

CIATEQ, A. C. Centro de Tecnología Avanzada  
Gerencia de Posgrado



*Desarrollo de dispositivo de confirmación de cobertura de  
pasta Ceramabond 575 en termistores de sensor de  
temperatura*

TESIS QUE PRESENTA

**Ing. Saúl Alejandro Rodríguez Jiménez**  
**Asesor: Dra. Leonor Adriana Cárdenas Robledo**

Para obtener el grado de

**Maestro en  
Manufactura Avanzada**

Aguascalientes, Aguascalientes  
enero, 2024



## CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



**GOBIERNO DE  
MÉXICO**



**CONAHCYT**  
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES  
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



**CIATEQ**

Cunduacán, Tabasco, 24 de noviembre de 2023

**Mtro. Geovany González Carlos**

Coordinador Académico del Posgrado  
CIATEQ, A.C.

El abajo firmante, miembro del Comité Tutorial del Ing. Saúl Alejandro Rodríguez Jiménez, una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis/tesina, titulado "DESARROLLO DE DISPOSITIVO DE CONFIRMACIÓN DE COBERTURA DE PASTA CERAMABOND 575 EN TERMISTORES DE SENSOR DE TEMPERATURA.", autorizo que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de MAESTRO EN MANUFACTURA AVANZADA.

Sin otro particular por el momento, agradezco la atención prestada.

Dra. Leonor Adriana Cárdenas Robledo.

Asesor Académico

Lotes 15, 16 y 17, Manzana 16, Parque Industrial Tabasco Business Center. Autopista Reforma-Dos Bocas  
km. 17+920, Ra. Pechucalco 2ª. Sección (Cruces) C.P. 86693, Cunduacán, Tab. México

Tels: +52 (442) 211 2679, (993) 316 8363, (993) 316 8364, (993) 316 6656 www.ciateq.mx



## CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



GOBIERNO DE  
MÉXICO



CONAHCYT  
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES  
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



CIATEQ

Querétaro, Qro., 19 de diciembre del 2023.

Mtro. Geovany González Carlos  
Gerencia de Posgrado  
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del alumno **Saúl Alejandro Rodríguez Jiménez**, cuyo título es:

**"Desarrollo de dispositivo de confirmación de cobertura de pasta Ceramabond 575 en termistores de sensor de temperatura"**

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el alumno, y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

Dr. Óscar Hernández Uribe

F31b Revisión: 04-Feb-2022

Av. Manantiales No. 20, Parque Industrial Bernardo Quintana Arriola, Lázaro Cárdenas, El Marqués, Qro. México.  
Tel: +52 (442) 196 1500 [www.ciateq.mx](http://www.ciateq.mx)



## AGRADECIMIENTOS

Agradezco:

Primero y ante todo a Dios, por permitirme culminar mis estudios de posgrado y elaborar el presente trabajo de tesis.

A mi esposa Elizabeth y mi hijo Marcos Nahúm, por estar siempre presentes en mi vida y ser pacientes a la espera del término de este trabajo de tesis.

A mis padres Marcost<sup>†</sup> y Juanita, por haberme apoyado durante toda mi vida en mis estudios y haberme enseñado los principios cristianos.

A la Dra. Leonor Cárdenas, por su paciencia y valiosa dirección para la redacción de este trabajo de tesis.

Al Conahcyt y CIATEQ A.C., por proporcionar y gestionar los gastos de colegiatura.

Finalmente, a la compañía Sensata Technologies, por suministrar los recursos que hicieron posible este trabajo de tesis.

\* \* \*

## RESUMEN

Este trabajo de tesis desarrolla un dispositivo capaz de confirmar el área mínima de cobertura en un termistor por una pasta térmica dispensada y curada en el proceso de fabricación de sensores de temperatura de *recirculación de gases de escape* (EGR, por sus siglas en inglés de Exhaust Gas Recirculation) para proporcionar la fijación requerida en presencia de condiciones de choques mecánicos. Este dispositivo aprovecha el efecto de autocalentamiento del termistor y la conductividad térmica de la pasta para medir la caída de voltaje del sensor, lo cual se traduce en área de cobertura de la pasta. La metodología sigue un procedimiento para el desarrollo de equipos y procesos, considerando una fase inicial de confirmación del concepto para demostrar la viabilidad del desarrollo del dispositivo. En una fase posterior, se calculan los parámetros óptimos y se establecen en el dispositivo para obtener la clasificación correspondiente de los sensores durante la prueba. Una vez puesto en producción, el dispositivo demuestra una gran eficacia en la detección de los sensores con un área de cobertura de pasta rechazable en el termistor.

**Palabras clave:** Autocalentamiento; Termistor; Pasta; Sensor de temperatura; Disipación de calor.

## **ABSTRACT**

This thesis work develops a device capable of confirming the minimum coverage area on a thermistor by a thermal paste dispensed and cured in the manufacturing process of Exhaust Gas Recirculation (EGR) temperature sensors to provide the required fixation in the presence of mechanical shock conditions. Such a device leverages the thermistor's self-heating effect and the thermal conductivity of the paste to read the voltage drop from the sensor, which translates into paste coverage area. The methodology follows a synthesized procedure to develop equipment and processes, considering an early phase for concept confirmation to demonstrate the feasibility of the device development. In a later phase, the optimal parameters are calculated and set to the device for delivering the corresponding classification of the sensors during the test. Once launched in production, the device demonstrates high effectiveness in screening out the sensors with rejectable paste coverage area on the thermistor.

**Keywords:** Self-heating; Thermistor; Paste; Temperature sensor; Heat dissipation.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|  |      |
|--|------|
| RESUMEN .....  | iv   |
| ABSTRACT .....   | v    |
| ÍNDICE DE CONTENIDO .....  | vi   |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....   | viii |
| ÍNDICE DE TABLAS .....   | x    |
| GLOSARIO .....   | xi   |
| 1. INTRODUCCIÓN.....   | 1    |
| 1.1. ANTECEDENTES .....  | 2    |
| 1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....   | 4    |
| 1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA .....  | 4    |
| 1.4. JUSTIFICACIÓN .....   | 5    |
| 1.5. OBJETIVOS.....  | 5    |
| 1.5.1. Objetivo general.....   | 5    |
| 1.5.2. Objetivos específicos .....   | 5    |
| 1.6. HIPÓTESIS.....  | 6    |
| 2. MARCO TEÓRICO .....   | 7    |
| 2.1. EL SENSOR EGR, SUS COMPONENTES Y PRUEBAS ELÉCTRICAS .....                                     | 7    |
| 2.1.1. Funcionamiento del sensor.....  | 7    |
| 2.1.2. Características térmicas y composición de los materiales de<br>componentes del sensor ..... | 9    |
| 2.1.3. Pruebas eléctricas en el sensor EGR .....   | 13   |
| 2.2. TERMISTOR: TIPOS Y CARACTERÍSTICAS.....   | 15   |
| 2.3. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN .....   | 17   |
| 2.4. HERRAMIENTAS DE INGENIERÍA PARA EL ANÁLISIS .....   | 20   |
| 2.4.1. Análisis del sistema de medición.....   | 20   |
| 2.4.2. Capacidad de proceso .....  | 22   |
| 2.4.3. Procedimiento para el desarrollo de equipos y procesos de producción<br>masiva .....        | 23   |
| 2.4.4. Metodología A3.....   | 25   |
| 2.5. TRABAJOS RELACIONADOS.....  | 28   |
| 3. PROCEDIMIENTO.....  | 31   |
| 3.1. CONFIRMACIÓN DE CONCEPTO .....  | 31   |



|   |    |
|---|----|
| 3.1.1. Pruebas concepto .....   | 31 |
| 3.1.2. Definición de voltaje de suministro .....                            | 34 |
| 3.2. INDUSTRIALIZACIÓN.....   | 34 |
| 3.2.1. Definición de la secuencia de prueba .....                           | 34 |
| 3.2.2. Parámetros de prueba.....  | 37 |
| 3.2.3. Herramienta para estimación de parámetros de tiempo de lectura ..... | 37 |
| 3.2.4. Diseño de equipo de producción .....                                 | 44 |
| 3.2.5. Plan de calificación y controles de lanzamiento .....                | 46 |
| 3.3. DESARROLLO DE PARÁMETROS .....   | 47 |
| 3.3.1. Corridas iniciales .....   | 47 |
| 3.3.2. Estimación de parámetros $V_{init}$ y $V_{final}$ .....              | 49 |
| 3.3.3. Estimación de parámetro $V_{delta\_Max}$ .....                       | 51 |
| 3.4. PLAN DE VALIDACIÓN .....   | 58 |
| 4. RESULTADOS .....   | 60 |
| 4.1. CONTROLES DE LANZAMIENTO.....  | 60 |
| 4.2. ESTANDARIZACIÓN Y PREVENCIÓN DE OCURRENCIA.....                        | 63 |
| CONCLUSIONES .....  | 66 |
| RECOMENDACIONES .....   | 67 |
| APORTACIÓN DE LA TESIS.....   | 68 |
| APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS .....   | 69 |
| REFERENCIAS .....   | 70 |
| ANEXO .....   | 75 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Juego de jeringa y aguja con pasta C575.....  | 3  |
| Figura 2. Sensor EGR.....   | 3  |
| Figura 3. Componentes principales del sensor EGR.....   | 8  |
| Figura 4. Calor específico estimado para la pasta C575 a partir de los datos de calor específico y volumen del óxido de aluminio y el óxido de magnesio. ....     | 12 |
| Figura 5. Puntos de contacto para las pruebas eléctricas en el sensor EGR.....  | 14 |
| Figura 6. Divisor de voltaje compuesto por una fuente de 5 voltios, una resistencia de referencia y un sensor EGR conectado a salida de voltaje (Vout). ....      | 14 |
| Figura 7. Curva RT para termistores tipo NTC y PTC.....   | 16 |
| Figura 8. Fuentes de variación del sistema de medición. ....  | 21 |
| Figura 9. Procedimiento para el desarrollo de equipos y procesos de producción masiva. ....   | 23 |
| Figura 10. Metodologías A3 y PDCA.....  | 28 |
| Figura 11. Autocalentamiento en el termistor producto de la aplicación de sobre voltaje.....  | 33 |
| Figura 12. Comportamiento del voltaje de salida medido al aplicar sobre voltaje a sensores con diferentes condiciones de cobertura de pasta C575 en termistor.... | 33 |
| Figura 13. Curva de máximo autocalentamiento en termistor.....  | 35 |
| Figura 14. Curvas de voltaje de sensores EGR con diferentes condiciones de cobertura de pasta C575 en termistor. ....   | 35 |
| Figura 15. Secuencia de prueba del PCTD.....  | 36 |
| Figura 16. Sección 1. Datos de curvas de voltaje. ....  | 40 |
| Figura 17. Sección 2. Configuraciones. ....   | 40 |
| Figura 18. Sección 3. Cálculos principales. ....  | 40 |
| Figura 19. Sección 4. Cálculos auxiliares. ....   | 41 |
| Figura 20. Sección 5. Resumen de resultados.....  | 41 |
| Figura 21. Sección 6. Gráficos de resultados. ....  | 41 |
| Figura 22. Sección 7. Resumen de modelos. ....  | 42 |
| Figura 23. Sección 8. Notas. ....   | 42 |
| Figura 24. Parámetros configurables en módulo Solver.....   | 43 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 25. Estaciones del equipo de producción FFT.....  | 45 |
| Figura 26. Condiciones de cobertura de pasta C575 en piezas de corridas iniciales.<br>.....  | 48 |
| Figura 27. Gráficos de resultados optimizados por Solver. ....   | 51 |
| Figura 28. Histograma de valores Vdelta de 3 mil sensores EGR.....   | 52 |
| Figura 29. Gráfico de probabilidad de valores Vdelta de 3 mil sensores EGR. ....   | 52 |
| Figura 30. Histograma de valores Vdelta del grupo 1.....   | 53 |
| Figura 31. Gráfico de probabilidad de valores Vdelta del grupo 1. ....   | 53 |
| Figura 32. Histograma de valores Vdelta del grupo 2.....   | 54 |
| Figura 33. Gráfico de probabilidad de valores Vdelta del grupo 2. ....   | 54 |
| Figura 34. Histograma de valores Vdelta del grupo 3.....   | 55 |
| Figura 35. Gráfico de probabilidad de valores Vdelta del grupo 3. ....   | 55 |
| Figura 36. Imágenes Rayos X de algunos sensores EGR cuyos valores Vdelta se<br>encuentran en el grupo 1.....   | 56 |
| Figura 37. Imágenes Rayos X de algunos sensores EGR cuyos valores Vdelta se<br>encuentran en el grupo 2.....   | 57 |
| Figura 38. Imágenes Rayos X de algunos sensores EGR cuyos valores Vdelta se<br>encuentran en el grupo 3.....   | 57 |
| Figura 39. Estudio Cpk para Vdelta. ....   | 59 |
| Figura 40. Condición de cobertura de pasta C575 en algunos sensores rechazados<br>por las dos detecciones durante el periodo de controles de lanzamiento. .... | 63 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Costos asociados con inspección Rayos X en línea EGR.....  | 4  |
| Tabla 2. Componentes principales del sensor EGR y materiales que los constituyen.<br>.....  | 9  |
| Tabla 3. Propiedades térmicas de los materiales con los que los componentes<br>principales del sensor EGR se fabrican.....  | 13 |
| Tabla 4. Efecto del autocalentamiento del termistor en la resistencia y caída de<br>voltaje.....  | 33 |
| Tabla 5. Función actual y posterior a implementación del PCTD de las estaciones<br>de equipo de producción FFT.....   | 45 |
| Tabla 6. Criterios de aceptación y rechazo de cobertura de pasta C575 en<br>termistores. ....   | 48 |
| Tabla 7. Orden de prueba de piezas en corridas iniciales y para estudio GR&R. ..  | 49 |
| Tabla 8. Extracto de parámetros relevantes de la sección Configuraciones del<br>Analizador. ....  | 50 |
| Tabla 9. Tabla de conteos de la sección Resumen de resultados del Analizador..  | 50 |
| Tabla 10. Tabla de estadísticos de la sección Resumen de resultados del<br>Analizador. ....   | 50 |
| Tabla 11. Tabla de resultados del estudio GR&R para Vdelta. ....  | 58 |
| Tabla 12. Resumen general de resultados de sensores aceptados y rechazados<br>por detección PCTD y Rayos X. ....  | 60 |
| Tabla 13. Sensores rechazados por la detección por PCTD durante los controles de<br>lanzamiento, atendiendo a las condiciones de cobertura de pasta C575. ....    | 61 |
| Tabla 14. Sensores rechazados por la detección por Rayos X durante los controles<br>de lanzamiento, atendiendo a las condiciones de cobertura de pasta C575. .... | 62 |

## GLOSARIO

**5 porqués, análisis:** Es una herramienta utilizada en el análisis de causa raíz de un problema planteado que consiste en preguntar *por qué* éste ocurrió y contestarlo con un enunciado que de igual manera deberá ser cuestionado con un porqué, este proceso continúa hasta que cinco porqués son contestados; la respuesta al porqué final tiene una alta probabilidad de ser la causa raíz del problema.

**A3, metodología:** Es una metodología desarrollada por Toyota para contar la historia de una mejora. Sus dos funciones básicas es servir como un método para hacer propuestas e informar las acciones aprobadas. La metodología debe su nombre a la designación de la Organización Internacional de Normalización para el formato de papel A3, el cual tiene dimensiones de 297 por 420 milímetros.

**Calor:** Se define como la energía que fluye debido a la diferencia en temperatura.

**Calor específico:** Es la energía que se requiere para incrementar la temperatura de una unidad de masa de una sustancia en un grado. Representada con letras  $C_p$ .

**Capacidad de calor específico:** Indica la capacidad de una sustancia para almacenar calor. Se representa mediante la combinación de las letras  $pC_p$ .

**Coefficiente de expansión térmica:** Es la propiedad de los materiales que es un indicativo del grado en que se expanden al ser calentados. Tiene unidades  $^{\circ}C^{-1}$ .

**Conductividad térmica:** Se refiere a la habilidad intrínseca de un material de transferir o conducir calor.

**Cpk:** Caracteriza la relación existente entre la media estadística de un proceso y su distancia al límite de especificación, por el cual el proceso dará un resultado menos correcto. Es el índice utilizado para saber si el proceso se ajusta a las tolerancias, es decir, si la media natural del proceso se encuentra centrada o no con relación al valor nominal del mismo. Se considera que el proceso está dentro de las especificaciones si el índice Cpk es mayor o igual a 1.33.

**Curado:** Conocido por el término en inglés *Cure*, se refiere al proceso en el que, debido a una reacción química en una sustancia, ésta se endurece y se forma una red estructural a nivel molecular.

**Densidad:** Magnitud escalar referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de sustancia o un objeto sólido. Se representa con la letra griega  $\rho$  (ro).

**Difusividad térmica:** Es una propiedad específica de cada material para caracterizar la conducción de calor en condiciones no estacionarias. Este valor describe cuán rápido un material reacciona a un cambio de temperatura.

**Dispositivo:** Un objeto inventado o adaptada para un fin particular, especialmente una pieza de un equipo mecánico o eléctrico.

**Distribución lognormal:** En probabilidad y estadística, la distribución lognormal es una distribución de probabilidad continua de una variable aleatoria cuyo logaritmo está normalmente distribuido.

**Distribución normal:** En probabilidad y estadística, se llama distribución normal, a una de las distribuciones de probabilidad de variable continua que con más frecuencia aparece en estadística y en la teoría de probabilidades. Es un modelo que aproxima el valor de una variable aleatoria a una situación ideal, dependiendo de la media y la desviación estándar.

**Distribución Weibull:** En probabilidad y estadística, la distribución de Weibull es una distribución de probabilidad continua. Se describe según los parámetros de forma, escala y valor umbral y también se conoce como la distribución de Weibull de 3 parámetros.

**Ecuaciones diferenciales:** Es una ecuación matemática que relaciona una función con sus derivadas. En la matemática aplicada, las funciones usualmente representan cantidades físicas, las derivadas representan sus razones de cambio y la ecuación define la relación entre ellas.

**Efecto de autocalentamiento:** Es un efecto que se presenta cuando una corriente fluye a través de una resistencia, ya sea fija o variable.

**EGR:** Siglas en inglés del nombre *Exhaust Gas Recirculation Temperature*, que se refiere al sistema de recirculación de gases del vehículo motor a base de Diesel en el que el sensor de temperatura es instalado. Este es también el nombre de la línea de producción en Sensata Technologies donde el sensor EGR es fabricado.

**Error de medición:** Se define como la diferencia entre el valor medido y el valor verdadero. Los errores de medición afectan a cualquier instrumento de medición y pueden deberse a distintas causas. Las que se pueden de alguna manera prever, calcular, eliminar mediante calibraciones y compensaciones, se denominan deterministas o sistemáticos y se relacionan con la exactitud de las mediciones.

**Error tipo 1:** En un estudio de investigación, el error de tipo I, también denominado error de tipo alfa o falso positivo, es el error que se comete cuando el investigador rechaza la hipótesis nula siendo esta verdadera en la población.

**Error tipo 2:** En un estudio de investigación, el error de tipo II, también llamado error de tipo beta, se comete cuando el investigador no rechaza la hipótesis nula siendo esta falsa en la población.

**Estado estable (o estacionario):** Se dice de un sistema o proceso que está en estado estacionario si las variables que definen su comportamiento, respecto del tiempo, permanecen invariantes.

**Estado transitorio:** Se dice de un sistema o proceso que está en estado transitorio si las variables que definen su comportamiento, respecto del tiempo, permanecen cambiantes.

**FFT:** Siglas en inglés de *Final Function Test*, que es un equipo de producción para pruebas funcionales finales.

**Función objetivo (optimización):** Es aquella función que se optimiza, ya sea maximizando, minimizando o igualando su resultado a un valor deseado.

**Gradiente:** Razón entre la variación del valor de una magnitud en dos puntos próximos y la distancia que los separa.

**Hardware:** Conjunto de los componentes que integran la parte material de una computadora. También se refiere a todos los componentes electrónicos, eléctricos, electromecánicos, mecánicos, cableados y tarjetas de circuitos impresos.

**Histograma de frecuencias:** En estadística, un histograma es una representación gráfica de una variable en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados.

**Industrialización:** Indica el paso de un sistema de producción artesanal a un sistema de producción fundado en el empleo de máquinas.

**Medición:** Es un proceso básico de la ciencia que se basa en comparar una unidad de medida seleccionada con el objeto o fenómeno cuya magnitud física se desea medir, para averiguar cuántas veces la unidad está contenida en esa magnitud.

**MSA:** Siglas en inglés del nombre *Measurement System Analysis*, que se refiere a la evaluación exhaustiva de un sistema de medición y normalmente incluye un experimento diseñado que busca identificar los componentes de su variación.

**Newtoniano, fluido:** Se le llama así al fluido cuya viscosidad se considera constante.

**NPD:** Siglas en inglés del nombre *New Process Development*, que se refiere a la función de desarrollo de nuevos procesos en Sensata Technologies.

**OEM:** Siglas en inglés del nombre *Original Equipment Manufacturer*, que se refiere al fabricante de equipos originales quien confecciona dispositivos para su utilización en los productos de otras empresas.

**PDCA:** Siglas en inglés de la metodología *Plan-Do-Check-Act*, el cual es un método iterativo de diseño y gestión utilizado en los negocios para el control y la mejora continua de procesos y productos. Tiene su base en el método científico.

**Piezas de verificación:** También llamadas *piezas master*, utilizadas en la industria automotriz como un control para la verificación que un sistema de medición se encuentra categorizando correctamente las unidades sujetas a tal actividad.

**PFMEA:** Siglas en inglés del nombre *Process Failure Mode and Effect Analysis*, que es la metodología utilizada para el análisis del modo de falla y efecto del proceso. Al



documento resultante de la aplicación de esta metodología también se le conoce con el mismo nombre.

**Por lo tanto, análisis:** Es una herramienta que se utiliza en complemento con la herramienta *5 porqués*. Una vez encontrada la posible causa raíz de un problema bajo el proceso *5 porqués*, debe comprobarse de manera sistemática su lógica, pero ahora estableciendo el análisis en forma inversa, esto es, partiendo desde el enunciado causa raíz seguido de un *por lo tanto* y proseguir con el mismo análisis hasta llegar al enunciado del planteamiento del problema; el análisis de causa raíz será robusto si el uso de *por lo tanto* presenta lógica de igual manera.

**Potencia eléctrica:** Es la proporción por unidad de tiempo con la cual la energía eléctrica es transferida por un circuito eléctrico, es decir, la cantidad de energía eléctrica entregada o absorbida por un elemento en un momento determinado.

**Prueba T de dos muestras:** Es un método utilizado para probar si las medias de poblaciones desconocidas de dos grupos son iguales o no.

**Resistividad eléctrica:** Es la propiedad básica de un material que define su capacidad para resistir el paso del flujo eléctrico.

**Sinterizado:** Es el proceso de fabricación por el cual polvos de metal son comprimidos y calentados por debajo del punto de fusión para generar una forma específica de material más denso.

**Sistema:** Es un objeto complejo cuyas partes o componentes se relacionan con al menos alguno de los demás componentes, ya sea conceptual o material.

**Sistema de medición:** Se define como la colección de operaciones, procedimientos, instrumentos de medición y otros equipos, software y personal definido para asignar un número a la característica que está siendo medida.

**Software:** Conjunto de programas y rutinas que permiten a la computadora realizar determinadas tareas.

**Soldabilidad:** Es la capacidad que tienen los materiales para ser unidos mediante procesos de soldadura, considerando sus naturalezas, y lo más importante, sin

presentar daños, transformaciones estructurales perjudiciales, tensiones, o deformaciones en los productos finales.

**Tixotropía:** Es la propiedad de algunos fluidos no newtonianos que muestran un cambio de su viscosidad en el tiempo; cuanto más tiempo se someta el fluido a esfuerzos de cizalla, más disminuye su viscosidad.

**Termistor:** Es un tipo de resistor cuya resistencia eléctrica depende de la temperatura a la que se encuentre sometido.

**Termodinámica (ciencia):** Es una rama de la física que estudia el calor, la temperatura y el trabajo, y cómo estas magnitudes se relacionan entre sí y con otras propiedades físicas de la materia.

**PCTD:** Siglas en inglés del nombre *Paste Coverage Test Device*, que es un instrumento de detección de presencia de pasta envolviendo un termistor mediante la disipación del calor que éste genera al aplicársele una corriente eléctrica que excede el nominal de trabajo.

**Transferencia de calor (ciencia):** La transferencia de calor es el proceso físico de propagación del calor en distintos medios. La subdisciplina de la física que estudia estos procesos se llama a su vez termodinámica.

**Valor P:** En estadística general y pruebas de hipótesis, el valor p se define como la probabilidad de que un valor estadístico calculado sea posible dada una hipótesis nula cierta.

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis aborda la problemática a la que se enfrenta Sensata Technologies en la fabricación de sensores de temperatura para los que se debe asegurar la cantidad y posición de una pasta térmica dispensada dentro de ellos con el fin de cubrir un área mínima del elemento sensitivo que utilizan, conocido como *termistor*. Para resolver este problema, se utilizó un procedimiento para el desarrollo de equipos y procesos de producción masiva, a través del cual se diseñó un dispositivo automático que utiliza el autocalentamiento de los termistores para confirmar la cobertura de la pasta sobre éstos. Este dispositivo utiliza la conductividad térmica de la pasta y la medición del voltaje de salida de los termistores para realizar estas comprobaciones.

Este trabajo no sólo beneficia a Sensata Technologies al eliminar la necesidad de inspecciones adicionales y posibles reclamaciones de los clientes, sino que también aporta nuevos conocimientos a esta y a otras compañías fabricantes del sector. Por otro lado, al implementarse una solución con base en las propiedades térmicas de los componentes del sensor de temperatura, se agrega una aplicación más al abanico de las ya existentes en la industria manufacturera.

En el capítulo 1, se plantean formalmente el problema y la solución propuesta. También se enuncian los objetivos de este trabajo de tesis, así como la hipótesis de investigación. En el capítulo 2, se abordan las cuestiones teóricas que sustentan el planteamiento del problema y se concluye con el análisis de algunos trabajos que abordan temas similares, así como sus coincidencias y diferencias con este trabajo de tesis. En el capítulo 3, se diseña el dispositivo a través del procedimiento mencionado empleado por la compañía. Se ejecutan los elementos de evaluación del plan de validación para determinar que el dispositivo es apto para operar en un ambiente de producción en serie. En el capítulo 4, se analizan los resultados del periodo de post lanzamiento y se documenta la introducción en operación del dispositivo en los diferentes repositorios de la compañía.

## 1.1. ANTECEDENTES

Al menos en una ocasión el lector seguramente ha escuchado hablar de los fluidos newtonianos, y si no es así, vale la pena proporcionar como ejemplo el nombre del fluido más conocido por el ser humano: el agua. La característica por la cual este fluido se denomina *newtoniano* es porque la relación entre la tasa de deformación y el esfuerzo cortante se mantiene linealmente proporcional, a esta relación se le conoce como viscosidad (Çengel y Cimbala, 2017). Debido a esta característica, el agua es capaz de fluir a través de canales de poco o grande diámetro permitiendo determinar el volumen del fluido que pasa por un punto por una unidad de tiempo. Por otro lado, esto no sucede así con los fluidos no newtonianos los cuales se clasifican de diferentes maneras de acuerdo con su comportamiento respecto de su viscosidad.

Una de las clasificaciones dentro de los fluidos no newtonianos es la de *fluidos tixotrópicos* (Larson, 2015), en los cuales la viscosidad se reduce al paso del tiempo cuando se le aplica esfuerzo de deformación desde un estado en reposo y su posterior recuperación de viscosidad con el tiempo cuando el flujo se detiene (Sha et al., 2016).

Es debido a este comportamiento tixotrópico de la pasta conocida como *Ceramabond 575 (C575)*, que la problemática de esta investigación nace. Dicha pasta es aplicada mediante un juego de jeringa y aguja de acero inoxidable de 7.6 cm de longitud como se observa en la Figura 1, en un lugar confinado en los sensores de temperatura utilizados en el sistema de *recirculación de gases de escape* (EGR, por sus siglas en inglés, Exhaust Gas Recirculation) del vehículo (Semakula e Inambao, 2017) fabricados en la compañía Sensata Technologies de México, en la línea de producción EGR de la división de negocios *controles de transmisión y sensores de inercia* (TCIS por sus siglas en inglés, Transmission Controls and Inertial Sensors). En la Figura 2 se muestra el esquemático con un corte transversal de un sensor EGR (Rakopoulos et al., 2018).



Figura 1. Juego de jeringa y aguja con pasta C575.  
Elaboración propia

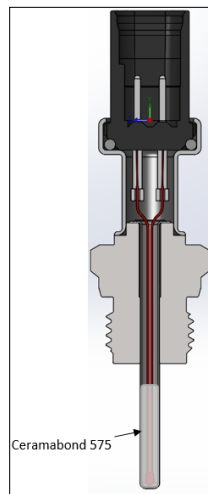


Figura 2. Sensor EGR  
Elaboración propia

La naturaleza tixotrópica de la pasta C575 aunada a la del diseño del sensor EGR, no permiten al ingeniero a cargo asegurar la cantidad y el lugar en el que ésta es depositada, por lo que se vuelve incierta inclusive su presencia. Esta incertidumbre ha generado la necesidad de realizar inspecciones con Rayos X (Shashishekhar, 2017) al 100 % de la producción de este sensor con el fin de asegurar que son embarcados al cliente cumpliendo sus requerimientos. Esto a su vez ha incrementado los costos de producción y llevado a la dirección de la división de negocios a considerar la adquisición de una máquina para inspección de Rayos X ya que la actualmente utilizada pertenece a otra unidad de negocios. En la Tabla 1 se detallan los costos de producción e inversión debido al panorama actual del proceso de dispensado.

Tabla 1. Costos asociados con inspección Rayos X en línea EGR

| Rubro              | Costo o inversión | Año de aplicación |
|--------------------|-------------------|-------------------|
| Mano de obra       | \$31 mil USD      | 2019              |
| Rechazo incorrecto | \$49 mil USD      | 2019              |
| Máquina Rayos X    | \$175 mil USD     | Pendiente         |

Elaboración propia

## 1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La característica tixotrópica de la pasta C575 y la dificultad para observar el interior de la probeta una vez ensamblado el sensor EGR, deriva en la complejidad para asegurar la cantidad y posición en la que la pasta es depositada. Debido a esto, se vuelve incierto que la pasta se encuentre en contacto con el termistor, cubriéndolo en un área mínima necesaria para proveer fijación mecánica ante las condiciones de choques térmicos y vibración (Hanly, 2016) que son parte del perfil de prueba requerido por el cliente.

## 1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA

El sensor EGR está constituido por un termistor de *coeficiente negativo de temperatura* (NTC, por sus siglas en inglés, Negative Temperature Coefficient) que es susceptible a un efecto físico conocido como *efecto de autocalentamiento* (del inglés, Self-heating Effect), el cual ocurre dado que el termistor es básicamente una resistencia que disipa potencia en forma de calor cuando una corriente fluye a través de este (Ebrahimi-Darkhaneh, 2019). Dicho efecto en combinación con la *conductividad térmica* de la pasta C575, se utiliza para el desarrollo e implementación de un dispositivo que permite detectar la presencia de la pasta mediante la confirmación de su cobertura sobre el termistor en sensores de temperatura EGR, el cual se denomina *dispositivo de prueba de cobertura de pasta* (PCTD, por sus siglas en inglés, Paste Coverage Test Device). El PCTD se incorpora en la máquina de producción *prueba de función final* (FFT, por sus siglas en inglés, Final Function Test) y se define la secuencia de prueba para su operación.

## 1.4. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de tesis contribuye con el desarrollo del concepto de detección automática de la pasta C575 a través del PCTD, el cual permite tener certidumbre de que ésta se encuentra en contacto con el termistor para proporcionar fijación mecánica. Esta certidumbre permite eliminar la necesidad de continuar inspeccionando con Rayos X los productos que se fabrican en la línea EGR y obtener los ahorros descritos en la Tabla 1.

No es simple cuantificar el beneficio que la compañía obtiene al evitar reclamos de cliente debidos al efecto ocasionado por el modo de falla *Pasta C575 no cubre termistor de sensor EGR* ya que, durante las pruebas iniciales de lanzamiento, se observó que las lecturas de resistencia eléctrica entre una parte sin pasta y otra con pasta sometidas a temperatura de 135°C, tenían un comportamiento distinto encontrándose la primera fuera de la especificación del cliente.

El beneficio que genera un mayor impacto en el desarrollo de este proyecto es el aporte de conocimiento nuevo para Sensata Technologies y para las compañías manufactureras del ramo.

## 1.5. OBJETIVOS

### 1.5.1. Objetivo general

Desarrollar e implementar en producción masiva un dispositivo automático que permita la detección de la presencia de pasta C575 en posición y cantidad correctas en el área de cobertura del termistor ubicado en el sensor EGR.

### 1.5.2. Objetivos específicos

Para lograr el objetivo general de esta investigación, se dará cumplimiento a los siguientes objetivos específicos.

1. Definir la secuencia de prueba del PCTD.
2. Incorporar el hardware y programar la secuencia de prueba en el software de la máquina de producción FFT.

3. Desarrollar los parámetros de prueba del PCTD.
4. Definir los límites de proceso de la característica caída de voltaje de salida para el rechazo de piezas no conformantes.

## **1.6. HIPÓTESIS**

En un ambiente industrializado, la presencia en la posición de diseño de la pasta C575 puede ser detectada mediante el uso del efecto de autocalentamiento del termistor sometido a un sobre voltaje.



## **2. MARCO TEÓRICO**

En este capítulo se abordan los temas relevantes que sirven como base teórica para el presente trabajo de tesis. En la sección 2.1, se describe de manera básica el funcionamiento del sensor EGR, los materiales de los cuales se encuentran constituidos sus componentes y algunas de las características más importantes relacionadas con la conducción de calor. Posteriormente, en la sección 2.2, se hace mención del funcionamiento del termistor como elemento sensitivo, sus tipos y aplicaciones. Por otra parte, en la sección 2.3, se introducen los conceptos de la conducción de calor que son relevantes para el desarrollo y solución de la problemática, para cuyo análisis se utilizan algunas herramientas de ingeniería y estadística industrial, sobre las cuales se hace mención en la sección 2.4. Finalmente, en la sección 2.5 se presenta un sumario de las investigaciones más recientes respecto a elementos clave de este trabajo de tesis.

### **2.1. EL SENSOR EGR, SUS COMPONENTES Y PRUEBAS ELÉCTRICAS**

Se expone el funcionamiento básico del producto para el mejor entendimiento de la problemática tratada en el presente trabajo de tesis, así como un análisis general de los componentes que se encuentran relacionados con la característica de interés del producto. También se presentan las pruebas eléctricas que se aplican al sensor antes de enviarse al cliente que lo ensamblará en su producto final.

#### **2.1.1. Funcionamiento del sensor**

El sensor EGR se fabrica con diversos componentes fabricados por sub-proveedores. Sin embargo, los componentes principales tales como alambres de conexión, camisas de poliimida, pasta C575, probeta metálica y termistor, son los que se muestran en la Figura 3.

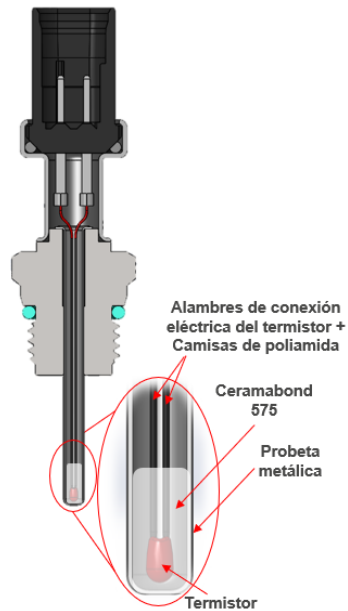


Figura 3. Componentes principales del sensor EGR.  
Elaboración propia

Cuando el sensor EGR se instala y conecta a la *unidad de control eléctrico* (Electrical Control Unit, en inglés) del vehículo (Tutunea et al., 2022), los *alambres de conexión eléctrica del termistor* (desde ahora llamados *alambres del termistor*) reciben y conducen la corriente eléctrica hacia el *termistor*, el cual se opone al paso de ésta. Esta es la característica principal medible en el sensor EGR y se le conoce como *resistencia eléctrica* (Jack et al., 2016). En la operación del producto, existe un riesgo potencial de contacto entre alambres del termistor, y para evitar un corto circuito entre ellos, se encuentran forrados por un aislante eléctrico conocido como *camisas de poliamida*.

La *probeta metálica* del sensor EGR, es la que se encarga de encapsular los componentes internos del sensor (Ahmed, 2020) para mantenerlos protegidos de daños y de las condiciones ambientales con alto nivel de humedad, pero a su vez funge como la interfaz entre el exterior y el interior del sensor. Esta probeta, es el elemento que de primera mano recibe el calor generado en el sistema donde se encuentra instalado y a su vez lo transmite hacia la pasta C575 que ya fue previamente curada y por lo tanto se encuentra endurecida. Posteriormente, la pasta C575 se encarga de transmitir el calor desde la probeta metálica hacia el

termistor, ya que las partículas del primero se encuentran en un estado de mayor energía que las del segundo; a esta forma de transmisión de calor se le conoce como *conducción térmica*. A la habilidad que presentan los materiales de permitir la conducción térmica se le conoce como *conductividad térmica* y forma parte de la *Ley de Fourier* la cual gobierna la difusión térmica a través de los sólidos (Çengel y Ghajar, 2020).

Cuando ocurre un cambio de temperatura en el ambiente que rodea la probeta, por consiguiente, se transmite calor a ésta. Este calor es recibido por la pasta C575 que se encuentra en contacto con la probeta y lo conduce hacia el termistor, mismo que lo detecta y cambia su resistencia eléctrica; se detalla el funcionamiento del termistor en la sección 2.2.

### **2.1.2. Características térmicas y composición de los materiales de componentes del sensor**

Los cinco componentes principales del sensor EGR para el alcance de esta investigación y los materiales que lo constituyen se presentan en la Tabla 2.

A continuación, se enuncian las propiedades térmicas de interés de los materiales que constituyen los componentes del sensor EGR: la conductividad térmica y el calor específico.

Tabla 2. Componentes principales del sensor EGR y materiales que los constituyen.

| Componente del sensor EGR | Material 1            | Material 2 (si aplica) |
|---------------------------|-----------------------|------------------------|
| Alambre del termistor     | Dumet                 |                        |
| Aislante de poliimida     | Poliimida             |                        |
| Pasta C575                | Óxido de aluminio     | Óxido de magnesio      |
| Probeta metálica          | Acero inoxidable 316L |                        |
| Termistor                 | Vidrio                |                        |

Elaboración propia

El *Dumet* es un material bimetálico compuesto de un núcleo de aleación níquel - hierro conocida como *NiFe42* y una cubierta de cobre libre de oxígeno de alta conductividad y cuya principal aplicación es la de servir como alambre de conexión para los productos que requieren sellado hermético vidrio a metal (JLC Electromet Pvt. Ltd., 2016). El *Dumet* posee un *coeficiente lineal de expansión térmica* (CTE por sus siglas en inglés, Coefficient of Thermal Expansion) en el orden del  $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  (JLC Electromet Pvt. Ltd., 2016), lo que lo hace compatible con su aplicación, ya que al incrementar la temperatura del medio en que se encuentra, su expansión no es tal que genere un estrés mecánico tan grande que pueda fracturar el vidrio al que se encuentra insertado; esta compatibilidad se debe principalmente a que el *Dumet* y el vidrio poseen un CTE prácticamente igual (Elektrisola, 2016).

La *resistividad eléctrica* del *Dumet* es ligeramente superior que la del cobre convencional, siendo la primera de  $7.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$  (JLC Electromet Pvt. Ltd., 2016) y la segunda de  $1.7 \times 10^{-8}$  con mismas unidades (Groover, 2015), lo cual hace al *Dumet* menos conductor que el cobre. También, la *conductividad térmica* del *Dumet* es de  $10.28 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  ( $0.1028 \text{ W/cm} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ) (California Fine Wire Co., 2023), menor que  $400 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  del cobre (Groover, 2015), ambos a  $20^{\circ}\text{C}$ . Por último, del *calor específico* del *Dumet* no se tiene referencia directa en otras fuentes, sin embargo, dado que el volumen del *NiFe42* representa el 99.996 % del *Dumet* considerando el grosor del recubrimiento de cobre en al menos 2 micras (JLC Electromet Pvt. Ltd., 2016), se asumirá para el *Dumet* el calor específico que el del *NiFe42*:  $500 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}$  a temperatura ambiente (Kanthal AB, 2021).

La *poliimida*, material del cual los aislantes del sensor EGR están fabricados, es un *polímero* que por definición es un tipo de compuesto formado por cadenas de grandes moléculas; cada molécula consiste en repetidas unidades conectadas entre ellas. De manera más específica, la *poliimida* se clasifica como *polímero termofijo* debido a su incapacidad para regresar a su estado sólido original después de haber sido calentado y ser luego enfriado (Groover, 2015).

La *conductividad térmica* de la *poliimida* se encuentra en el rango de  $0.12 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  a  $23^{\circ}\text{C}$  (McKeen, 2017), lo que es muy bajo en comparación con el *Dumet*. De

acuerdo con McKeen (2017), el CTE de la poliimida es de  $20 \times 10^{-6}/K$ , y su calor específico de  $1090 \text{ J/Kg} \cdot K$ .

La pasta C575 está constituida principalmente por dos materiales compuestos: el óxido de aluminio y óxido de magnesio. El primero se encuentra presente en la pasta C575 en concentración promedio de 75 % y el segundo en 15 %. El porcentaje restante lo componen otros materiales de menor relevancia para fines del análisis que se realiza en este trabajo de tesis.

El óxido de aluminio (también conocido como *alúmina*) es un material cerámico que posee una conductividad térmica de  $39 \text{ W/m} \cdot K$  a temperatura ambiente, así como un calor específico de  $775 \text{ J/Kg} \cdot K$  (Callister y Rethwisch, 2018). Entre las aplicaciones más importantes de este compuesto se encuentra el fungir como material aislante eléctrico y térmico debido a su estabilidad química y buen desempeño en el aislamiento eléctrico (Khumalo y Khoathan, 2019).

A su vez, la conductividad térmica del óxido de magnesio (también conocido como *magnesia*) es de  $37.7 \text{ W/m} \cdot K$  a temperatura ambiente y posee un calor específico de  $940 \text{ J/Kg} \cdot K$  (Callister y Rethwisch, 2018).

Respecto de la pasta C575, no se cuenta con información de parte del proveedor acerca de la conductividad térmica y calor específico, y tampoco en fuente alguna en internet debido principalmente a que este es un compuesto que se fabrica para Sensata Technologies exclusivamente. A pesar de esto, es posible estimar el calor específico ( $C_{p \text{ mezcla}}$ ) utilizando la *calculadora de la regla de mezclas* (traducción al español de Rule of Mixtures Calculator) desarrollada por Thermtest (Thermtest, 2017), la cual realiza el cálculo mediante el uso de la Ecuación 1. En esta ecuación, se incorpora el calor específico ( $C_p$ ) y la masa ( $m$ ) de los  $n$  compuestos que integran la mezcla. La Figura 4 muestra los resultados al resolver para la pasta C575 mediante los datos de calor específico y volumen del óxido de aluminio y del óxido de magnesio; el calor específico estimado de éste es  $802.5 \text{ J/Kg} \cdot K$ .

Para la conductividad térmica de una mezcla, Xu y Yamazaki (2008) desarrollaron un método de estimación que se basa en la densidad, calor específico y

conductividad térmica de los compuestos que la integran, sin embargo, este análisis se encuentra más allá del alcance de este trabajo de tesis. Para fines prácticos y dado que los valores de conductividad térmica del óxido de aluminio y óxido de magnesio son similares entre sí, únicamente se les promedia para obtener una estimación para la pasta C575. Esta estimación resulta en 38.4 W/m\*K.

$$C_{p\text{ mezcla}} = \left( \frac{m_1}{m_{\text{mezcla}}} \right) C_{p1} + \left( \frac{m_2}{m_{\text{mezcla}}} \right) C_{p2} \quad (1)$$

### RULE OF MIXTURES CALCULATOR - Results

Thank you for using our rule of mixtures calculator. Your results are displayed below.

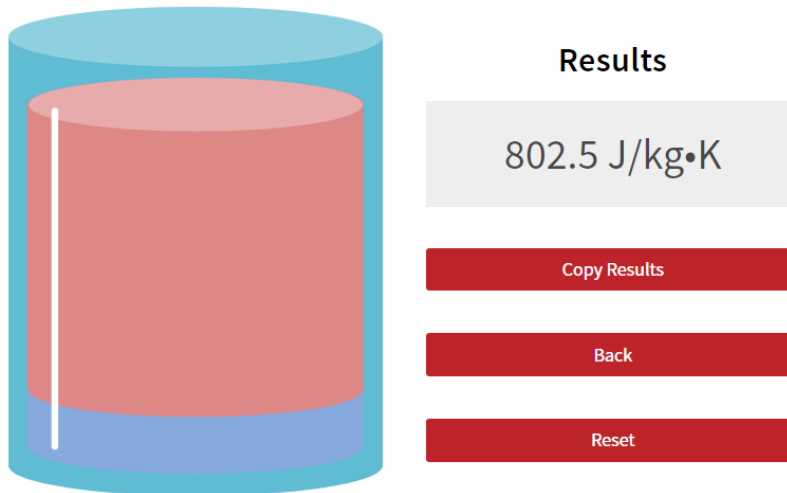


Figura 4. Calor específico estimado para la pasta C575 a partir de los datos de calor específico y volumen del óxido de aluminio y el óxido de magnesio.

Thermtest, 2017

El material del que está compuesta la probeta metálica es acero inoxidable 316L, el cual posee características térmicas prácticamente iguales a las de su homónimo 316, sin embargo, tienen como principal diferencia que el primero posee un menor contenido de carbón que el segundo. Esta diferencia le proporciona mayor soldabilidad al acero inoxidable 316L y más alta resistencia a la corrosión (Bevan et al., 2017). La conductividad térmica del acero inoxidable 316L es de 15.9 W/m\*K, lo

cual es relativamente bajo considerando que se trata de un metal; su calor específico es de 502 J/Kg\*K.

Finalmente, el vidrio, material que encapsula el elemento sensitivo del termistor, tiene forma de gota y se encuentra en contacto directo con los alambres de Dumet y la pasta C575. En este último, la porción de vidrio se encuentra envuelta y su grado de cobertura es proporcional a la disipación del calor generado por sobre corriente en el termistor.

El vidrio posee una conductividad térmica de 0.78 W/m\*K (Çengel y Cimbala, 2017) y un calor específico de 800 J/Kg\*K (Ulizio, 2015).

Se resumen en la Tabla 3 las propiedades térmicas de los materiales de los cuales están hechos los principales componentes del sensor EGR.

Tabla 3. Propiedades térmicas de los materiales con los que los componentes principales del sensor EGR se fabrican.

| Componente del sensor EGR | Material                                | Conductividad térmica (W/m*K) | Calor específico (J/Kg*K) |
|---------------------------|---|-------------------------------|---------------------------|
| Alambre del termistor     | Dumet                                   | 10.28                         | 500                       |
| Aislante de poliimida     | Poliimida                               | 0.12                          | 1090                      |
| Pasta C575                | Óxido de aluminio,<br>Óxido de magnesio | 38.40                         | 802.5                     |
| Probeta metálica          | Acero inoxidable 316L                   | 15.90                         | 502                       |
| Termistor                 | Vidrio                                  | 0.78                          | 800                       |

Elaboración propia

### 2.1.3. Pruebas eléctricas en el sensor EGR

Las pruebas eléctricas que se aplican al sensor EGR en el equipo de producción FFT son dos: prueba de continuidad eléctrica y prueba de aislamiento eléctrico.

La primera de ellas se basa en la aplicación de 5 voltios en los puntos 1 y 2 que se muestran en la Figura 5 y en la obtención de una lectura del cambio en la salida de voltaje que la resistencia eléctrica del termistor en el circuito eléctrico causa. Tal cambio se debe encontrar dentro de límites de prueba predefinidos por el

ingeniero desarrollador del proceso de tal forma que se pueda asegurar que la pieza tiene continuidad eléctrica. De tal manera que sea posible obtener una lectura de voltaje, el termistor debe encontrarse dentro de un arreglo de dos resistencias eléctricas en un circuito eléctrico conocido como *Divisor de voltaje*, cuya principal función es escalar el voltaje de alimentación a un valor menor con base en la proporción de las dos resistencias que lo componen (Zeng y Zeng, 2021); un ejemplo de divisor de voltaje se puede observar en la Figura 6.

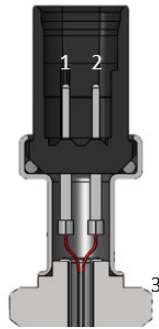


Figura 5. Puntos de contacto para las pruebas eléctricas en el sensor EGR.  
Elaboración propia

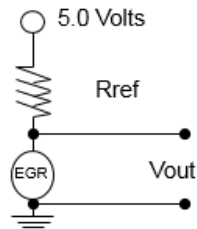


Figura 6. Divisor de voltaje compuesto por una fuente de 5 voltios, una resistencia de referencia y un sensor EGR conectado a salida de voltaje (Vout).  
Sensata Technologies, 2016

Tanto en el equipo de producción FFT como en el sistema de recirculación de gases del vehículo, el sensor EGR es conectado como componente de un divisor de voltaje y dado que el primero es esencialmente un dispositivo con resistencia eléctrica variable con base en la temperatura del ambiente en que se encuentra, la lectura de voltaje también es variable. Esta lectura es interpretada por la computadora del vehículo de acuerdo con los parámetros que el OEM programa.



La segunda prueba eléctrica tiene como función corroborar que no haya flujo de corriente eléctrica de un punto a otro. Para esta prueba, el equipo de producción FFT toca en dos puntos en el sensor EGR: en el circuito formado por 1 y 2 en la Figura 5 y la carcasa metálica, representada por el punto 3 en la misma figura. Para el circuito, los puntos 1 y 2 son tocados por puntas de medición conocidas como *pogo*, las cuales son carcasas metálicas muy delgadas con un resorte de cobre como alma que les permite ajustarse a cierta altura; también, éstas tienen una cubierta muy fina de oro (Hart, 2016). Entre 1 y 2 se encuentra un puente que les permite entrar en corto circuito, de esta manera ambas partes del circuito eléctrico son evaluados. La prueba de aislamiento eléctrico en el sensor EGR tiene como objetivo confirmar que no exista flujo de corriente desde la carcasa metálica hacia las terminales del termistor, a través de la pasta C575. Dado que este componente es de origen cerámico, una vez curado posee una alta resistividad eléctrica, y sin embargo debido a un curado incompleto (aún presencia de humedad) puede eventualmente formar micro puentes entre ambos elementos de prueba ante una alta densidad de flujo de corriente. A este fenómeno se le conoce como *electromigración* (Rahman et al., 2016), y es causante de muchos problemas por corto circuito en componentes electrónicos de la industria, incluyendo el sensor EGR.

La prueba de aislamiento eléctrico se aplica mediante un equipo conocido como *Hipot*, (abreviatura en inglés de High Potential). Generalmente la prueba se realiza con altos voltajes aplicados por algunos segundos. Para el sensor EGR, se aplican 500 voltios por 2 segundos. Al finalizar este periodo de tiempo, el Hipot toma una lectura, misma que es juzgada contra límites predefinidos por el ingeniero desarrollador del proceso.

## **2.2. TERMISTOR: TIPOS Y CARACTERÍSTICAS**

Como se mencionó en la sección 2.1.2, el elemento sensitivo del sensor EGR es el termistor. De acuerdo con Yang y Lin (2018) el termistor es un resistor térmicamente sensitivo cuya principal función es la de presentar un cambio en la resistencia eléctrica en respuesta a un cambio en su temperatura.

Existen dos tipos de termistores: de *coeficiente negativo de temperatura* (Iyere et al., 2020) y de *coeficiente positivo de temperatura* (NTC y PTC, respectivamente por sus siglas en inglés de Negative Temperature Coefficient y Positive Temperature Coefficient), los cuales se construyen de diferentes materiales que reaccionan en un modo específico ante un cambio de temperatura (Awalt, 2020).

En el caso particular del sensor EGR, el tipo de termistor es el NTC. Este tipo de termistores se construyen mediante el sinterizado de mezclas de óxido metálicos a altas temperaturas (Button, 2015). La característica principal del termistor NTC es que posee una caída en resistencia eléctrica casi de manera exponencial con el incremento en temperatura (Schubert et al., 2019), mientras que el termistor PTC muestra un incremento de resistencia como respuesta al incremento en la temperatura, como puede observarse en la curva *Resistencia-Temperatura* (curva RT) en la Figura 7.

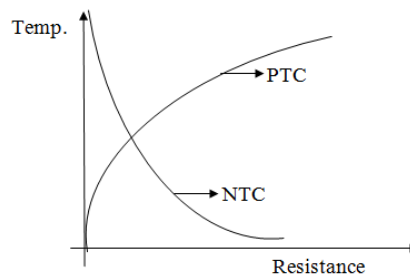


Figura 7. Curva RT para termistores tipo NTC y PTC  
Jack et al., 2016

Una característica importante del termistor NTC, de acuerdo con Jack et al. (2016) y por la cual suelen utilizarse ampliamente es el relativamente alto nivel de resistencia eléctrica en el que operan, ya que a temperatura ambiente (25 °C) su valor se encuentra en un rango de miles a millones de ohms. Una ventaja de este hecho es que se minimiza el error de medición debido a la resistencia eléctrica que los alambres del termistor inherentemente proporcionan.

Las aplicaciones del termistor NTC son muchas, algunas de las más importantes se sitúan en el automóvil, como la medición de temperatura en el sistema de

enfriamiento, aceite de la transmisión, convertor catalítico y entrada de aire por el múltiple de admisión (Dragos et al., 2018).

En *electrónica de potencia*, los termistores NTC se utilizan para la medición de la temperatura a través del uso de una *unidad de microcontrolador* (MCU, por sus siglas en inglés de Microcontroller Unit). Para esta aplicación, el método utilizado para calcular la temperatura a partir de los valores de resistencia es importante ya que determina la cantidad de trabajo previo requerido de parte del MCU, la complejidad del cálculo, precisión esperada y finalmente los recursos del propio MCU (Petkovšek et al. 2021).

Petkovšek et al. (2021), compararon cuatro métodos de cálculo de la temperatura a partir de la resistencia medida por el termistor NTC, los cuales son: *Interpolación de los valores provistos por fabricante del termistor*, *Aproximación polinomial*, *Ecuación Beta* y *Ecuación Steinhart-Hart*. Ellos encontraron que el primer y cuarto método (en orden de aparición) son superiores en términos de precisión en el rango entero de temperatura. Sin embargo, también observaron que si se restringe el rango de temperatura dentro de los -10 a 50 °C, el método de aproximación polinomial es aún mejor en términos de precisión y tiempo de cálculo. Este es precisamente el método que Sensata Technologies utiliza para el cálculo de temperatura a partir de los valores de resistencia del termistor y por lo tanto el que se sigue en este trabajo de tesis; método de cálculo que se basa en un polinomio de sexto orden mediante el uso de la función LINEST (en español ESTIMACION.LINEAL) en Excel.

### **2.3. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN**

En *ingeniería mecánica*, se estudian mayormente dos grandes áreas: la *termodinámica* y la *transferencia de calor* (Forsberg, 2021). De acuerdo con Forsberg (2021), la diferencia principal entre ambas áreas es que la termodinámica considera la cantidad de energía que es transferida durante los procesos de un sistema desde un estado de equilibrio a otro sin involucrar el tiempo que le tome en hacerlo. Mientras que la transferencia de calor agrega esta dimensión a sus

procesos de energía y el interés principal es la determinación de la velocidad con la que estos procesos ocurren (Çengel y Ghajar, 2020).

En transferencia de calor, se estudian los tres modos conocidos con los que el calor es transferido, estos son: conducción, convección y radiación. El presente trabajo de tesis se enfoca sólo en la conducción, la cual se define como el modo de transferencia de calor que se efectúa desde las partículas con mayor energía en una sustancia hacia aquellas adyacentes de menor energía, como resultado de las interacciones entre ellas (Çengel y Ghajar, 2020).

En el modo de conducción el calor fluye a través de un medio sólido debido a la existencia de un gradiente de temperatura en éste; el flujo ocurre desde la región de mayor a la de menor temperatura. La velocidad de transferencia del calor mediante conducción ( $q_k$ ) es proporcional al gradiente de temperatura ( $dT/dx$ ) por unidad de área ( $A$ ) a través de la cual el calor es transferido; esta relación se ilustra en la Ecuación 2 adaptada de Kreith et al. 2018.

$$q_k \propto A \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

En la relación expresada en la Ecuación 2,  $T$  representa la temperatura de manera local mientras que  $x$  es la distancia en dirección del flujo de calor. La Ecuación 3 adaptada de Kreith et al. 2018., representa la velocidad real de transferencia de calor ya que incorpora la conductividad térmica ( $k$ ) que fue previamente definida en la subsección 2.1.1, y el sentido en que se transfiere el calor denotado por el signo negativo. Este cambio de signo es una consecuencia de la segunda ley de la termodinámica, misma que restringe el flujo de calor en la dirección de mayor a menor temperatura (Kreith et al, 2018).

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

La Ecuación 3 es conocida como la *Ley de Fourier para la conducción de calor* (Çengel y Ghajar, 2020).

Utilizando como base la ecuación de la Ley de Fourier, si ambos miembros se dividen por el área a través de la cual el calor es transferido, se obtiene una derivación de esta relación conocida como *flujo de calor* (heat flux, en inglés), la cual se define como la velocidad de transferencia de calor por unidad de área. Esta es el área de la sección transversal a través de la cual, de manera perpendicular el calor se transfiere (Forsberg, 2021). En la Ecuación 4 adaptada de Kreith et al. 2018., se establece la relación entre el flujo de calor, el gradiente de temperatura y la conductividad térmica del medio.

$$\frac{q_k}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

De modo que sea posible la caracterización de la transferencia de calor a través de un cuerpo mediante conducción, es necesario introducir un término que deriva del calor específico y se conoce como *capacidad de calor específico*, el cual se define como la cantidad de calor necesaria para incrementar la temperatura de una unidad de masa, en una unidad. Calor específico y capacidad de calor específico son términos que describen la capacidad con la que un cuerpo almacena el calor, sin embargo, el primero lo hace por unidad de masa mientras que el segundo por unidad de volumen (Çengel y Ghajar, 2020). También, existe un término que relaciona la conductividad térmica y capacidad de calor específico que es conocido como *difusividad térmica*, la cual representa la rapidez con la que el calor se propaga a través de un material. La Ecuación 5 adaptada de Çengel y Ghajar, 2020, establece la relación existente entre conductividad térmica, difusividad térmica y capacidad de calor específico en donde la letra griega  $\rho$  (ro) representa la densidad del material del que el cuerpo se encuentra constituido y  $C_P$  es el calor específico; ambos en combinación representan la capacidad de calor específico.

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (5)$$

Difusividad térmica es un término que se emplea mayormente cuando se trata de un sistema en el que se transfiere calor por conducción y en el que las variables que definen su comportamiento se encuentran cambiantes respecto al tiempo; un sistema bajo tales condiciones, se dice que se encuentra en *estado transitorio* (o en estado no estable) (Çengel y Ghajar, 2020). Opuestamente, un sistema en *estado estable* es aquel cuyas variables involucradas no cambian respecto al tiempo, este es el caso del sistema formado por los componentes del sensor EGR.

## 2.4. HERRAMIENTAS DE INGENIERÍA PARA EL ANÁLISIS

Se exponen algunas herramientas que se utilizan en el análisis de sistemas de medición y para la solución de problemas de ingeniería.

Respecto de los sistemas de medición, en la subsección 2.4.1 se introducen los conceptos relevantes para llevar a cabo su análisis con enfoque en la descomposición de la variación total observada en sus componentes. En la industria, mayormente en la automotriz, es necesario conducir este análisis previo a proceder con el cálculo de la capacidad de cualquier proceso de producción, acerca de este último se trata la subsección 2.4.2.

Por otra parte, se describen en la subsección 2.4.3 las fases del procedimiento para el desarrollo de procesos y producción masiva. Por último, en la subsección 2.4.4 se abordan los pasos de los que se compone la metodología A3, la cual es utilizada ampliamente por la compañía Sensata Technologies.

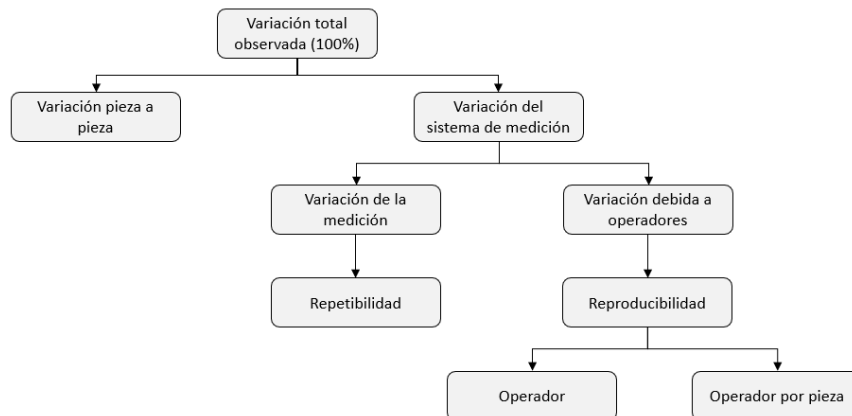
### 2.4.1. Análisis del sistema de medición

De acuerdo con Figliola y Beasley (2019), *medición* es el acto de asignar un valor específico a una variable física. En cualquiera que sea el contexto, el resultado de la medición está sujeta a *error* proveniente de diferentes fuentes como el

instrumento utilizado, la persona que la realiza y las condiciones en las que ésta se efectúa; al sistema que envuelve todos estos elementos con el fin de obtener una medición se le conoce como *sistema de medición* (Kubiak y Benbow, 2016).

Una estimación del error de medición se obtiene mediante el estimador *varianza* (o *variación*) (Taboga, 2021).

El *análisis del sistema de medición* (MSA, por sus siglas en inglés de Measurement System Analysis) es básicamente una serie de *experimentos diseñados* que tienen como objetivo el descomponer la *variación total observada*, en sus diferentes fuentes. Esta descomposición se ilustra con el diagrama en la Figura 8, en la cual se mencionan cuatro de las principales fuentes de *variación* que pueden ser identificadas mediante el MSA, es decir: *variación pieza a pieza*, *variación debida a la medición* (o *repetibilidad*), *variación debida al operador* y *operador por pieza*; estas dos últimas englobadas bajo el término *reproducibilidad* (Munro et al. 2015).



$$\sigma^2 \text{ Total} = \sigma^2 \text{ pieza a pieza} + \sigma^2 \text{ repetibilidad} + \sigma^2 \text{ operador} + \sigma^2 \text{ operador por pieza}$$

Figura 8. Fuentes de *variación* del sistema de medición.  
Munro et al., 2015

La *repetibilidad* es la *variación* que se presenta cuando un instrumento es utilizado varias veces por el mismo operador para medir la misma característica en el mismo producto; la *reproducibilidad* representa la *variación* obtenida cuando diferentes operadores miden el mismo producto, utilizando el mismo instrumento para medir la misma característica (Arcidiacono y Nuzzi, 2017).

Dentro del MSA, existe un experimento diseñado que tiene como objetivo cuantificar la variación dentro del sistema de medición debida a la repetibilidad y la reproducibilidad, su nombre es *estudio de repetibilidad y reproducibilidad* (GR&R, por sus siglas en inglés de Gauge Repeteability and Reproducibility).

### 2.4.2. Capacidad de proceso

Una vez que el MSA ha sido conducido y las fuentes de variación han sido identificadas y removidas, el porcentaje de variación del sistema de medición se reduce a una pequeña proporción de la variación total observada y por lo tanto, las mediciones que se efectúen serán muy cercanas al valor verdadero. Bajo un sistema de medición con tales características, es posible proceder a realizar estudios de capacidad de proceso (Munro et al. 2015).

De acuerdo con Munro et al. (2015), se le conoce como *capacidad de proceso* a la habilidad que presenta un proceso para cumplir las especificaciones, las cuales son obtenidas de dibujos de ingeniería y contratos con los clientes.

Para estimar la capacidad de proceso, múltiples índices han sido desarrollados, los cuales son considerados en la actualidad como herramientas clave para la medición de la calidad. Algunos de los índices más importantes son  $C_p$  y  $C_{pk}$  (Arcidiacono y Nuzzi, 2017), por sus siglas en inglés de Capacidad de Proceso e Índice de capacidad de proceso, respectivamente.

El  $C_p$  representa la proporción entre la amplitud de las especificaciones y la dispersión del proceso. Proporciona información general sobre el cumplimiento de las especificaciones. El  $C_{pk}$  por su parte, describe qué tan bien el proceso se centra dentro de las especificaciones, con referencia a la media del proceso (Arcidiacono y Nuzzi, 2017). Los índices  $C_p$  y  $C_{pk}$  se calculan utilizando la Ecuación 6 y Ecuación 7, respectivamente, ambas tomadas de Arcidiacono y Nuzzi, 2017.

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (6)$$



$$C_{pk} = \text{Min} \left\{ \frac{LSE - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \right\} \quad (7)$$

### 2.4.3. Procedimiento para el desarrollo de equipos y procesos de producción masiva

Se trata de un procedimiento utilizado por la compañía Sensata Technologies para el desarrollo de sus equipos y procesos de producción masiva que consta de cuatro fases: confirmación de concepto, industrialización, desarrollo de parámetros y plan de validación (Sensata Technologies, 2019). Estas fases se muestran en la Figura 9 y se describen en las siguientes subsecciones.

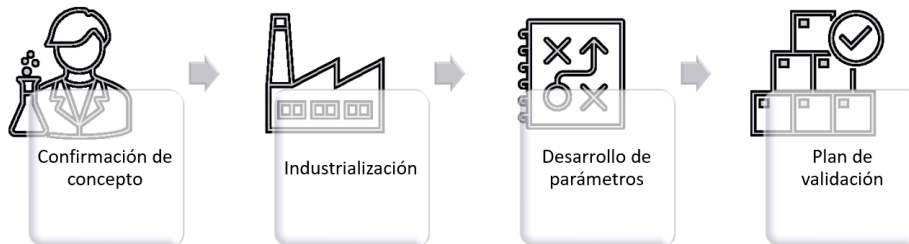


Figura 9. Procedimiento para el desarrollo de equipos y procesos de producción masiva. Sensata Technologies, 2019

#### 2.4.3.1. Confirmación de concepto

Una vez que el diseño del producto está completamente definido y que los pasos para su manufactura se han identificado, el ingeniero desarrollador del proceso tentativamente define la tecnología que se utilizará para su ensamble y prueba de manera masiva. Cual haya sido su elección, se debe primeramente probar que el concepto del proceso es factible, repetible y que puede producir partes con la calidad necesaria para el cliente.

Es en esta fase del procedimiento que el ingeniero desarrollador del proceso conduce pruebas de manera controlada y en un ambiente de laboratorio para confirmar que la tecnología tentativamente elegida cumple con lo esperado. Es posible en esta fase que el ingeniero desarrollador del proceso, trabajando de la mano con el manufacturador del equipo de producción masiva, crea conveniente

el llevar a cabo prototipado de los pasos del proceso más complejos o costosos para identificar potenciales puntos de corrección o mejora antes de proceder con el diseño y fabricación del equipo de producción industrializado.

#### **2.4.3.2. Industrialización**

En esta fase del procedimiento se lleva a cabo el diseño del equipo de producción masiva a la luz de la información de confirmación de concepto que se obtuvo en la fase anterior. El manufacturador seleccionado para la fabricación del equipo presenta el diseño de éste de manera exhaustiva al ingeniero desarrollador del proceso para su revisión y aclaración de dudas. Si el ingeniero está en confirmidad con el diseño del equipo de producción, entonces se procede con el arranque oficial de la fabricación.

Es en esta fase también que el ingeniero desarrollador del proceso especifica al manufacturador de manera tentativa la secuencia de prueba y parámetros parte de éste, los cuales serán refinados una vez que el equipo de producción se tenga disponible y listo para su operación total o parcial.

Finalmente, en esta fase se define el plan de validación del equipo de producción que será ejecutado en fases posteriores, el cual consiste en elementos de evaluación que permiten al ingeniero desarrollador de procesos confirmar que el equipo fabricado produce al menos los mismos resultados que los obtenidos en las pruebas de laboratorio.

#### **2.4.3.3. Desarrollo de parámetros**

En esta fase se cuenta con el equipo de producción listo para su operación de manera total o parcial y se conducen experimentos controlados con el fin de acotar el valor de los parámetros dentro de un área operable que produzca los resultados óptimos.

También, en esta fase se llevan a cabo corridas de muestra que incluyen generalmente distintos lotes de componentes para generar suficiente variación en

el equipo de producción. Luego, a la luz de esta nueva información y la obtenida con los experimentos, se realizan ajustes finos a los parámetros. Esta misma información es utilizada para generar límites de control en caso de no existir.

#### **2.4.3.4. Plan de validación**

Por último, en esta fase se ejecutan los elementos de evaluación de los que se compone el plan de validación definido en la fase de industrialización. Estos elementos son estudios parte del *análisis del sistema de medición y capacidad de proceso* aunque es posible que el ingeniero desarrollador del proceso desee incorporar otro tipo de pruebas al producto fabricado. El propósito principal de esta fase es responder la pregunta de si el equipo se encuentra en condiciones para poder iniciar a fabricar de manera masiva en un ambiente de producción.

### **2.4.4. Metodología A3**

Es una metodología desarrollada por Toyota para presentar la historia completa de una acción de mejora en una simple página de tamaño A3 (297x420 milímetros), definida por la *organización internacional de estandarización* (ISO, por sus siglas en inglés de International Standard Organization) (Siddiqui, 2017). Según Goldsmith (2014), la metodología A3 se compone de siete fases: clarificar el problema, descomposición del problema, establecimiento del objetivo, análisis de la causa raíz, desarrollo de contramedidas, implementación de contramedidas, monitoreo de resultados y estandarización y prevención de ocurrencia. Estas fases se describen a continuación.

#### **2.4.4.1. Clarificar el problema**

De acuerdo con Matthews (2011), esta fase en la metodología A3 consiste del *transfondo del problema y planteamiento del problema*. El primero tiene como función proporcionar el contexto dentro de la organización en el que se encuentra el autor del formato A3. En el segundo se enuncia el problema que bajo la

metodología A3 se define como la diferencia (o discrepancia) entre la situación actual y el estándar.

#### **2.4.4.2. Descomposición del problema**

Esta fase se compone de *alcance del problema* y *prioridad de problema*. En el primero se delimita el área de solución del problema partiendo de lo general a lo particular. En el segundo, se habla en términos de beneficios principalmente monetarios, con el fin de despertar en los directivos de la organización el suficiente interés para proporcionar soporte y recursos en su solución (Matthews, 2011).

#### **2.4.4.3. Establecimiento del objetivo**

Matthews (2011) menciona que el objetivo (u objetivos) debe ser expresado en términos de mejora de un indicador clave de la organización y debe contribuir con el cumplimiento de las metas generales establecidas por la administración.

#### **2.4.4.4. Análisis de la causa raíz**

De acuerdo con Matthews (2011), antes de ofrecer alguna contramedida al problema, se debe realizar un análisis sistemático de su causa raíz, para lo cual sugiere utilizar la herramienta *5 porqués* (del inglés *5 why's*) y después comprobar su lógica mediante su complemento *por lo tanto* (del inglés *therefore*).

#### **2.4.4.5. Desarrollo de contramedidas**

Matthews (2011) define *contramedida* como una contrarreacción que contribuye al objetivo definido. Existen dos tipos de contramedidas en esta metodología: las de corto y las de largo plazo. Las primeras brindan un alivio temporal de los efectos del problema. Las de largo plazo lidian con la causa del problema.

#### **2.4.4.6. Implementación de contramedidas**

Matthews (2011) recomienda que para cada actividad de la contramedida se genere un plan de acción con el responsable y fecha de término. Que éste se comunique claramente a responsables, personal directamente afectado, administradores de los departamentos en cuestión e interesados. Y finalmente que se ejecute el plan con su respectivo seguimiento de manera frecuente.

#### **2.4.4.7. Monitoreo de resultados**

En esta sección, se resumen los resultados posteriores a la ejecución de las contramedidas y se ofrece una explicación técnica de ellos en la medida en la que el problema establecido lo hace posible.

#### **2.4.4.8. Estandarización y prevención de ocurrencia**

La meta final de la solución de problemas mediante la metodología A3, es la de alcanzar el objetivo establecido, y por esta razón, una vez implementada, se deben evaluar los resultados de las contramedidas para determinar el grado de éxito que éstas tuvieron en el problema (Matthews, 2011).

La metodología A3 tiene como base el ciclo *Planear-Hacer-Verificar-Actuar* (PDCA por sus siglas en inglés) (Siddiqui, 2017); ambas metodologías pueden conciliarse de acuerdo con la Figura 10.

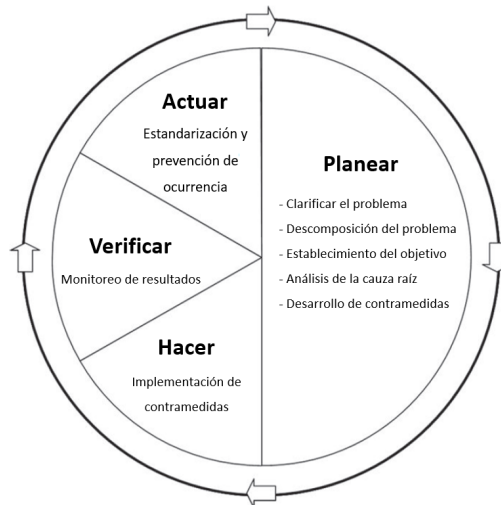


Figura 10. Metodologías A3 y PDCA.  
Matthews, 2011

## 2.5. TRABAJOS RELACIONADOS

Los autores enunciados a continuación, incorporan en sus respectivos trabajos de investigación el estudio del efecto de autocalentamiento del termistor al ser alimentado con una corriente eléctrica; este efecto es la base de la detección de la presencia de la pasta C575 en el sensor EGR, en el presente trabajo de tesis.

Xu et al. (2014) modelan y simulan en software ANSYS el efecto del autocalentamiento en un sensor de flujo de aire convencional, el cual contiene dos termistores: el de referencia y el autocalentado. Los autores experimentan con diferentes niveles de potencia de autocalentamiento con el fin de entender la configuración óptima para reducir el error del instrumento de medición.

Talic et al. (2019) simulan el desempeño de diferentes arreglos de ocho termistores utilizados para sensar el calor que el paso de un fluido líquido transfiere desde una fuente de calor que puede ser un resistor o un termistor auto calentado. Se utiliza el software COMSOL, el cual al igual que ANSYS, se basa en el método del elemento finito para la simulación de sistemas en los que ocurre transferencia de calor.

Aleksic et al. (2021) diseñan un sensor para medir el flujo de agua mediante el arreglo de dos termistores NTC de capa gruesa dispuestos en una derivación del curso principal del agua. El primer termistor, conocido como *frío* (cold, en inglés),

sensa la temperatura del agua de entrada; al segundo termistor, conocido como *autocalentado* (self-heated, en inglés), se le tiene conectado a una fuente de poder y se le aplica un voltaje constante. El termistor autocalentado incrementa su temperatura por la aplicación del voltaje, sin embargo el agua que fluye en la derivación disipa el calor generado. Esta disipación del calor generado por el termistor demanda un mayor uso de potencia eléctrica en el sistema, lo cual se utiliza para poder estimar la magnitud del flujo del agua.

Skinner y Lambert (2009), evalúan el uso del termistor tipo NTC en un medidor automático de filtración de agua subterránea hacia los cuerpos de agua superficial como es el caso de ríos y lagos. Utilizan dos termistores autocalentados: el primero dentro de un sistema en forma de cabina, sumergida, en contacto con el suelo en el fondo, aislada de intromisión de agua desde el cuerpo y sin embargo con salida hacia éste; el segundo en el exterior del sistema, en contacto directo con el cuerpo de agua. La diferencia de temperatura entre el primer y el segundo termistor se monitorea, ésta tiende a cero cuando el flujo de agua subterránea es prácticamente nulo, por otra parte, esta diferencia se incrementa cuando el flujo es mayor porque el calor del termistor autocalentado que se encuentra dentro del sistema, se disipa de manera proporcional al flujo de agua. Esta relación se utiliza para medir el flujo de agua subterránea hacia el cuerpo de agua.

Ebrahimi-Darkhaneh (2019) expone que el autocalentamiento de los termistores NTC y PTC es causa de error de medición de la temperatura y que el primero se encuentra sujeto a mayor porcentaje de error debido a la naturaleza exponencial de su curva Resistencia-Temperatura. Ebrahimi-Darkhaneh enlista una serie de factores que contribuyen para el autocalentamiento del termistor, entre los cuales figuran la cantidad de corriente que circula a través del mismo, su coeficiente de temperatura, su tamaño, la disposición del circuito de la tarjeta impresa (PCB, por sus siglas en inglés) sobre la cual está montado y la conducción de calor de las condiciones ambientales en el medio en el que se encuentra.

Ingle (2019) describe el uso de dispositivos autocalentados que llama *sensores de cable caliente* (hot-wire sensors en inglés) en los sensores de flujo másico de aire. Menciona que los sensores de cable caliente se seleccionan para tal fin gracias al

concepto de pérdida de calor cuando un flujo de aire de entrada circula sobre la superficie calentada de elemento expuesto y se utiliza la cantidad de potencia necesaria para mantenerlos calentados a temperatura estable como la variable para estimar la cantidad de flujo másico de aire.

TE connectivity (2018) menciona el uso de dos termistores autocalentados aplicados para la medición de vacío, éstos son dispuestos de tal forma que uno de ellos se encuentra dentro de la cámara de vacío y el otro fuera de ella. Dentro de la cámara, mientras la presión se reduce, cada vez menos cantidad de moléculas de aire se encuentran en contacto con el termistor calentado y su disipación térmica se reduce en comparación con el que se encuentra fuera de la cámara. Esta diferencia en temperatura de autocalentamiento se utiliza como estimación del nivel de vacío alcanzado.

Heyd (2021) utiliza un termistor NTC en miniatura para la caracterización de diversos materiales en cantidades micrométricas respecto de sus propiedades térmicas. Aprovecha el principio del autocalentamiento del termistor para utilizarlo como fuente de calor y sensor de temperatura.

Golan y Azoulay (2023) presentan un método de detección y medición de flujo másico de fluido basado en el uso de un termistor NTC de referencia con el que se mide la temperatura del fluido, y el otro PTC autocalentado que detecta la carga térmica de éste. A partir de un experimento que conducen con el uso de este arreglo de termistores y un puente de Wheatstone, logran obtener resultados con mayor sensibilidad en diferentes rangos de velocidad de fluido en comparación con un medidor de flujo másico industrial.

Los trabajos mencionados en esta sección tienen relación con el presente trabajo de tesis en el uso de al menos un termistor autocalentado para interactuar con el medio que le rodea. Esta interacción deriva en la transferencia de calor desde el termistor hacia el medio, la cual permite entender una característica de interés de este último. El medio en el que se encuentra el termistor autocalentado de estos trabajos relacionados es agua y aire, a diferencia del de este trabajo de tesis, el cual es el componente sólido pasta C575.



### **3. PROCEDIMIENTO**

En este capítulo se desarrolla la solución del problema establecido en el primer capítulo a través del *procedimiento para el desarrollo de equipos y procesos de producción masiva*, como se enunció en la sección 2.4.3. En la sección 3.1, se conducen pruebas de manera controlada y en un ambiente de laboratorio con la finalidad de confirmar que el principio de funcionamiento y la tecnología tentativamente elegida para el desarrollo del PCTD cumple con el desempeño esperado. En la sección 3.2, se definen los detalles que consituyen el diseño del equipo de producción masiva a la luz de la información de confirmación de concepto que se obtuvo en la sección anterior. La sección 3.3, trata sobre la conducción de experimentos controlados con el fin de acotar el valor de los parámetros de equipo dentro de un área operable que produzca los resultados óptimos. Y finalmente, en la sección 3.4 se ejecutan los elementos de evaluación de los que se compone el plan de validación establecido y se determina que el PCTD se encuentra en condiciones para su operación en un ambiente de producción masiva.

#### **3.1. CONFIRMACIÓN DE CONCEPTO**

La presente sección se divide en las subsecciones *pruebas concepto* y *definición de voltaje de suministro*. En la primera subsección se describen los resultados de las pruebas en las que se confirma el principio de funcionamiento del autocalentamiento a partir de un sobrevoltaje aplicado. En la segunda subsección se utiliza la información provista por el fabricante del termistor y los resultados obtenidos en la subsección anterior para definir el valor óptimo de voltaje de suministro para el PCTD.

##### **3.1.1. Pruebas concepto**

Como resultado de las pruebas concepto propuestas y ejecutadas por parte del diseñador del sensor EGR en el centro de investigación de Sensata Technologies en

la ciudad de Attleboro, Massachusetts el mes de agosto del año 2017, fue posible confirmar que al aplicar un sobrevoltaje de alimentación entre las terminales del termistor en el sensor EGR respecto de lo recomendado por el fabricante, se produce el efecto de autocalentamiento. Mediante una cámara termográfica, se obtuvo la imagen de la Figura 11 en la que se puede observar que, al suministrar un sobrevoltaje de 18 voltios por 1 segundo en las terminales del termistor, se produce el efecto de autocalentamiento.

También fue posible entender el comportamiento del voltaje de salida en sensores de temperatura EGR con diferentes condiciones de cobertura de pasta C575 en el termistor cuando diferentes voltajes son suministrados, lo cual se observa en la Figura 12. Nótese que, en la sección encerrada en rojo correspondiente al suministro de 18 voltios, es posible discernir la mayor diferencia en el comportamiento entre las condiciones de cobertura de pasta C575 en termistor. Para aquellos sensores con la cobertura de pasta C575 en termistor de acuerdo con el diseño, la razón de cambio en el voltaje medido con respecto al tiempo es menos pronunciada comparada con la de las que no tienen cobertura de pasta C575. A esta razón de cambio se le denomina *caída de voltaje en el termistor* o simplemente *caída de voltaje* a partir de ahora. La caída de voltaje menos pronunciada en estos sensores es atribuida al hecho que el calor generado en el termistor está siendo conducido por la pasta C575 (que se encuentra en contacto con el termistor autocalentado) desde el interior hacia el exterior del sensor EGR, es decir: desde el termistor hacia la carcasa metálica y posteriormente al ambiente. De manera opuesta, la caída de voltaje más pronunciada en las piezas sin cobertura de pasta C575 en termistor es explicada por la acumulación del calor generado en el termistor debido a su autocalentamiento al no tener un medio por el cual conducirse hacia el exterior.

La Tabla 4 presenta un resumen del párrafo anterior e incorpora el efecto del autocalentamiento del termistor sobre la resistencia eléctrica de éste.

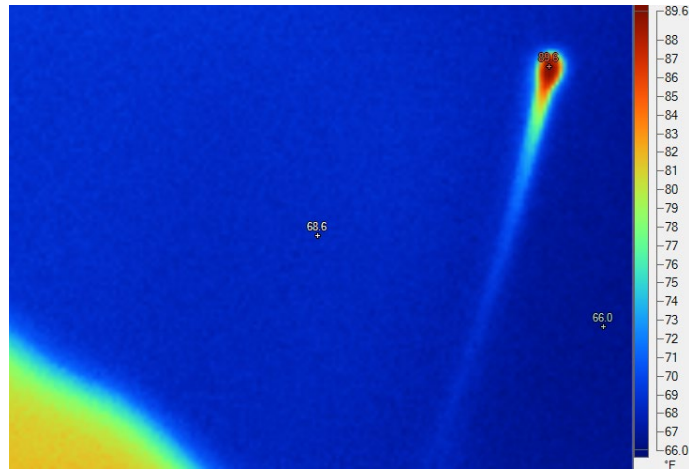


Figura 11. Autocalentamiento en el termistor producto de la aplicación de sobre voltaje.  
Elaboración propia

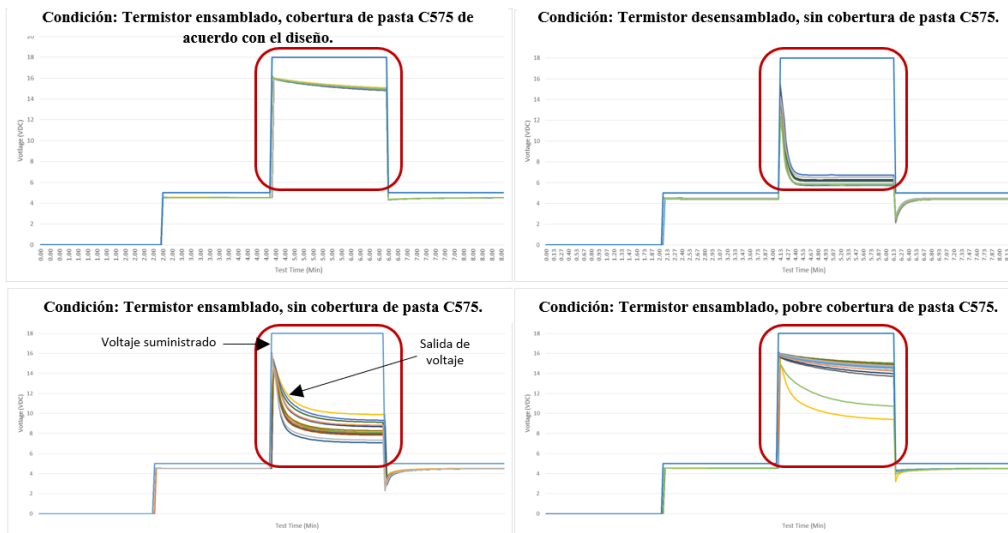


Figura 12. Comportamiento del voltaje de salida medido al aplicar sobre voltaje a sensores con diferentes condiciones de cobertura de pasta C575 en termistor.  
D. Neilan, comunicación personal, 15 de agosto de 2017

Tabla 4. Efecto del autocalentamiento del termistor en la resistencia y caída de voltaje.

| Condición de cobertura de pasta C575 | Calor acumulado en termistor | Resistencia eléctrica del termistor | Caída de voltaje debida al termistor |
|--------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| De acuerdo con diseño                | Poco                         | Alta                                | Baja                                 |
| Sin cobertura                        | Mucho                        | Baja                                | Alta                                 |

Elaboración propia

### **3.1.2. Definición de voltaje de suministro**

En la subsección 3.1.1 se explica el comportamiento en términos de caída de voltaje para sensores EGR con y sin cobertura de pasta C575 en termistor mediante el suministro de un sobrevoltaje de 18 voltios. Tal cantidad suministrada en el termistor a temperatura ambiente (25 °C) resulta en la aplicación de potencia eléctrica de 26 mW. Esta potencia aplicada excede el máximo recomendado por el fabricante (24 mW) para evitar que el termistor entre en *modo de huida* (runaway mode en inglés) en el que el autocalentamiento puede llegar a ser tal que termine modificando sus propiedades de manera irreversible.

Posterior a consultar al fabricante, el ingeniero diseñador del sensor EGR definió el voltaje de suministro para el PCTD en 11 voltios con lo que la potencia eléctrica aplicada se reduce a 10 mW. Esto reduce significativamente el riesgo de daño en el termistor sin comprometer el autocalentamiento necesario para la prueba a temperatura ambiente; la cantidad máxima de autocalentamiento bajo tales condiciones es de 13.33 °C, como lo muestra la Figura 13.

A la luz de estos resultados, se confirmó el potencial para desarrollar el PCTD y detectar la cobertura de pasta C575 en termistores.

## **3.2. INDUSTRIALIZACIÓN**

En esta sección se definen la secuencia de prueba del PCTD, sus parámetros y herramienta desarrollada para su estimación. También se define el diseño del equipo de producción FFT para poder implementar el PCTD.

### **3.2.1. Definición de la secuencia de prueba**

La intención de diseño de proceso para el PCTD fue su incorporación en el equipo de producción existente FFT, mismo que debía ser acondicionado para ser posible introducirlo. También se incorporaría en el equipo la capacidad de almacenamiento automático de lecturas de voltaje observadas durante el tiempo de un ciclo de prueba en un archivo Excel individual (una lectura cada 25

milisegundos), las cuales proporcionarían información respecto de la disipación o acumulación de calor tomando lugar en el sensor EGR. La Figura 14 muestra un ejemplo de estas lecturas de voltaje graficadas en conjunto, al cual se le conoce como *curva de voltaje* (voltage curve, en inglés).

Como parte de la planeación para implementar el PCTD en el equipo FFT, debía definirse su secuencia de prueba, cuyos pasos se muestran en la Figura 15.

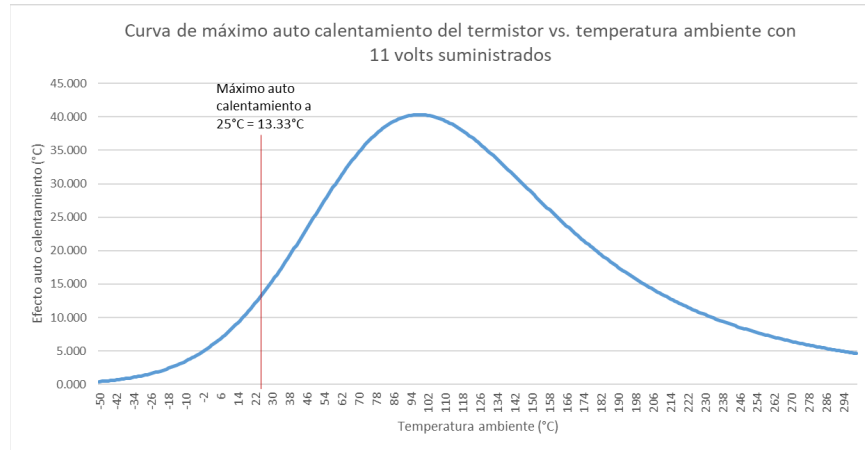


Figura 13. Curva de máximo autocalentamiento en termistor. Elaboración propia

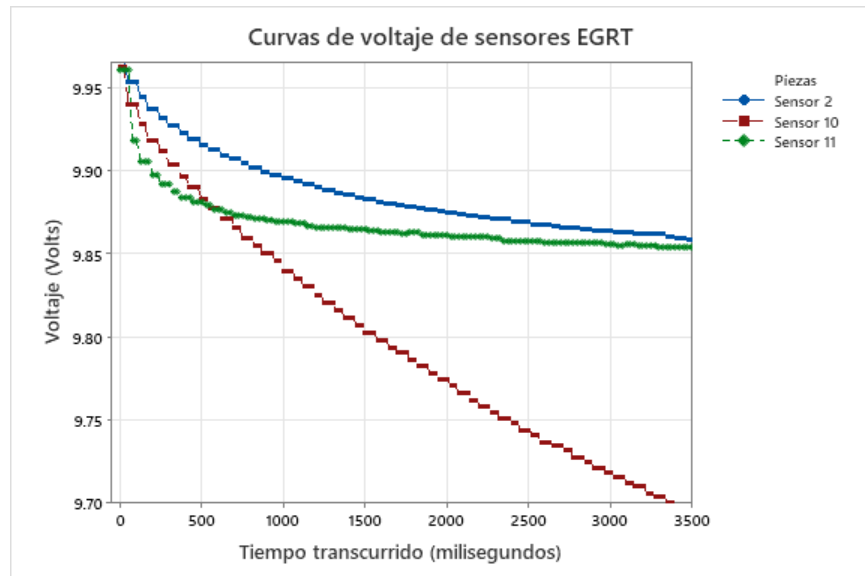


Figura 14. Curvas de voltaje de sensores EGR con diferentes condiciones de cobertura de pasta C575 en termistor. Elaboración propia

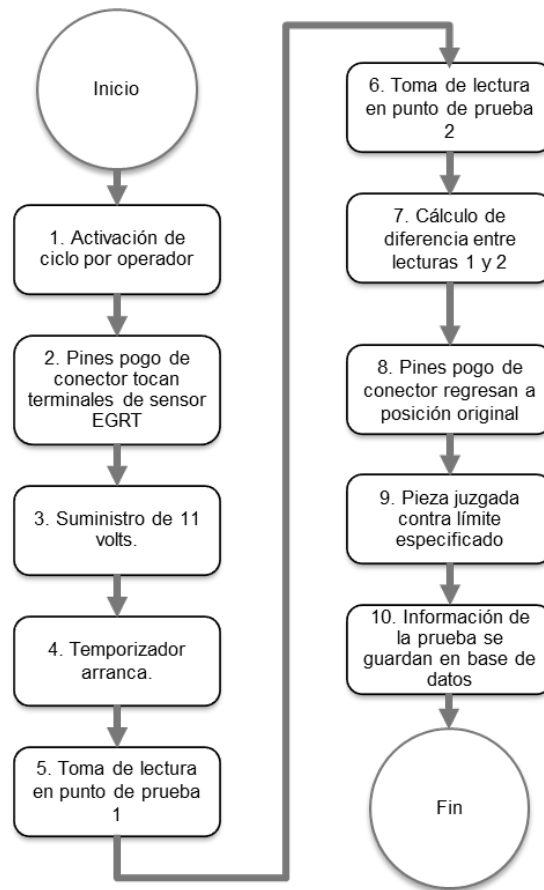


Figura 15. Secuencia de prueba del PCTD.  
Elaboración propia

Se presenta una explicación de cada paso de la secuencia de prueba del PCTD:

1. Activación de ciclo por operador. El operador del equipo FFT activa el ciclo de la máquina. Todas las pruebas comienzan, incluyendo el PCTD.
2. Pines pogo de conector tocan terminales de sensor EGR. El conector de la máquina que contiene dos pines pogo, toca las terminales del sensor EGR.
3. Suministro de 11 voltios. El control de la máquina activa la fuente de poder de 11 voltios para que suministre al sensor EGR.
4. Temporizador arranca. Simultáneamente con el paso anterior, se inicia el temporizador y se mantiene corriendo.
5. Toma de lectura en punto de prueba 1. El sistema de *adquisición de datos* (DAQ por sus siglas en inglés) de la máquina toma la primera lectura de

- voltaje de salida del sensor EGR después que la cantidad de milisegundos establecida haya transcurrido. También se reinicia el temporizador.
6. Toma de lectura en punto de prueba 2. El DAQ toma la segunda lectura de voltaje de salida del sensor EGR después que la cantidad de milisegundos establecida haya transcurrido. También se detiene el temporizador.
  7. Cálculo de diferencia entre lecturas 1 y 2. Se calcula la diferencia (delta) en las lecturas de voltaje de salida.
  8. Pines pogo de conector regresan a su posición original. El conector de la máquina deja de hacer contacto con pieza y regresa a su posición original.
  9. Pieza juzgada contra límite especificado. Se juzga si la pieza es aceptada comparando el delta con el límite especificado.
  10. Información de la prueba se almacena en la base de datos. Se guarda la información del PCTD en base de datos de resultados.

### **3.2.2. Parámetros de prueba**

Se presenta el nombre de los parámetros de prueba a desarrollar y su respectiva definición. En paréntesis se relacionan los parámetros con los pasos de la secuencia de prueba del PCTD en la Figura 15.

- *Tinit*. Instancia del temporizador medida en milisegundos en que la lectura de voltaje 1 es tomada (paso 5).
- *Tfinal*. Instancia del temporizador medida en milisegundos en que la lectura de voltaje 2 es tomada (paso 6).
- *Vdelta\_Max*. Límite superior de delta de lecturas. En lo sucesivo se hace referencia al delta de lecturas como *Vdelta* (paso 9).

### **3.2.3. Herramienta para estimación de parámetros de tiempo de lectura**

Para la estimación de los dos parámetros que tienen que ver con el tiempo de lectura de voltaje (*Tinit* y *Tfinal*) se desarrolló una herramienta que permite su estimación a partir de las curvas de voltaje de cada prueba. La herramienta fue diseñada en software *Excel* con la finalidad de hacer uso del módulo *Solver*, el cual

permite obtener soluciones óptimas a problemas complejos mediante la definición de un modelo de optimización. Desde ahora se hace referencia a la herramienta con el nombre de *Analizador de curvas de voltaje* o simplemente *Analizador*.

El *Analizador* se compone de ocho secciones, las cuales se nombran y describen a continuación; también se presentan capturas de pantalla de cada una de ellas.

1. Datos de curvas de voltaje. En ella se plasman los valores de la curva de voltaje de cada prueba que se somete a análisis; una columna para cada curva de voltaje. También, se coloca una *etiqueta* en el encabezado de la columna, la cual identifica al sensor con un estatus conocido y previamente determinado por el usuario mediante inspección por Rayos X. La Figura 16 muestra los datos que se introducen por parte del usuario. Pueden analizarse hasta 145 diferentes curvas de voltaje con 450 lecturas cada una (el equivalente a 11 segundos de prueba).
2. Configuraciones. Contiene las variables configurables por el usuario para el análisis de los datos de curva de voltaje, entre las cuales se incluyen los parámetros *Tinit* y *Tfinal*. La Figura 17 muestra las variables configurables.
3. Cálculos principales. Utiliza los datos de curvas de voltaje y las variables configurables en las secciones 1 y 2 respectivamente, para realizar el cálculo del valor *Vdelta*, el cual se obtiene mediante restar la lectura de voltaje en el tiempo *Tfinal* de la propia para el *Tinit*; la Figura 18 muestra esta sección. El equipo de producción FFT obtendrá este valor de la misma manera.
4. Cálculos auxiliares. Corresponde a una matriz de datos cuyos encabezados se alimentan de dos tipos de datos: las etiquetas de estatus en la sección *datos de curvas de voltaje* y los valores calculados *Vdelta* en la sección *cálculos principales*, como lo muestra la Figura 19. Los datos correspondientes a sensores EGR aceptados se colocan automáticamente en el encabezado de columnas mientras que los rechazados se colocan en encabezado de filas. Posteriormente cada posición al interior de la matriz obtiene la diferencia de valores calculados *Vdelta* de sensores rechazados contra los de los aceptados, en ese orden particular, ya que debido al distinto comportamiento de los primeros (mayor *Vdelta*) y los segundos



(menor  $V_{delta}$ ) y asumiendo una buena estimación de los parámetros  $T_{init}$  y  $T_{final}$ , se espera que la diferencia sea mayor a cero.

5. Resumen de resultados. Se compone de dos tablas: *estadísticos* y *conteos*, que se muestran en la Figura 20. La primera tabla se alimenta de los valores  $V_{delta}$  en la sección *cálculos principales*, la segunda de las diferencias en los cruces de la matriz en la sección *cálculos auxiliares*. La tabla de estadísticos presenta un resumen de los datos por etiqueta de estatus y realiza una *prueba T de dos muestras* entre los resultados de sensores aceptados y rechazados. La tabla de conteos recaba el número de veces en que las diferencias en la matriz son mayores y menores a cero. Esta tabla también calcula la suma de cuadrados de estas diferencias. La información provista por la tabla de conteos es clave para la estimación de los parámetros  $T_{init}$  y  $T_{final}$  en la sección 3.3.2.
6. Gráficos de resultados. Se presenta el resumen de los resultados mediante dos gráficos que son útiles para analizar los datos  $V_{delta}$  de los sensores EGR por etiqueta de estatus, como lo muestra la Figura 21.
7. Resumen de modelos. En esta sección, el módulo *Solver* registra los parámetros del modelo de optimización con los que fue encontrada la solución óptima, como se observa en la Figura 22.
8. Notas. Se muestra en la Figura 23. Se utiliza para registro de información que el usuario considere relevante, por ejemplo: el número de sensores utilizados, procedencia de éstos, observaciones durante el estudio, etc.

El *Analizador* fue diseñado de tal forma que mediante el uso de un algoritmo (o método de solución) y la definición de restricciones numéricas se estimaran los valores óptimos de  $T_{init}$  y  $T_{final}$  que calcularan que los valores  $V_{delta}$  de los sensores EGR conocidos aceptables fueran siempre menores que los de sensores conocidos rechazados. En otras palabras, maximizar la diferencia entre ambos tipos de sensores hacia el sentido correcto: valores bajos de  $V_{delta}$  para sensores aceptables, y valores altos para sensores rechazados.

| Datos de curvas de voltaje |           |           |           |           |         |         |         |         |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|
| Etiquetas                  | R_parcial | R_parcial | A_par_tot | R_parcial | R_nula  | R_nula  | R_nula  | R_nula  |
| 170080035                  |           | 11.0507   | 11.0507   | 11.0504   | 11.051  | 11.0507 | 11.0517 | 11.0517 |
| 170080060                  | 25        | 11.0507   | 11.0507   | 11.0497   | 11.051  | 11.0514 | 11.0507 | 11.0507 |
| 170080085                  | 25        | 11.0507   | 11.0507   | 11.0497   | 11.051  | 11.0514 | 11.0507 | 11.0507 |
| 170080110                  | 25        | 11.0507   | 11.0507   | 11.0504   | 11.051  | 11.051  | 11.0507 | 11.0507 |
| 170080135                  | 25        | 11.0507   | 11.0517   | 11.0504   | 11.051  | 11.051  | 11.0507 | 11.0507 |
| 170080160                  | 25        | 11.0507   | 11.0517   | 11.0504   | 11.051  | 11.051  | 11.0507 | 11.0507 |
| 170080185                  | 25        | 11.0507   | 11.0517   | 11.0504   | 11.0514 | 11.0507 | 11.0507 | 11.0507 |
| 170080210                  | 25        | 11.0507   | 11.0517   | 11.0504   | 11.0514 | 11.0507 | 11.0507 | 11.0507 |
| 170080235                  | 25        | 11.0507   | 11.0517   | 11.0504   | 11.0514 | 11.0514 | 11.0507 | 11.0507 |
| 170080260                  | 25        | 11.051    | 11.0517   | 11.0507   | 11.051  | 11.0514 | 11.0507 | 11.0507 |
| 170080285                  | 25        | 11.051    | 11.0517   | 11.0507   | 11.051  | 11.0514 | 11.0507 | 11.0507 |
| 170080310                  | 25        | 11.0507   | 11.0504   | 11.0504   | 11.051  | 11.0514 | 11.0507 | 11.0507 |
| 170080335                  | 25        | 11.0507   | 11.0504   | 11.0504   | 11.051  | 11.0514 | 11.0507 | 11.0507 |
| 170080360                  | 25        | 11.0507   | 11.0504   | 11.0504   | 11.051  | 11.051  | 11.0507 | 11.0507 |
| 170080385                  | 25        | 11.0507   | 10.3709   | 10.8382   | 10.5797 | 11.051  | 10.7533 | 10.7533 |
| 170080410                  | 25        | 11.0507   | 10.3709   | 10.8382   | 10.5797 | 11.051  | 10.7533 | 10.7533 |
| 170080435                  | 25        | 9.97913   | 10.3709   | 9.97409   | 9.97342 | 9.97006 | 9.95462 | 9.95462 |
| 170080460                  | 25        | 9.97913   | 9.96603   | 9.97409   | 9.97342 | 9.97006 | 9.95462 | 9.95462 |
| 170080485                  | 25        | 9.97913   | 9.96603   | 9.97409   | 9.97342 | 9.95529 | 9.95462 | 9.95462 |
| 170080510                  | 25        | 9.96335   | 9.95328   | 9.95932   | 9.96066 | 9.95529 | 9.93918 | 9.93918 |
| 170080535                  | 25        | 9.96335   | 9.95328   | 9.95932   | 9.96066 | 9.95529 | 9.93918 | 9.93918 |

Figura 16. Sección 1. Datos de curvas de voltaje.  
Elaboración propia

| Configuraciones |     |      |
|-----------------|-----|------|
|                 | Aux | Real |
| Tinit           | 50  | 500  |
| Tfinal          | 397 | 3970 |
| Samp. rate      | 25  | -    |
| Row St. Pnt.    | 56  | -    |
| Row St. Pnt.    | 2   | -    |
| Max. limit      | 500 | 5000 |
| Tinit + Tfinal  |     | 4470 |

Figura 17. Sección 2. Configuraciones.  
Elaboración propia

| Cálculos principales |            |         |         |            |            |
|----------------------|------------|---------|---------|------------|------------|
| Vdelta               | 0.026      | 0.024   | 0.015   | 0.016      | 0.027      |
| X-Xbar               | 8.4209E-06 | 1.5E-06 | 9.1E-06 | 4.2226E-05 | 0.00208851 |
| Error                | 0.00615    | 0.00483 | 0.00289 | 0.00455    | 0.00881    |

Figura 18. Sección 3. Cálculos principales.  
Elaboración propia

**Cálculos auxiliares**

|    |              | 3           | 7           | 8           | 11          |         |
|----|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------|
|    |              | A_par_tot 1 | A_par_tot 2 | A_par_tot 3 | A_par_tot 4 |         |
|    |              | 0.01511     | 0.01276     | 0.01208     | 0.00974     |         |
| 1  | R_parcial 1  | 0.026       | 0.01074     | 0.01309     | 0.01377     | 0.01611 |
| 2  | R_parcial 2  | 0.024       | 0.00906     | 0.01141     | 0.01209     | 0.01443 |
| 4  | R_parcial 3  | 0.016       | 0.00134     | 0.00369     | 0.00437     | 0.00671 |
| 12 | R_parcial 4  | 0.027       | 0.01209     | 0.01444     | 0.01512     | 0.01746 |
| 13 | R_parcial 5  | 0.016       | 0.00101     | 0.00336     | 0.00404     | 0.00638 |
| 14 | R_parcial 6  | 0.026       | 0.01108     | 0.01343     | 0.01411     | 0.01645 |
| 15 | R_parcial 7  | 0.023       | 0.00805     | 0.0104      | 0.01108     | 0.01342 |
| 21 | R_parcial 8  | 0.027       | 0.01208     | 0.01443     | 0.01511     | 0.01745 |
| 26 | R_parcial 9  | 0.016       | 0.00067     | 0.00302     | 0.0037      | 0.00604 |
| 27 | R_parcial 10 | 0.025       | 0.01007     | 0.01242     | 0.0131      | 0.01544 |
| 28 | R_parcial 11 | 0.021       | 0.00638     | 0.00873     | 0.00941     | 0.01175 |
| 34 | R_parcial 12 | 0.029       | 0.01376     | 0.01611     | 0.01679     | 0.01913 |
| 37 | R_parcial 13 | 0.023       | 0.00772     | 0.01007     | 0.01075     | 0.01309 |
| 39 | R_parcial 14 | 0.015       | 0.00033     | 0.00268     | 0.00336     | 0.0057  |
| 40 | R_parcial 15 | 0.026       | 0.01074     | 0.01309     | 0.01377     | 0.01611 |
| 47 | R_parcial 16 | 0.027       | 0.01175     | 0.0141      | 0.01478     | 0.01712 |
| 49 | R_parcial 17 | 0.026       | 0.01108     | 0.01343     | 0.01411     | 0.01645 |
| 57 | R_parcial 18 | 0.015       | 0.00033     | 0.00268     | 0.00336     | 0.0057  |

Figura 19. Sección 4. Cálculos auxiliares.  
Elaboración propia

**Resumen de resultados**

**Tabla de estadísticos**

|           | R_nula  | R_parcial | A_par_tot |
|-----------|---------|-----------|-----------|
| n         | 48      | 48        | 48        |
| Media     | 0.0000  | 0.0000    | 0.0000    |
| Desv. Est | 0.00000 | 0.00000   | 0.00000   |

t-Test ✔ #DIV/0! ✔ #DIV/0!

**Tabla de conteos**

| Condición         | Conteo |
|-------------------|--------|
| R - A > 0         | 0      |
| R - A <= 0        | 2211   |
| Suma de cuadrados | 0      |

Figura 20. Sección 5. Resumen de resultados.  
Elaboración propia

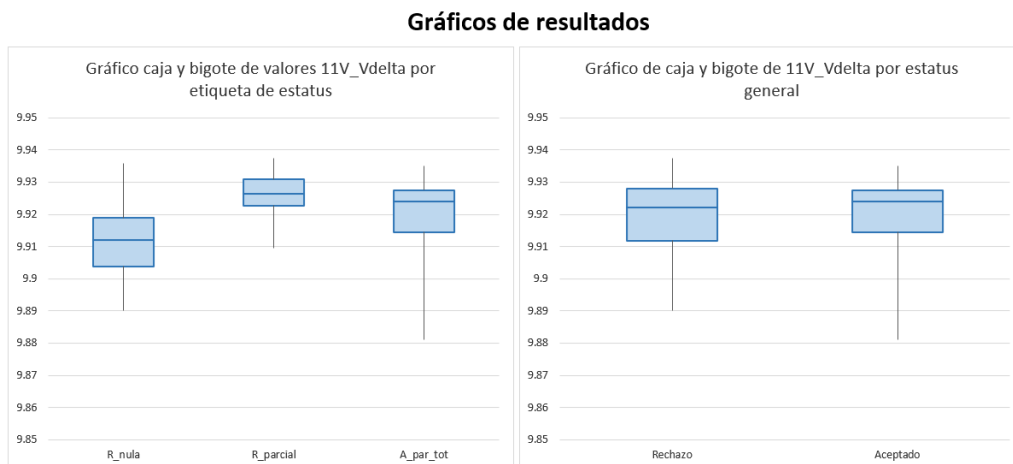


Figura 21. Sección 6. Gráficos de resultados.  
Elaboración propia

| Resumen de modelos |        |   |      |      |      |      |      |      |       |   |
|--------------------|--------|---|------|------|------|------|------|------|-------|---|
| Model1             | 2211   | 2 | TRUE | TRUE | TRUE | TRUE | TRUE | TRUE | 32767 | 0 |
| Model2             | 4.8368 | 2 | TRUE | TRUE | TRUE | TRUE | TRUE | TRUE | 32767 | 0 |

Figura 22. Sección 7. Resumen de modelos.  
Elaboración propia

| Notas   |
|---|
| <p>1st GR&amp;R run.<br/>                     Vinit = 137<br/>                     Vfinal = 148</p> <p>The GR&amp;R passed NDC, %StudyVar and % Contribution.<br/>                     %Tolerane for Part-Part and GR&amp;R is not passing.</p> |

Figura 23. Sección 8. Notas.  
Elaboración propia

La Figura 24 muestra la ventana con los parámetros del modelo de optimización que el usuario debe introducir en *Solver*, los cuales se describen a continuación.

1. Función objetivo. Se define en forma de una celda en una hoja de Excel en la que se encuentra una operación matemática que envuelve a su vez otras celdas con variables. Se selecciona en la ventana si se desea optimizar minimizando, maximizando o igualando a un valor. Para el caso del *Analizador* de las curvas de voltaje, se define como función objetivo la celda que contiene la función indicadora de la Ecuación 8, la cual representa el conteo de las veces que el valor *Vdelta* en los sensores conocidos rechazados son mayores que los conocidos aceptados. Se especifica que la función objetivo se maximice.

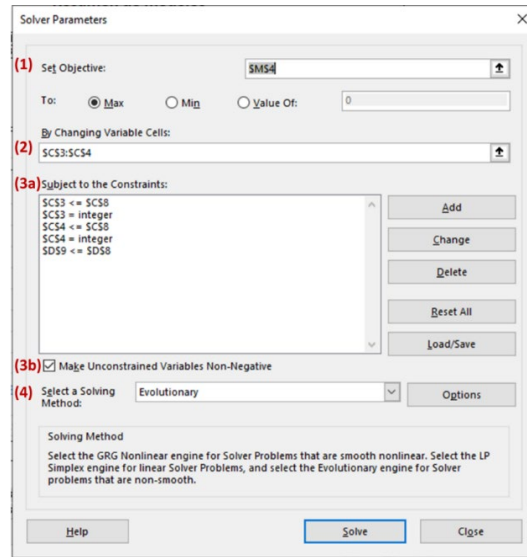


Figura 24. Parámetros configurables en módulo Solver.  
Elaboración propia

$$\sum_{\substack{1 \leq i \leq m \\ 1 \leq j \leq n}} 1_{(V_{init_i} - V_{final_i}) < (V_{init_j} - V_{final_j})} \quad (8)$$

Donde:

- $V_{init_i}$  y  $V_{init_j}$  representan las lecturas de voltaje en  $T_{init}$  para el  $i$ -ésimo sensor conocido aceptable y el  $j$ -ésimo sensor conocido rechazado, respectivamente.
  - $V_{final_i}$  y  $V_{final_j}$  representan las lecturas de voltaje en  $T_{final}$  para el  $i$ -ésimo sensor conocido aceptable y el  $j$ -ésimo sensor conocido rechazado, respectivamente.
2. Variables de la función objetivo. Aunque los parámetros  $T_{init}$  y  $T_{final}$  no se encuentran contenidos directamente en la función objetivo, sí determinan el cálculo del valor  $V_{delta}$  de los sensores, sean aceptados o rechazados. Por esta razón, se definen estos parámetros como las variables de la función objetivo, sobre las cuales Solver realizará iteraciones en busca del valor máximo de la mencionada función.
  3. Restricciones. En todo problema de optimización, los valores de las variables de la función objetivo necesitan ser acotados en rangos permitidos, los

cuales en muchas ocasiones tienen que ver con la disponibilidad de recursos o limitaciones tecnológicas. A los elementos que acotan las variables se les llama *restricciones*; *Solver* solicita dos tipos de ellas.

- a. Numéricas. Es la restricción que impone un límite al valor que la variable puede tomar, ya sea superior, inferior o entero. En el caso del *Analizador*, se define que individualmente y sumados, los parámetros *Tinit* y *Tfinal* no pueden ser mayores a 5000 milisegundos, esto es debido a que se desea mantener el tiempo ciclo del equipo de producción FFT por debajo de este valor. También, se define que ambos parámetros deben ser números enteros, es decir, no se admiten valores decimales.
  - b. De no negatividad. Es la restricción que es utilizada para representar la existencia de recursos, esto lo hace mediante restringir que la solución implique números negativos.
4. Algoritmo de solución. Se selecciona el método de solución que *Solver* empleará para buscar la solución óptima, en el caso del *Analizador*, se define el método evolucionario (*evolutionary* en inglés), el cual se utiliza para la solución de problemas que no tienen una solución lineal.

#### **3.2.4. Diseño de equipo de producción**

El último paso preparativo para la implementación del PCTD en un ambiente de producción es definir en cuál de las estaciones del equipo de producción FFT que se muestra en la Figura 25 se han de incorporar los cambios necesarios. La Tabla 5, relaciona las estaciones del equipo FFT, sus funciones actuales y posterior a la implementación del PCTD. Como se puede observar a partir de la mencionada tabla, la *prueba de continuidad eléctrica* que se llevaba a cabo en la estación 2, se migró a la estación 1 junto con la *prueba de aislamiento eléctrico* con el fin de dar paso al PCTD.

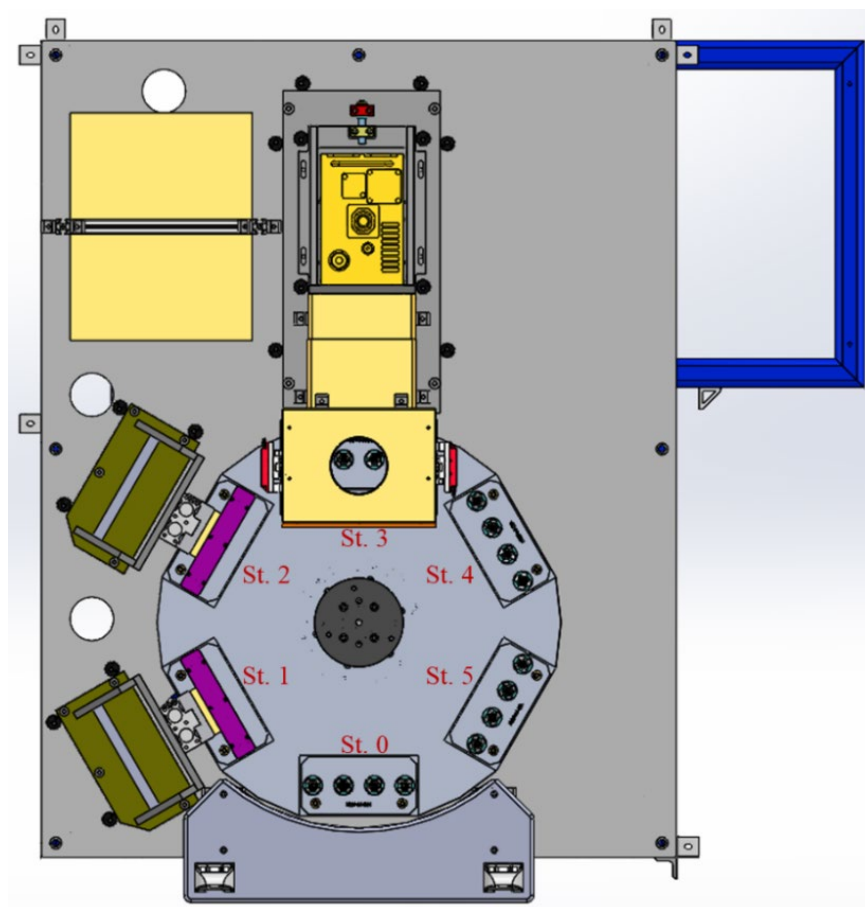


Figura 25. Estaciones del equipo de producción FFT.  
B. Armstrong, comunicación personal, 5 de septiembre de 2018

Tabla 5. Función actual y posterior a implementación del PCTD de las estaciones de equipo de producción FFT.

| Estación | Función actual                            | Función después de PCTD                        |
|----------|---|--|
| St. 0    | Carga y descarga de producto.             | Carga y descarga de producto                   |
| St. 1    | Prueba de aislamiento eléctrico.          | Prueba de aislamiento eléctrico y continuidad. |
| St. 2    | Prueba de continuidad eléctrica.          | PCTD   |
| St. 3    | Codificado láser del sensor EGR aceptado. | Codificado láser del sensor EGR aceptado.      |
| St. 4    | No aplica.                                | No aplica.                                     |
| St. 5    | No aplica.                                | No aplica.                                     |

Elaboración propia

### **3.2.5. Plan de calificación y controles de lanzamiento**

Como todo sistema de medición utilizado en la industria, antes de ser liberado para producción en masa, el PCTD necesitaría ser sometido a estudios que demostraran su repetibilidad, reproducibilidad y capacidad de proceso una vez que los parámetros de proceso fueran desarrollados. Estos estudios forman parte de lo que se conoce como *plan de calificación* del equipo de producción. De manera específica, el PCTD necesitaría de un estudio GR&R y Cpk, los cuales se llevan a cabo en la sección 3.4.

También, en la industria automotriz, debe considerarse una ventana de tiempo significativa en la que como parte de la implementación de cualquier sistema de detección nuevo (ya sea manual o automático) que remplace a uno probado de tener cierta eficacia, ambos deben permanecer activos y completamente funcionales. Al final de esta ventana de tiempo, se evalúan los resultados contra un objetivo fijado de antemano y en el caso favorable se decide remover el antiguo sistema de detección, de lo contrario se toman las decisiones pertinentes. Esto se hace para tener la certeza que una vez implementado, el sistema nuevo no omitirá aspectos importantes que el anterior sí consideraba, y de esa manera pueda potencialmente desencadenarse un problema mayúsculo. Esta ventana de tiempo se conoce como *controles de lanzamiento*.

La implementación del PCTD como sistema automático, reemplaza a la inspección visual por Rayos X, la cual es completamente dependiente del operador. Como controles de lanzamiento se definió una ventana de 10 lotes de producción (cada uno con 1050 sensores EGR) en la que el PCTD debe estar activo probando los sensores EGR, y posteriormente ser inspeccionados por Rayos X. Al finalizar el periodo de controles de lanzamiento, debe analizarse la información y cumplir con el criterio de salida, el cual es que el PCTD rechace todos los sensores EGR cuya condición de cobertura de pasta C575 en termistor sea rechazable, tal como se habría hecho con la inspección por Rayos X.



### **3.3. DESARROLLO DE PARÁMETROS**

La presente sección se desenvuelve posterior a la instalación del hardware y programación de la secuencia de prueba, ambos necesarios para la implementación del PCTD en el equipo de producción FFT. Esto estuvo a cargo del departamento de mecanización de la compañía. Se describe el trabajo que se llevó a cabo para la implementación del PCTD en un ambiente de producción y la posterior ejecución del plan de calificación, ambos planeados en la sección 3.2.

En la subsección 3.3.1, se probaron los primeros sensores EGR en el equipo de producción FFT adaptado para el PCTD. Posteriormente, en la subsección 3.3.2 se utilizaron las curvas de voltaje obtenidas de probar estos sensores, para la definición de los parámetros de prueba del PCTD con la ayuda del *Analizador*. Y finalmente en la subsección 3.3.3, se probaron 3 mil sensores, cuya información se utilizó para el establecimiento de un límite de proceso para el delta de lecturas de voltaje.

#### **3.3.1. Corridas iniciales**

Se obtuvieron 12 sensores EGR con condiciones diversas de cobertura de pasta C575 en termistor, confirmadas por inspección Rayos X, las cuales se pueden observar en la Figura 26. Hasta este momento, el ingeniero diseñador del producto había especificado criterios claros de aceptación y rechazo de cobertura de pasta C575 en termistor para la inspección de Rayos X, los cuales se muestran en la Tabla 6. Estos sensores se probaron en el equipo de producción FFT, cada uno en tres ocasiones por cada una de las cuatro posiciones del herramental de la máquina; todas las corridas de prueba se llevaron a cabo en el orden que se muestra en la Tabla 7, el cual es el típico orden para el experimento diseñado GR&R.

Una vez realizadas dichas corridas, se descargaron los datos de prueba que la máquina de producción FFT almacenó automáticamente en el servidor y se confirmó que no existía problema alguno con el almacenamiento de datos.

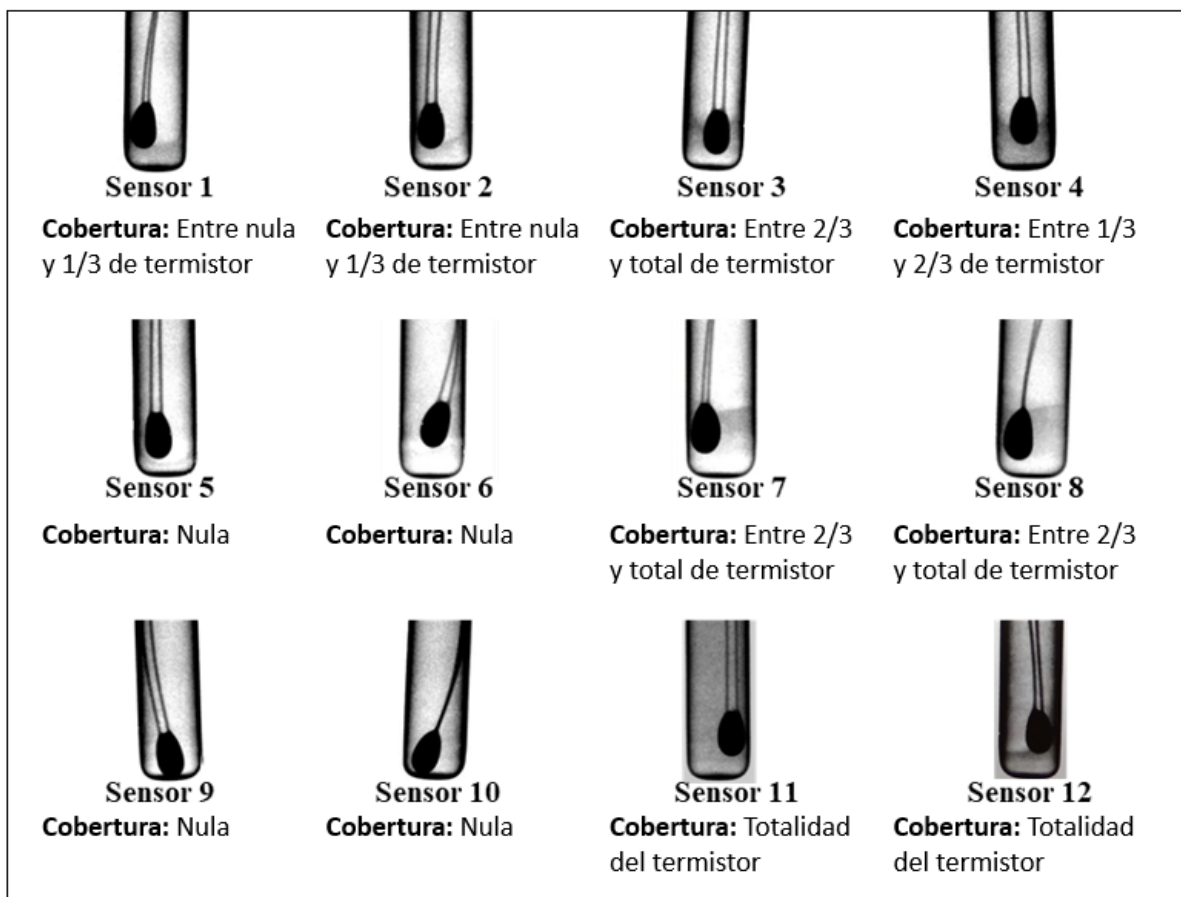


Figura 26. Condiciones de cobertura de pasta C575 en piezas de corridas iniciales. Elaboración propia

Tabla 6. Criterios de aceptación y rechazo de cobertura de pasta C575 en termistores.

| Condición de cobertura de pasta C575 | Criterio   | Disposición de material  | Etiqueta en Analizador | Ejemplos de sensores en Figura 26 |
|--------------------------------------|------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| Nula                                 | Rechazo    | Desechar en contenedor   | R_nula                 | 5, 6                              |
| Entre nula y 1/3 de termistor        | Rechazo    | Resguardar para análisis | R_parcial              | 1, 2                              |
| Entre 1/3 y 2/3 de termistor         | Rechazo    | Resguardar para análisis | R_parcial              | 4                                 |
| Entre que 2/3 y total de termistor   | Aceptación | Continúa flujo de prod.  | A_par_tot              | 3, 7                              |
| Totalidad del termistor              | Aceptación | Continúa flujo de prod.  | A_par_tot              | 11, 12                            |

Elaboración propia

Tabla 7. Orden de prueba de piezas en corridas iniciales y para estudio GR&amp;R.

| Corrida/Posición | Réplica 1 |    |    |    | Réplica 2 |    |    |    | Réplica 3 |    |    |    |
|------------------|-----------|----|----|----|-----------|----|----|----|-----------|----|----|----|
|                  | 1         | 2  | 3  | 4  | 1         | 2  | 3  | 4  | 1         | 2  | 3  | 4  |
| 1                | 1         | 2  | 3  | 4  | 12        | 11 | 10 | 9  | 2         | 5  | 11 | 4  |
| 2                | 5         | 6  | 7  | 8  | 8         | 7  | 6  | 5  | 1         | 7  | 3  | 10 |
| 3                | 9         | 10 | 11 | 12 | 4         | 3  | 2  | 1  | 9         | 6  | 8  | 12 |
| 4                | 4         | 1  | 2  | 3  | 9         | 12 | 11 | 10 | 4         | 2  | 5  | 11 |
| 5                | 8         | 5  | 6  | 7  | 5         | 8  | 7  | 6  | 10        | 1  | 7  | 3  |
| 6                | 12        | 9  | 10 | 11 | 1         | 4  | 3  | 2  | 12        | 9  | 6  | 8  |
| 7                | 3         | 4  | 1  | 2  | 10        | 9  | 12 | 11 | 11        | 4  | 2  | 5  |
| 8                | 7         | 8  | 5  | 6  | 6         | 5  | 8  | 7  | 3         | 10 | 1  | 7  |
| 9                | 11        | 12 | 9  | 10 | 2         | 1  | 4  | 3  | 8         | 12 | 9  | 6  |
| 10               | 2         | 3  | 4  | 1  | 11        | 10 | 9  | 12 | 5         | 11 | 4  | 2  |
| 11               | 6         | 7  | 8  | 5  | 7         | 6  | 5  | 8  | 7         | 3  | 10 | 1  |
| 12               | 10        | 11 | 12 | 9  | 3         | 2  | 1  | 4  | 6         | 8  | 12 | 9  |

Elaboración propia

### 3.3.2. Estimación de parámetros $V_{init}$ y $V_{final}$

En la subsección 3.3.1, además de descargarse los datos de proceso que se almacenaron en el servidor, también se obtuvieron las curvas de voltaje para su uso en la definición de los parámetros  $T_{init}$  y  $T_{final}$ , las cuales fueron introducidas en el *Analizador*, un total de 144 curvas. Posteriormente se ejecutó el algoritmo en *Solver* con los parámetros configurables que se muestran en la Figura 24. *Solver* encontró una solución óptima en aproximadamente 40 segundos, estimando los valores de los parámetros  $T_{init}$  y  $T_{final}$  en 1370 y 1480 milisegundos, los cuales se muestran en la Tabla 8. Estos valores estimados produjeron de manera efectiva la maximización de la función objetivo. Es decir, en cada una de las oportunidades de comparación de valores  $V_{delta}$  entre los sensores conocidos aceptados y los rechazados,

siempre éstos últimos fueron mayores que los primeros, y en ninguna de las comparaciones esto sucedió del modo contrario, como se puede observar en la *tabla de conteos* en la Tabla 9. Además de esto, las medias para los tres grupos de sensores resumidos de acuerdo con su etiqueta de estatus en la Tabla 10 se observan sustancialmente distintas. Esto también se puede demostrar gráficamente en la Figura 27, en la que se observa una clara separación entre las tres cajas que representan los resultados de los tipos de sensores de acuerdo con su etiqueta de estatus.

Tabla 8. Extracto de parámetros relevantes de la sección Configuraciones del Analizador.

| Parámetro      | Valor (en milisegundos) |
|----------------|-------------------------|
| Tinit          | 1370                    |
| Tfinal         | 1480                    |
| Max. Limit     | 5000                    |
| Tinit + Tfinal | 2850                    |

Elaboración propia

Tabla 9. Tabla de conteos de la sección Resumen de resultados del Analizador.

| Condición         | Conteo |
|-------------------|--------|
| $R - A > 0$       | 2211   |
| $R - A \leq 0$    | 0      |
| Suma de cuadrados | 4.8368 |

Elaboración propia

Tabla 10. Tabla de estadísticos de la sección Resumen de resultados del Analizador.

| Parámetro | R_nula  | R_parcial | R_par_tot |
|-----------|---------|-----------|-----------|
| n         | 48      | 48        | 48        |
| Media     | 0.0729  | 0.0229    | 0.0121    |
| Desv. Est | 0.02644 | 0.00448   | 0.00217   |

Elaboración propia

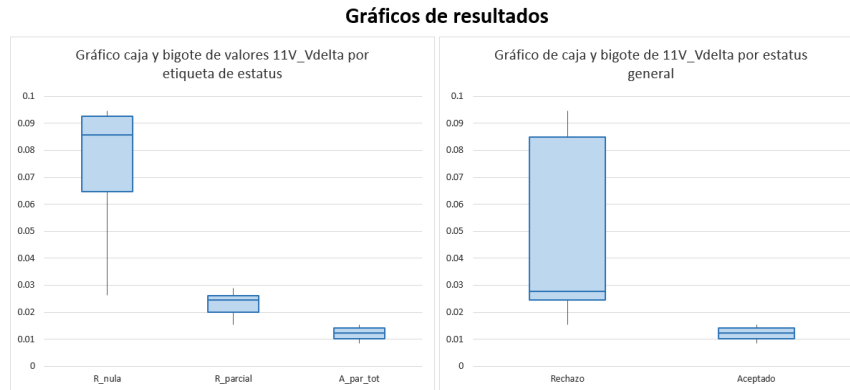


Figura 27. Gráficos de resultados optimizados por Solver.  
Elaboración propia

### 3.3.3. Estimación de parámetro Vdelta\_Max

Una vez definidos los parámetros de tiempo los cuales son necesarios para el cálculo del valor *Vdelta* del PCTD, el siguiente paso fue realizar la estimación del parámetro faltante: el *Vdelta\_Max*. De acuerdo con la subsección 3.2.2, este parámetro permite al equipo de producción FFT discriminar entre piezas aceptadas y rechazadas. Para hacer posible la estimación de este parámetro, se identificó que era necesario recabar los datos de proceso del PCTD de un mínimo de 3 lotes de producción, equivalentes a 3 mil sensores, a los cuales posteriormente se les inspeccionó con Rayos X con el fin de poder correlacionar el valor numérico con una imagen. Una vez probados en el PCTD, se procedió a analizar los datos de los sensores mediante el histograma de frecuencias que se muestra en la Figura 28. Con este histograma se observa que la distribución de estos datos no parece ser normal, sino que tiende a formar tres grupos casi perfectamente definidos. El primero de estos grupos de izquierda a derecha se asemeja a una distribución Normal teniendo como valores frontera 0 a 0.015. El segundo tiene una forma más aplanada yendo desde 0.015 a 0.047. El tercero parece tener una forma ligeramente más puntiaguda, partiendo desde 0.047 hasta poco más de 0.1. Con ayuda del gráfico de probabilidad normal de la Figura 29, fue posible confirmar que la distribución de los datos no era normal.

Posteriormente se procedió a segmentar la totalidad de los datos observados en la Figura 28 en tres grupos, de acuerdo con los valores frontera mencionados en el

párrafo anterior. Luego se graficaron los tres grupos en histogramas de frecuencias y se identificó cada uno con la distribución de probabilidad de la cual de manera más probable provenían. El grupo 1 de una distribución Normal (Figura 30 y 31); el grupo 2 de una distribución Lognormal de 3 parámetros (Figura 32 y 33); el grupo 3, de una distribución Weibull (Figura 34 y 35).

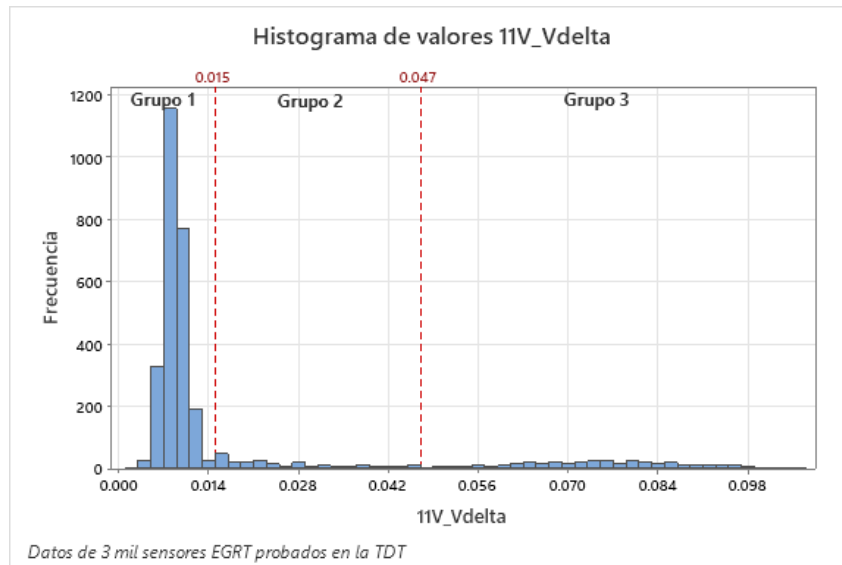


Figura 28. Histograma de valores Vdelta de 3 mil sensores EGR. Elaboración propia

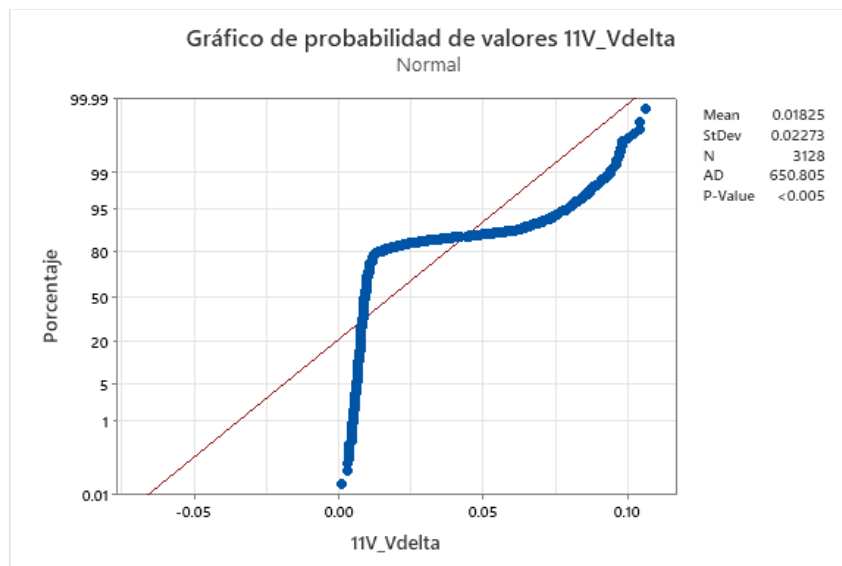


Figura 29. Gráfico de probabilidad de valores Vdelta de 3 mil sensores EGR. Elaboración propia

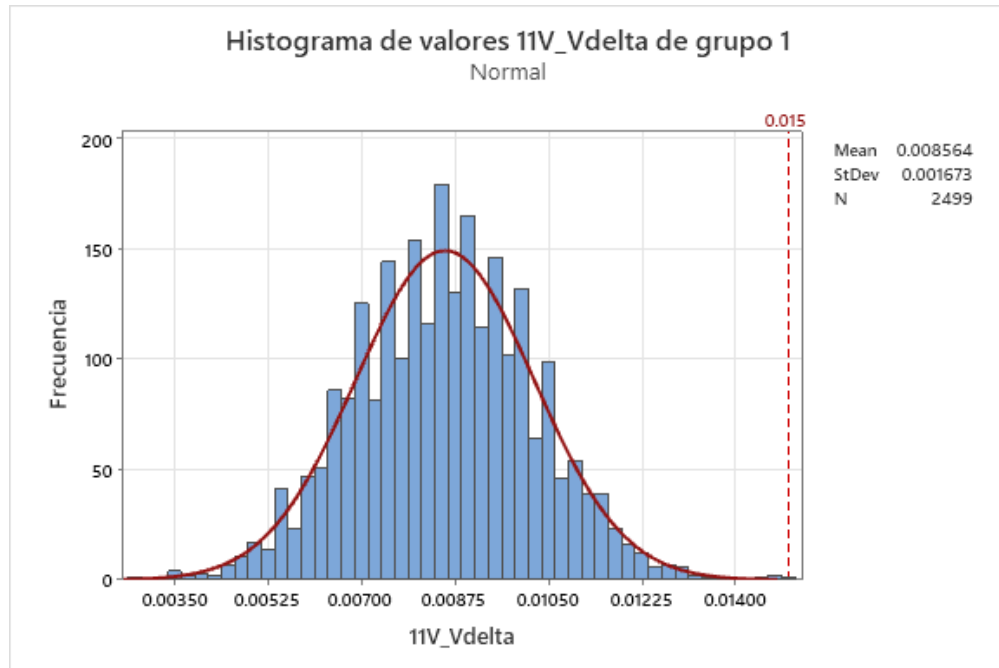


Figura 30. Histograma de valores Vdelta del grupo 1.  
Elaboración propia

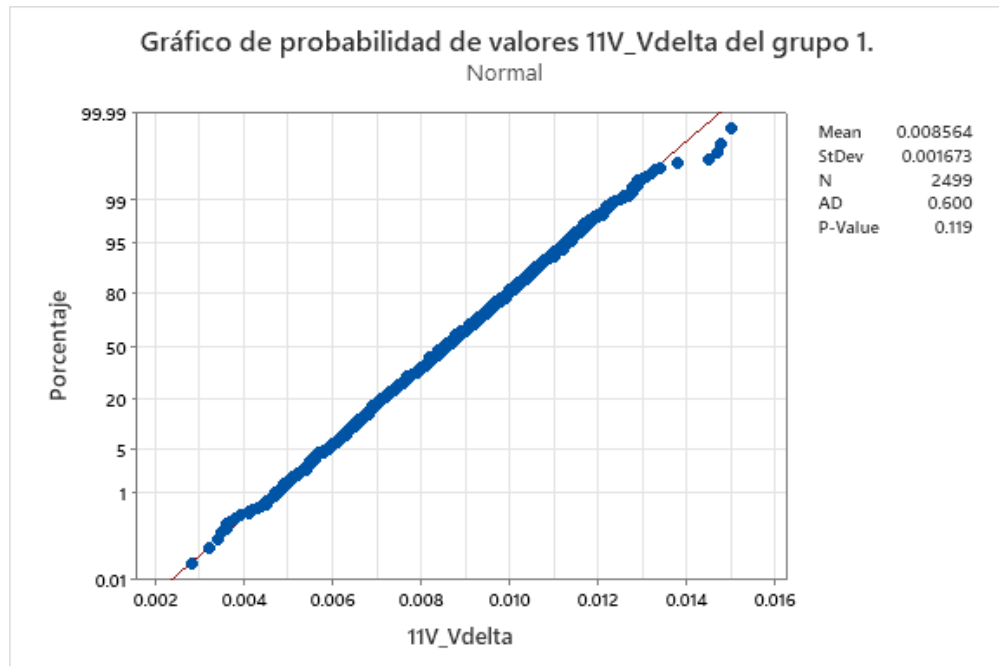


Figura 31. Gráfico de probabilidad de valores Vdelta del grupo 1.  
Elaboración propia

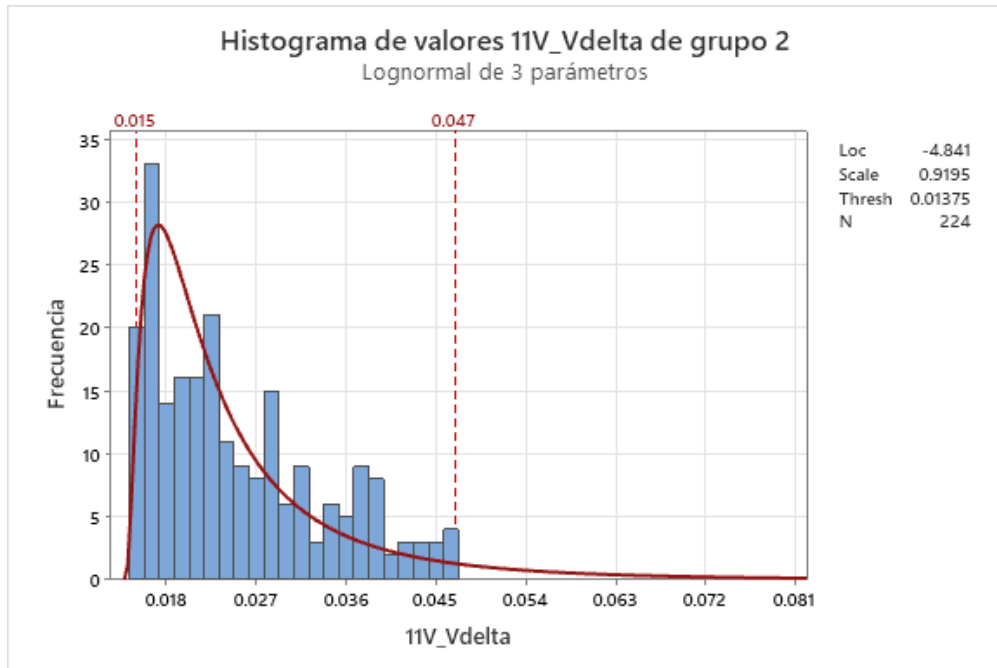


Figura 32. Histograma de valores Vdelta del grupo 2.  
Elaboración propia

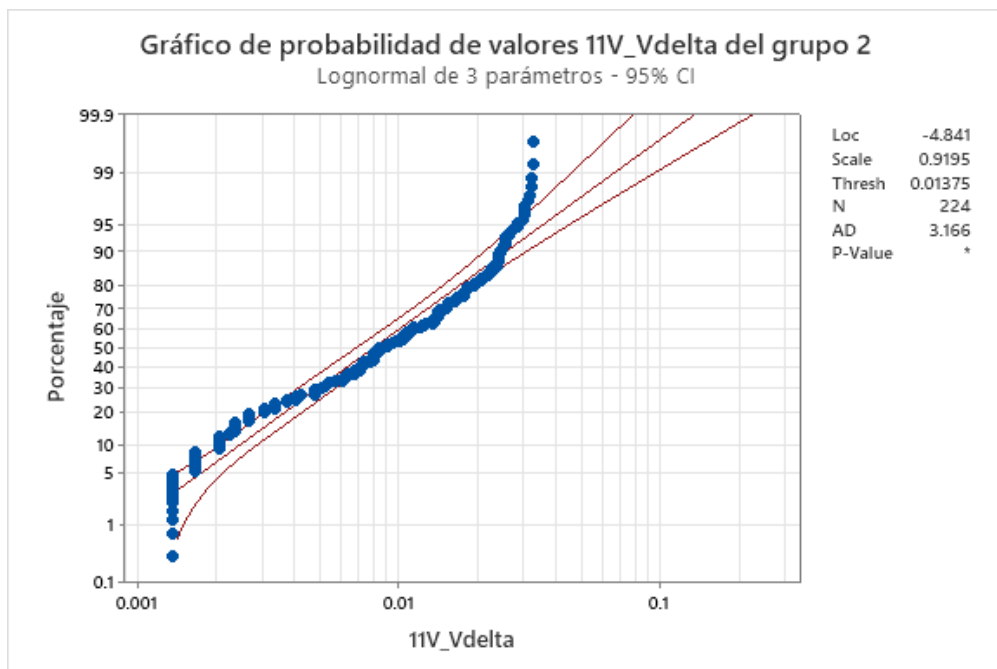


Figura 33. Gráfico de probabilidad de valores Vdelta del grupo 2.  
Elaboración propia



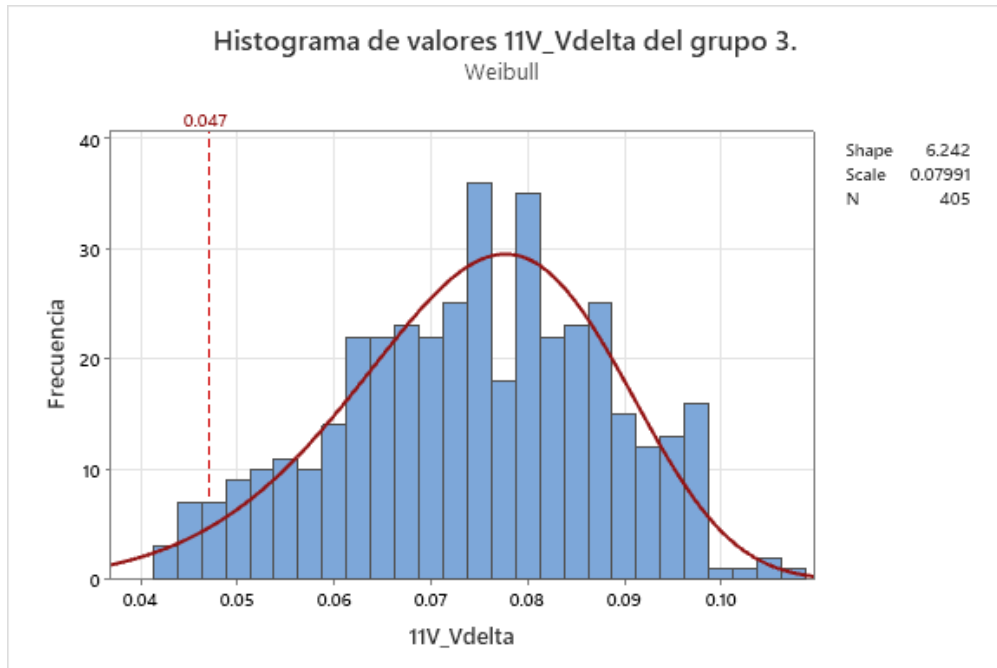


Figura 34. Histograma de valores Vdelta del grupo 3.  
Elaboración propia

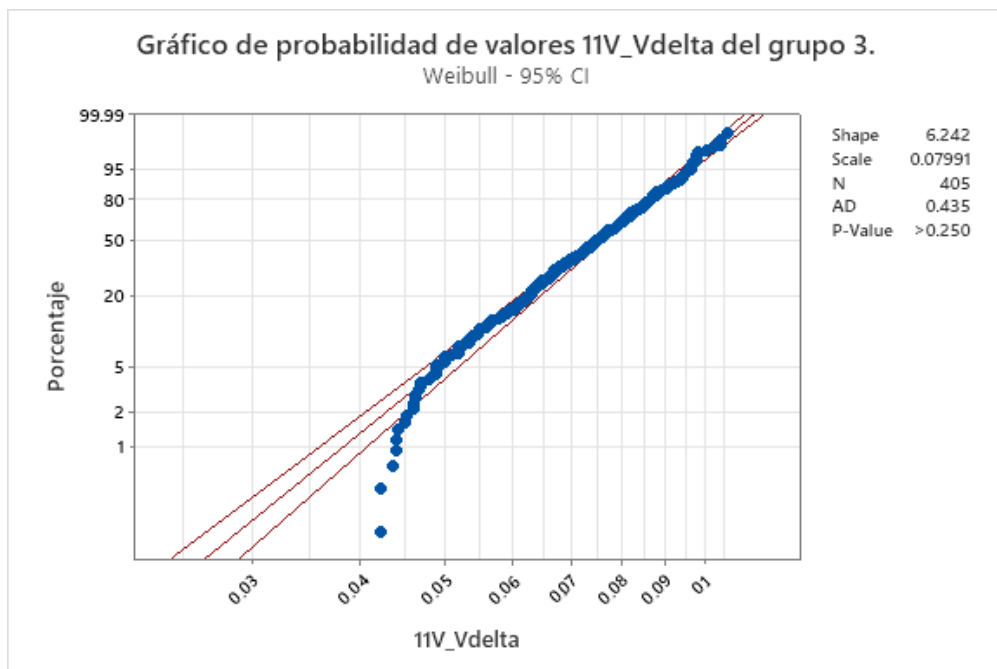


Figura 35. Gráfico de probabilidad de valores Vdelta del grupo 3.  
Elaboración propia

Con ayuda de los datos de prueba del PCTD y las imágenes de inspección en Rayos X de cada sensor, se procedió a muestrear de manera aleatoria en cada uno de los grupos con el fin de identificar qué nivel de cobertura de pasta C575 en termistor tenían. Lo que se encontró fue que los valores  $V_{\Delta}$  del grupo 1 correspondían a las piezas con criterio de aceptación; del grupo 2 las piezas con cobertura parcial y criterio de resguardo para análisis; del grupo 3 sin cobertura, es decir con criterio de rechazo. Estos criterios se encuentran en la Tabla 6.

Las Figuras 36 a 38 presentan imágenes Rayos X de algunos sensores EGR cuyos valores  $V_{\Delta}$  provienen de cada uno de los grupos.

Con base en las imágenes Rayos X de los tres grupos, especialmente las de los grupos 1 y 2, se estimó el valor del parámetro  $V_{\Delta\_Max}$  en 0.015, bajo el cual se juzgarían los sensores EGR durante el periodo de *controles de lanzamiento* abordados en la sección 4.1.

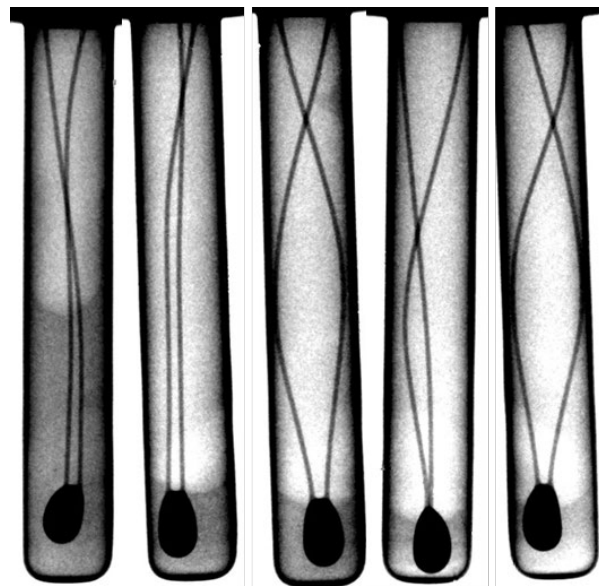


Figura 36. Imágenes Rayos X de algunos sensores EGR cuyos valores  $V_{\Delta}$  se encuentran en el grupo 1.  
Elaboración propia

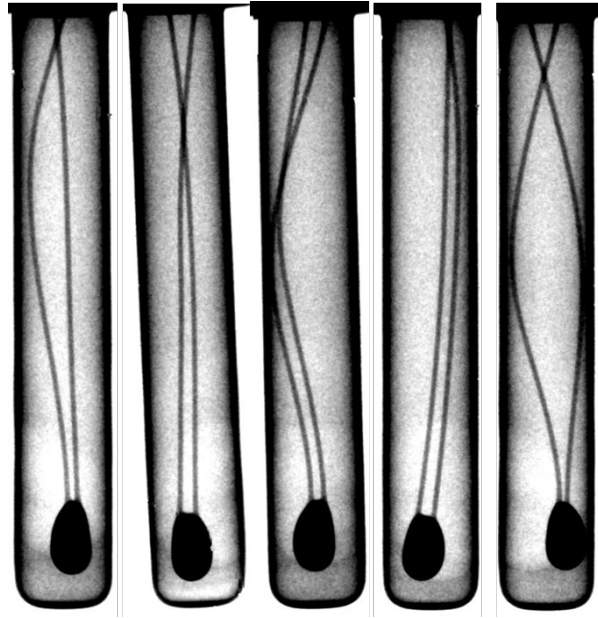


Figura 37. Imágenes Rayos X de algunos sensores EGR cuyos valores  $V_{\Delta}$  se encuentran en el grupo 2.  
Elaboración propia

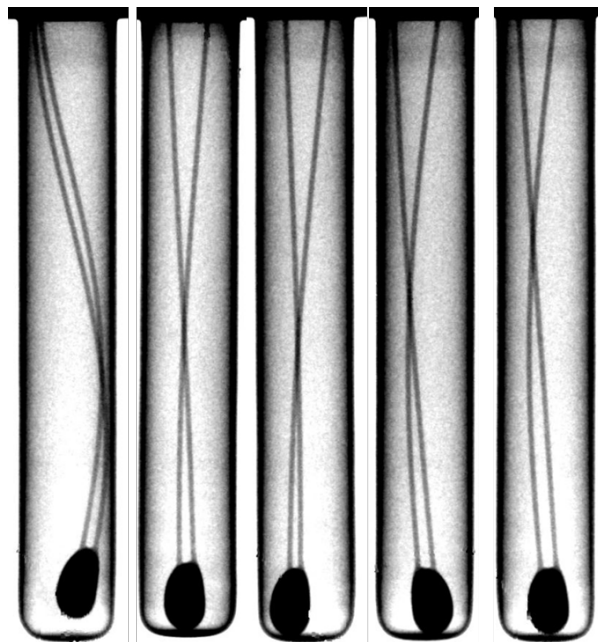


Figura 38. Imágenes Rayos X de algunos sensores EGR cuyos valores  $V_{\Delta}$  se encuentran en el grupo 3.  
Elaboración propia

### 3.4. PLAN DE VALIDACIÓN

En la sección 3.2.5 se definió el plan de calificación de la implementación del PCTD en el equipo de producción FFT, el cual consiste en un estudio GR&R y uno de Cpk, los cuales se muestran en la Tabla 11 y en la Figura 39, respectivamente.

En la Tabla 11 se muestran los resultados del estudio GR&R, en la cual el % *varianza del estudio* de la fuente *repetibilidad y reproducibilidad total del estudio* es menor a 10 %. Este es el valor máximo que un estudio GR&R puede obtener para que el sistema de medición sea considerado como aceptable. Este estudio se llevó a cabo con 12 sensores EGR probados en cada posición de prueba, tres veces en cada una y de acuerdo con el orden en la Tabla 7.

También, en la Figura 39 se muestra el estudio Cpk del primer lote de producción, en el cual se puede observar que este valor es mayor a 1.33. Este es el límite inferior para que un proceso pueda ser considerado como capaz de producir piezas dentro de la especificación técnica.

Con base en estos estudios, se consideró la implementación del PCTD calificado y listo para comenzar a probar en un ambiente de producción.

Tabla 11. Tabla de resultados del estudio GR&R para Vdelta.

| Fuente   | Desviación estándar (DE) | Varianza del estudio ( $6 * DE$ ) | % Varianza del estudio (% VE) |
|--|--------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Repetibilidad y reproducibilidad total del estudio | 0.0012086                | 0.007251                          | 3.77                          |
| Repetibilidad                                      | 0.0011286                | 0.006771                          | 3.52                          |
| Reproducibilidad                                   | 0.0004323                | 0.002594                          | 1.35                          |
| Pieza a pieza                                      | 0.0320334                | 0.192200                          | 99.93                         |
| Variación total                                    | 0.0320562                | 0.192337                          | 100.00                        |

Elaboración propia

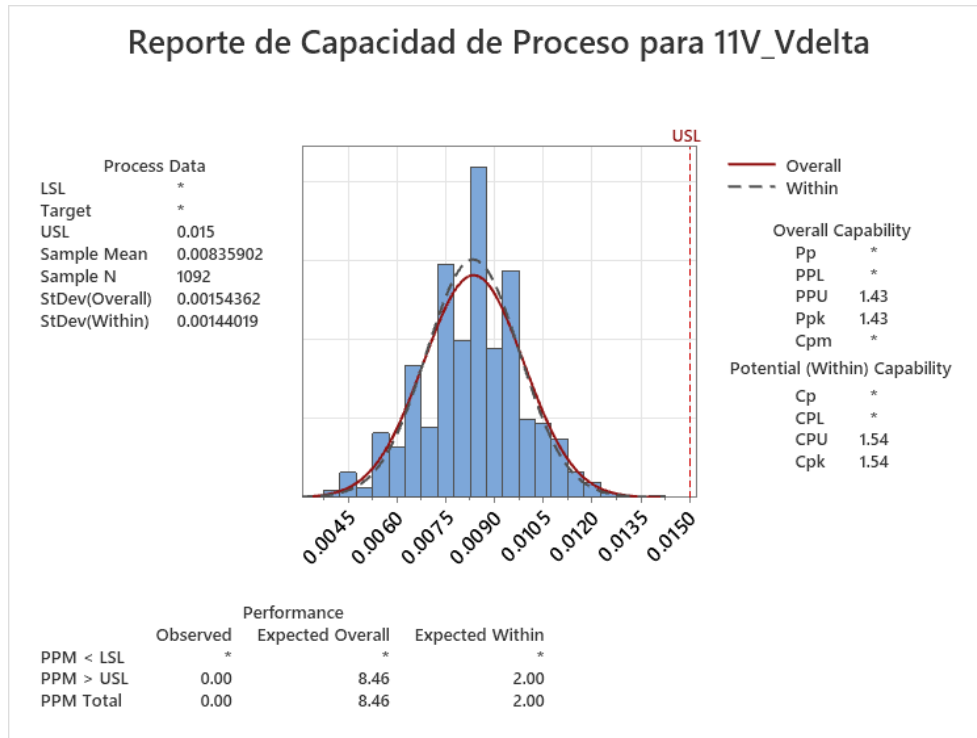


Figura 39. Estudio Cpk para Vdelta.  
Elaboración propia

## 4. RESULTADOS

Se abordan los temas de controles de lanzamiento, y la estandarización y prevención de ocurrencia. En la primera, se resumen y analizan los resultados de la implementación del PCTD. En la segunda, se realiza la documentación de puntos específicos del PCTD en documentos clave del negocio.

### 4.1. CONTROLES DE LANZAMIENTO

El periodo de controles de lanzamiento se llevó a cabo de acuerdo con lo mencionado en la subsección 3.2.5 y bajo la supervisión de ingenieros de calidad y procesos. Se reportan en la Tabla 12 los resultados de sensores aceptados y rechazados con ambas detecciones atendiendo únicamente al número de éstos. Posteriormente, los rechazados con ambas detecciones fueron inspeccionados mediante Rayos X por los ingenieros a cargo y se les clasificó en alguna de las categorías de cobertura de pasta C575 de la Tabla 6. Esta información se reporta en las Tablas 13 y 14 para la detección por el PCTD y Rayos X, respectivamente. A partir de la Tabla 12 se concluye que, del total de 10 mil 500 sensores fabricados e inspeccionados durante el periodo de controles de lanzamiento, el 0.65 % de ellos fueron rechazados por el PCTD y el 0.59 % por Rayos X.

Tabla 12. Resumen general de resultados de sensores aceptados y rechazados por detección PCTD y Rayos X.

| Lote          | Aceptados | Rechazados por PCTD | Rechazados por Rayos X |
|---------------|-----------|---------------------|------------------------|
| J01, 44326756 | 1045      | 4                   | 1                      |
| J02, 44326757 | 1031      | 19                  | 0                      |
| J03, 44320933 | 1050      | 0                   | 0                      |
| J04, 44319599 | 1004      | 25                  | 21                     |
| J05, 44319605 | 1040      | 7                   | 3                      |
| J06, 44314439 | 1014      | 9                   | 27                     |
| J07, 44330540 | 1042      | 2                   | 6                      |
| J08, 44330541 | 1049      | 1                   | 0                      |
| J09, 44334931 | 1044      | 2                   | 4                      |
| J10, 44334934 | 1050      | 0                   | 0                      |

Elaboración propia

De la Tabla 13, que incluye información referente a la detección por PCTD, se puede observar que en un alto porcentaje de los sensores (66.6 %), el rechazo fue correctamente hecho; la condición incluida es la cobertura *nula* de termistor. También, de acuerdo con los criterios de aceptación en la Tabla 6, el 28.98 % de los sensores rechazados pertenecen al grupo de los sensores que deben resguardarse para análisis de ingeniero diseñador del producto; las condiciones que se incluyen son cobertura *entre nula y 1/3 de termistor* y cobertura *entre 1/3 y 2/3 de termistor*. Finalmente, el 4.34 % de los sensores fueron incorrectamente rechazados (*error tipo 1*); las condiciones que se incluyen son cobertura *entre 2/3 y total de termistor* y cobertura *en la totalidad del termistor*.

Respecto de la Tabla 14, la cual incluye la información relacionada con la detección por Rayos X, se puede observar que ninguno de los sensores fue encontrado con la condición de cobertura *Nula* de pasta C575, lo cual es un indicativo de la eficacia del PCTD para detectar el 100 % de los sensores con condición rechazable.

Tabla 13. Sensores rechazados por la detección por PCTD durante los controles de lanzamiento, atendiendo a las condiciones de cobertura de pasta C575.

| Lote          | Nula | Entre nula y<br>1/3 de<br>termistor | Entre 1/3 y<br>2/3 de<br>termistor | Entre 2/3 y<br>total de<br>termistor | Totalidad<br>de<br>termistor |
|---------------|------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| J01, 44326756 | 3    | 1                                   | 0                                  | 0                                    | 0                            |
| J02, 44326757 | 15   | 1                                   | 0                                  | 1                                    | 2                            |
| J03, 44320933 | 0    | 0                                   | 0                                  | 0                                    | 0                            |
| J04, 44319599 | 13   | 11                                  | 1                                  | 0                                    | 0                            |
| J05, 44319605 | 7    | 0                                   | 0                                  | 0                                    | 0                            |
| J06, 44314439 | 5    | 2                                   | 2                                  | 0                                    | 0                            |
| J07, 44330540 | 2    | 0                                   | 0                                  | 0                                    | 0                            |
| J08, 44330541 | 1    | 0                                   | 0                                  | 0                                    | 0                            |
| J09, 44334931 | 0    | 2                                   | 0                                  | 0                                    | 0                            |
| J10, 44334934 | 0    | 0                                   | 0                                  | 0                                    | 0                            |

Elaboración propia

Tabla 14. Sensores rechazados por la detección por Rayos X durante los controles de lanzamiento, atendiendo a las condiciones de cobertura de pasta C575.

| Lote          | Nula | Entre nula y 1/3 de termistor | Entre 1/3 y 2/3 de termistor | Entre 2/3 y total de termistor | Totalidad de termistor |
|---------------|------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| J01, 44326756 | 0    | 0                             | 1                            | 0                              | 0                      |
| J02, 44326757 | 0    | 0                             | 0                            | 0                              | 0                      |
| J03, 44320933 | 0    | 0                             | 0                            | 0                              | 0                      |
| J04, 44319599 | 0    | 4                             | 11                           | 6                              | 0                      |
| J05, 44319605 | 0    | 0                             | 1                            | 2                              | 0                      |
| J06, 44314439 | 0    | 17                            | 8                            | 2                              | 0                      |
| J07, 44330540 | 0    | 0                             | 0                            | 6                              | 0                      |
| J08, 44330541 | 0    | 0                             | 0                            | 0                              | 0                      |
| J09, 44334931 | 0    | 0                             | 2                            | 2                              | 0                      |
| J10, 44334934 | 0    | 0                             | 0                            | 0                              | 0                      |

Elaboración propia

También, el 70.9 % de los sensores rechazados tenían condición que implicaba resguardo para análisis y sin embargo no fueron detectados por la detección por PCTD. Lo anterior es un indicativo a favor de que las condiciones que se encuentran incluidas en estos sensores probablemente no sean rechazables, sin embargo, debe llevarse a cabo un análisis exhaustivo y posteriormente proveerse aprobación por parte del ingeniero diseñador del producto para que estas condiciones sean aceptadas. Finalmente, el 29.03 % de los sensores rechazados tenían una condición de cobertura aceptable, lo cual confirma lo que establece la Tabla 1: que la detección por Rayos X está rechazando sensores incorrectamente, lo que se traduce en costo para la compañía.

Algunos ejemplos de sensores rechazados por ambas detecciones durante el periodo de controles de lanzamiento se presentan en la Figura 40.

Los ingenieros de calidad y procesos expusieron los resultados del periodo de controles de lanzamiento a los gerentes de calidad, procesos y diseño de producto. Ellos emitieron la aprobación para proceder con la remoción definitiva de la detección por Rayos X estableciendo únicamente la condición que los



documentos clave de la compañía fueran actualizados para reflejar el cambio de éste, lo cual se aborda brevemente en la sección 4.2.

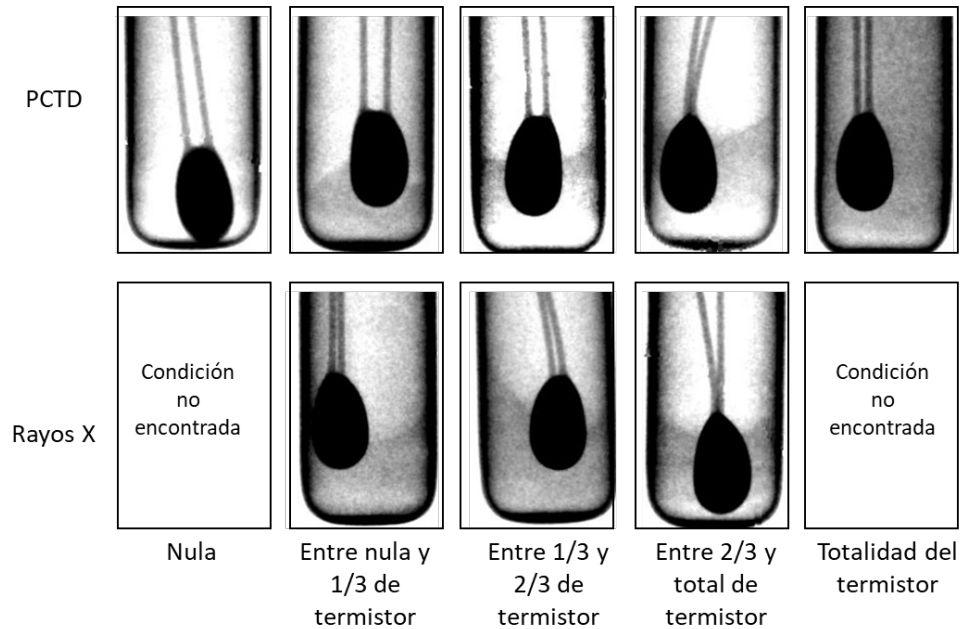


Figura 40. Condición de cobertura de pasta C575 en algunos sensores rechazados por las dos detecciones durante el periodo de controles de lanzamiento.  
Elaboración propia

## 4.2. ESTANDARIZACIÓN Y PREVENCIÓN DE OCURRENCIA

El PCTD, que fue incorporado en la máquina FFT como parte del proceso normal de producción de sensores EGR en la línea de producción con el mismo nombre, fue agregado en los documentos y repositorios clave del negocio con el fin de establecerse de forma permanente y documentarse su instauración. Se enlista el nombre de éstos, y se provee una descripción breve de su contenido y la razón de haberse documentado:

1. PFMEA: es el documento resultante de la aplicación de la metodología cuyo nombre en español es *análisis del modo y efecto de falla del proceso*, el cual enuncia todos los controles que se encuentran presentes para la prevención y detección de ocurrencia de fallas en el proceso de elaboración de un producto o servicio. El PCTD fue agregado en este documento por considerársele método de detección de las fallas *incorrecta cantidad de pasta C575 e incorrecta posición de pasta C575 respecto de termistor*.

2. Plan de control: es un documento que se deriva del PFMEA y contiene las características de interés respecto del producto y proceso, para las cuales se ha definido una especificación, dispositivo de prueba/confirmación de su cumplimiento, tamaño y frecuencia de prueba, método de control y plan de reacción en caso de su incumplimiento. En este documento se incluyó la referencia a la condición de un sensor EGR con cobertura nula de pasta C575, el cual fue fabricado a propósito y agregado al juego de piezas maestras de verificación propio de la máquina FFT.
3. Estándar de operaciones de parámetros: es fundamentalmente un registro con todos los parámetros de proceso utilizados en la fabricación o prueba funcional de un producto, en el cual se documentaron los parámetros del PCTD que se mencionan en la sección 3.3.
4. Base de datos históricos de producción: es un repositorio digital para la retención de los resultados de producción del PCTD en sensores EGR. Esta retención de datos históricos tiene un costo de operación y mantenimiento y sin embargo es de vital importancia por múltiples razones, siendo la principal el tener la manera de evidenciar el resultado de un sensor en particular posterior a un reclamo de cliente por incumplimiento de la funcionalidad del producto. Esta retención se aseguró para el PCTD mediante la dedicación de un espacio de almacenamiento en uno de los servidores remotos de la compañía.
5. Repositorio de software de producción: es un espacio de almacenamiento digital con acceso limitado cuya función es la de mantener un respaldo y control de revisiones del software de las máquinas de producción de la compañía. Ante el caso del atrofiamiento del disco duro de la máquina y pérdida del software, se cuenta con un respaldo seguro en este repositorio. La versión final del software de la máquina FFT que incluye el PCTD, fue respaldado en este repositorio.
6. Librería de ingeniería de la compañía: es un repositorio digital en el que se almacenan documentos de investigación, desarrollo e ingeniería de la compañía que tiene la finalidad de documentar el trabajo realizado en cierta área de aplicación. También tiene la finalidad de ser un punto de

acceso rápido para consulta de información relevante a través de un buscador especializado. Para el caso de la temática de este trabajo de tesis, la documentación se llevó a cabo en el formato A3 descrito en la sección 2.4.4 y fue almacenado en este repositorio.

Los tres primeros documentos en el listado anterior fueron sometidos a revisión y aprobación del departamento de *control de calidad de documentos* una vez efectuada su actualización. Para el repositorio 4 y 5, el soporte del departamento de Mecanización fue requerido. Y para el repositorio 6, el ingeniero desarrollador del proceso que elabora el presente trabajo de tesis dio de alta el formato A3, el cual se encuentra adjunto en el Anexo.

## CONCLUSIONES

El objetivo general del presente trabajo de tesis fue cumplido ya que, fue posible desarrollar un dispositivo de detección automático de presencia de pasta C575 en posición dentro del sensor EGR: el PCTD. Esto se llevó a cabo con base en la disipación térmica que la pasta permite. El PCTD se implementó en producción masiva en la máquina FFT de la línea de producción de estos sensores. Para dar cumplimiento al objetivo general, los 4 objetivos específicos fueron cumplidos.

1. Se definió la secuencia de prueba del PCTD. Esto se logró de manera particular en la subsección 3.2.1.
2. Se incorporó el PCTD en la máquina FFT. Se instaló el hardware y se programó la secuencia de prueba en el software de la máquina FFT para automatizar su ejecución. Esto se trató en la sección 3.3.
3. Se desarrollaron los parámetros de prueba del PCTD. Esto se llevó a cabo en la subsección 3.3.2, en la que se trató con detalle los parámetros necesarios para la operación del PCTD.
4. Se definió el límite de proceso de la característica *caída de voltaje de salida* para el rechazo de piezas no conformantes. Sobre esto se trató ampliamente en la subsección 3.3.3.

## RECOMENDACIONES

El autor de este trabajo de tesis desea emitir una recomendación con relación específica a la problemática abordada en éste: la investigación exhaustiva de las condiciones de cobertura de pasta C575 que en la Tabla 6 se disponen como resguardo para análisis. Esto es debido a que, con base en los resultados observados en la sección 4.1, es posible conjeturar que los sensores EGR con estas condiciones de cobertura de pasta C575 son aceptables, y por lo tanto el ahorro por concepto de material rechazado incorrectamente podría incrementarse.

Con respecto al uso de herramientas avanzadas de ingeniería y solución de problemas que pueden sin duda facilitar a otros colegas el abordar problemáticas complejas. Se recomienda:

1. El abordar cualquier problemática en el área industrial y de servicios mediante el seguimiento de la metodología A3, ya que esta se encuentra basada en el método científico y provee guía para la implementación de soluciones objetivas.
2. El uso de algoritmos evolutivos y generativos para la obtención de soluciones elaboradas en situaciones en las que éstas no se encuentran al alcance, sino que es necesario llevar a cabo múltiples, quizá miles, de iteraciones. De manera más particular, se recomienda el uso de algoritmos de auto aprendizaje en el caso en el que se cuente con datos de entrenamiento y prueba.

## APORTACIÓN DE LA TESIS

En la compañía Sensata Technologies, en los diferentes centros de investigación y desarrollo, así como los de operaciones en los que se incorpore un termistor como parte del producto terminado, esta tesis aporta el desarrollo de un dispositivo para la detección de su correcto ensamble y operabilidad de acuerdo con la función para la que se diseñó, mediante la aplicación de herramientas de ingeniería y el uso de software para el que la compañía cuenta con licencia. Así mismo, el artículo de investigación publicado bajo la problemática de este trabajo de tesis, el cual se titula *aprovechamiento del efecto de auto calentamiento del termistor NTC para detectar su mínima cobertura por una pasta térmica dispensada en el proceso de producción de sensores de temperatura* (Leveraging the Self-heating Effect of NTC Thermistor to Detect its Minimum Coverage by a Dispensed Paste in the Mass Production Process of Temperature Sensors, en inglés) (Rodríguez y Cárdenas, 2023), añade a la comunidad de ingeniería global un ejemplo de la aplicación del principio de funcionamiento del autocalentamiento de termistores.

## **APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS**

El presente trabajo de tesis contribuye a la sociedad mediante la eliminación de una operación catalogada de riesgo medio por la compañía Sensata Technologies, ya que el equipo utilizado para la inspección por Rayos X no está diseñado para un ambiente de producción en masa sino para pruebas de laboratorio. Esto implica que no cuenta con las medidas ergonómicas para el operador que manipula ocho horas al día los sensores desde y hacia dentro de la cabina de inspección del equipo.

## REFERENCIAS

- Ahmed, I. (2020). *Engine Coolant Temperature Sensor in Automotive Applications*. ResearchGate.  
[https://www.researchgate.net/publication/344327217\\_Engine\\_Coolant\\_Temperature\\_Sensor\\_in\\_Automotive\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/344327217_Engine_Coolant_Temperature_Sensor_in_Automotive_Applications)
- Aleksic, S. O., Mitrovic, N. S., Lukovic, M. D., Lukovic, S. G., y Nikolić, N. T. (2021). Heat Loss Flowmeter for Water Based on Thick Film Thermistors in Power Save Regime. *IEEE Sensors Journal*, 21(1), 199-206. doi:10.1109/JSEN.2020.3015023
- Arcidiacono, G., y Nuzzi, S. (2017). A Review of the Fundamentals on Process Capability, Process Performance, and Process Sigma, and an Introduction to Process Sigma Split. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(14), 4556-4570.
- Awalt, A. (16 de Junio de 2020). *Basics of NTC and PTC Thermistors*. Digi-Key Electronics. Recuperado el 20 de Agosto de 2023 de <https://www.digikey.com/en/blog/basics-of-ntc-and-ptc-thermistors>
- Bevan, M. A., Ameri, A. A., East, D., Austin, D. C., Brown, A. D., Hazell, P. J., y Escobedo-Diaz, J. P. (2017). Mechanical Properties and Behavior of Additive Manufactured Stainless Steel 316L en S. Ikhmayies, B. Li, J. S. Carpenter, J. Li, J.-Y. Hwang, S. N. Monteiro, . . . J. Kim (Eds.), *Characterization of minerals, metals and minerals 2017* (pp. 577-583). Springer.
- Bhat, F. Z. (2021). *Application of Finite Element Analysis*. Parihaspora: Research Gate.  
[https://www.researchgate.net/publication/352017598\\_Application\\_of\\_Finite\\_Element\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/352017598_Application_of_Finite_Element_Analysis)
- Button, V. L. (2015). *Principles of Measurement and Transduction of Biomedical Variables*. Elsevier Inc. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800774-7.00010-6>
- California Fine Wire Co. (2023). Item # 100065, Dumet Wire. California Fine Wire Company. Recuperado el 20 de Agosto de 2023 de <https://calfinewire.com/datasheets/100065-dumet/>
- Callister, W. D., y Rethwisch, D. G. (2018). *Material Science and Engineering, an introduction*. Wiley.
- Çengel, Y. A., y Cimbala, J. M. (2017). *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill.
- Çengel, Y. A., y Ghajar, A. J. (2020). *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*. McGraw-Hill Education.



- Dragos, T., George, G., Dumitri, I., y Dima, A. (2018, 03 23). Evaluation of Thermistors Used for Temperature Measurement in Automotive. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1220(012035), 001-006. doi:10.1088/1757-899X/1220/1/012035
- Ebrahimi-Darkhaneh, H. (2019). Measurement error caused by self-heating in NTC and PTC thermistors. *Analog Design Journal*(Q3 2019), 001-004.
- Elektrisola. (Mayo de 2016). Copper Clad Nickel-Iron Alloy (Dumet). MWS Wire Industries. Recuperado el 20 de Agosto de 2023 de <https://mwswire.com/copper-clad-nickel-iron-alloy/>
- Figliola, R. S., y Beasley, D. E. (2019). *Theory and Design for Mechanical Measurements*. John Wiley & Sons, Inc.
- Forsberg, C. H. (2021). Heat transfer Principles and applications. Academic Press.
- Golan, G., y Azoulay, M. (2023). High sensitivity calorimetric sensor for flow measurements. *Bulgarian Chemical Communications*, 55(2), 149-152. <https://doi.org/10.34049/bcc.55.2.AESMT22-21>
- Goldsmith, R. H. (2014). *Toyota's 8-Steps to Problem Solving*. Shingo institute.
- Groover, M. P. (2015). *Fundamental of Modern Manufacturing: materials, processes and systems*. John Wiley & Sons, INC.
- Hart, P. (27 de Octubre de 2016). *Using Pogo Pins to Add Electrical Connectivity to Your 3D Printed Fixtures*. Javelin Technologies Inc. Recuperado el 20 de Agosto de 2023 de <https://www.javelin-tech.com/blog/2016/10/pogo-pins-3d-printed-fixtures/>
- Heyd, R. (2021). One-Dimensional Systemic Modeling of Thermal Sensors Based on Miniature Bead-Type Thermistors. *Sensors*, 21(23), 001-029. <https://doi.org/10.3390/s21237866>
- Ingle, R. (30 de Agosto de 2019). *The Functionality and Design of Mass Air Flow Sensors*. AZO sensors. <https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=1746>
- Iyere, S. F., Ozigi, B. O., y Yeboah, J. K. (2020). Response characteristics of a negative temperature coefficient. *Journal of Electrical, Control and Technological Research (JECTR)*, 1, 017-022. <https://doi.org/10.37121/jectr.vol1.113>
- Jack, K. E., Nwangwu, E. O., Etu, I. A., y Osuagwu, E. U. (2016). A Simple Thermistor Design for Industrial Temperature Measurement. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 11(5), 057-066. doi:10.9790/1676-1105035766

- JLC Electromet Pvt. Ltd. (Marzo de 2016). *Data sheet: dumet*. JLC Electromet. Recuperado el 20 de Agosto de 2023 de <https://jlcelectromet.com/dumet-wire-lamp-diode-grade-alloys.html>
- Kanthal AB. (04 de Febrero de 2021). *Resistance heating wire and resistance wire: Nifethal 42*. Kanthal. Recuperado el 20 de Agosto de 2023 de <https://www.kanthal.com/en/products/material-datasheets/wire/resistance-heating-wire-and-resistance-wire/nifethal-42/>
- Khumalo, M., y Khoathan, M. C. (2021). Effect of Mechanical Alloying in Polymer-Ceramics Composites en C. M. Hussain, y S. Thomas (Eds.), *Handbook of Polymer and Ceramic Nanotechnology* (pp. 001-028). Springer.
- Kreith, F., Manglik, R. M., y Bohn, M. S. (2016). *Principles of heat transfer*. Cengage Learning.
- Kubiak, T. M., y Benbow, D. W. (2016). *The certified six sigma blackbelt handbook*. ASQ Quality Press.
- Larson, R. G. (2015). Constitutive Equations for Thixotropic Fluids. *Journal of Rheology*, 59(3), 595-611. <https://doi.org/10.1122/1.4913584>
- Matthews, D. D. (2011). *The A3 Workbook. Unlock your problem-solving mind*. Productivity Press.
- McKeen, L. W. (2017). *Film Properties of Plastics and Elastomers*. Elsevier Inc.
- Moatamedi, M., y Khawaja, H. (2018). *Finite Element Analysis*. Taylor & Francis Group.
- Munro, R. A., Ramu, G., y Zrymiak, D. J. (2015). *The certified Six Sigma Green belt handbook*. ASQ.
- Petkovšek, M., Nemeč, M., y Zajec, P. (2021). Algorithm Execution Time and Accuracy of NTC Thermistor-Based Temperature Measurements in Time-Critical Applications. *Mathematics*, 9(18), 001-016. <https://doi.org/10.3390/math9182266>
- Rahman, M. K., Musa, A. M., Neher, B., Patwary, K. A., Rahman, M. A., y Islam, M. S. (2016). A review of the study on the electromigration and power electronics. *Journal of electronics cooling and thermal control*, 6(1), 019-031. doi:10.4236/jectc.2016.61002
- Rakopoulos, C. D., Rakopoulos, D. C., Mavropoulos, G. C., y Kosmadakis, G. M. (2018). Investigating the EGR rate and temperature impact on diesel engine combustion and emissions under various injection timings and loads by comprehensive two-zone modeling. *Energy*, 157, 990-1014. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.178>

- Rodríguez, S. A., y Cárdenas, L. A. (2023). Leveraging the Self-heating Effect of NTC Thermistor to Detect its Minimum Coverage by a Dispensed Paste in the Mass Production Process of Temperature Sensors. *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology*, 10(4), 108-120.
- Schubert, M., Munch, C., Schuurman, S., Poulain, V., Kita, J., y Moos, R. (2019). Novel Method for NTC Thermistor Production by Aerosol Co-Deposition and Combined Sintering. *Sensors*, 19(7), 001-011.  
<https://doi.org/10.3390/s19071632>
- Semakula, M., y Inambao, F. (2017). The Effects of Exhaust Gas Recirculation on the Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine – A Critical Review. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(23), 13677-13689.
- Sensata Technologies. (2016). *FFT algorithm*. Sensata Technologies. Recuperado el 21 de Agosto de 2023
- Sensata Technologies. (2019). *Process and equipment development procedure*. Sensata Technologies. Recuperado el 21 de Agosto de 2023
- Sha, J., Zhang, F., y Zhang, H. (2016). Thixotropic flow behavior in chemical pulp fibre suspensions. *BioResources*, 11(2), 3481-3493. DOI: 10.15376/biores.11.2.3481-3493
- Shashishekhar, N. (2017). Automated X-Ray Inspection: Industrial Applications and Case Studies. *Indian National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation NDE 2016*, 22(6), 139-144.
- Siddiqui, A. A. (Diciembre de 2017). *A3 Problem Solving Number of Steps Used in Quality Management Department* [Archivo PowerPoint]. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/324720286\\_A3\\_Problem\\_Solving\\_Number\\_of\\_Steps\\_Used\\_in\\_Quality\\_Management\\_Department](https://www.researchgate.net/publication/324720286_A3_Problem_Solving_Number_of_Steps_Used_in_Quality_Management_Department)
- Skinner, A. J., y Lambert, M. F. (2009). Evaluation of a warm-thermistor flow sensor for use in automatic seepage meters. *IEEE Sensors Journal*, 9(9), 1058-1067. doi:10.1109/JSEN.2009.2024056
- Taboga, M. (2021). *Estimation of the variance*. StatLect. Recuperado el 20 de Agosto de 2023 de <https://www.statlect.com/fundamentals-of-statistics/variance-estimation>
- Talic, A., Cerimovic, S., Beigelbeck, R., Kohl, F., Sauter, T., y Keplinger, F. (2019). FEM-Analysis of 2D Micromachined Flow Transducers based on aGe-Thermistor Arrays and a Double Bridge Readout. *Sensors*, 19(16), 001-020. doi:10.3390/s19163561
- TE connectivity. (Febrero de 2018). *NTC thermistors for gas flow measurements*. TE connectivity. Recuperado el 20 de Agosto de 2023 de

<https://www.te.com/content/dam/te-com/documents/sensors/global/te-app-note-ntc-for-gas-flow-measurement.pdf>

Thermtest. (30 de Noviembre de 2017). *Rule of Mixtures Calculator for Heat Capacity*. Thermtest instruments. Recuperado el 20 de Agosto de 2023 de <https://thermtest.com/thermal-resources/rule-of-mixtures>

Tutunea, D., Ilie, D., Racila, L., Otat, O., y Geonea, I. (2022). Evaluation of temperature sensors used in automotive applications type NTC and PTC. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1220(012035), 001-006. doi:10.1088/1757-899X/1220/1/012035

Ulizio, M. (05 de Agosto de 2015). *Glass thermal properties and their role in product design*. Kopp Glass Inc. Recuperado el 20 de Agosto de 2023 de <https://www.koppglass.com/blog/glass-thermal-properties-and-their-role-product-design>

Xu, C., Guo, X., Jiang, H., Zhefeng, Z., y Liu, S. (12-14 de Agosto de 2014). *Modeling and Simulation of Self-heating Effect with Temperature Difference Air Flow Sensor* [Resumen de presentación de la conferencia]. *15th International Conference on Electronic Packaging Technology*, Chengdu. IEEE.

Xu, Y., y Yamazaki, M. (2008). Prediction of Thermal Conductivity of Composite Materials en K. Cen, Y. Chi, y F. Wang (Eds.), *Challenges of Power Engineering and Environment* (pp. 897-902). Springer

Yang, X., y Lin, W. (2017). Thermistor en P. T. Bobrowsky, & B. Marker (Eds.), *Encyclopedia of Engineering Geology* (pp. 001-002). Springer.

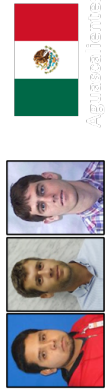
Zeng, G. L., & Zeng, M. (2021). *Electric circuits. A concise, conceptual tutorial*. Springer.

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., y Zhu, J. Z. (2013). *The finite element method: its basis and fundamentals*. Elsevier.

## **ANEXO**

# Formato A3

## Desarrollo de un dispositivo de detección de presencia de pasta térmica Ceramabond 575 en sensor de temperatura.



|   |   |   |  |   |
|---|---|---|--|---|
| <b>A3 No.</b><br><b>DOC00242520</b>             | <b>Miembros del equipo</b><br>1. Sauli A. Rodriguez<br>2. Daniel Neilan<br>3. Matthew Morin | <b>Principales interesados (nombre y posición).</b><br>1. Ruben Rodriguez (Gerente de Ops).<br>2. Victor Alarcón (Director de Ops). | <b>Departamento</b><br><b>Desarrollo de Procesos</b> | <b>Objetivo de la organización</b><br>Desarrollo de Nuevos Procesos |
| <b>Líder del proyecto</b><br>Sauli A. Rodriguez |   |   |  | <b>Fecha de comienzo y final</b><br>Enero 2022 – Diciembre 2022     |

|   |   |                   |                  |                   |              |              |      |                   |              |      |                 |               |            |   |
|---|---|-------------------|------------------|-------------------|--------------|--------------|------|-------------------|--------------|------|-----------------|---------------|------------|---|
| <p><b>1. Clarificar el problema.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Estándar. Se cuenta con un método de detección de pasta C575 en posición y cantidad especificados por diseño, en los sensores EGRT.</li> <li>- Situación actual. No se cuenta con un método de detección de pasta C575.</li> <li>- Discrepancia. Se requiere un método de detección de pasta C575 en posición y cantidad especificados por diseño, en los sensores EGRT.</li> </ul> | <p><b>2. Descomposición del problema.</b></p> <p>El problema se desenvuelve en la siguiente área de aplicación:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- En la compañía Sensata Technologies de México.</li> <li>- Campus Aguascalientes, México.</li> <li>- Planta Morelos.</li> <li>- La unidad de negocios es TCIS.</li> <li>- Línea de producción EGRT que fabrica sensores de temperatura.</li> <li>- En el proceso de dispensado de pasta C575.</li> <li>- En lo relacionado a la posición y cantidad de diseño de la pasta C575 dentro del sensor EGRT.</li> <li>- Se generan costos asociados a la detección de pasta C575, la cual se lleva a cabo por inspección Rayos X.</li> </ul> <p>Costos asociados con inspección Rayos X en línea EGRT</p> <table border="1"> <tr> <td>Buho</td> <td>Cambio inversión</td> <td>Año de aplicación</td> </tr> <tr> <td>Mano de obra</td> <td>\$31 mil USD</td> <td>2019</td> </tr> <tr> <td>Sobre segregación</td> <td>\$49 mil USD</td> <td>2019</td> </tr> <tr> <td>Máquina Rayos X</td> <td>\$175 mil USD</td> <td>Permanente</td> </tr> </table> | Buho              | Cambio inversión | Año de aplicación | Mano de obra | \$31 mil USD | 2019 | Sobre segregación | \$49 mil USD | 2019 | Máquina Rayos X | \$175 mil USD | Permanente | <p><b>3. Establecimiento del objetivo.</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Reducir el costo anual por mano de obra y material en \$80 mil dólares mediante detener la inspección por Rayos X a partir del año 2022.</li> <li>2. Evitar incurrir en un costo único de \$175 mil dólares para la compra de una máquina de inspección por Rayos X en el año 2023.</li> <li>3. Incrementar la capacidad productiva de la línea EGRT desde 0.77 a 1.55 millones de piezas al año comenzando en el año 2023.</li> </ol> |
| Buho  | Cambio inversión  | Año de aplicación |                  |                   |              |              |      |                   |              |      |                 |               |            |   |
| Mano de obra  | \$31 mil USD  | 2019              |                  |                   |              |              |      |                   |              |      |                 |               |            |   |
| Sobre segregación   | \$49 mil USD  | 2019              |                  |                   |              |              |      |                   |              |      |                 |               |            |   |
| Máquina Rayos X   | \$175 mil USD   | Permanente        |                  |                   |              |              |      |                   |              |      |                 |               |            |   |
| <p><b>4. Análisis de la causa raíz.</b></p>   |   |                   |                  |                   |              |              |      |                   |              |      |                 |               |            |   |

|   |  |  |
|---|--|--|
| <p><b>5. Desarrollo de contramedidas.</b></p> <p>Un nuevo concepto fue desarrollado aprovechando el efecto de autocalentamiento del termistor cuando un voltaje relativamente alto se le aplica.</p> <p>Condiciones de prueba de pasta C575 de acuerdo con diseño:<br/>         Condición 1- Termistor ensamblado, sin pasta C575.<br/>         Condición 2- Termistor con pasta C575.<br/>         Condición 3- Termistor con pasta C575 y voltaje aplicado.<br/>         Condición 4- Termistor con pasta C575 y voltaje aplicado en el voltaje 4 = 2.5V DC.</p> <p>Voltaje 1 = 2V DC<br/>         Voltaje 2 = 5V DC<br/>         Voltaje 3 = 18V DC<br/>         Voltaje 4 = 2.5V DC</p> <p>Resultados del estudio</p> <p>Después de correr pruebas controladas con diferentes voltajes y condiciones de cobertura de pasta C575, se encontró que suministrar 11 Volts en el termistor permitiría su auto calentamiento, y de esta manera la pasta C575 lo dispararía hacia la probeta metálica dependiendo de la condición de cobertura de ésta.</p> <p><b>6. Implementación de contramedidas.</b></p> <p>El dispositivo para la prueba de cobertura (PCTD en inglés) fue desarrollado e implementado en la actual máquina FFT de la línea de producción, en la que se instaló el hardware necesario y efectuaron los cambios pertinentes al software.</p> <p>Gráficos de resultados de sensores de corridas iniciales</p> <p>Condiciones de cobertura de pasta C575 en sensores de corridas iniciales</p> <p>Estos son los parámetros importantes del PCTD, los cuales fueron desarrollados mediante el uso de un algoritmo evolucionario en software Solver de Excel.</p> <p>Over_V_VfinaI_Time = 1370ms<br/>         Over_V_VfinaI_Max = 1480 mS<br/>         Over_V_Deira_Max = 0.015 V</p> | <p><b>6. Implementación de contramedidas (continuación).</b></p> | <p><b>7. Monitoreo de resultados.</b></p> <p>El PCTD se encuentra midiendo de manera consistente (GR&amp;R), rechazando piezas que no serían aceptadas por un operador inspeccionando por Rayos X. Los resultados obtenidos siguen una distribución normal.</p> <p>Como controles de lanzamiento, cerca de 11 mil piezas fueron probadas en el equipo FFT con el PCTD activo previa al 100% de inspección por Rayos X.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• No se encontraron sensores con la condición de cobertura nula posterior al 100% de inspección por Rayos X.</li> <li>• Los controles de lanzamiento fueron satisfactoriamente completados y la inspección por Rayos X fue removida del proceso de fabricación de los sensores EGRT.</li> </ul> <p>P-Val = 0.157</p> |
| <p><b>8. Estandarización y prevención de ocurrencia.</b></p> <p>Los documentos PFMEA, plan de control e instrucción de trabajo fueron actualizados para reflejar el PCTD como parte del proceso de producción normal de los sensores EGRT.</p> <p>Estos son los beneficios anuales de la compañía al finalizar el proyecto.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Evitar inversión en Máquina de Rayos X por 175KUSD.</li> <li>- Incremento de producción de 0.77 a 1.55 millones de piezas al año.</li> <li>- El nivel de detección en términos de PFMEA se mejoró de D=8 a D=4</li> </ul>  |  |  |