado.	31
Figura 16. Chart con sus respectivas entradas y salidas.	31
Figura 17. Corrientes de los motores a) Bomba de agua b) Alimentador de carbón c) Ventilador de tiro.	32

Figura 18. Corriente en el arranque.	33
Figura 19. Velocidad de los motores a) Bomba de agua b) Alimentador de carbón c) Ventilador de tiro.	34
Figura 20. Corriente en estado estable.	35
Figura 21. Corriente de la bomba de agua bajo la presencia de falla térmica.	36
Figura 22. Estado de operación protección térmica.	36
Figura 23. Corriente del alimentador de carbón bajo la presencia de falla por sobrecorriente. ...	37
Figura 24. Estado de operación de sobrecorriente (51)	37

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Datos de placa del fabricante.	27
Tabla 2. Parámetros de los motores.	28
Tabla 3. Resultados de velocidad obtenidos mediante la simulación.	38

Resumen

Título: Simulación del Sistema Eléctrico de una Caldera Acuotubular.*

Autor: Jeimy Tatihana Vásquez Bejarano.**

Palabras Clave: Caldera Acuotubular, Protecciones, Subsistema.

Descripción:

Este trabajo consiste en la implementación de un modelo de simulación del sistema eléctrico que comprende una caldera acuotubular, para evaluar la respuesta de los componentes eléctricos que en esta operan ante un perfil de operación establecido. Simulación que se va a llevar a cabo en el entorno gráfico Simulink de MATLAB. En esta simulación se implementan dos protecciones eléctricas por cada uno de los motores, también se establecen unas condiciones de operación y se implementa la lógica de control para cada una de las máquinas. Este control se lleva a cabo mediante el Grafset, el cual es una herramienta que representa gráficamente el comportamiento secuencial de un sistema. Cada una de las máquinas y sus respectivas protecciones se simulan en un subsistema y finalmente se integra todo en un modelo general de simulación. Los resultados obtenidos evidencian una autonomía en respuesta de la implementación de lógica de control, dado que se logra tener un control del estado de operación de cada una de las máquinas. Por otro lado, se evidencia el disparo de las protecciones eléctricas ante la presencia de una falla térmica o sobrecorriente. Sin embargo, se observa que en simulación el tiempo de actuación de las protecciones presenta un porcentaje de error del 7,8% en comparación al tiempo en el cual deberían actuar las protecciones teóricamente.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Javier Enrique Solano Martínez, Doctor en Ingeniería Eléctrica.

Abstract

Title: Simulation of the Electrical System of a Water Tuve Boiler.*

Author: Jeimy Tatihana Vásquez Bejarano.**

Key Words: Water Tuve Boiler, Protections, Subsystem.

Description:

This work consists of the implementation of a simulation model of the electrical system that includes a water tuve boiler, to evaluate the response of the electrical components that operate in this before an established operating profile. Simulation to be carried out in the MATLAB Simulink graphical environment. In this simulation, two electrical protections are implemented for each of the machines. This control is carried out by means of the Grafcet, which is a tool that graphically represents the sequential behavior of a system. Each of the machines and their respective protections are simulated in a subsystem and finally everything is integrated into a general simulation model. The results obtained show autonomy in response to the implementation of control logic since it is possible to have control of the operating status of each of the machines. On the other hand, the tripping of the electrical protections is evidenced in the presence of a thermal fault or overcurrent. However, it is observed that in simulation the protection actuation time presents an error percentage of 7.8% compared to the time in which the protections should act theoretically.

* Bachelor Thesis.

** Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Javier Enrique Solano Martínez, Doctor en Ingeniería Eléctrica.

Introducción

A comienzos de la Revolución Industrial que se dio a finales del siglo XVIII se popularizaron las máquinas a vapor, también conocidas como calderas. En un principio, estas máquinas sirvieron para calentar pequeñas cantidades de agua y generar vapor mediante la transferencia de calor. No obstante, con el paso del tiempo permitieron movilizar grandes ferrocarriles y barcos, facilitando el transporte de alimentos y pasajeros de un lugar a otro. Actualmente, las calderas son de gran utilidad en muchos procesos industriales que requieren altas temperaturas, en su mayoría de alimentos, hidrocarburos, hospitales, lavandería, textiles, entre otros (Maquilick, s.f.).

Los avances ingenieriles de estos sectores económicos han significado modernizaciones en dichas máquinas, lo cual ha mejorado su rendimiento y reducido su impacto ambiental. En la actualidad hay dos tipos de calderas según la disposición de los fluidos (Franz, 2012). Por una parte, están las calderas pirotubulares, en las cuales los gases de la combustión pasan por el interior de los tubos y el agua se encuentra en el exterior. Por otra, las calderas acuotubulares, en las que el agua pasa por el interior de los tubos y los gases de combustión circulan en el exterior. En comparación con las pirotubulares, estas últimas tienen un menor rendimiento y requieren un mayor volumen de agua para su funcionamiento debido a su diseño, de manera que son utilizadas especialmente cuando se requieren niveles elevados de presión.

En general, la mayoría de las calderas incorporan en su sistema eléctrico un juego de motores, protecciones y un sistema de control. Asimismo, dentro de la estrategia del sistema de

control se cuenta con unos controladores de agua y presión que permiten mantener la caldera con un nivel de agua y un rango de presión adecuado para su funcionamiento.

Para el correcto funcionamiento del sistema eléctrico de la caldera, es vital coordinar y automatizar las protecciones que este opera, ya que la presencia de fallas en alguno de sus componentes puede ocasionar pérdidas materiales y humanas. En ese sentido, los niveles de control de agua de la caldera son fundamentales, pues si por alguna razón se quedara sin líquido y el sistema eléctrico no respondiera adecuadamente a través del encendido de la bomba o apagando todo el sistema, la máquina podría estallar y provocar una tragedia. Por esta razón, es indispensable contar con un sistema de protección robusto, efectivo y bien coordinado que garantice la seguridad de las personas y los equipos en el momento indicado.

Una técnica para evaluar el comportamiento del sistema eléctrico de la caldera es la simulación apoyada en herramientas matemáticas y computacionales, que nos permite obtener una respuesta del sistema en estado estable de operación y ante la presencia de fallas.

Teniendo esto en cuenta, este trabajo adapta un modelo de simulación del sistema eléctrico de una caldera acuotubular, con el fin de analizar y probar la capacidad de respuesta de su sistema de control y protección ante la presencia de alguna falla. Así, se analizará la protección térmica y sobrecorriente inversa, el control de nivel de agua y los controles de presión. Además, se estimarán los parámetros eléctricos de los motores mediante datos de placa y se implementarán los modelos matemáticos de cada motor. En esta investigación se emplea el software *Simulink* de MATLAB, el cual es un entorno gráfico orientado a simular el comportamiento de los sistemas dinámicos.

Este artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección II se presenta el modelo matemático de los motores y el modelo de las protecciones de sobrecorriente inversa y térmica para cada uno de los motores. Estos modelos presentados son el equivalente monofásico de los motores trifásicos. En la sección III se presenta un modelo general de simulación integrando cada uno de los subsistemas. En la sección IV se presenta la lógica de conexión y desconexión, modelo de simulación del GRAFCET. En la sección V se presentan los parámetros para cada uno de los motores y los resultados obtenidos en la simulación. Y finalmente, en la sección VI se presentan las conclusiones de este trabajo.

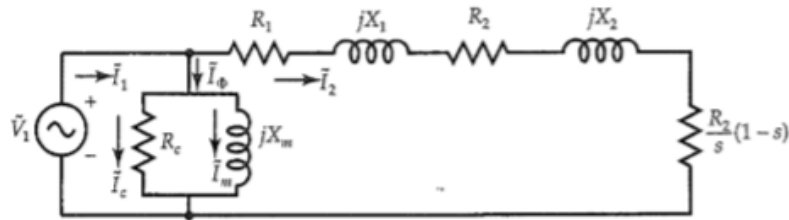
1. Modelo del sistema

En este proyecto se trabaja con motores de inducción, que son las máquinas eléctricas más utilizadas debido a su bajo precio y fácil mantenimiento. Este tipo de máquinas son muy eficientes ya que no tienen escobillas, razón por la cual elimina las pérdidas eléctricas y mecánicas que se pueden generar entre ellas por caídas de tensión o fricción. Para proteger el sistema se cuenta con protecciones eléctricas que garantizan seguridad ante la presencia de fallas.

A continuación, se muestra el modelo matemático de cada uno de los componentes eléctricos ya mencionados.

1.1. Motor de inducción

La parte constructiva del motor de inducción está compuesta esencialmente por el estator y el rotor. Cuando el estator se conecta a una red de alimentación trifásica genera un campo magnético variable, que induce una corriente en el rotor y produce una fuerza magnética que genera rotación (Hiziroglu y Guru, 2003).

Figura 1. Circuito equivalente monofásico.

En la figura 1 se muestra la representación del motor de inducción trifásico mediante un circuito equivalente por fase, donde

$\tilde{V}_1 =$ voltaje aplicado por fase

$R_1 =$ resistencia por fase del devanado del estator

$X_1 =$ reactancia de dispersión por fase del devanado del estator

$R_2 =$ resistencia por fase del devanado del rotor

$X_2 =$ inductancia de dispersión por fase del devanado del rotor

$N_1 =$ vueltas reales por fase del devanado del estator

$N_2 =$ vueltas reales por fase del devanado del rotor

$\tilde{E}_1 =$ fem inducida por fase en el devanado del estator

$N_s =$ velocidad síncrona del campo rotatorio

$N_m =$ velocidad del rotor con carga

$s =$ velocidad de deslizamiento o deslizamiento

$f =$ frecuencia de la corriente en el devanado del estator

$P =$ número de polos

La velocidad síncrona del campo rotatorio es definida por:

$$W_s = \frac{4\pi f}{P} \quad (1)$$

Por otra parte, tenemos que el deslizamiento sería igual a:

$$s = \frac{W_s - W_m}{W_s} \quad (2)$$

Para cálculos prácticos se desprecia la rama de magnetización. Aplicando la ley de tensiones Kirchhoff al circuito de la figura 1 obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$\tilde{V}_1 = R_1 * I_2 + L_1 * \frac{dI_2}{dt} + R_2 * I_2 + L_2 * \frac{dI_2}{dt} + \frac{R_2(1-s)}{s} * I_2 \quad (3)$$

$$\tilde{V}_1 = \left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right) * I_2 + (L_1 + L_2) * \frac{dI_2}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{dI_2}{dt} = \frac{1}{(L_1 + L_2)} \left[\tilde{V}_1 - \left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right) * I_2 \right] \quad (5)$$

Las dos variables de estado que se contemplan en este circuito electromecánico son la corriente (I_2) y la velocidad de giro del motor (W_m). Nótese que la ecuación (5) está en términos del deslizamiento (s); esta variable ya fue definida en la ecuación (2) donde se observa que está en términos de (W_m), variable que hasta el momento es desconocida, y por ende se procede a sacar una segunda ecuación que relacione esta salida.

Partiendo de la segunda ley de Newton en que la sumatoria de fuerzas es igual a la masa por aceleración, se puede calcular la ecuación mecánica que define el comportamiento del motor, donde en este caso la sumatoria de fuerza o torque será igual al momento de inercia (J) por la derivada de la velocidad de giro (W_m), por lo que se obtiene que:

$$T_d - D * W_m - T_L = J * \frac{dw_m}{dt} \quad (6)$$

$$\frac{dw_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_d - D * W_m - T_L) \quad (7)$$

Siendo el par desarrollado (T_d) igual a $\frac{3I_2^2 R_2}{sW_s}$ [4] se sustituye en la ecuación 7, lo que da como resultado

$$\frac{dw_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_d - D * W_m - T_L) \quad (8)$$

Donde

$D =$ coeficiente de fricción

$T_d =$ par desarrollado

$J =$ momento de inercia

1.2.1 Protección de sobrecorriente [51]

Brinda protección ante la presencia de fallas de altas corrientes. Según se define en IEEE C37.112 *Standard inverse-Time Characteristic equations for Overcurrent Relays*, la ecuación para un relé de sobrecorriente inversa está definida por la siguiente ecuación

$$t(I) = \frac{A}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^2 - 1} \quad (9)$$

Donde:

$I =$ corriente del motor

$I_p =$ corriente pico

$A =$ constante

La ecuación (10) representa el modelo dinámico de la protección, con el fin de garantizar la coordinación con los relés de sobrecorriente bajo a la presencia de corriente variable (Steinmetz et al, 2013).

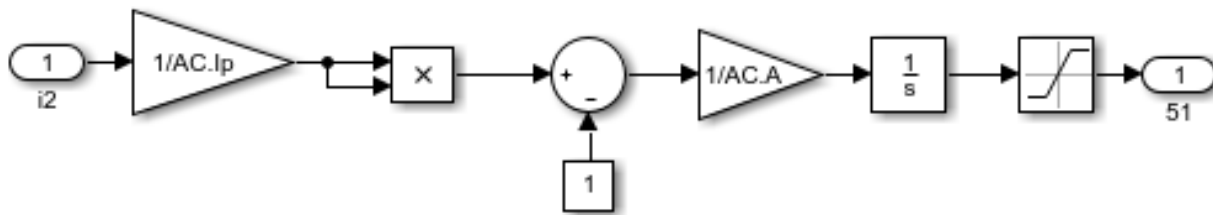
$$\int_0^{T_0} \frac{1}{t(I)} dt = 1 \quad (10)$$

Reemplazando (9) en (10)

$$\int_0^{t_0} \frac{\left(\frac{I}{I_p}\right)^2 - 1}{A} dt = 1 \quad (11)$$

se obtiene la ecuación (11). Esta expresión garantiza que cuando la integral sea igual a 1 la protección se dispare. Partiendo de esta ecuación se realiza el diagrama de bloques correspondiente al modelo matemático de la protección de sobrecorriente inversa, el cual se observa en la figura 3.

Figura 3. Diagrama de bloques de protección (51)



1.2.2. Protección térmica

Con el objetivo de proteger los motores de sobrecargas y recalentamientos, se implementa en el sistema eléctrico un relé térmico por cada motor que garantiza el buen funcionamiento de las máquinas, impidiendo que trabajen bajo la presencia de calentamiento anómalo, al tiempo en que brinda seguridad para las personas y los equipos.

La termodinámica del motor se puede describir matemáticamente por la siguiente ecuación (Venkataraman et al, 2005).

$$C * \frac{dT'(t)}{dt} = I^2(t) * R - H * T'(t) \quad (12)$$

$dT'(t)/dt =$ *variación de la temperatura*

$I(t) =$ *corriente del motor*

$C =$ *constante de calentamiento*

$H =$ *coeficiente de disipación*

$R =$ *resistencia*

Reescribiendo la ecuación (12) en términos de corriente por unidad y aumento de temperatura, se tiene que:

$$T(t) = \frac{T'(t)}{T_{max}} \quad (13)$$

$$I_{p.u}(t) = \frac{I(t)}{I_{nom}} \quad (14)$$

Donde

$I_{nom} =$ *corriente nominal*

$T_{max} =$ *máximo calentamiento permisible de la máquina*

Sustituyendo las ecuaciones (13) y (14) en la ecuación (12) se obtiene

$$\frac{I_{nom}^2 * R}{H * T_{max}} * I_{p.u}^2(t) = \frac{C}{H} * \frac{dT(t)}{dt} + T(t) \quad (15)$$

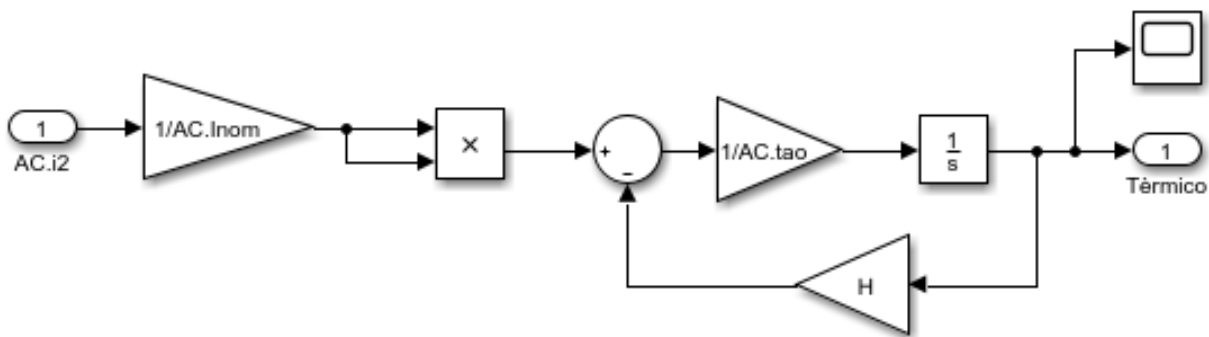
Cuando la máquina entra en estado permanente de operación con corriente nominal y temperatura máxima, se denomina que se encuentra en estado de equilibrio térmico, por lo que se puede decir que $\frac{I_{nom}^2 * R}{H * T_{max}} = 1$ teniendo como resultado la ecuación N.

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} [I_{p.u}^2(t) - T(t)] \quad (16)$$

Siendo $\tau = \frac{C}{H}$

obtenida la ecuación (16) que representa el comportamiento de la protección térmica se realiza el diagrama de bloques correspondiente (ver figura 4)

Figura 4. Diagrama de bloques protección térmica.



2. Modelo de simulación

En esta sección se muestra el modelo de simulación del sistema eléctrico de una caldera utilizando el entorno gráfico *Simulink* de MATLAB, para lo cual se requiere que el lector esté familiarizado con dicho software.

Partiendo del modelo matemático de los motores y protecciones eléctricas que interactúan en el sistema, se realiza el modelo de simulación mediante los diagramas de bloques que fueron expuestos en la sección II (ver figuras 2-3-4). A cada una de estas representaciones se les denomina subsistema, y están interconectados de acuerdo con su funcionalidad.

En el modelo general que incorpora cada uno de los subsistemas de las máquinas empleadas para el funcionamiento de la caldera, se puede observar en la figura 5 que cada uno de esos bloques está conformado por pequeños subsistemas que comprenden el modelo del motor y sus respectivas protecciones (ver figura 6). Estas se activan cuando la salida del integrador, visto en el diagrama de bloques, es igual a uno. Cuando esta condición se cumple se muestra una señal digital llamada AC_52 en la salida del bloque del subsistema de protecciones (ver figura 7). Allí se encuentran conectadas las protecciones a una compuerta lógica (OR), garantizando que si alguna de las mismas llegara a actuar marcará 1 en su salida, señal que llega como entrada al switch que está conectado a la entrada de tensión del subsistema de cada motor (ver figura 5). Si la entrada del switch registra un 1, la entrada de tensión del motor será 0, y si la señal recibida por el AC_52 es 0, la señal de entrada al motor es una fuente de tensión sinusoidal de 220V.

De esta forma es como se coordina que las protecciones actúen directamente sobre el motor, previniendo que este trabaje bajo condiciones de falla

Figura 5. Sistema general comprendido por los subsistemas donde se encuentra el modelo de las máquinas y la lógica de control.

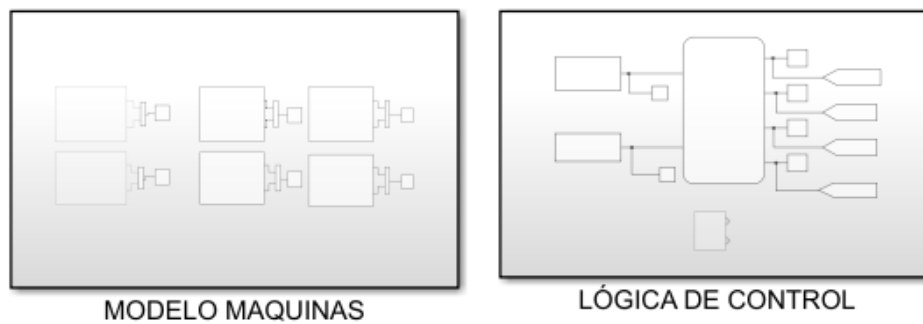


Figura 6. Subsistema del motor construido por su modelo matemático y respectivas protecciones.

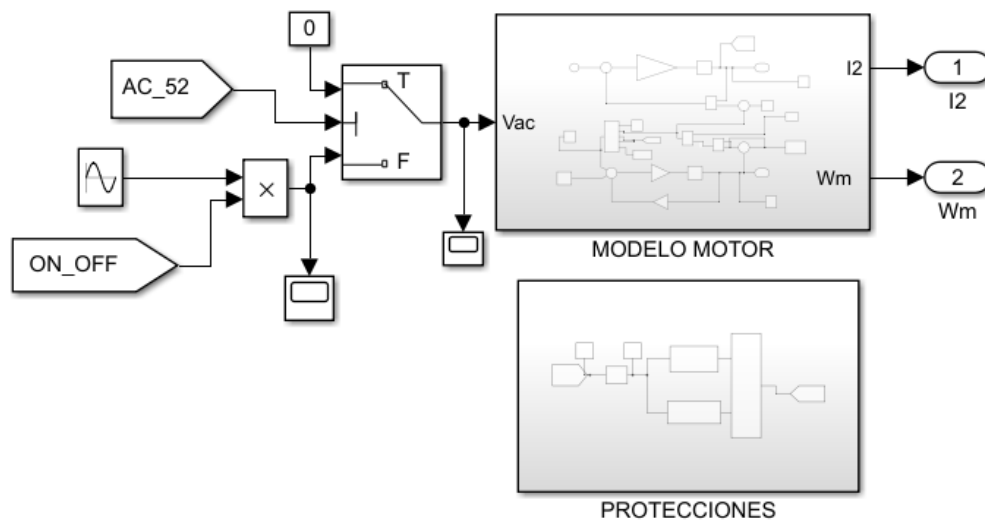
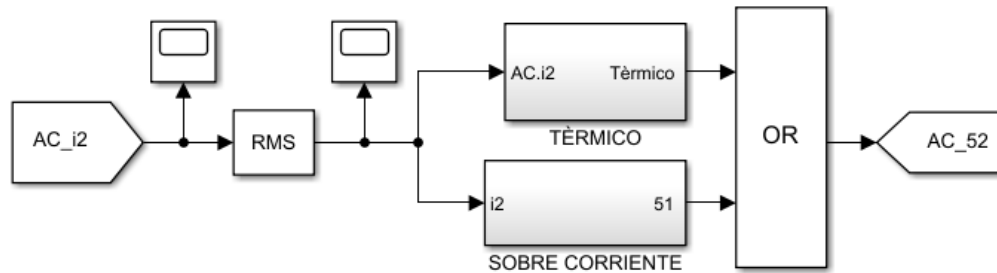


Figura 7. Subsistema de protecciones.

3. Lógica de control con Grafcet

Para implementar la lógica de control en un proceso, es necesario llevar a cabo una serie de operaciones lógicas que permiten automatizar un sistema secuencial. Para tener un control del proceso estudiado, en el presente artículo se ha implementado el Grafcet, que significa diagrama de control con etapas y transiciones, el cual es una herramienta que representa gráficamente el comportamiento secuencial de un sistema definido por entradas, salidas y acciones a realizar.

Para el desarrollo de este Grafcet se utiliza el entorno Stateflow dentro de Simulink, que permite simular la lógica de decisión basado en máquinas de estado y diagramas de flujo. En esta librería se trabaja con un bloque llamado *chart* (ver figura 8), que contiene una serie de elementos, entre ellos el *state* (ver figura 9). Este bloque se define con un nombre propio y una acción a realizar. Para cambiar de estado se realiza una transición que se representa mediante una línea que se une con el siguiente estado. En esta transición se define una condición, de tal manera que, si esta se cumple, el siguiente estado estará activo. Las condiciones están definidas por las entradas

que se establecen inicialmente en el *chart*. De este modo, se obtiene un lenguaje gráfico que modela la lógica de decisión y permite desarrollar un control de supervisión (Campoy, s.f.).

Figura 8. *Chart con sus respectivas entrada y salida.*

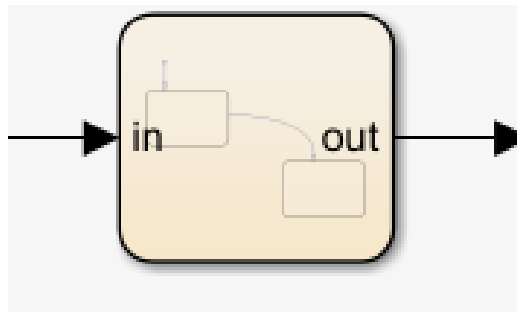
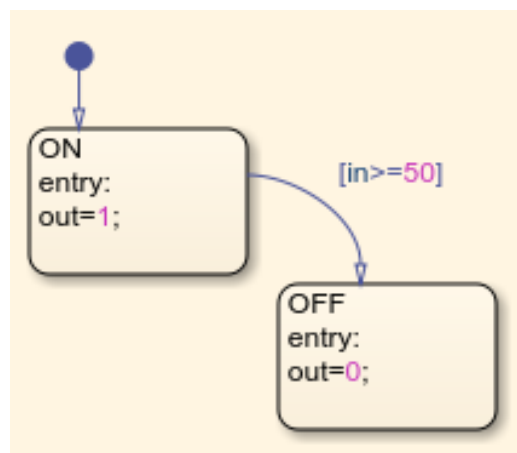
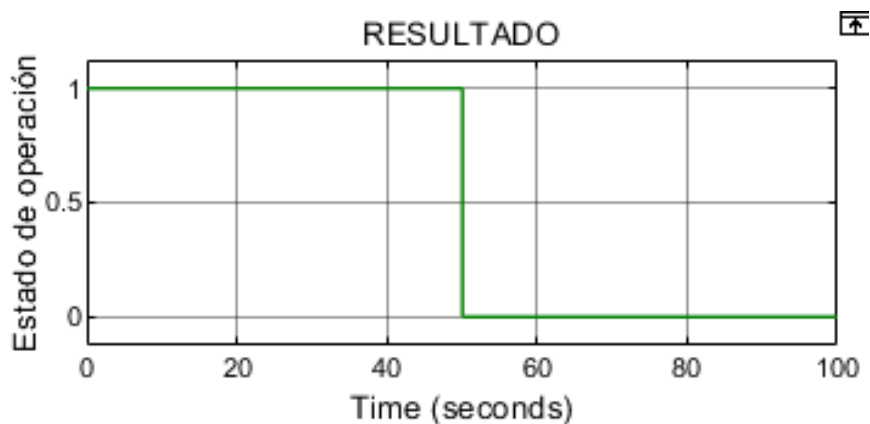


Figura 9. *Bloques de estado con una transición.*



Nótese que en el estado llamado ON se define la acción de tener un uno a la salida. Para que el segundo estado llamado OFF esté activo, se requiere que la condición ($in \geq 50$) se cumpla, y cuando esto suceda la salida será igual a cero. Como respuesta se obtiene la siguiente gráfica (ver figura 10).

Figura 10. Resultado obtenido del Grafset.



4. Caso de estudio y resultados

4.1. Parámetros

En este estudio se simula el sistema eléctrico de una caldera que funciona con cuatro motores, descritos a continuación:

- Motor 1: Bomba de agua (B), encargada de inyectar agua a la caldera.
- Motor 2: Ventilador de tiro forzado (VT), encargado de succionar los gases calientes emitidos por la caldera.

- Motor 3: Ventilador primario (VP), encargado de inyectar aire del ambiente en la parte inferior de la caldera para hacer combustión y avivar la llama.
- Motor 4: Alimentador de carbón (AC), encargado de inyectar carbón a la caldera mediante un tornillo sin fin.

Los parámetros correspondientes a cada una de las máquinas fueron tomados de Carreño (2009) y Escobar et al (2008).

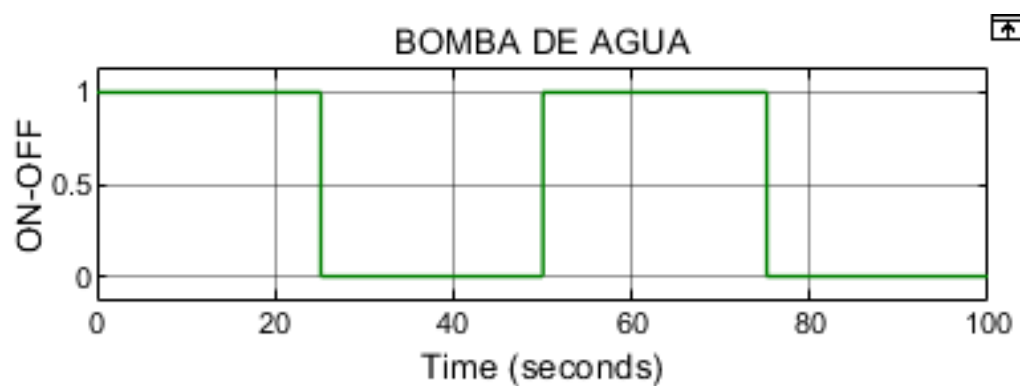
Para esta selección se tomaron como criterios los datos de placa de cada uno de los motores. En la tabla 1 se resumen los datos dados por el fabricante y en la tabla 2 los parámetros eléctricos de los motores.

Tabla 1. *Datos de placa del fabricante.*

	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4
Potencia(hp)	3	7.5	3	3
In a220V	8,2	9,1	6,7	6,1
Velocidad(rpm)	3490	1740	3710	1800
Eficiencia (%)	76	79	77	80
Frecuencia (Hz)	60	60	60	60
f.p nominal	0,88	0,86	0,89	0,90

Tabla 2. *Parámetros de los motores.*

Parámetro	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4
Resistencia del estator	1.3741	0,9191	1.4857	3,114
Resistencia del rotor	0.9789	0,6358	0.4215	2,234
Impedancia del estator	1.441	1,2584	0.5564	3,27
Impedancia del rotor	2.7895	1,2584	6.7914	3,27

Figura 11. *Estado de operación de la bomba de agua.***Figura 12.** *Estado de operación del ventilador de tiro.*

4.2. Estado de operación

El perfil de operación en este estudio está asociado con el trabajo común de una caldera destinada a la generación de vapor para la industria alimenticia.

El estado de operación de las máquinas se caracteriza por un ON-OFF, lo que quiere decir que si la máquina está encendida (ON) se visualiza uno (1) en su salida y, por el contrario, si la máquina se encuentra apagada (OFF) se observa cero (0) como salida. De esta manera se puede observar en la figura 11 que el proceso comienza con la bomba de agua encendida, debido a que para empezar a generar vapor se requiere que la caldera contenga un nivel de agua establecido. Luego de que la caldera está llena, se apaga la bomba y se enciende el ventilador de tiro (ver figura 12), encargado de extraer los gases calientes que emite la caldera y expulsarlos por la chimenea.

Nótese en la figura 13 que simultáneamente se prende el ventilador primario que aviva la llama del hogar de la caldera, y pasados 20 segundos se prende el alimentador de carbón (ver figura 14).

Los resultados que se observan en las figuras anteriormente mencionadas se obtienen mediante la implementación de lógica de control por medio del Grafset. En la figura 15 se evidencia el proceso secuencial que sigue el respectivo diagrama de flujos.

Inicialmente se definen las entradas y salidas del sistema, que a su vez son las condiciones para que los estados estén activos o inactivos. En el presente caso de estudio se tienen como

entradas el nivel de agua y la presión que tiene la caldera, y como salida se obtiene el estado de operación de los motores (ver figura 16). Esta salida va conectada directamente a la fuente de alimentación de cada uno de los motores, para así tener un control sobre el encendido y apagado de cada máquina.

Figura 13. Estado de operación del ventilador primario.

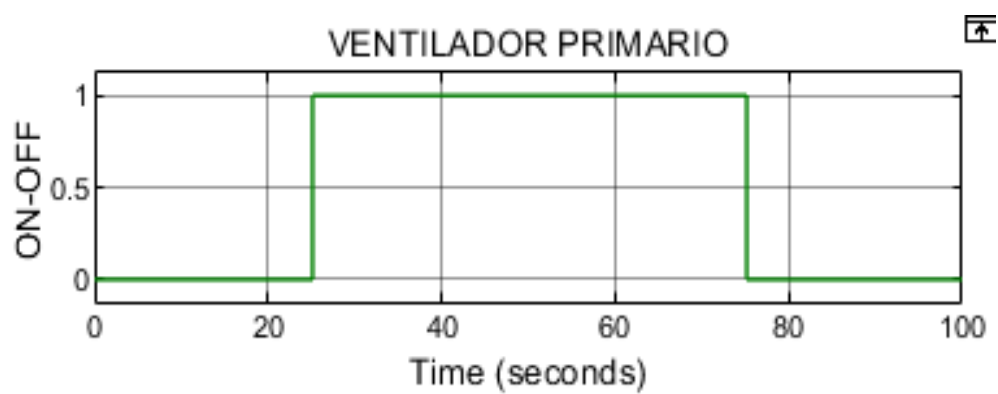


Figura 14. Estado de operación del alimentador de carbón.

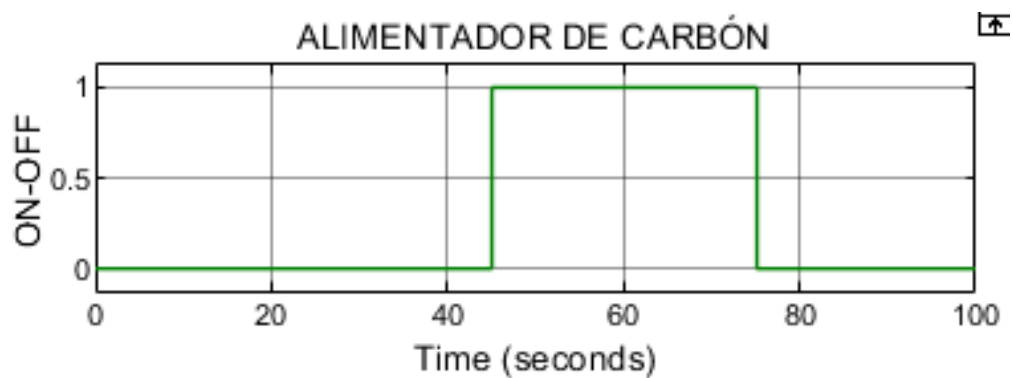


Figura 15. Lógica de control a partir de bloques de estado.

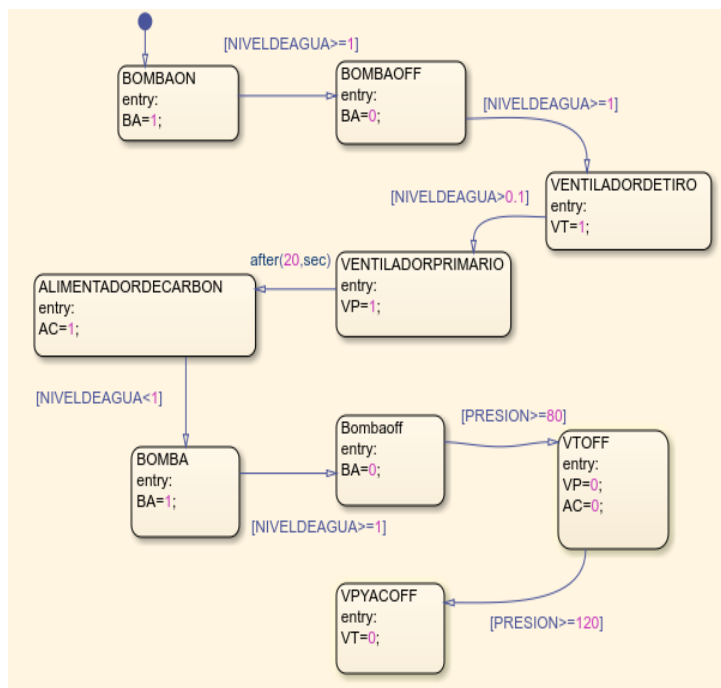


Figura 16. Chart con sus respectivas entradas y salidas.

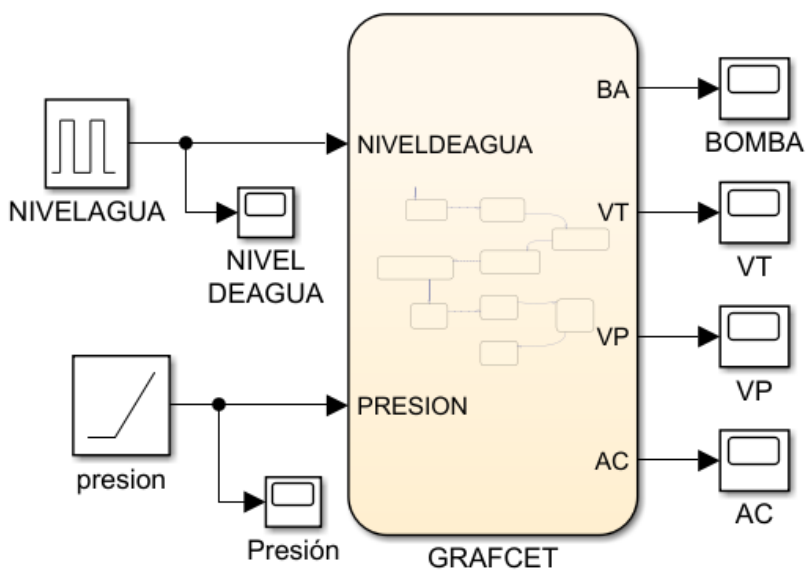
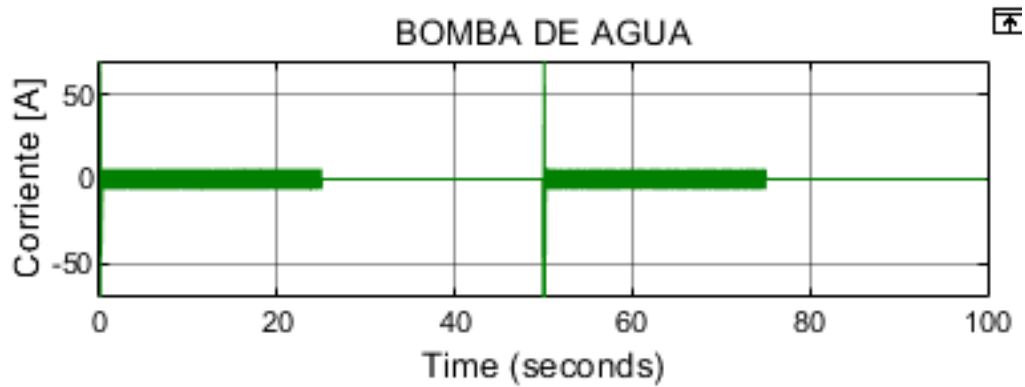
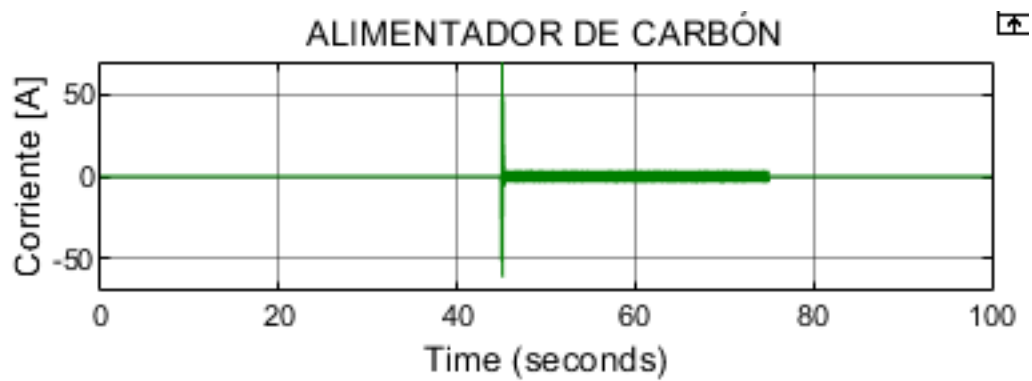


Figura 17. Corrientes de los motores a) Bomba de agua b) Alimentador de carbón c) Ventilador de tiro de tiro.

(a)

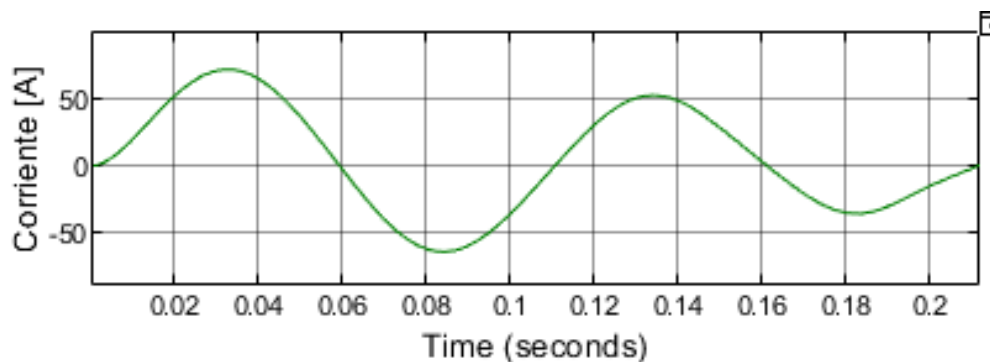


(b)



(c)



Figura 18. *Corriente en el arranque.*

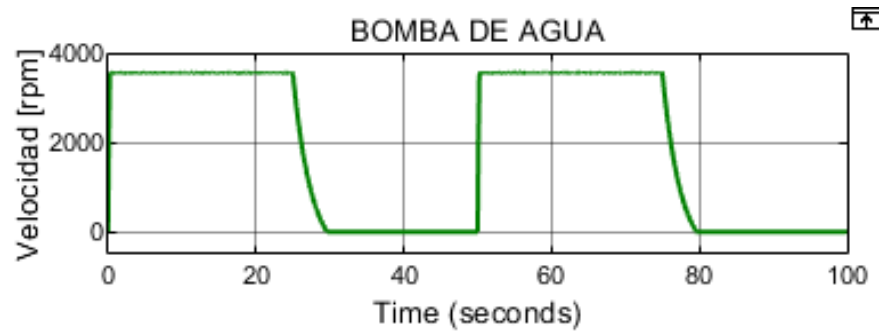
4.3. Resultados

En este apartado se muestra la respuesta del sistema ante dos condiciones de operación: estado estable y bajo presencia de falla. En la figura 17 se observa la corriente de los motores; nótese que en el arranque la corriente llega a su máximo valor, ya que es en este momento en el que su valor es entre 5 y 10 veces la corriente nominal (ver figura 18). En la figura 19 se visualiza la velocidad de cada máquina, y se puede observar que los motores b y c se apagan en tiempos diferentes de manera automática, debido a que están controlados por un sensor que establece unos límites de presión para su funcionamiento. El alimentador de carbón se apaga cuando se presenta una presión superior a los 80 psi y el ventilador de tiro en 120 psi.

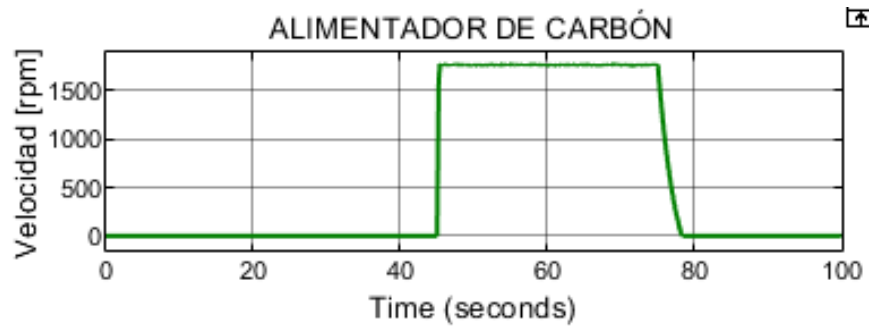
Para el análisis bajo falla, se simulan dos condiciones. En la primera condición uno de los motores presenta una sobrecarga y en la segunda condición se presenta una sobrecorriente. Así, se activan las protecciones y se apagan las máquinas afectadas. Estas protecciones soportan el pico de corriente presentado en el arranque durante un tiempo determinado.

Figura 19. Velocidad de los motores a) Bomba de agua b) Alimentador de carbón c) Ventilador de tiro de tiro.

(a)



(b)



(c)

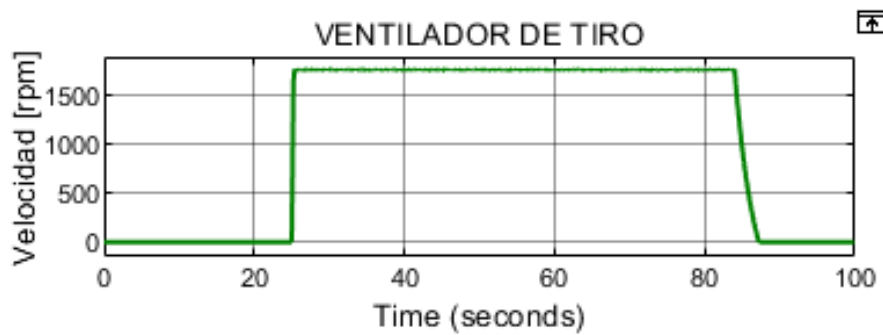
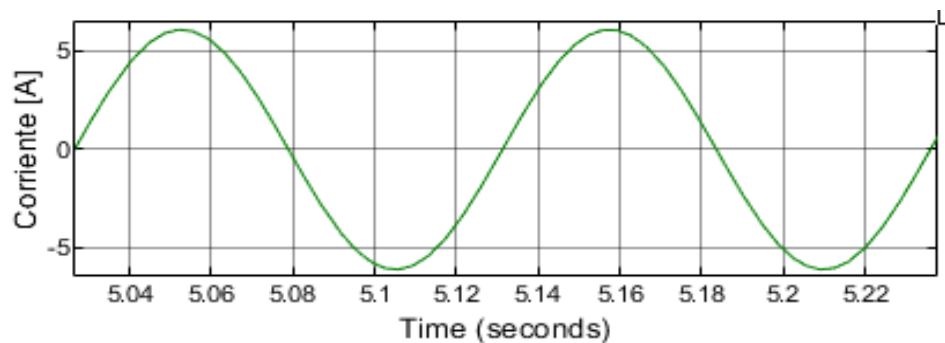
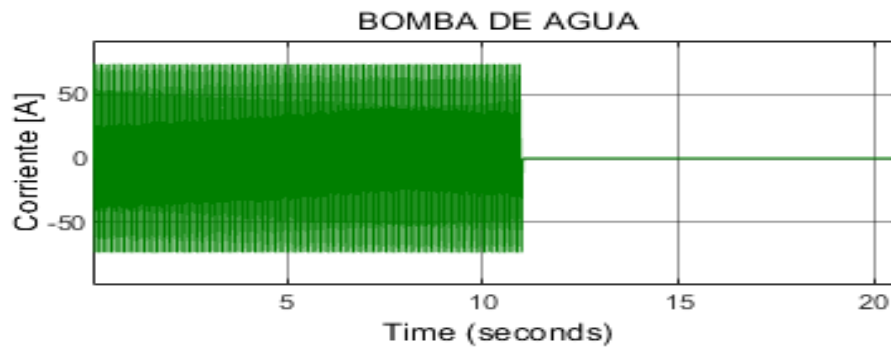
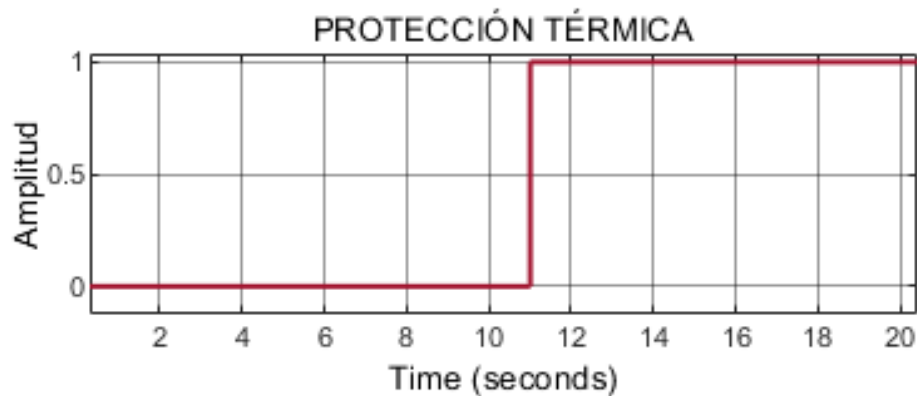


Figura 20. *Corriente en estado estable.*

En la condición de falla 1, se simula una sobrecarga de 40%, para lo cual se incrementa el par de carga que genera un incremento en la corriente (ver figura 21) y calienta los devanados del motor. La protección teóricamente debería actuar contados 10 segundos desde que se presenta el incremento en la corriente. En la simulación se observa que la protección actúa en el segundo 10.78 (ver figura 22), obteniendo un porcentaje de error del 7.8%.

En la figura 21 se puede apreciar que la bomba se apaga unos segundos después de entrar en operación. Al apagarse esta máquina de forma repentina, la caldera no alcanza el nivel de agua adecuado para comenzar a trabajar, y esto afecta directamente a todo el sistema ya que ninguno de los motores restantes entra en operación.

Figura 21. Corriente de la bomba de agua bajo la presencia de falla térmica.**Figura 22.** Estado de operación protección térmica.

En la condición de falla 2, se simula una sobrecorriente con una duración mayor al tiempo de arranque, y para esto también se incrementa el par de carga en otra de las máquinas. Según la teoría, la protección opera cuando la corriente ha superado el 218% de su corriente nominal con una duración de 10 segundos. En simulación se observa que el motor 4 está operando en estado estable los primeros 20 segundos, cuando de manera repentina hay un incremento en la corriente

del 250% de su corriente nominal (ver figura 23), condición que dispara la protección de sobrecorriente 11 segundos después de presentarse la falla (ver figura 24).

Figura 23. Corriente del alimentador de carbón bajo la presencia de falla por sobrecorriente.

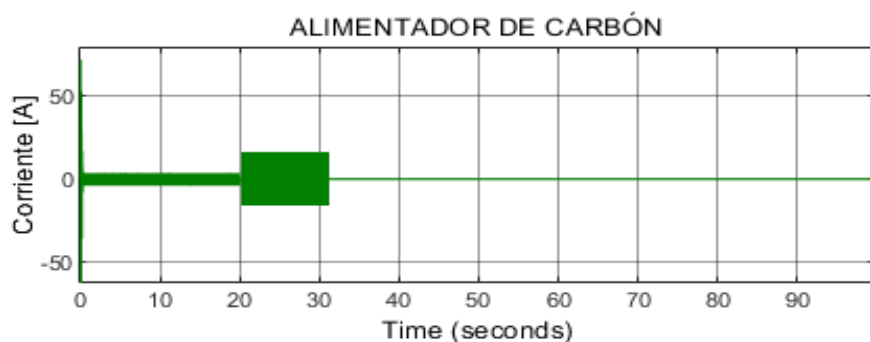
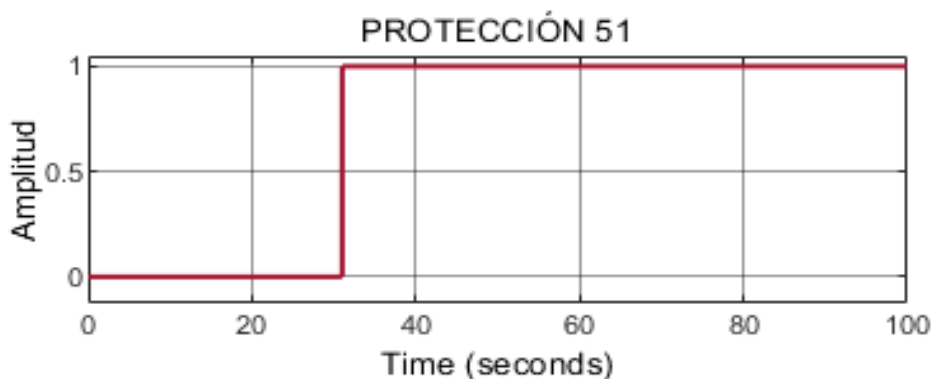


Figura 24. Estado de operación de sobrecorriente (51)



En la tabla 3 se muestran algunos resultados de velocidad obtenidos mediante la simulación y su porcentaje de error en comparación con los datos de placa.

Tabla 3. Resultados de velocidad obtenidos mediante la simulación.

Máquina	Velocidad medida [rpm]	Velocidad de placa [rpm]	% Error
Bomba de agua	3562	3490	2.06
Alimentador de carbón	1773	1800	1.5
Ventilador de tiro	1761	1740	1.20

5. Conclusiones

Este modelo de simulación permite el estudio del sistema eléctrico de una caldera ante diferentes perfiles de operación, al obtener evidencia del comportamiento de los componentes eléctricos con los motores y sus respectivas protecciones, contando con la información de cada uno de los elementos que actúan en él.

Para los modelos de las protecciones estudiadas en este proyecto se obtuvo una respuesta favorable, ya que estas pueden proporcionar seguridad al sistema actuando con una efectividad de disparo ante las fallas simuladas.

En cuanto a la implementación de la lógica de control en la cual se utilizó la herramienta de *stateflow*, se comprueban unos resultados satisfactorios ya que se logra tener un control sobre cada una de las máquinas definiendo ciertas condiciones de operación. Esta herramienta trabajada facilita y simplifica el método o mecanismo que usualmente se utiliza para automatizar un sistema, debido a que los bloques son muy sencillos de manejar e interpretar, y tienen una amplia variedad de funciones.

La toma de mediciones eléctricas nos permite tener una mejor comparación del sistema real y el simulado. Inicialmente, el alcance de este proyecto proponía una comparación con datos de trabajo reales, pero debido a la pandemia fue imposible realizar dichas mediciones.

Referencias bibliográficas

- Carreño, S. (2009). *Estudio de los datos del catálogo en motores de inducción trifásicos*. (Tesis de pregrado). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Escobar, A., Ocampo, F., y Holguín, M. (2008). Estimación de parámetros del motor de inducción a partir de los datos de placa del fabricante. *Revista Scientia et Technica*, 39, 78-82.
- Franz, E. (2012). Comparativa de caldera pirotubular y caldera acuotubular. https://www.bosch-industrial.com/files/fb013_sp.pdf
- Hiziroglu, H. y Guru, B. (2003). Máquinas eléctricas y transformadores. Oxford University Press.
- Maquiclick. (s.f.). Calderas industriales ¿Cómo funcionan? <https://www.fabricantes-maquinaria-industrial.es/calderas-industriales-funcionan/>
- Pedrero, A. (s.f.). *Modelado y simulación de dos placas fotovoltaicas controladas por Matlab* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, Colombia.
- Sepúlveda, D. y Ramírez, J. (2011). Condiciones de seguridad en calderas de vapor de empresas afiliadas a una administradora de riesgos profesionales en Antioquia, 2009. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 29 (2), 145-152.

Steinmetz, J. et al. (abril-mayo de 2013). Stator Thermal Time Constant. En P. Staecker (Presidencia), *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, Annual Meeting*. Conferencia llevada a cabo en el congreso del Institute of Electrical and Electronics Engineers, Stone Mountain, Georgia, Estados Unidos.

Venkataraman, B., Premerlani, W., Shulman, E., Godsey, B., Thakur, M., y Midence, R. (septiembre de 2005). Fundamentals of a Motor Thermal Model and its Applications in Motor Protection. En C. Anderson (Presidencia), *Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*. Conferencia llevada a cabo en el congreso del Institute of Electrical and Electronics Engineers, Jacksonville, Florida, Estados Unidos.