

Centro de Enseñanza Técnica y Superior

Con reconocimiento de validez oficial de estudios del Gobierno del Estado de Baja California según Acuerdo de fecha 10 de octubre de 1983



Control automático de tiempo de precalentamiento en ajuste de interruptores termomagnéticos.

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería e Innovación

Presenta:

Miguel Angel Romo Garcia

Centro de Enseñanza Técnica y Superior (CETYS Universidad)

Tijuana, Baja California, México
2020

Capítulo 1. Resumen

Los interruptores termomagnéticos son dispositivos de protección eléctrica contra sobrecarga y corto circuito utilizados en diferentes tipos de industrias con diferentes tipos de aplicaciones. La planta de Schneider Electric en Tijuana manufactura en su mayoría interruptores termomagnéticos en miniatura con valores de corriente menores a 100 A. La tesis presenta la implementación de un sistema de control difuso para el ajuste automático del tiempo de precalentamiento en interruptores termomagnéticos necesario para cumplir con estándares y límites definidos por compañías certificadoras a nivel mundial. Para asegurar que los interruptores cumplen con estas normas es necesario hacer una prueba por muestreo con corriente al 135% del valor nominal del interruptor donde debe interrumpir la corriente en una ventana de tiempo definida por el equipo de diseño de la empresa. La reducción de rechazos por desconexión de los interruptores fuera de las ventanas de tiempo definidas fue uno de los objetivos principales de este trabajo. El control difuso fue implementado con éxito en una primera prueba implementando un sistema de recolección de datos y monitoreo en tiempo real alineado con los objetivos de Industria 4.0 de la planta de Schneider Electric en Tijuana. La reducción de rechazos obtenida en la primera prueba rebasó las expectativas y objetivos planteados en un inicio por lo que la implementación completa en el área de interruptores termomagnéticos con protección electrónica fue aprobada.

1.2 Abstract.

The circuit breaker is an electric protection device against overloads and short circuits used in different types of industries and applications. The Schneider Electric plant in Tijuana manufactures mostly miniature circuit breakers with handle ratings below 100 A. These breakers should comply with electric standards defined by certification companies worldwide. In order to get breakers within the specifications one test is done by sampling applying 135% of the rated current of the breaker where it should trip within a time limit window defined by the design department of the company. The adjustment of the bimetal heat-up time using a fuzzy control system was selected as the main tool to reduce the rejections of breakers that trip out of the defined time limit windows. After a first test of the control system the reduction of rejections obtained was above the defined objectives. We were able to confirm that the fuzzy control is an effective tool to reduce the rejections of

breakers tripping out of the time limit windows and was approved by the plant to be implemented in all the calibration equipment present in the electronic breaker lines.

1.2 *Palabras clave.*

Interruptor, termomagnético, control, difuso.

1.3 *Agradecimientos.*

El presente documento e investigación no hubieran sido posibles sin el apoyo recibido por el CONACYT y Schneider Electric con la beca obtenida en la convocatoria para posgrados con la industria 2018.

Capítulo 2. Antecedentes

2.1 Schneider Electric.

La compañía Schneider Electric, de origen francés, fue fundada en el siglo XIX en la primera revolución industrial. Con más de 180 años de historia y con presencia en más de 100 países, Schneider Electric es uno de los líderes en la industria eléctrica con marcas de prestigio como lo son Square D y APC, entre otras. La compañía reporta ingresos anuales de más de 25 billones de euros y cuenta con más de 144 mil empleados a nivel mundial (Schneider Electric, 2020).

La presencia de Schneider Electric en México comenzó en 1991 con la adquisición de Square D Company tomando control de sus plantas de manufactura ubicadas en territorio nacional. Sin embargo, la historia de Square D en México comienza en 1945 formando parte de importantes proyectos nacionales como la construcción de la ciudad universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México, la construcción del metro de la ciudad de México, la construcción y remodelación de estadios para la copa mundial de México 1970 y la central termonuclear de la CFE de Laguna Verde entre otros (Schneider Electric, 2015). Schneider Electric en 2020 cuenta con nueve plantas de manufactura en cinco estados de la república mexicana.

La planta de Schneider Electric en Tijuana manufactura en su mayoría interruptores termomagnéticos en miniatura (*MCB Miniature Circuit Breakers*) en diferentes familias. El volumen de ventas año con año aumenta debido a la gran demanda causada por el crecimiento inmobiliario y la actualización en regulaciones eléctricas en países como Estados Unidos, donde la NEC (*National Electric Code*) requiere la instalación de tipos de interruptores termomagnéticos y electrónicos específicos dependiendo del tipo de aplicación. Según un documento de la compañía inmobiliaria PwC para el 2050 la población urbana incrementará en un 75% hasta 6,300 millones de personas, casi doblando la población urbana registrada en 2010 (PwC, 2020). Estos datos indican un incremento en la demanda constante de interruptores termomagnéticos al menos hasta 2050.

2.2 Interruptores termomagnéticos.

La utilización de dispositivos de desconexión en redes eléctricas es necesaria para proteger la red y los dispositivos conectados a ella. Estos dispositivos regularmente tienen cambios de impedancia de cero, en posición cerrada, a infinita en posición abierta. Existen distintos métodos y diseños disponibles en el mercado y la industria para protección de redes y equipos (Niayesh, 2016). Un interruptor termomagnético es un ejemplo de estos dispositivos.

El interruptor termomagnético es un dispositivo diseñado para abrir y cerrar un circuito de manera no automática y para abrir el circuito automáticamente en una sobrecarga predeterminada sin hacerse daño cuando es correctamente utilizado conforme a su amperaje (National Electrical Code, 2005). La potencia disponible ofrecida por un transformador a un sistema de distribución excede la potencia soportada por cada circuito del sistema, el transformador proporciona la corriente demandada sin saber si el circuito es capaz de soportarla, en este punto el interruptor termomagnético actúa como un centinela protegiendo los circuitos de su red.

Los interruptores termomagnéticos en miniatura de Schneider Electric manejan corrientes menores a 100 A y tienen el propósito de proteger el cableado y equipos en un circuito. Es común en los Estados Unidos tener más de 300 metros de cableado a proteger a través de las paredes, techos y pisos para evitar incendios (Square D Company, 1995). La protección del cableado por un interruptor termomagnético está dividida en dos tipos: Sobrecarga y corto circuito. Una sobrecarga es definida como la operación de un equipo por encima de la carga máxima establecida o un conductor con exceso de corriente de la máxima establecida para su funcionamiento. Por lo regular es establecida entre una y diez veces el valor predeterminado en la manija del interruptor termomagnético (Dolezal, 1990). Cuando esta condición es mantenida por suficiente tiempo puede causar daños a los equipos y calentamiento en cableado (Square D Company, 1995). Un corto circuito es definido como el máximo flujo de corriente no intencionada, fase a fase, fase a tierra o fase a neutral. Es el flujo de corriente resultante por un daño en alguno de los diferentes aislantes protectores de los circuitos y las redes (Square D Company, 1995). Por lo regular es establecido como una corriente mayor a diez veces el valor de la manija de un interruptor termomagnético (Dolezal, 1990).

Los interruptores termomagnéticos en miniatura de Schneider Electric cuentan con dos características principales para ofrecer la protección de sobrecarga y corto circuito: La desconexión térmica y desconexión magnética. El botado magnético o desconexión magnética es ocasionado por un corto circuito; el repentino flujo de corriente excesiva a través del interruptor genera un campo magnético, provocando la atracción de un mecanismo para la desconexión del interruptor. El botado térmico o desconexión térmica, es ocasionado por la flexión de un bimetalo en el mecanismo resultante del calor generado por el flujo de corriente a través de él. La corriente fluyendo a través del interruptor termomagnético produce calor en sus componentes, el calor es causado por los elementos resistivos de la trayectoria de la corriente. La generación de calor es directamente proporcional a la resistividad, los componentes con menor resistividad son más conductivos.

La conductividad es definida como el recíproco de la resistividad en volumen, la conductancia por unidad cúbica de material (Gooch, 2011). En el sistema internacional de medidas sus unidades son siemens por metro (S/m) sin embargo en la industria son utilizados valores referenciados a la conductividad de 100% del cobre (5.8001×10^7 S/m) a una temperatura de 20 grados centígrados (NDT, 2020). Todos los componentes participantes en la trayectoria de la corriente de un interruptor termomagnético tienen porcentajes de conductividad menores a 100% (Dolezal, 1990).

La resistencia eléctrica de un componente está relacionada con la resistividad del material y sus dimensiones mediante la ecuación 1 (Palmer, 1994).

$$R = \frac{\rho l}{A} \dots (1)$$

Donde ρ es el valor de la resistividad, l es la longitud del componente y A es el área transversal del componente por donde fluye la corriente.

La resistencia del circuito de trayectoria de corriente en un interruptor termomagnético está compuesta por dos resistencias de acuerdo con Shea (1993), la resistencia de los contactos, diferente siempre cuando el interruptor pasa a la posición de encendido y la resistencia a granel, constante en el interruptor. La ecuación 2 representa la resistencia de un interruptor.

$$R_{tt} = R_c + R_b \dots (2)$$

Donde R_{tt} es la resistencia de terminal a terminal, R_c es la resistencia de los contactos y R_b es la resistencia a granel.

La resistencia a granel depende en gran medida de las dimensiones y propiedades de los materiales participantes en el flujo de corriente del interruptor.

2.2.1 Componentes en la trayectoria del flujo de corriente.

Los principales componentes de la trayectoria de la corriente en un interruptor termomagnético son: quijada, contactos, blade, cable de cobre, yoke, bimetálico y terminal. Para efectos de este trabajo, los dos componentes con más intervención en la desconexión térmica son definidos a continuación.

El bimetálico es el componente con mayor resistividad y comprende de la unión de dos o tres metales con diferente coeficiente de expansión térmica, el aumento de temperatura flexiona el bimetálico al estar uno de los metales en tensión y el otro en compresión como muestra la figura 1. La primera aplicación de este fenómeno para provecho del ser humano está registrada en 1735 cuando John Harrison lo utilizó para diseñar un cronómetro (Stephenson, Moulin y Welland, 1999). La protección de circuitos es una de las aplicaciones comunes, formando parte de interruptores termomagnéticos como el elemento activo causante de la desconexión térmica liberando el mecanismo retenedor de los contactos del interruptor en su posición de encendido. El tiempo de desconexión de un interruptor termomagnético es inversamente proporcional a la cantidad de corriente causante de la flexión del bimetálico. El bimetálico utilizado para interruptores de 15 y 20 A de las áreas de AFI/CAFI/DF de la planta de Schneider Electric en Tijuana es del tipo B300R según la designación de material EMS o TM15 según ASTM con una resistencia de 0.00338 ohms / ft. (Schneider Electric,2020). El bimetálico es soldado con la terminal formando parte del circuito de corriente.

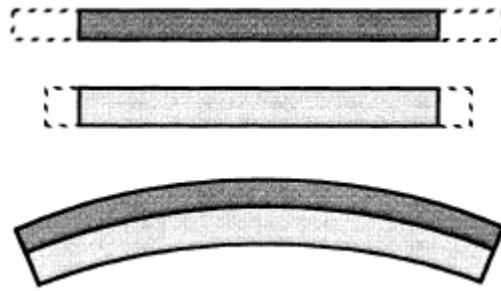


Figura 1. Tira de bimetálica lineal. (Robert J. Stephenson, Armelle M. Moulin, and Mark E. Welland, 1999).

La terminal es otro elemento participante activamente en la desconexión térmica de los interruptores termomagnéticos. Su función principal es actuar como la conexión entre el bimetálico y la carga a donde fluye la corriente estando soldada directamente al bimetálico. El tipo de material de la terminal difiere dependiendo del amperaje donde será utilizada, en caso de interruptores de bajo amperaje como 15 y 20 A, la terminal tiene la función extra de conducir calor al bimetálico como apoyo para su flexión. La conductividad de la terminal va del 5% al 8% para interruptores de 15 A hasta 80% y 90% para interruptores de altos amperajes (Dolezal, 1990).

La terminal utilizada en las áreas de AFI/CAFI/DF de la planta de Schneider Electric en Tijuana tiene una especificación de conductividad del 7% con un tipo de aleación ASTM B96 (Schneider Electric, 2020).

La variación en propiedades de los materiales y dimensiones de la terminal y bimetálico de los interruptores crean la necesidad de ajustar el interruptor como una compensación.

El tornillo de ajuste es el componente sujetador del subensamble del bimetálico y la terminal en la base del interruptor. Mediante su movimiento en contra o a favor de las manecillas del reloj permite ajustar la distancia de separación entre el bimetálico y la terminal; denominándola calibración del interruptor (Dolezal 1990).

2.2.2 Ajuste de interruptores termomagnéticos.

Los interruptores magnéticos de Schneider Electric están diseñados para cumplir con estándares marcados por la compañía certificadora *Underwriters Laboratories* (UL) en su documento UL 489.

La compañía UL ha definido niveles de corriente y tiempo donde debe de botar o desconectarse un interruptor. En la planta de Tijuana de Schneider Electric, los inspectores de calidad prueban los interruptores a 135% y 200% del valor de la manija con corriente respecto a los estándares establecidos por UL (Square D Company, 1995).

Las cuatro variables independientes identificadas en el tiempo de desconexión de los interruptores en la planta de Schneider Electric en Tijuana son:

1. Tiempo de precalentamiento.
2. Temperatura ambiente.
3. Propiedades de los materiales.
4. Dimensiones de los componentes.

La temperatura ambiente fue identificada como una de las variables dependientes por un estudio de tiempos de desconexión a diferentes temperaturas realizado en 2018 en las áreas de AFI/CAFI/DF de la planta de Schneider Electric en Tijuana, Baja California. (Schneider Electric, 2018).

El ajuste de los interruptores es necesario para cumplir con los requerimientos de UL y para compensar las tolerancias en medidas físicas y en estructura de materiales generadas con cada interruptor. La planta de Schneider Electric en Tijuana cuenta con equipos de ajuste automático por medio de precalentamiento del bimetálico y el movimiento del tornillo de ajuste. La variable controlada para el ajuste de los interruptores es el tiempo de precalentamiento del bimetálico en segundos.

El ajuste de los interruptores comienza con un ajuste previo, pre-ajuste, donde la distancia de la abertura entre el bimetálico y la terminal es modificada entre un rango preestablecido mediante el movimiento del tornillo de ajuste. Este proceso ayuda a mantener estable el ajuste y a hacer más rápido el proceso en el equipo automático.

El proceso de ajuste automático cuenta con una muestra de un interruptor por cada 25 para hacer una prueba de verificación con corriente al 135% del valor de la manija. UL tiene un tiempo definido de desconexión menor a una hora para esta prueba, sin embargo, por diseño y control interno los límites son estrangulados. Los límites para los interruptores termomagnéticos de 15 y 20 A de las áreas de AFI/CAFI/DF de la planta de Schneider Electric en Tijuana son mostrados en la tabla 1.

Tabla 1. Tiempos de desconexión en segundos de interruptores AFI/CAFI/DF Fuente:(Schneider Electric, 2020)

Referencia	Límite inferior al 135% (segundos)	Límite superior al 135% (segundos)
HOM115	105	600
HOM120	105	1200
QO115	105	600
QO120	120	1200

La desconexión de un interruptor fuera de los límites establecidos genera un rechazo de lote y pallet como control interno. La disposición varía dependiendo del análisis realizado por los ingenieros sobre cada rechazo.

La herramienta conocida como análisis de modo de falla y efecto es utilizada para evaluar cada rechazo, donde existen cuatro diferentes niveles de severidad para los distintos modos de falla del producto en el proceso de manufactura y en caso de llegar con cliente final. La tabla 2 muestra los niveles y su descripción. La desconexión o botado debajo del límite inferior de la prueba de verificación, desconexión ligera, genera un rechazo con una severidad de cuatro en el análisis de modo de falla y efecto con posible insatisfacción del cliente por botado o desconexión constante del interruptor. La desconexión o botado por encima del límite superior de la prueba de verificación, botado pesado, genera un rechazo con severidad de diez en el análisis de modo de falla y efecto con posibilidad de generar incendios y muerte ya instalado en campo. (Schneider Electric, 2020).

Tabla 2. Severidad de modos de falla. Fuente:(Schneider Electric, 2020)

Rango	Severidad de modos de falla	
1	<p>Indetectable por el cliente. Efecto de falla potencial: ningún efecto perceptible en la funcionalidad del producto. <i>El cliente es poco probable que lo sepa.</i></p>	<p>Estética de conveniencia.</p>
4	<p>Aun trabajando. Efecto de falla potencial: cierta degradación del producto a nivel de subsistema, pero el rendimiento de los sistemas principales no es afectado. <i>El cliente está incómodo o molesto.</i></p>	<p>Degradación de la función secundaria y / o subsistema.</p>
7	<p>Soporte en el sitio necesario. Efecto potencial de falla: subsistemas inoperables o degradación de los sistemas principales, y la funcionalidad principal del producto es menor a las expectativas del Cliente (por ejemplo: todas las CTQ provenientes del perfil de persona cuyo nivel de gravedad podría ser clasificado como 1 o 4: estética, por ejemplo) <i>Existe insatisfacción del cliente</i></p>	<p>Degradación de la función principal.</p>
9	<p>Mayor impacto comercial para el cliente: la destrucción de parte de la instalación o puesta en marcha es imposible, ... Efecto de falla potencial: no conformidad con la regulación (riesgo de enjuiciamiento o costo enorme) o producto inoperable en los niveles más altos del sistema, pero no está relacionado con la seguridad. <i>El cliente está muy insatisfecho.</i></p>	<p>Integridad de la propiedad y / o parada de entregas.</p>
10	<p>Posible problema de seguridad solamente. Efecto potencial de falla: riesgo inaceptable de lesiones o daños a la salud de los seres humanos. Esto incluye elementos de no conformidad con la regulación, representa un problema de seguridad potencial directo. <i>El cliente está en peligro.</i></p>	<p>Integridad humana.</p>

El proceso de manufactura en la planta busca mantener los tiempos de botado o desconexión de los interruptores termomagnéticos cercano al límite inferior de la ventana para no interrumpir el flujo de material y no generar un cuello de botella en la línea.

El ajuste del tiempo de precalentamiento con corriente es el método de control utilizado en el proceso. Este es realizado de manera manual por parte de los técnicos de mantenimiento de las líneas de producción. Las áreas de AFI/DF/CAFI de la planta de Schneider Electric de Tijuana cuentan 12 equipos de ajuste automático, tres técnicos de mantenimiento y cuatro inspectores de calidad. El control de los equipos de ajuste es solo una de las actividades en el rol de los técnicos de mantenimiento. Al tener cuatro equipos de ajuste automático por cada técnico de mantenimiento el control es realizado de manera reactiva al haber tenido un rechazo.

2.3 Tecnologías de control.

Los sistemas de control convencional como PID y *on-off* fueron utilizados hasta el principio de la década de 1960 (Chmielowski, 2016). El control de sistemas en la industria actualmente está evolucionando, la industria 4.0 nos permite obtener datos de nuestros procesos imposibles de conseguir en el pasado.

2.3.1 Aprendizaje de máquina

El aprendizaje de máquina es definido por Gopinath Rebala (2019) como el campo de las ciencias de la computación dedicado a estudiar los algoritmos y técnicas para automatizar soluciones a problemas complejos difíciles de programar usando métodos de programación convencionales. Frank Hutter, Lars Kotthoff y Joaquin Vanschoren (2019) concuerdan en la existencia de tres métodos principales de aprendizaje de máquina: Optimización de hiperparámetros, Meta-aprendizaje y Neuroarquitecturas. (Hutter et al, 2019). Para cualquiera de los tres métodos mencionados es necesario contar con conjuntos de información del proceso por el método de toma de decisiones en un sistema con aprendizaje de máquina, conducido por medio de información. De acuerdo con Chollet (2018), hay tres puntos necesarios para hacer aprendizaje de máquina:

- *Puntos de datos de entrada:* Dependiendo de la tarea asignada para realizar el aprendizaje de maquina son necesarios puntos de entrada, por ejemplo, para una tarea de reconocimiento de voz son utilizados sonidos de personas hablando.

- *Ejemplo de salida esperada:* Los datos de salida esperados deben definirse. En reconocimiento de voz, por ejemplo, transcripciones de archivos de sonido generadas por un humano.
- *Una manera de medir si el algoritmo funciona:* Es necesario para determinar la diferencia entre la salida del sistema y la salida esperada.

2.3.2 Lógica difusa y control difuso

Los pilares del control difuso fueron por primera vez presentados en 1965 por Lofti A. Zadeh permitiendo la creación de sistemas difusos utilizando reglas condicionales preestablecidas de tipo *if-then*. El control difuso cambió la lógica de cero-uno donde uno es igual a un elemento perteneciente a un conjunto y un cero es igual a un elemento no perteneciente a un conjunto, desarrollando niveles de pertenencia entre cero y uno descritos en funciones de membresía. Diez años después Ebrahim Mamdani propuso la utilización de lógica difusa en el control de sistemas en ingeniería (Chmielowski, 2016).

El control difuso está dividido en dos conceptos básicos: Control difuso descriptivo y control difuso prescriptivo. El control difuso descriptivo está basado en la falta conocimiento exacto del sistema a controlar asumiendo los puntos siguientes:

- El modelo del proceso a controlar no es conocido debido a su complejidad, no linealidad y dificultad.
- El conocimiento, experiencia e intuición disponibles permiten establecer reglas base para toma de decisiones en el sistema sin conocer su modelo.
- El conocimiento, experiencia e intuición son posibles de expresar de manera verbal y no debe ser preciso, por ejemplo, en forma numérica.

Los sistemas difusos están compuestos por 4 bloques principales:

1. Bloque de fuzzificación.
2. Bloque de reglas.
3. Bloque de razonamiento.
4. Bloque de desfuzzificación.

La entrada de datos en el sistema de control es dada con valores numéricos descriptores del proceso; estos valores pasan por los bloques antes mencionados entregando al final una salida de control para el sistema. Existen dos tipos principales de modelos para sistemas difusos: Mamdani y Takagi-Sugeno (Chmielowski, 2016).

Capítulo 3. Planteamiento del problema

El ajuste del tiempo de precalentamiento en equipos de ajuste automático de interruptores es la principal herramienta utilizada en la planta de Schneider Electric en Tijuana, Baja California para manufacturar interruptores acordes a los estándares de UL. La justificación, pregunta de investigación e hipótesis son las siguientes:

3.1 Justificación

Un registro de 342 rechazos de pallets en 2019 con material terminado por interruptores con desconexión fuera del límite superior establecido del área de AFI/CAFI/DF de la planta de Schneider Electric en Tijuana, Baja California, representa una pérdida anual de 145,712 interruptores, equivalentes a 50 mil dólares para la planta (Schneider Electric, 2020). El ajuste manual del tiempo de precalentamiento no permite actuar de manera preventiva sobre los rechazos debido a la cantidad de equipos de ajuste automático de interruptores y la cantidad de técnicos de mantenimiento disponibles en el área. Los motivos expuestos en el párrafo justifican la pregunta de investigación siguiente.

3.2 Pregunta de investigación

La pregunta de investigación fue:

¿Qué tipo de control reduce las fallas por tiempo de desconexión de un interruptor termomagnético?

3.3 Hipótesis

La siguiente hipótesis fue planteada con base a la pregunta de investigación presentada.

La hipótesis alternativa fue:

H_1 : El control difuso disminuye la cantidad de rechazos por tiempos de desconexión en pruebas de verificación.

La hipótesis nula fue:

H_0 : El control difuso no disminuye la cantidad de rechazos por tiempos desconexión en pruebas de verificación.

3.4 Objetivos

El objetivo general y los objetivos específicos fueron los siguientes:

3.4.1 Objetivo general.

El objetivo general fue:

- Reducir 15% la cantidad de rechazos por tiempos de desconexión mediante la implementación de un sistema de control difuso.

3.4.2 Objetivos específicos.

Los objetivos específicos fueron:

- Conectar los equipos de ajuste TP-005 y TP-004 a la red local de la empresa.
- Definir las funciones de membresía y reglas base para el control difuso.
- Recolectar conjunto de datos de ajuste de interruptores termomagnéticos.

Capítulo 4. Metodología.

La metodología partió de una investigación documental para identificar el funcionamiento general de un interruptor termomagnético, las variables identificadas como dependientes en el tiempo de desconexión e identificar los tipos de control utilizados en la industria para continuar con una investigación de campo probando un tipo de control moderno; Control difuso con el método de Mamdani. La población seleccionada fue de interruptores ensamblados en la célula 33 del área de AFI/CAFI/DF de la planta de Schneider Electric en Tijuana, con un promedio de 4,000 interruptores termomagnéticos diarios por equipo, utilizando dos equipos de ajuste de interruptores: TP-004 y TP-005. Las pruebas consistieron en dos corridas de ajuste de interruptores del mismo modelo provenientes de la misma célula de ensamble ajustados como muestra la tabla 2. La corrida utilizó una muestra del 100% de la población de interruptores producidos en un turno con un aproximado de 3800 interruptores. La muestra de 129 interruptores tomada de cada calibrador fue determinada con la fórmula $n = \frac{N * Z a^2 * p * q}{d^2 * (N - 1) + Z a^2 * p * q}$ (PSYMA LATINA, 2015). Donde N es el tamaño de la población, Z es el nivel de confianza con $\alpha = 5\%$, p es la probabilidad de éxito, q la probabilidad de fracaso y d la precisión.

$$n = \frac{3800 * 1.96 * .5 * .5}{.085^2 * (3800 - 1) + 1.96^2 * .5 * .5} = \frac{3649.52}{28.4081} = 129 \dots (2)$$

Una prueba de verificación al 135% del valor nominal de corriente fue realizada a todas las muestras en el laboratorio ubicado en la planta de Schneider Electric en Tijuana. Ningún ajuste manual fue hecho en los equipos de ajuste. Las condiciones de temperatura para cada corrida fueron las mismas para ambos equipos de ajuste.

Tabla 2. Interruptores ajustados por corrida de prueba. Fuente: Elaboración propia.

Número de corrida	Calibrador	Control Difuso	Sin control
1	TP-005	3800	0
	TP-004	0	3550

La obtención de datos previa, durante y posterior a las pruebas fue realizada para asumir el comportamiento de la población total de interruptores y validar los tipos de control utilizados en cada una de las pruebas.

4.1 Obtención de datos.

La colección de datos fue desarrollada con una interfaz en LabVIEW donde los inspectores de calidad capturaron los resultados de las pruebas de verificación al 135% entre otros datos de manera manual y automática mediante la conexión al PLC (Controlador Lógico Programable). La tabla 3 muestra los tipos de datos recolectados.

Tabla 3. Datos colectados de pruebas al 135%. Fuente: Elaboración propia.

Dato	Forma de captura	Unidades
Nombre del inspector	Tecleo	N/A
Área	Selección manual	N/A
Célula	Selección manual	N/A
Turno	Selección manual	N/A
Modelo	Selección manual	N/A
Equipo de ajuste	Selección manual	N/A
Equipo de prueba	Selección manual	N/A
Temperatura ambiente	Manual	Grados centígrados (°)
Tiempo de precalentamiento	Automático con PLC	Segundos (s)
Tiempo de desconexión en sorteo	Manual	Segundos (s)
Tiempo de desconexión en prueba de verificación	Manual	Segundos (s)

Los datos fueron almacenados en una base de datos hospedada en un servidor de SQL de la planta de Schneider Electric en Tijuana con la arquitectura mostrada en la figura 2:

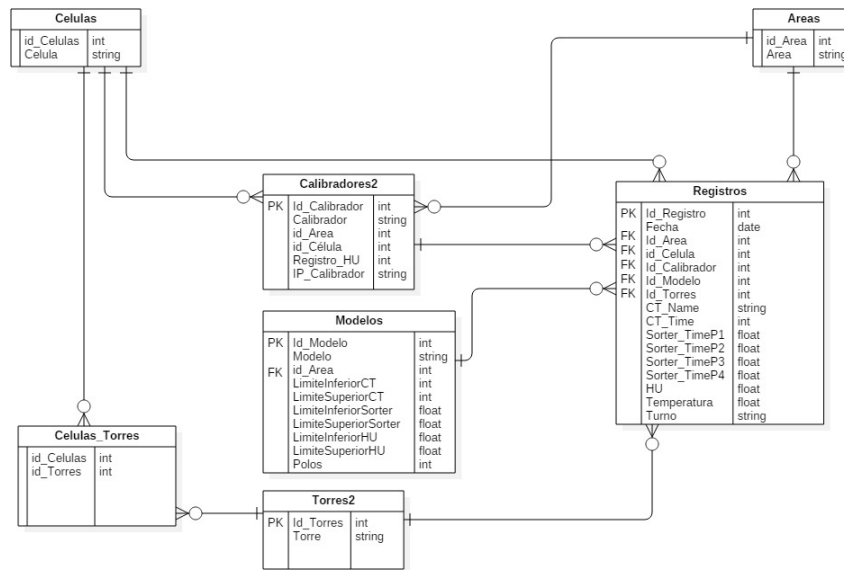


Figura 2. Arquitectura de base de datos en SQL. Fuente: Creación propia.

El sistema fue monitoreado por medio de una conexión a la nube utilizando *Aveva Insight*, una solución de Schneider Electric para el monitoreo de procesos. Los datos son recuperados por nodos programados con *Node-Red* y hospedados en el servidor WVMX06201PLCS de la planta de Schneider Electric en Tijuana utilizando LabVIEW como plataforma para montar el control del tiempo de precalentamiento como muestra la Figura 3.

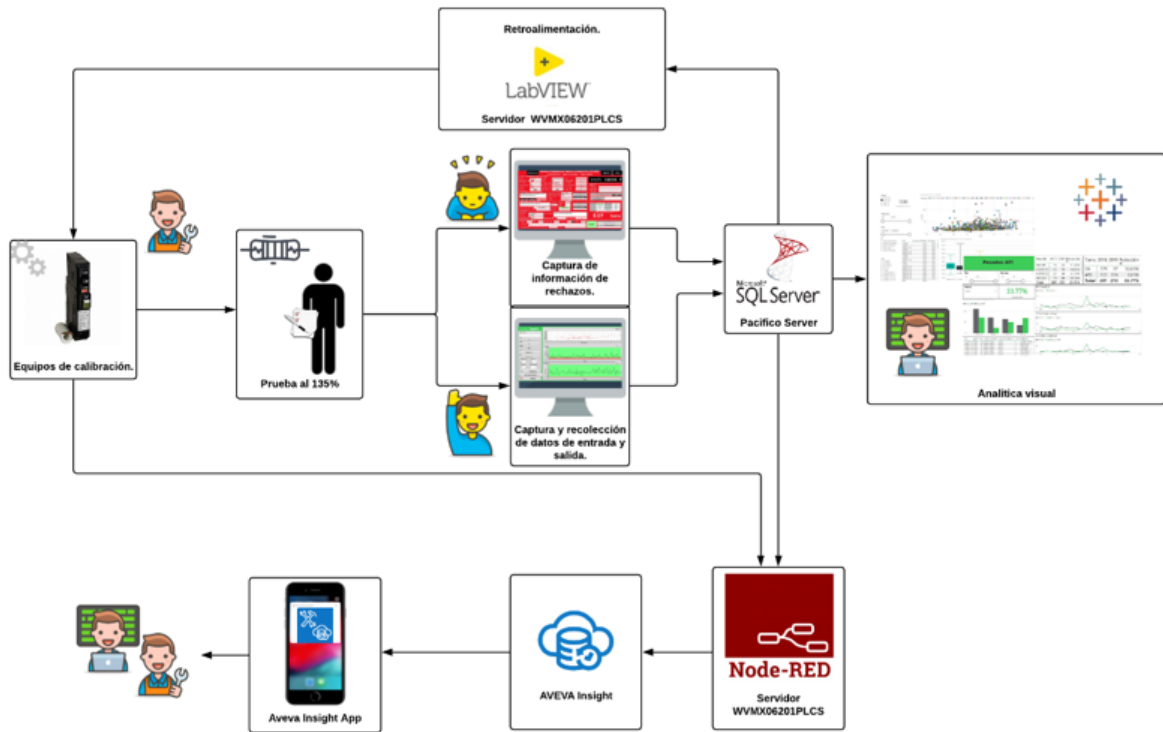


Figura 3. Diagrama de proceso propuesto. Fuente: Creación propia.

4.2 Control difuso.

La forma de control evaluada fue el control difuso con el método Mamdani.

4.2.1 Seleccionar las variables de entrada y salida.

Las variables de entrada y salida seleccionadas de la tabla 3 son descritas en la tabla 4; temperatura ambiente, tiempo de desconexión en sorteo, tiempo de desconexión en prueba de verificación, tiempo de precalentamiento y añadiendo el porcentaje de rechazos por interruptores con desconexión fuera de los límites de sorteo.

Tabla 4. Variables de entrada y salida. Fuente: Elaboración propia.

Variable	Tipo de variable
Temperatura ambiente	Entrada
Tiempo de desconexión en sorteo	Entrada
Tiempo de desconexión en prueba de verificación	Entrada
Tiempo de precalentamiento	Salida

4.2.2 Establecer funciones de membresía para las variables seleccionadas.

La selección de funciones de membresía no cuenta con un método exacto y depende de la experiencia del usuario (Sadollah, 2018). Diferentes tipos de funciones de membresía como triangulares, trapezoidales, gaussianas, de campana y sinusoidales fueron evaluadas para determinar la mejor manera de modelar el sistema. Las funciones de membresía fueron creadas tomando variables lingüísticas como, por ejemplo: Muy caliente, caliente, templado, frío, muy frío. La figura 4 muestra un ejemplo de una función de membresía.

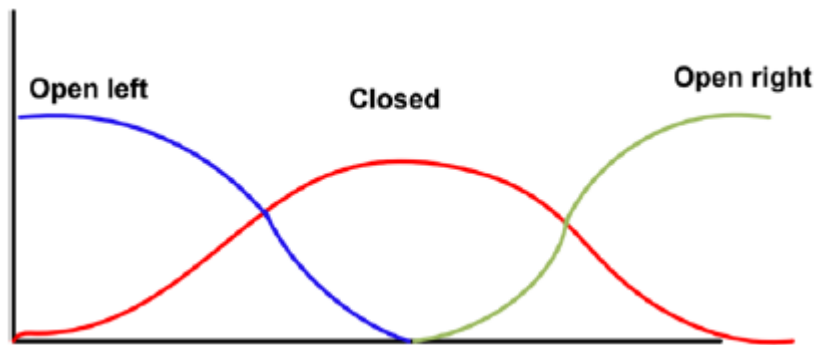


Figura 4. Funciones de membresía para sistemas difusos (Singh,2020).

Las funciones de membresía triangulares fueron desarrolladas con la ecuación 3:

$$f(x; a, b, c) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{array} \right\} \dots (3)$$

Donde a es la frontera baja, b es el centro y c es la frontera alta. La figura 5 muestra un ejemplo de funciones de membresía triangulares.

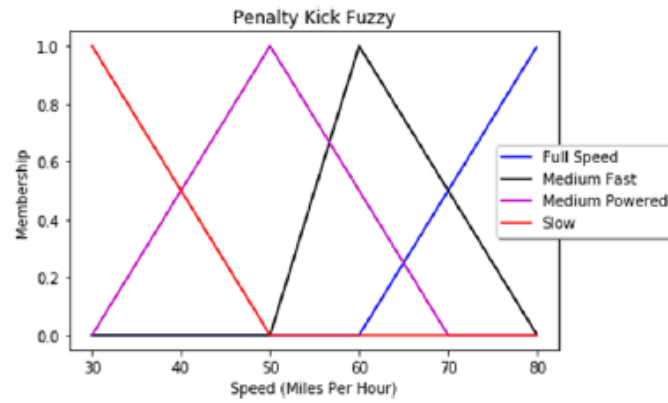


Figura 5. Funciones de membresía triangulares (Singh,2020).

Las funciones de membresía trapezoidales cuentan con cuatro coordenadas para evaluar un valor x : a, b, c , y d con la condición $b < c < d$. La ecuación 4 describe las funciones trapezoidales.

$$f(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x - a}{b - a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d - x}{d - c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \dots (4)$$

La figura 6 muestra un ejemplo de funciones de membresía trapezoidales.

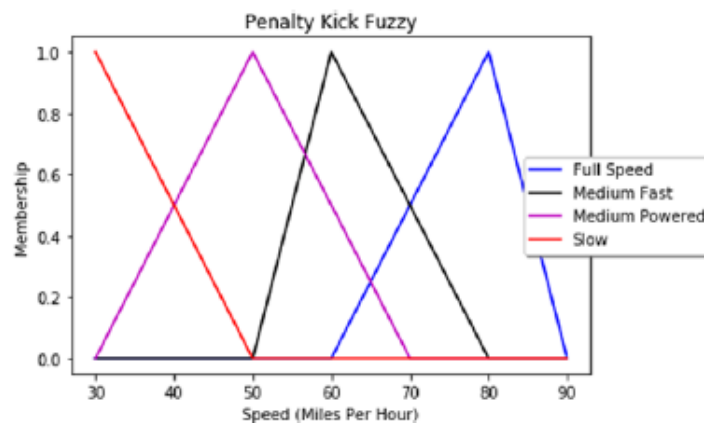


Figura 6. Funciones de membresía trapezoidales (Singh,2020).

La función gaussiana de membresía puede utilizarse conociendo o proponiendo los promedios y desviaciones estándar de los valores de pertenencia. La ecuación 5 describe la función gaussiana.

$$\mu_A(x, c, s, m) = e^{-\frac{1}{2} \left| \frac{x-c}{s} \right|^m} \dots (5)$$

Donde c y s son el promedio y la desviación estándar, respectivamente, y m es un factor de fuzzificación. La figura 7 muestra un ejemplo de funciones de membresía gaussianas.

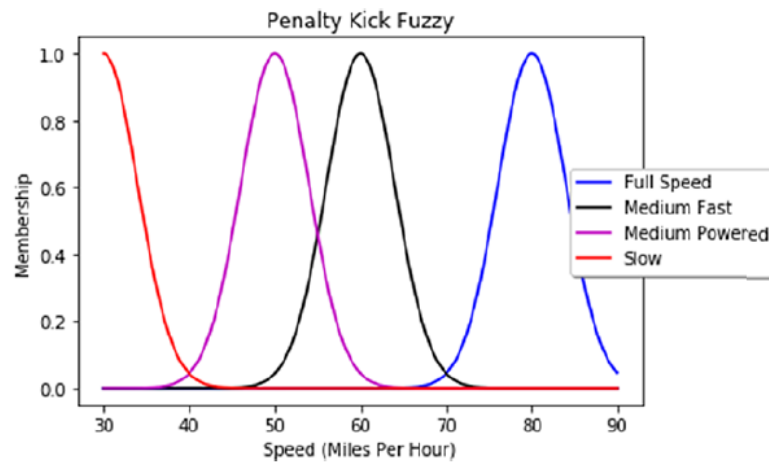


Figura 7. Funciones de membresía gaussianas (Singh,2020).

Las funciones de membresía de las diferentes variables de entrada y salida fueron seleccionadas dependiendo de la cantidad de información disponible para cada una, pasando a establecer las reglas base como siguiente paso.

4.2.3 Establecer reglas base.

La identificación de variables de entrada y salida de nuestro sistema permitieron establecer reglas base para el control utilizando la experiencia, el conocimiento y la intuición adquirida sobre el proceso actual.

Las reglas base fueron establecidas siguiendo la siguiente lógica:

Si x es A entonces y es B

Donde y es una variable de salida, por ejemplo, tiempo de precalentamiento, x es una variable de entrada, por ejemplo, tiempo de desconexión en prueba de verificación y las

variables lingüísticas son identificadas como A como antecedente y B como consecuente. Las variables A y B son difusas, con valores como alto, medio bajo. Una regla puede contener múltiples antecedentes o consecuentes como muestra el ejemplo:

Si x es A entonces y es B y z es D

La programación del sistema difuso con sus variantes fue realizada con LabVIEW como enlace de retroalimentación en el sistema.

funciona con un conjunto de datos de entrada donde es necesario indicar la variable a controlar.

4.4 Validación de modelo de control.

Las muestras tomadas del proceso diario con un patrón de uno por cada 25 para su captura en sistema y además una muestra representativa de 322 interruptores para evaluación de tiempos de desconexión en laboratorio de ambos equipos de ajuste fueron utilizadas para validar el resultado de la corrida.

Una prueba de muestra de proporción fue utilizada tomando la aceptación histórica del proceso como proporción a comparar con las siguientes ecuaciones:

$$H_a = P > a_0 \dots (2)$$

$$H_0 = P \leq a_0 \dots (3)$$

Donde P es la aceptación resultante con el control utilizado y a_0 la aceptación histórica del proceso.

Los interruptores de la muestra llevados a laboratorio fueron evaluados con una prueba T-pareada con las ecuaciones cuatro y cinco al ser datos dependientes provenientes de una misma población y ajustadas en dos equipos diferentes.

$$H_a = \mu_1 < \mu_2 \dots (4)$$

$$H_0 = \mu_1 \geq \mu_2 \dots (5)$$

Donde μ_1 es el promedio de tiempo de desconexión de la muestra del equipo de ajuste con retroalimentación y μ_2 es el promedio de tiempo de desconexión de la muestra sin retroalimentación.

El teorema del límite central fue utilizado para obtener el tiempo promedio de la población con los datos guardados en la base de datos. Una prueba para determinar la diferencia entre medias fue realizada con las ecuaciones seis y siete.

$$H_a = \mu_1 < \mu_0 \dots (6)$$

$$H_0 = \mu_1 \geq \mu_0 \dots (7)$$

Donde μ_1 es el promedio de tiempo de desconexión de la muestra del equipo de ajuste con retroalimentación y μ_0 es el promedio de tiempo de desconexión de la población

El resultado de las pruebas fue evaluado con las cuatro variantes de retroalimentación propuestos con un $\alpha = 0.05$ esperando resultados de $P_{value} < \alpha$ para validar el resultado.

4.1 Criterios de aceptación.

El criterio para aceptar el método de control es mostrado en la tabla 5 donde la dificultad de implementación será valorada con los siguientes niveles: Fácil, normal y difícil. Si el método cuenta con valores P_{value} menores a 0.05 y menor cantidad de rechazos es seleccionado. En el caso de tener valores similares con control difuso y sin el mismo, el nivel de dificultad sirvió para aceptar o rechazar la implementación en planta.

Tabla 5. Criterios de evaluación. Fuente: Elaboración propia.

Metodo	P-value contra equipo de ajuste	P-value contra población	Dificultad de implementación	Rechazos
Control disufo Mamdani	0.019	0.272	Normal	3.3%

La dificultad de implementación fue evaluada con dos puntos: el tiempo dedicado a la implementación del método y la cantidad de módulos o funciones utilizados.

Capítulo 5. Resultados.

La corrida de interruptores fue planeada en la célula 33 del área de AFI/CAFI/DF en la planta de Schneider Electric en Tijuana, Baja California. El modelo seleccionado fue el QO120 que cuenta con una aceptación promedio de 97.88% en los equipos de calibración automática de esa célula. El documento interno controlado GF000I contiene los límites para parámetros del modelo seleccionado. La Tabla 6 muestra los límites presentes en el documento.

Tabla 6. Límites establecidos para modelo QO120. Fuente: Elaboración propia.

Modelo	Límites de tiempo de desconexión en verificación al 135% (s)	Límites de tiempo de desconexión en sorteo (s)	Tiempo de precalentamiento (s)
QO120	120 - 1200	6.3 - 8	3.8 - 4.6

La herramienta *Fuzzy System Designer* fue utilizada con una versión de LabVIEW 2017 para diseñar el sistema difuso que controló la corrida piloto. La Tabla 7 muestra los diferentes valores lingüísticos utilizados para crear las funciones de membresía de cada una de las variables.

Tabla 7. Valores lingüísticos para las variables de entrada. Fuente: Elaboración propia.

Variable	Tipo	VL 1	VL 2	VL 3	VL 4	VL 5
Temperatura	Entrada	Baja	Media	Alta	N/A	N/A
Tiempo de desconexión en sorteo	Entrada	Ligero	Normal	Pesado	N/A	N/A
Tiempo de desconexión en prueba de verificación	Entrada	Muy Ligero	Ligero	Normal	Pesado	N/A
Ajuste de tiempo de precalentamiento	Salida	Subir mucho	Subir	Mantener	Bajar	Bajar mucho

*VL = Valor lingüístico

Las funciones de membresía se definieron de la manera siguiente:

El modelado de la temperatura fue definido con tres variables lingüísticas con valores de “Baja”, “Media” y “Alta”; con un rango de 10 a 35 °C.

La variable “Baja” fue definida con valores de $a = b = 10$; $c = 15$; $d = 24$ sustituidos en la ecuación 4. La ecuación 5 muestra el modelado para el nivel de pertenencia del valor de temperatura “Baja”.

$$f(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq 10 \\ 1, & 10 \leq x \leq 15 \\ \frac{24-x}{9}, & 15 \leq x \leq 24 \\ 0, & 24 \leq x \end{array} \right\} \dots (5)$$

La variable “Media” fue definida con valores de $a = 22$; $b = 25$; $c = 28$ sustituidos en la ecuación 3. La ecuación 6 muestra el modelado para el nivel de pertenecía del valor de temperatura “Media”.

$$f(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq 22 \\ \frac{x-22}{3}, & 22 \leq x \leq 25 \\ \frac{28-x}{3}, & 25 \leq x \leq 28 \\ 0, & 28 \leq x \end{array} \right\} \dots (6)$$

La variable “Alta” fue definida con valores de $a = 25$; $b = 30$; $c = d = 35$; sustituidos en la ecuación 4. La ecuación 7 muestra el modelado para el nivel de pertenecía del valor de temperatura “Alta”.

$$f(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq 25 \\ \frac{x-25}{5}, & 25 \leq x \leq 30 \\ 1, & 30 \leq x \leq 35 \\ 0, & 35 \leq x \end{array} \right\} \dots (7)$$

La figura 8 muestra las funciones de membresía para temperatura graficadas a lo largo del rango. Las variables “Alta” y “Baja” son de forma trapezoidal con un tope en 10 y 35 °C respectivamente y la variable “Media” es de forma triangular con un centro en 25°C como marca la especificación de pruebas de verificación para UL.

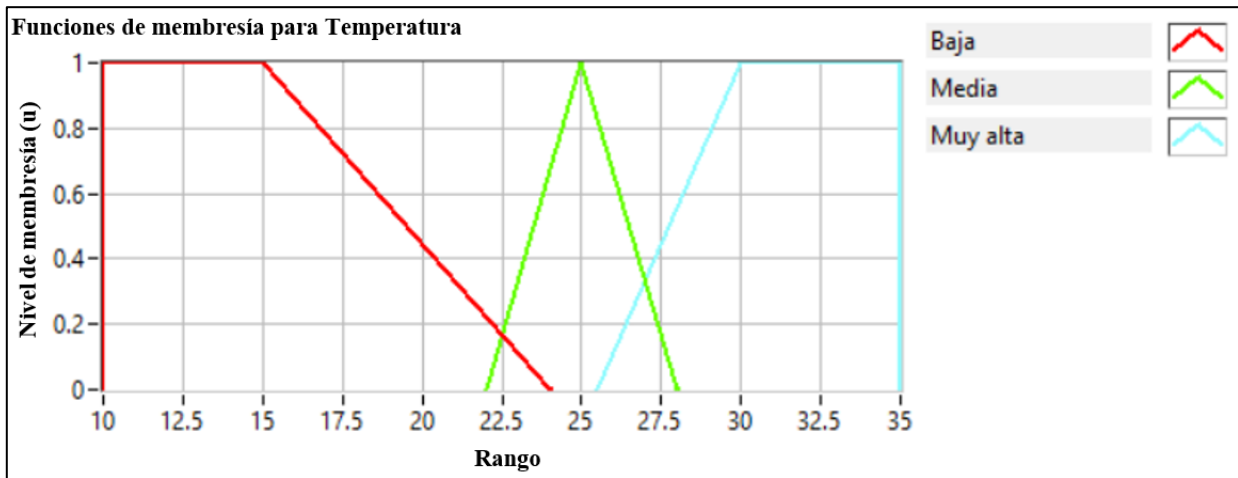


Figura 8. Funciones de membresía para temperatura.

El modelado del tiempo de desconexión en sorteo fue definido con tres variables lingüísticas con valores de “Ligero”, “Normal” y “Pesado”; con un rango de 6 a 8 segundos como está definido en el documento interno controlado GF001 para el modelo seleccionado para la corrida piloto.

La variable “Ligero” fue definida con valores de $a = b = 6$; $c = 6.1$; $d = 6.7$ sustituidos en la ecuación 4. La ecuación 8 muestra el modelado para el nivel de pertenecía del valor de tiempo de sorteo “Ligero”.

$$f(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq 6 \\ 1, & 6 \leq x \leq 6.1 \\ \frac{6.7 - x}{0.6}, & 6.1 \leq x \leq 6.7 \\ 0, & 6.7 \leq x \end{array} \right\} \dots (8)$$

La variable “Normal” fue definida con valores de $a = 6.4$; $b = 6.775$; $c = 7.2$ sustituidos en la ecuación 3. La ecuación 9 muestra el modelado para el nivel de pertenecía del valor de tiempo de sorteo “Normal”.

$$f(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq 6.4 \\ \frac{x - 6.4}{0.375}, & 6.4 \leq x \leq 6.775 \\ \frac{7.2 - x}{0.425}, & 6.775 \leq x \leq 7.2 \\ 0, & 7.2 \leq x \end{array} \right\} \dots (9)$$

La variable “Pesado” fue definida con valores de $a = 6.9$; $b = 7.3$; $c = d = 8$; sustituidos en la ecuación 4. La ecuación 10 muestra el modelado para el nivel de pertenencia del valor de tiempo de sorteo “Pesado”.

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 6.9 \\ \frac{x - 6.9}{0.4}, & 6.9 \leq x \leq 7.3 \\ 1, & 7.3 \leq x \leq 8 \\ 0, & 8 \leq x \end{cases} \dots (10)$$

La figura 9 muestra las funciones de membresía para desconexión de tiempo de botado en sorteo graficadas a lo largo del rango. Las variables “Ligero” y “Pesado” son de forma trapezoidal con un tope en 6 y 8 segundos definidos con respecto al documento interno controlado GF00I respectivamente y la variable “Normal” es de forma triangular con un centro en 6.775 segundos obtenido de manera experimental.

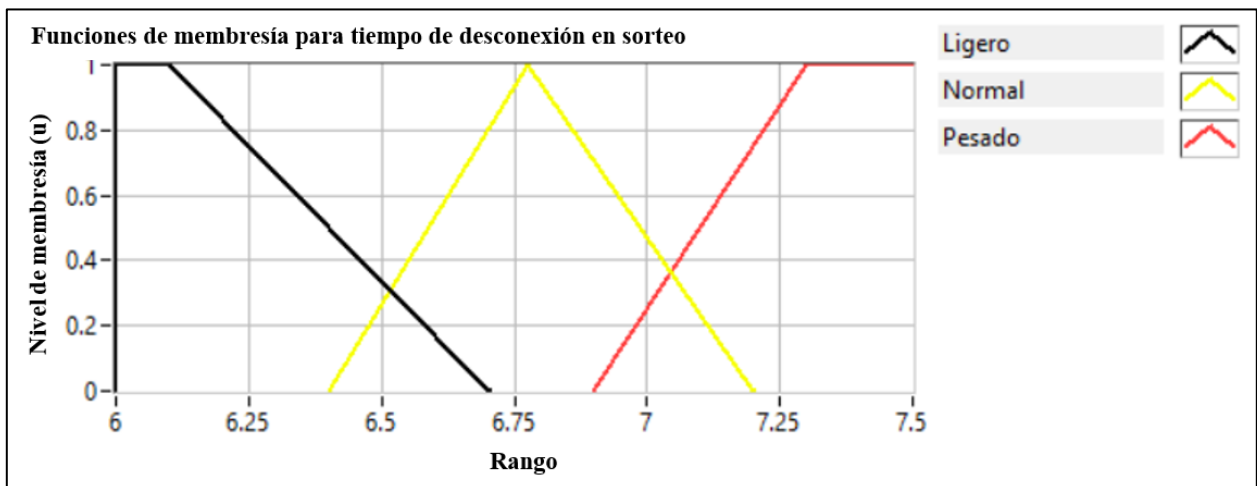


Figura 9. Funciones de membresía para tiempo de desconexión en sorteo.

El modelado del tiempo de desconexión en prueba de verificación fue definido con cuatro variables lingüísticas con valores de “Muy Ligero”, “Ligero”, “Normal” y “Pesado”; con un rango de 0 a 1400 segundos, este rango cuenta con los límites definidos en el documento controlado GF000I para el modelo seleccionado para la prueba piloto definidos entre 120 y 1200 segundos.

La variable “Muy Ligero” fue definida con valores de $a = b = 0; c = 70; d = 100$ sustituidos en la ecuación 4. La ecuación 11 muestra el modelado para el nivel de pertenecía del valor de tiempo de desconexión en tiempo de verificación “Muy Ligero”.

$$f(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq 0 \\ 1, & 0 \leq x \leq 70 \\ \frac{70-x}{70}, & 70 \leq x \leq 100 \\ 0, & 100 \leq x \end{array} \right\} \dots (11)$$

La variable “Ligero” fue definida con valores de $a = 50; b = 105; c = 130$ sustituidos en la ecuación 3. La ecuación 12 muestra el modelado para el nivel de pertenecía del valor de tiempo de desconexión en tiempo de verificación “Ligero”.

$$f(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq 50 \\ \frac{x-50}{55}, & 50 \leq x \leq 105 \\ \frac{130-x}{15}, & 105 \leq x \leq 130 \\ 0, & 130 \leq x \end{array} \right\} \dots (12)$$

La variable “Normal” fue definida con valores de $a = 100; b = 120; c = 180; d = 200$; sustituidos en la ecuación 4. La ecuación 13 muestra el modelado para el nivel de pertenecía del valor de tiempo de desconexión en tiempo de verificación “Normal”.

$$f(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq 100 \\ \frac{x-100}{20}, & 100 \leq x \leq 120 \\ 1, & 120 \leq x \leq 180 \\ \frac{200-x}{20}, & 180 \leq x \leq 200 \\ 0, & 200 \leq x \end{array} \right\} \dots (13)$$

La variable “Pesado” fue definida con valores de $a = 180; b = 400; c = d = 1400$; sustituidos en la ecuación 4. La ecuación 14 muestra el modelado nivel de pertenecía del valor de tiempo de desconexión en tiempo de verificación “Pesado”.

$$f(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq 6.9 \\ \frac{x-6.9}{0.4}, & 6.9 \leq x \leq 7.3 \\ 1, & 7.3 \leq x \leq 8 \\ 0, & 8 \leq x \end{array} \right\} \dots (14)$$

La figura 10 muestra las funciones de membresía para desconexión de tiempo de desconexión en prueba de verificación graficadas a lo largo del rango. Las variables “Muy Ligero”, “Normal” y “Pesado” son de forma trapezoidal con un tope en 0 y 1400 segundos definidos con respecto al máximo tiempo de botado registrado en el historial de la base de datos. La variable “Ligero” es de forma triangular con un centro en 105 segundos.

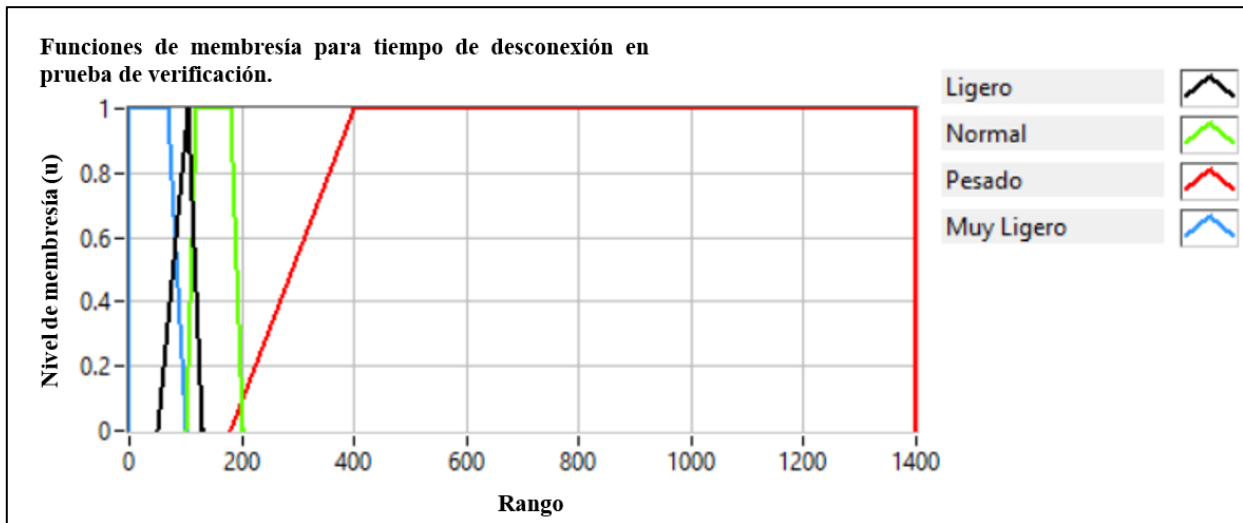


Figura 10. Funciones de membresía para tiempo de desconexión en prueba de verificación.

El modelado del tiempo de precalentamiento fue definido con cinco variables lingüísticas con valores de “Bajar mucho”, “Bajar”, “Mantener”, “Subir” y “Subir mucho”; con un rango de -5 a 5 puntos. En el rango seleccionado cada unidad representa 0.1 segundos en la vida real. Los límites de tiempo de precalentamiento definidos en el documento interno controlado GF000I son de 3.8 a 4.6 segundos. La idea principal al definir el rango de esta manera fue para que el sistema de control decida cuanto tiempo modificar tomando como referencia el tiempo de precalentamiento utilizado en el momento por el equipo de calibración automática; para así evitar cambios bruscos en la variable que afecten el proceso de calibración.

La variable “Bajar mucho” fue definida con valores de $a = b = -5$; $c = -3$; $d = -2$ sustituidos en la ecuación 4. La ecuación 15 muestra el modelado para el nivel de pertenecía del valor de ajuste de tiempo de precalentamiento “Bajar mucho”.

$$f(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq -5 \\ 1, & -5 \leq x \leq -3 \\ -2 + x, & -3 \leq x \leq -2 \\ 0, & -2 \leq x \end{array} \right\} \dots (15)$$

La variable “Bajar” fue definida con valores de $a = -3$; $b = -1.5$; $c = 0$ sustituidos en la ecuación 3. La ecuación 16 muestra el modelado para el nivel de pertenecía del valor de ajuste de tiempo de precalentamiento “Bajar”.

$$f(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq -3 \\ \frac{x+3}{3}, & -3 \leq x \leq -1.5 \\ \frac{-x}{1.5}, & -1.5 \leq x \leq 0 \\ 0, & 0 \leq x \end{array} \right\} \dots (16)$$

La variable “Mantener” fue definida con valores de $a = -1$; $b = 0$; $c = 1$ sustituidos en la ecuación 3. La ecuación 17 muestra el modelado para el nivel de pertenecía del valor de ajuste de tiempo de precalentamiento “Mantener”.

$$f(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq -1 \\ x + 1, & -1 \leq x \leq 0 \\ 1 - x, & 0 \leq x \leq 1 \\ 0, & 1 \leq x \end{array} \right\} \dots (17)$$

La variable “Subir” fue definida con valores de $a = 0$; $b = 1.5$; $c = 3$ sustituidos en la ecuación 3. La ecuación 18 muestra el modelado para el nivel de pertenecía del valor de ajuste de tiempo de precalentamiento “Subir”.

$$f(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq 0 \\ \frac{x}{1.5}, & 0 \leq x \leq 1.5 \\ \frac{3-x}{1.5}, & 1.5 \leq x \leq 3 \\ 0, & 3 \leq x \end{array} \right\} \dots (18)$$

La variable “Subir mucho” fue definida con valores de $a = 2$; $b = 3$; $c = d = 5$ sustituidos en la ecuación 4. La ecuación 19 muestra el modelado para el nivel de pertenecía del valor de ajuste de tiempo de precalentamiento “Subir mucho”.

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 2 \\ x - 2, & 2 \leq x \leq 3 \\ 1, & 3 \leq x \leq 5 \\ 0, & 5 \leq x \end{cases} \dots (19)$$

La figura 11 muestra las funciones de membresía para los ajustes en tiempo de precalentamiento graficadas a lo largo del rango. Las variables “Bajar Mucho”, “Subir Mucho” son de forma trapezoidal con un tope en -5 y 5 puntos definidos como los movimientos máximos de 0.5 segundos. Las variable “Bajar”, “Mantener”, “Subir” es de forma triangular centrados en -1.5, 0 y 1.5 puntos respectivamente.

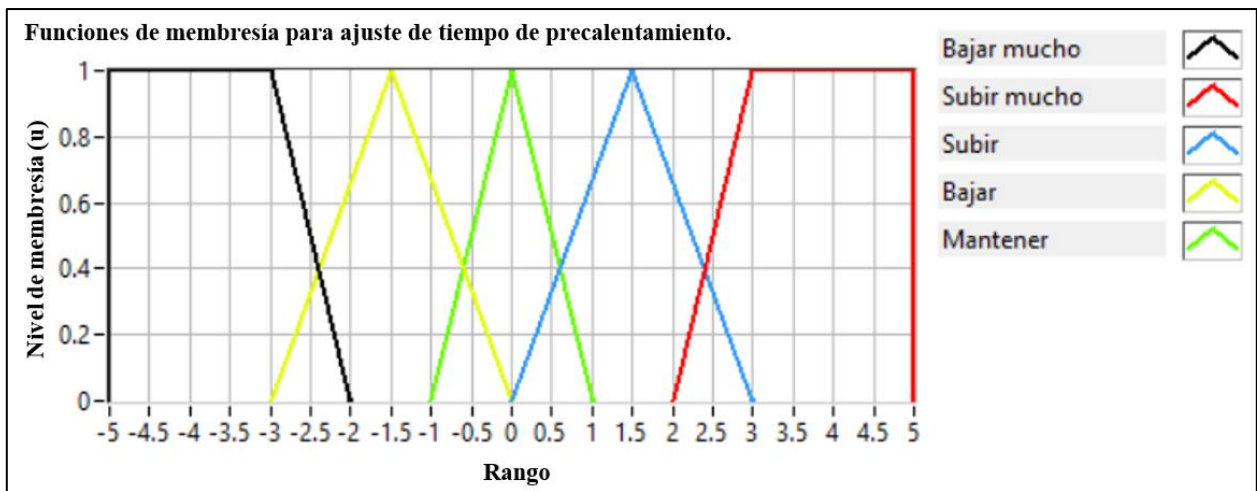


Figura 11. Funciones de membresía para ajuste de tiempo de precalentamiento.

Las reglas difusas para el control fueron definidas mediante el conocimiento del proceso y la experiencia en ajustes de los equipos de calibración automática. Un total de 36 reglas fueron obtenidas mediante la combinación de las diferentes funciones de membresía de las tres variables de entrada en el sistema. La Tabla 8 muestra las 36 reglas que fueron programadas en el *Fuzzy System Designer* de *LabVIEW 2017*. La figura 12 muestra el sistema de prueba con el que cuenta el software para simular resultados de acuerdo con diferentes valores de las variables de entrada, en este ejemplo tenemos una temperatura de 25.90 °C, un tiempo de desconexión en sorteo de 7.16 segundos y un tiempo de desconexión en prueba de verificación de 531.5 segundos. El resultado obtenido para el ajuste de tiempo de precalentamiento de -3.2 puntos, equivalentes a 0.32 segundos.

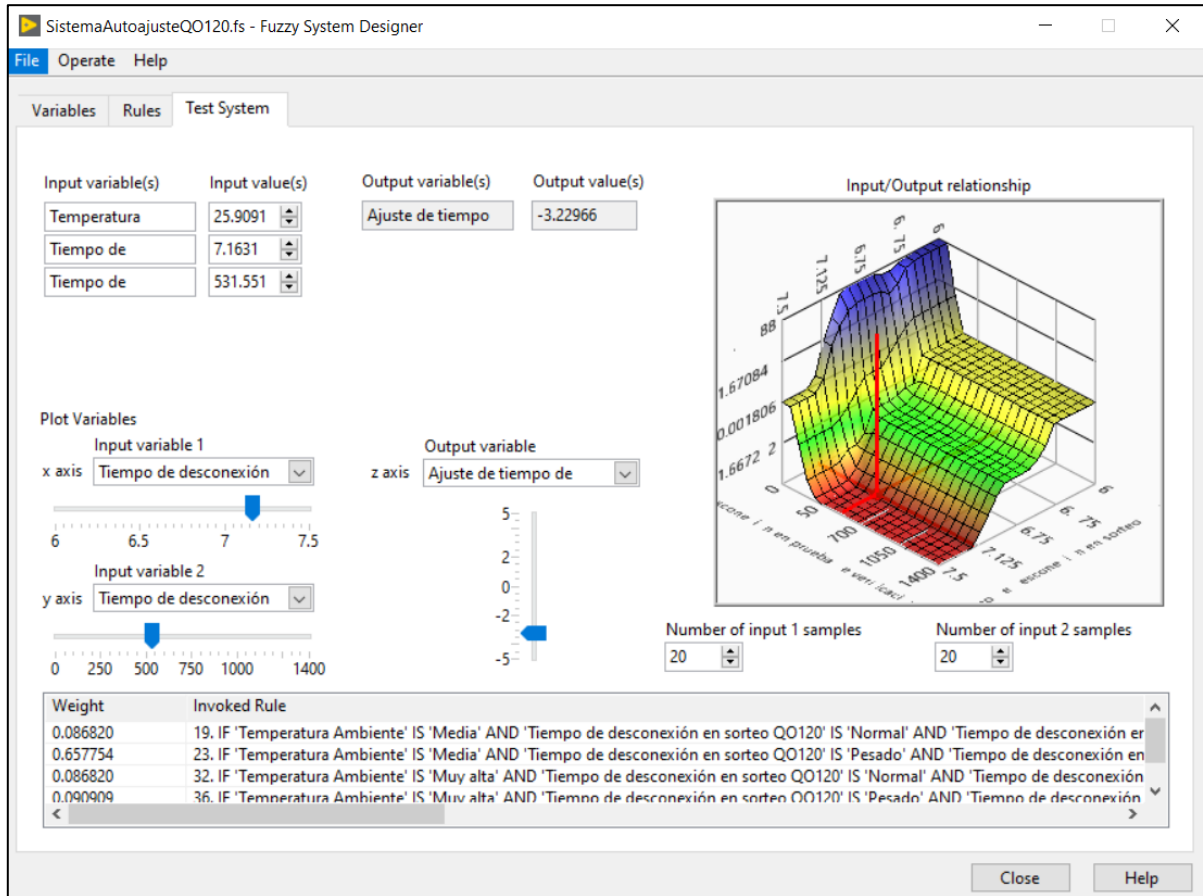


Figura 12. Sistema de prueba de sistema de control.

Tabla 8. Reglas definidas para el sistema difuso. Fuente: Elaboración propia.

Regla	Temperatura	Tiempo de desconexión en sorteo	Tiempo de desconexión en prueba de verificación	Ajuste de tiempo de precalentamiento
1	Baja	Ligero	Muy Ligero	Subir mucho
2	Baja	Ligero	Ligero	Subir
3	Baja	Ligero	Normal	Mantener
4	Baja	Ligero	Pesado	Mantener
5	Baja	Normal	Muy Ligero	Subir
6	Baja	Normal	Ligero	Subir
7	Baja	Normal	Normal	Mantener
8	Baja	Normal	Pesado	Bajar
9	Baja	Pesado	Muy Ligero	Mantener
10	Baja	Pesado	Ligero	Mantener
11	Baja	Pesado	Normal	Bajar
12	Baja	Pesado	Pesado	Bajar mucho
13	Media	Ligero	Muy Ligero	Subir mucho
14	Media	Ligero	Ligero	Subir mucho
15	Media	Ligero	Normal	Subir
16	Media	Ligero	Pesado	Mantener
17	Media	Normal	Muy Ligero	Subir mucho
18	Media	Normal	Ligero	Subir
19	Media	Normal	Normal	Mantener
20	Media	Normal	Pesado	Bajar
21	Media	Pesado	Muy Ligero	Mantener
22	Media	Pesado	Ligero	Mantener
23	Media	Pesado	Normal	Bajar
24	Media	Pesado	Pesado	Bajar mucho
25	Alta	Ligero	Muy Ligero	Mantener
26	Alta	Ligero	Ligero	Mantener
27	Alta	Ligero	Normal	Mantener
28	Alta	Ligero	Pesado	Mantener
29	Alta	Normal	Muy Ligero	Mantener
30	Alta	Normal	Ligero	Mantener
31	Alta	Normal	Normal	Mantener
32	Alta	Normal	Pesado	Mantener
33	Alta	Pesado	Muy Ligero	Mantener
34	Alta	Pesado	Ligero	Mantener
35	Alta	Pesado	Normal	Mantener
36	Alta	Pesado	Pesado	Mantener

La población utilizada para la corrida fue de interruptores ensamblados en la célula 33 del área de AFI/CAFI/DF de la planta de Schneider Electric en Tijuana, con una población total de 7350 interruptores termomagnéticos entre el turno de la mañana, de 6:30 a.m. a

6:30 p.m. y el turno de la noche de 6:30 p.m. a 6:30 a.m., utilizando dos equipos de ajuste de interruptores: TP-004 y TP-005. La corrida fue realizada el 18 de agosto de 2020, la tabla 9 muestra los resultados resumidos de la corrida.

Tabla 9. Resumen de resultados en la corrida piloto. Fuente: Elaboración propia.

Equipo	Tipo de control	Interruptores procesados	Pruebas de verificación	Aceptación del equipo	Aceptación de pruebas de verificación	Interruptores debajo del límite inferior de especificación	Interruptores por encima del límite superior de especificación	Lotes rechazados	Lotes aprobados
TP-004	Sin control	3550	142	94%	90.8%	10	3	13	129
TP-005	Difuso	3800	152	94.3%	96.7%	2	3	5	147

El análisis de los resultados entre los dos equipos de calibración mostrados arroja una diferencia de 178% en rechazos para el equipo de calibración automática TP-004 sin control contra el del equipo de calibración automática TP-005 con control difuso obteniendo 13 y 5 rechazos respectivamente.

La obtención de datos fue realizada mediante la captura de la información de pruebas de verificación por parte del inspector de calidad conforme al procedimiento interno controlado C305P que define una muestra de un interruptor por cada 25.

Utilizando la ecuación 2, la cantidad de muestras fueron validadas para los dos equipos de calibración automática como muestran las ecuaciones 20 y 21 con valores de nivel de confianza al 95% $Z = 1.96$, probabilidad de éxito $p = 0.5$, probabilidad de fracaso $q = 0.5$ y precisión al 8.5% con $d = 0.085$.

$$n_{TP-004} = \frac{3550 * 1.96^2 * .5 * .5}{.085^2 * (3550 - 1) + 1.96^2 * .5 * .5} = 128.16 \dots (20)$$

$$n_{TP-005} = \frac{3800 * 1.96^2 * .5 * .5}{.085^2 * (3800 - 1) + 1.96^2 * .5 * .5} = 128.46 \dots (21)$$

El número de muestras obtenidas en la corrida son por ende suficientes para realizar la validación del modelo de control.

Las gráficas con los resultados de la corrida de prueba fueron obtenidas utilizando Minitab. La Figura 13 muestra los ajustes de tiempo de precalentamiento en ambos equipos de calibración a lo largo del día. Los valores iniciales de tiempo de

precalentamiento fueron inicializados con el último valor utilizado en cada equipo antes de la corrida. Los puntos azules representan los ajustes de tiempo de precalentamiento en el equipo TP-005 utilizando el control difuso y los puntos rojos al equipo TP-004 sin un control automático. Los ajustes en el equipo sin control se notan más drásticos con brincos de hasta 0.8 segundos de ajuste, por encima del máximo establecido en las funciones de membresía de ajuste de tiempo de precalentamiento definido en 0.5 segundos.

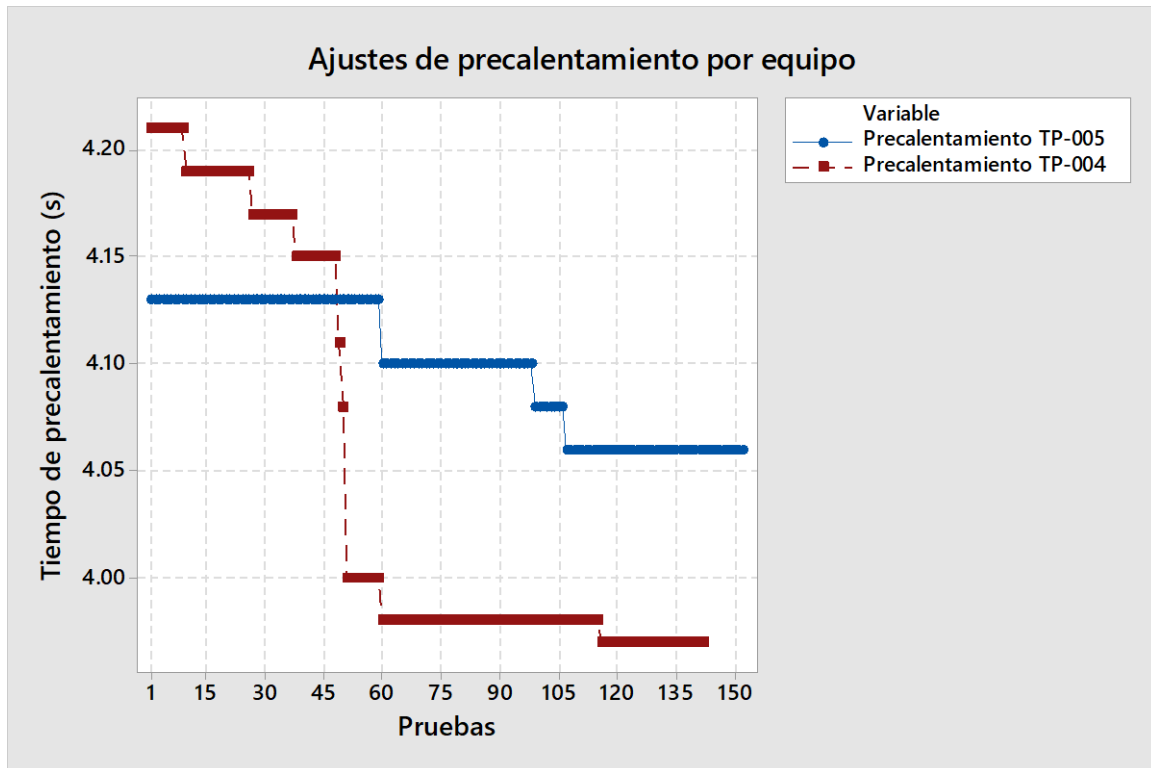


Figura 13. Ajustes de tiempo de precalentamiento.

La Figura 14 muestra la tendencia en tiempos de desconexión de la muestra tomada para el equipo TP-005, indicando tres pruebas con desconexión por encima del límite superior. Si comparamos los ajustes de tiempo de precalentamiento hechos por el control y lo comparamos con la cantidad de rechazos por encima del límite de desconexión superior en la prueba de verificación, obtenemos la misma cantidad, 3 ajustes y 3 rechazos. El sistema de control difuso fue programado para que la entrada de tiempo de desconexión en pruebas de verificación al 135% fuera el tiempo promedio de las pruebas con el tiempo de precalentamiento existente en el equipo. Por ejemplo: Si el tiempo de precalentamiento en el equipo es de 4.1 segundos, el control difuso tomara como entrada

el tiempo promedio de los últimos interruptores probados con ese tiempo de precalentamiento. El tiempo promedio de desconexión en la prueba de verificación para el equipo TP-005 fue de 258 segundos. Cabe destacar que de los tres rechazos por encima del límite superior dos pasaron el proceso de desviación definido en el procedimiento controlado C305P donde indica realizar tres pruebas al interruptor, definiéndolo como aceptable cuanto se desconecta dentro de los límites dos de tres veces.

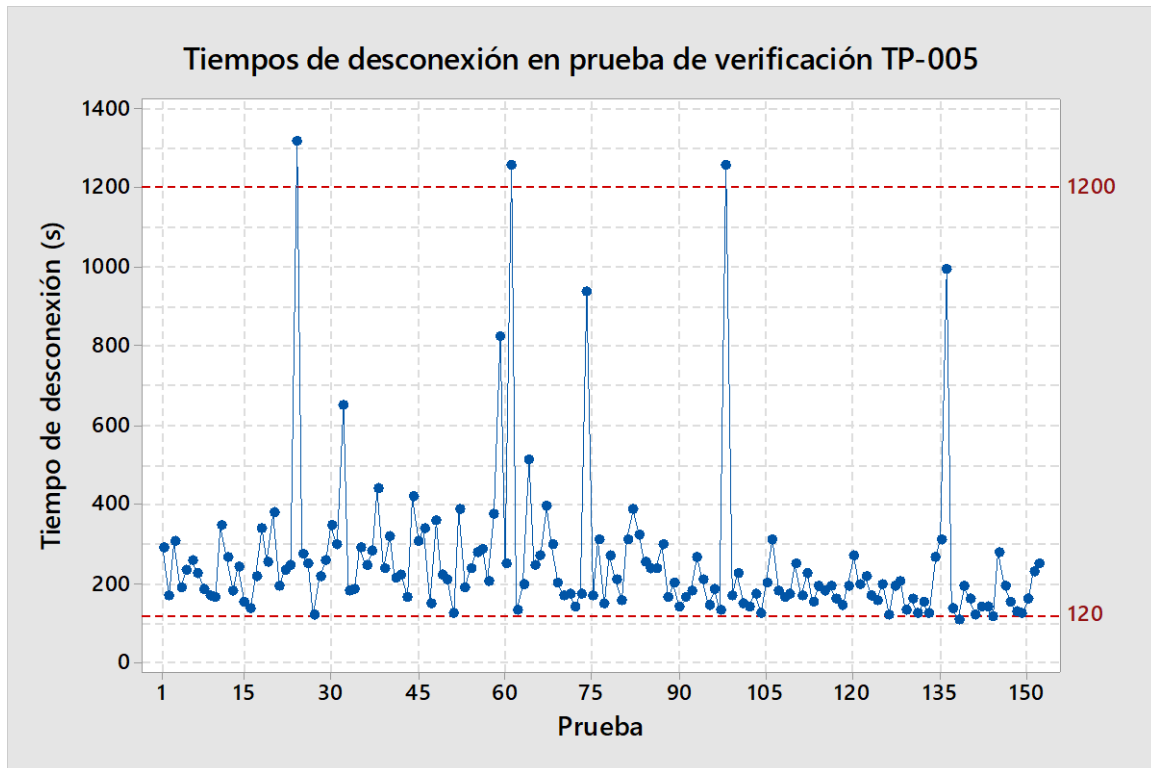


Figura 14. Tiempos de desconexión en verificación en TP-005.

La figura 15 muestra los tiempos de desconexión en pruebas de verificación del equipo sin control automático TP-004. El equipo contó con 13 rechazos, tres por desconexión por encima del límite superior y diez por desconexión por debajo del límite inferior. El promedio de tiempo de desconexión en prueba de verificación del equipo TP-004 fue de 247 segundos. Los tres rechazos por desconexión por encima del límite superior fueron confirmados después del proceso de desviación.

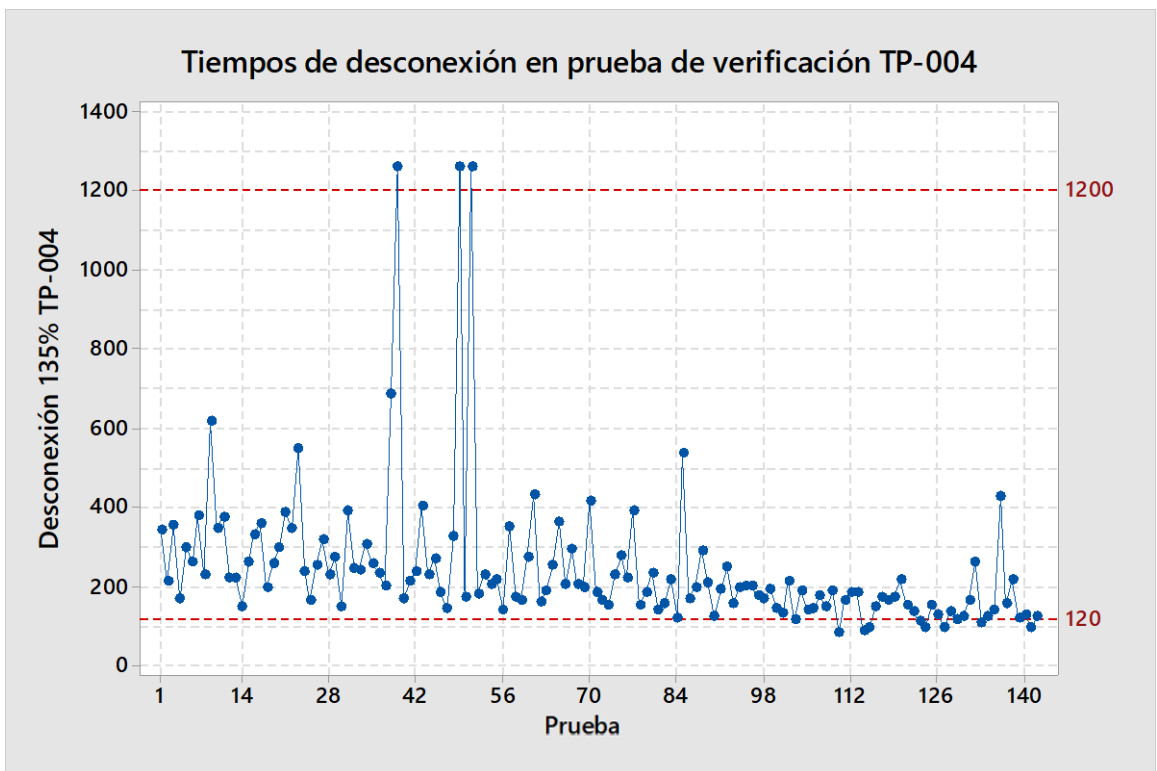


Figura 15. Tiempos de desconexión en verificación en TP-004.

Los resultados de tiempos de desconexión en sorteo para el equipo TP-005 y para el TP-004 se muestran en las figuras 16 y 17. El promedio de tiempo de desconexión en sorteo para cada equipo es de 7.05 y 7.12 segundos respectivamente. La ventana de tiempo de desconexión definida por la empresa es de solo 1.7 segundos con centro en 7.15 segundos, ambos tiempos promedio están por debajo de este valor dando sentido a la tendencia hacia el lado inferior en tiempo de desconexión de la prueba de verificación.

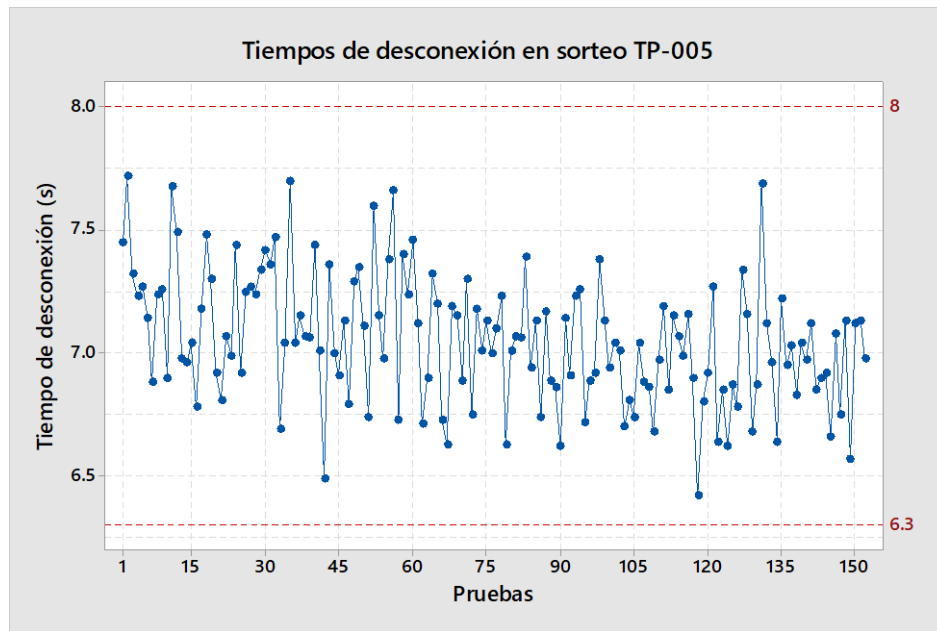


Figura 16. Tiempos de desconexión en sorteo de TP-005.

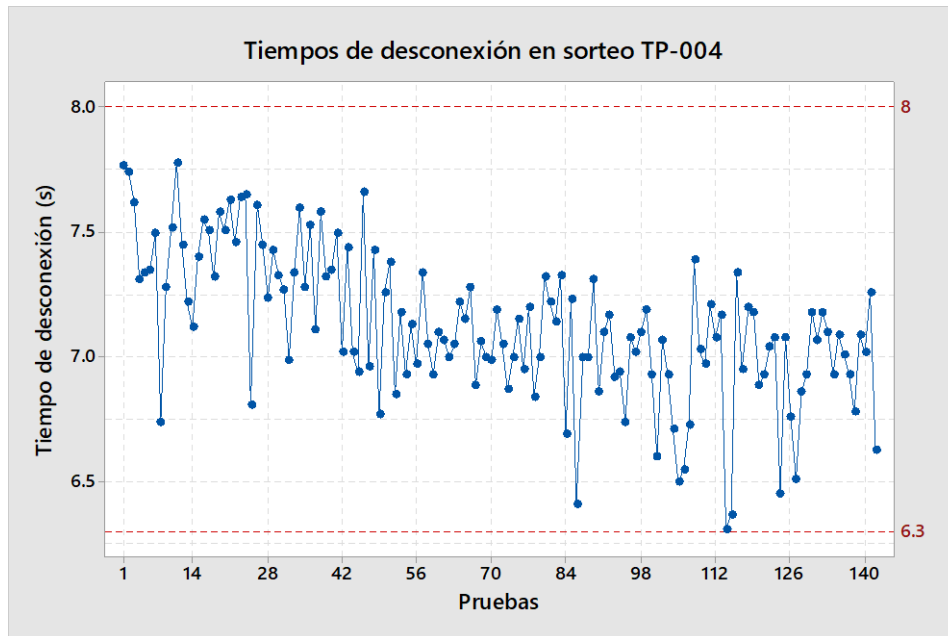


Figura 17. Tiempos de desconexión en sorteo en TP-004.

La tabla 10 muestra un resumen de los resultados clave con información histórica de cada uno de los equipos.

Tabla 10. Resumen de resultados clave. Fuente: Elaboración propia.

Equipo	Promedio tiempo de desconexión en prueba de verificación	Promedio tiempo de desconexión en prueba de verificación historico	Promedio tiempo de desconexión en sorteo	Promedio tiempo de desconexión en sorteo historico	Acpetación prueba de desconexión en prueba de verificación corrida	Acpetación historica de desconexión en prueba de verificación.
TP-004	246.9	213	7.12	6.93	90.8%	97.3%
TP-005	257.8	210	7.05	6.85	96.7%	97.6%

La comparación entre datos de la Tabla 10 fue realizada mediante una prueba de muestra de proporción definida como:

$$H_a = a_{TP-004} < a_{TP-005} \dots (22)$$

$$H_0 = a_{TP-004} \geq a_{TP-005} \dots (23)$$

Donde a_x representa la aceptación de pruebas de verificación del equipo X.

El p_{value} obtenido fue de 0.019, indicando que hay suficiente evidencia estadística para confirmar que la aceptación del equipo sin control TP-004 es menor a la del equipo con control TP-005.

La siguiente prueba muestra de proporción fueron realizadas entre la aceptación del equipo con control y su aceptación histórica.

$$H_a = a_{TP-005} < a_{H TP-005} \dots (24)$$

$$H_0 = a_{TP-005} \geq a_{H TP-005} \dots (25)$$

El p_{value} obtenido fue de 0.272, indicando que no hay suficiente evidencia estadística para decir que la aceptación del equipo con control es menor a la aceptación histórica del mismo.

La siguiente prueba muestra de proporción fueron realizadas entre la aceptación del equipo sin control y su aceptación histórica.

$$H_a = a_{TP-004} < a_{H TP-004} \dots (26)$$

$$H_0 = a_{TP-004} \geq a_{H TP-004} \dots (27)$$

El p_{value} obtenido fue de 0.004, indicando que hay suficiente evidencia estadística para confirmar que la aceptación del equipo sin control es menor a la aceptación histórica del mismo.

Capítulo 6. Conclusiones.

Las siguientes conclusiones fueron obtenidas a partir de los resultados mostrados en el capítulo anterior con las pruebas de proporción definidas y los resultados mostrados en la tabla 10:

1. La reducción de rechazos obtenida de **178%** está por encima del 15% establecido en el objetivo general.
2. La hipótesis planteada se acepta según los resultados. El control difuso disminuye en al menos un 15% la cantidad de rechazos por tiempos de desconexión en pruebas de verificación.
3. El entrenamiento y conocimiento del proceso de los técnicos de mantenimiento afecta directamente el desempeño de los interruptores.
4. El sistema de control difuso permite disminuir la dependencia del conocimiento del técnico de mantenimiento en ajuste de equipos de calibración.
5. La implementación de obtención de datos del sistema de calibración de los interruptores ayudará en proyectos futuros.

La conclusión general es la siguiente:

El control difuso es una herramienta efectiva para mantener las aceptaciones de los equipos de calibración con un buen desempeño de los interruptores en pruebas de verificación disminuyendo en un 178% los rechazos. Una prueba piloto deberá realizarse en otros seis equipos de calibración automática presentes en el área de CAFI/AFI/DF de la planta de Schneider Electric en Tijuana, Baja California para finalizar su implementación en el área.

Lista de referencias bibliográficas

- Palmer, N. (1994). *Circuit Breaker Theory*. Schneider Electric, Estados Unidos.
- Niayesh, K. & Runde, M. (2017). *Power Switching Components*. Springer. Cham. doi: 10.1007/978-3-319-51460-4.
- Schneider Electric (2020). *GF900FC FMEA Control Plan AFI/CAFI/DF*. Schneider Electric. México.
- Schneider Electric (2020). *GF000I Limites de calibración y check test AFI & CAFI*. Schneider Electric. México.
- Schneider Electric (2020). *48001-005-17 Rawstock, Bimetal*. Schneider Electric. Estados Unidos.
- Schneider Electric (2020). *48118-684-01-02 Connector – QO/HOM GFI*. Schneider Electric. Estados Unidos.
- Schneider Electric (2018). *Afectaciones que provoca la temperatura ambiente en el botado de breakers termomagnéticos*. Schneider Electric. México.
- Hutter, F., Kotthoff L. & Vanschoren J (Eds.) (2019). *Automated Machine Learning*. Springer. Estados Unidos. doi: 10.1007/978-3-030-05318-5.
- Chollet, F. (2018) *Deep Learning with Python*. Manning Publications Co. Estados Unidos.
- Singh, H. & Lone, Y. (2020). *Deep Neuro-Fuzzy Systems with Python*. Apress. New York doi: 10.1007/978-1-4842-5361-8.
- Chmielowski, W. (2016). *Fuzzy Control in Environmental Engineering*. Springer. Suiza doi: 10.1007/978-3-319-19261-1.
- Kruse, R., Borgelt, C., Braune, C., Mostaghim S. & Steinbrecher, M. (2016). *Computational Intelligence: A methodological Introduction*. (2da Ed.) Springer. Londres. doi: 10.1007/978-1-4471-7296-3.
- Dolezal, T. (1990). *Principles of Circuit Breakers*. Schneider Electric. Estados Unidos.
- Palmer, N. (1994). *Circuit Breaker Design Manual*. Schneider Electric. Estados Unidos:
- Stephenson, R., Moulin, M. & Welland, E. (1999) *Temperature Measurment*. Consultado el 29 de febrero de 2020 de:
<http://www.autex.spb.su/download/wavelet/books/sensor/CH32.PDF>.
- Shea, J. & Bindas, J. (1993). *Measuring Molded Case Circuit Breaker Resistance*. IEEE Transactions on components, hybrids, and manufacturing technology Vol. 16, No. 2. IEEE. Estados Unidos.
- PwC (2020). *Real Estate 2020 Construyendo el futuro*. PwC: México. Consultado el 29 de febrero de 2020 de:
<https://www.pwc.com/cl/es/publicaciones/assets/2016/real-estate-2020.pdf>

- Carpenter, J., Earley, M. & O'Connor, J. (2005). *National Electrical Code*. NFPA. Estados Unidos.
- Square D (1995). *Circuit Breaker Theory*. Schneider Electric. Estados Unidos.
- UL (2013). *UL489 Standard for safety, Molded-case circuit breakers, Molded-case switches and circuit-breaker enclosures*. Underwriters Laboratories. Estados Unidos.
- Gooch J.W. (2011) *Conductivity*. In: Gooch J.W. (eds) *Encyclopedic Dictionary of Polymers*. Springer, New York, NY.
- Electrical conductivity and resistivity (s.f.)*. NDT Resource Center. Consultado el 29 de Febrero de 2020 de: https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Physical_Chemical/Electrical.htm.
- Rebala G., Ravi A., Churiwala S. (2019) *Machine Learning Definition and Basics*. In: *An Introduction to Machine Learning*. Springer, Cham.
- Rozenberg, G., Bäck, T. & Kok, J. (2012). *Handbook of Natural Computing*. Springer. Berlin. doi: 10.1007/978-3-540-92910-9.
- 2PSYMA LATINA. (2015). *¿Cómo determinar el tamaño de una muestra?* Consultado el 29 de Febrero de 2020 de: <https://www.psyma.com/company/news/message/como-determinar-el-tamano-de-una-muestra>.
- Ali Sadollah (2018). *Introductory Chapter: Which Membership Function is Appropriate in Fuzzy System?* En: Ali Sadollah, *IntechOpen, Fuzzy Logic Based in Optimization Methods and Control Systems and Its Applications*, DOI: 10.5772/intechopen.79552.