

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

Facultad de Arquitectura e Ingenierías

Maestría en Diseño Mecánico

Mención Fabricación de Autopartes de Vehículos

Selección de material a través de técnicas MCDM, para aislantes eléctricos de alta tensión SPB de bobinas de encendido COP. Verificación de resultados mediante simulación y validación experimental.

Jaime Eduardo Portilla Hernández

Nota del Autor

Jaime Eduardo Portilla Hernández, Facultad de Arquitectura e Ingenierías,
Universidad Internacional SEK.

Director Ing. Javier Martínez, PhD.

Codirector M.sc. Juan Carlos Rocha

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:

jportilla.mdm@uisek.edu.ec

Declaración Juramentada.

Yo, Jaime Eduardo Portilla Hernández, portador de la cédula de identidad número 1002584876, por medio del presente declaro de forma juramentada que el presente trabajo investigativo obedece al plan de desarrollo tecnológico y se relaciona directamente con la innovación en el diseño de procesos y productos en el Ecuador, mismo que es netamente de mi autoría, del mismo modo declaro que, no registran investigaciones o trabajos iguales a este en ningún grado de aplicación profesional; todas las consultas realizadas están incluidas como referencias bibliográficas a lo largo de todo el presente documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

JAIME EDUARDO PORTILLA HERNÁNDEZ

CI: 1002584876

Índice de contenido.

Declaración Juramentada.....	2
Índice de contenido.....	3
Índice de tablas.....	5
Índice de figuras.....	7
Resumen.....	9
Abstract.....	10
Introducción.....	11
Justificación.....	13
Objetivo General.....	15
Objetivos Específicos.....	15
Marco Teórico.....	17
Motor de Combustión Interna Ciclo Otto (MCICO de gasolina).....	17
Bobina de encendido.....	17
Bonina de encendido independiente (Coil On Plug COP).....	18
Aislantes de Alta Tensión (Spark Plug Boot SPB).....	20
Falla técnica de aislamiento eléctrico de SPB.....	21
Métodos de Selección Multicriterio MCDM.....	22
Ponderación de pesos:.....	24
Método de Entropía.....	24
Método de Desviación Estándar.....	27
Método de Variación Estadística.....	28
Métodos multicriterio:.....	29
Método VIKOR.....	30
Método PUGH.....	32
Método TOPSIS.....	34
Método PROMETHEE II.....	36
Método DOMINIC.....	38
Método COPRAS.....	39
Coefficiente de Corelación de SPEARMAN.....	42
Método.....	47
Características de material de SPB.....	48
Magnitudes dieléctricas:.....	49
Resistencia dieléctrica.....	49
Magnitudes térmicas:.....	49
Temperatura de trabajo.....	49
Coefficiente de expansión térmica.....	49
Conductividad térmica.....	50
Magnitudes Químicas:.....	50
Prueba de hidrocarburos.....	50
Prueba de grasas y aceites.....	50
Precio.....	50
Magnitudes mecánicas:.....	50
Módulo de elasticidad.....	50

Selección de materiales.....	51
Polietileno HDPE (Alta Densidad).....	52
Polietileno LDPE (Baja Densidad).....	53
Poliestireno PS.....	53
Policloruro de vinilo – No Plastificado PVC.....	54
Poliamida 6 – Nylon PA6.....	54
Copolímero de Etileno – Tetrafluoretileno ETFE – Teflón.....	55
Polipropileno PP.....	56
Desarrollo de métodos de ponderación (Pesos):.....	58
Método de Entropía.....	58
Método de Desviación Estándar.....	61
Método de Variación Estadística.....	62
Comparación y selección de valores de métodos de ponderación.....	63
Aplicación de Métodos Multicriterio MCDM:.....	64
Método VIKOR.....	64
Método PUGH.....	68
Método TOPSIS.....	71
Método PROMETHEE II.....	73
Método DOMINIC.....	82
Método COPRAS.....	85
Desarrollo de la Simulación.....	90
Modelado CAD.....	90
Simulación Térmica.....	91
Condiciones de borde para la simulación.....	94
Desarrollo de la Experimentación.....	97
Resultados.....	99
Resultados Métodos de ponderación.....	99
Resultados Métodos Multicriterio MCDM:.....	100
Resultados Método VIKOR.....	100
Resultados Método PUGH.....	102
Resultados Método TOPSIS.....	103
Resultados Método PROMETHEE II.....	104
Resultados Método DOMINIC.....	105
Resultados Método COPRAS.....	106
Resultados de Correlación de SPEARMAN.....	107
Resultados Simulación, Temperatura Vs. Tiempo.....	108
Resultados de la Simulación con Polietileno BD.....	108
Resultados de la Simulación con Polietileno AD.....	110
Resultados de la Simulación con Poliestireno.....	112
Resultados de la Simulación con PVC.....	114
Resultados de la Simulación con Nylon.....	116
Resultados de la Simulación con Teflón.....	118
Resultados de la Simulación con Polipropileno.....	120
Convergencia de datos de simulación térmica.....	122
Resultados de la Experimentación pruebas TGA.....	123

Discusión de resultados.....	125
Comparación de Resultados MCDM.....	130
Correlación de Spearman.....	130
Comparación de Resultados Simulación.....	131
Conclusiones.....	137
Recomendaciones.....	139
Referencias.....	140
Anexos.....	144

Índice de tablas.

Tabla 1. Características de un SPB.....	51
Tabla 2. Criterios de Selección Preliminares.....	52
Tabla 3. Propiedades del Polietileno AD Alta Densidad.....	52
Tabla 4. Propiedades del Polietileno BD Baja Densidad.....	53
Tabla 5. Propiedades del Poliestireno.....	54
Tabla 6. Propiedades del Polivinilo.....	54
Tabla 7. Propiedades del Nylon.....	55
Tabla 8. Propiedades del Teflón.....	55
Tabla 9. Propiedades del Polipropileno.....	56
Tabla 10. Materiales Candidatos.....	57
Tabla 11. Tabla de variables técnicas de materiales.....	58
Tabla 12. Matriz de materiales y criterios.....	58
Tabla 13. Resultados Intermedios de Cálculo de la Entropía(e) y Grado de Divergencia (d).60	
Tabla 14. Tabla de pesos obtenida mediante método Entropía.....	61
Tabla 15. Resultados Intermedios de Cálculo de la Desviación Estándar (σ).....	61
Tabla 16. Pesos obtenidos mediante el Método de Desviación Estándar.....	62
Tabla 17. Matriz de decisión normalizada método de variación estadística.....	62
Tabla 18. Resultados Intermedios de la Variación Estadística (V).....	63
Tabla 19. Pesos obtenidos mediante el método de Variación Estadística.....	63
Tabla 20. Comparación de Valores de Ponderación.....	63
Tabla 21. Tabla de pesos a utilizar en MCDM (Variación Estadística).....	64
Tabla 22. Datos para formar la Matriz de Decisión VIKOR.....	64
Tabla 23. Datos ordenados de la Matriz Normalizad VIKOR(R_{ij}) con sus respectivos criterios y materiales.....	66
Tabla 24. Datos ordenados de la Matiz Estandarizada de Pesos VIKOR.....	66
Tabla 25. Resultados intermedios VIKOR.....	68
Tabla 26. Ranking VIKOR.....	68
Tabla 27. Matriz de decisión PUGH.....	69
Tabla 28. Matriz de ponderación de pesos primer paso PUGH.....	69
Tabla 29. Matriz de ponderación de pesos segundo paso PUGH.....	70

Tabla 30. Resultados intermedios PUGH	70
Tabla 31. Ranking PUGH	71
Tabla 32. Matriz soluciones ideales positivas y negativas TOPSIS	71
Tabla 33. Resultados intermedios de distancias entre soluciones positivas y negativas ideales TOPSIS	72
Tabla 34. Ranking TOPSIS.....	73
Tabla 35. Matriz de decisión PROMETHEE II	73
Tabla 36. Matriz normalizada PROMETHEE II	74
Tabla 37. Tabla de flujos para el criterio 1 PROMETHEE II	80
Tabla 38. Tabla de flujos para el criterio 2 PROMETHEE II	80
Tabla 39. Tabla de flujos para el criterio 3 PROMETHEE II	80
Tabla 40. Tabla de flujos para el criterio 4 PROMRTHEE II	81
Tabla 41. Tabla de flujos criterio 5 PROMETHEE II	81
Tabla 42. Table de flujos criterio 6. PROMETHEE II	81
Tabla 43. Resultados intermedios Matriz Flujo Neto de Superación PROMETHEE II.....	82
Tabla 44. Ranking PROMETHEE II	82
Tabla 45. Matriz de decisión DOMINIC	83
Tabla 46. Matriz de ponderación DOMINIC.....	84
Tabla 47. Matriz de ponderación numérica DOMINIC.....	84
Tabla 48. Matriz de ponderación normalizada DOMINIC	84
Tabla 49. Resultados intermedios DOMINIC	85
Tabla 50. Ranking DOMINIC	85
Tabla 51. Matriz de decisión método COPRAS	86
Tabla 52. Matriz de decisión Normalizada COPRAS	87
Tabla 53. Matriz Estandarizada de Pesos COPRAS.....	87
Tabla 54. Pesos normalizados positivos y negativos	88
Tabla 55. Resultados intermedios - Prioridades Relativas.....	88
Tabla 56. Ranking Método COPRAS.....	89
Tabla 57. Condiciones de borde para la simulación	94
Tabla 58. Identificación de Muestra y Servicio Termogravimétrico EPN	97
Tabla 59. Condiciones del Ensayo.....	98
Tabla 60. Resultados de métodos de ponderación de pesos.	99
Tabla 61. Resultados Método VIKOR.....	101
Tabla 62. Resultados Método PUGH.....	102
Tabla 63. Resultados Método TOPSIS	103
Tabla 64. Resultados Método PROMETHEE II.....	104
Tabla 65. Resultados Método DOMINIC	105
Tabla 66. Resultados Método COPRAS.....	106
Tabla 67. Correlación de Spearman en resultados MCDM.	107
Tabla 68. Valores de Degradación Térmica del SPB construido con Nylon en el TGA	124

Índice de figuras.

Figura 1. Bobina COP, con SPB en corte	19
Figura 2. Representación esquemática de un SPB en el motor.....	20
Figura 3. Bobina COP con grietas en SPB	22
Figura 4. Pasos para aplicación de métodos multicriterio MCDM.....	24
Figura 5. Proceso de aplicación método de Entropía.....	25
Figura 6 . Proceso de aplicación método de Desviación Estándar	27
Figura 7. Proceso de aplicación método de Variación Estadística	28
Figura 8. Proceso de aplicación del método VIKOR.....	30
Figura 9. Proceso de aplicación del método PUGH	32
Figura 10. Proceso de aplicación del método TOPSIS	34
Figura 11. Proceso de aplicación del método PROMETHEE II.....	36
Figura 12. Proceso de aplicación del método DOMINIC.....	38
Figura 13. Proceso de aplicación del método COPRAS.....	40
Figura 14. Ejemplo de Simulación Térmica en NX Nastram	44
Figura 15. Analizador Termogravimétrico TGA	46
Figura 16. Plano de SPB Vista Frontal.	90
Figura 17. Plano de SPB Vista Longitudinal	91
Figura 18. Cargando el entorno de Simulación Térmica en NX.....	91
Figura 19. Lista de Materiales NX.....	92
Figura 20. Mallado Tetraédrico de SPB	92
Figura 21. Asignando carga térmica al SPB	93
Figura 22. Aplicación de restricciones térmica.....	94
Figura 23. SPB dividido en 6 cuadrantes.....	95
Figura 24. Ejemplo de ubicación de simulaciones en función del tiempo, en las figuras de resultados	96
Figura 25. Comparación de métodos de ponderación.....	99
Figura 26. Ranking Método VIKOR	101
Figura 27. Ranking Método PUGH	102
Figura 28. Ranking Método TOPSIS.....	103
Figura 29. Ranking Método PROMETHEE II	104
Figura 30. Ranking Método DOMINIC.....	105
Figura 31. Ranking método COPRAS.....	106
Figura 32. Análisis De Coeficiente de Spearman en MCDM.....	107
Figura 33. Secuencia térmica del Polietileno BD	108
Figura 34. Secuencia térmica del Polietileno AD.....	110
Figura 35. Secuencia térmica del Poliestireno.....	112
Figura 36. Secuencia térmica del PVC	114
Figura 37. Secuencia térmica del Nylon.....	116
Figura 38. Secuencia térmica del Teflón	118
Figura 39. Secuencia térmica del Polipropileno	120
Figura 40. Convergencia de datos de simulación térmica	122

Figura 41. Prototipo de SPB Mecanizado en Nylon Vs. Original	123
Figura 42. Resultados Experimentación TGA	124
Figura 43. Comparación de resultados MCDM.....	127
Figura 44. Comparación de Resultados de Simulación Térmica Global	132
Figura 45. Comparación de resultados de simulación por cuadrantes, a 120 S.....	133
Figura 46. Comparación de resultados de simulación por cuadrantes, a 240 S.....	133
Figura 47. Comparación de resultados de simulación por cuadrantes, a 360 S.....	134
Figura 48. Comparación de resultados de simulación por cuadrantes, a 480 S.....	134
Figura 49. Comparación de resultados de simulación por cuadrantes, a 600 S.....	135
Figura 50. Peso de un SPB original	157
Figura 51. Peso de un SPB fabricado con Nylon.....	157
Figura 52. Características de la Computadora utilizada en todo el proceso de tesis	158

Resumen.

El siguiente trabajo investigativo trata acerca del estudio y selección de un material compuesto alternativo, para fabricar dispositivos de aislamiento eléctrico para el circuito de alta tensión de motores de combustión interna ciclo Otto, o mejor conocidos como motores a gasolina. Los aislantes de alta tensión son generalmente fabricados de materiales como caucho o silicón, los mismos que al estar sometidos a elevadas temperaturas sufren degradaciones técnicas del material, provocando fugas de energía eléctrica y pérdidas de potencia del motor. Esta falla en el material, obliga a que el dispositivo completo sea reemplazado. En el mercado nacional, solo se puede encontrar este dispositivo en conjunto con la bobina de encendido y el circuito electrónico. El propósito de este trabajo es sugerir un material compuesto, con el que se puedan fabricar solo estos cuerpos aislantes. Para ello se emplean técnicas de selección multicriterio y se validan los resultados mediante simulación virtual de carácter térmico y pruebas experimentales normadas, que validen la simulación.

Palabras clave: vehículo automotor, temperatura, material compuesto, energía eléctrica, circuito electrónico.

Abstract.

The following research work deals with the study and selection of an alternative composite material, to manufacture electrical insulation devices for the high voltage circuit of Otto cycle internal combustion engines, or better known as gasoline engines. High voltage insulators are generally made of materials such as rubber or silicone, which, when subjected to high temperatures, suffer technical degradation of the material, causing electric power leaks and engine power losses. This failure in the material forces the entire device to be replaced. In the national market, you can only find this device in conjunction with the ignition coil and the electronic circuit. The purpose of this work is to suggest a composite material, with which only these insulating bodies can be manufactured. To do this, multicriteria selection techniques are used and the results are validated by virtual simulation of thermal character and normed experimental tests, which validate the simulation.

Keywords: automotive vehicle, temperature, composite material, electric power, electronic circuit.

Introducción.

En la actualidad, todavía un gran porcentaje de los vehículos que circulan por las vías ecuatorianas poseen como fuente de energía a la combustión de gasolina. Para que la gasolina se inflame necesita ser estimulada por una fuente de calor, para ser más preciso de una descarga de energía eléctrica o chispa. Para que esta descarga llegue hasta la gasolina, debe atravesar un circuito eléctrico. Este circuito eléctrico consta de 3 elementos: una fuente, un transformador y un conductor. El origen de esta investigación tiene lugar en el tercero, el conductor, mismo que consta de 2 elementos: un conductor eléctrico y un aislante dieléctrico. De estos 2 componentes hay uno que presenta problemas, el cual es: el aislante dieléctrico o aislante de alta tensión. Los aislantes de alta tensión (Spark Plug Boot SPB) son los dispositivos que evitan que la energía generada en la bobina de encendido (Coil On Plug COP), sea descargada fuera del sistema de encendido. Según (Funk & Eiler, 2003) la energía producida por el transformador es descargada en la bujía a través de un conductor asilado por un cuerpo dieléctrico denominado Spark Plug Boot. Los problemas detectados son dos: uno origen técnico y otro de origen comercial. El problema técnico, es la fuga de energía eléctrica, ocasionada por la degradación técnica del material con que está fabricado un SPB (Caucho o Silconset). Mencionada degradación técnica del material es el efecto resultante de la continua exposición de este dispositivo a elevadas temperaturas típicas de un motor, y por otro lado al contacto con hidrocarburos, típicos también de un motor.

El problema de origen comercial, es que los aislantes SPB no se producen en el Ecuador, según (Ministerio de Industrias y Productividad del Ecuador, 2018), de este modo los existentes son todos importados.

De este modo, para resolver los dos problemas, es necesario investigar acerca de materiales dieléctricos, a fin de sugerir un material, de los disponibles en el mercado nacional, para fabricar dichos dispositivos aislantes, de manera local.

Es decir, el aspecto medular en esta investigación es, sugerir un material idóneo para fabricar aislantes eléctricos de alta tensión SPB para bobinas de encendido independientes tipo COP. Para ello, se aplicó métodos de selección multicriterio MCDM, mismos que ayudaron a seleccionar el mejor material de una lista de 7 materiales candidatos predeterminados. Según (Aly, Hamza, & Farag, 2014) seleccionar un material apropiado para fabricar un componente, generalmente envuelve, una evaluación comparativa de varios criterios y atributos del material, mismos que son importantes en la puesta en servicio del componente. Es decir, la comparación entre materiales es clave al momento de determinar un material como idóneo. Luego de finalizar con el proceso de selección MCDM, se realizó una simulación de origen térmico usando el Software NX Nastran, en el módulo de simulación térmica. Posteriormente se verificaron los resultados de la simulación sometiendo a pruebas de laboratorio de naturaleza térmica y dieléctrica, a varios especímenes de SPB contruidos con el material ganador de la selección.

Justificación.

Reducir importaciones y crear nuevas fuentes de empleo, es el reto más importante que enfrentan en la actualidad, la universidad y la sociedad ecuatoriana, por tanto, la siguiente investigación de maestría, pretende utilizar métodos y técnicas científicas para encontrar un material con el cual se pueda fabricar una auto parte de manera local, aportando de ese modo al crecimiento de la industria nacional. Una auto parte que no se fabrica el país, es el aislante de alta tensión de bobinas de encendido automotriz SPB, estas bobinas son parte esencial de los motores automotrices. Para (Skinner & Lovers, 2013), las bobinas de encendido son complejos dispositivos pequeños que hacen iniciar la combustión en un motor. Según (Ministerio de Industrias y Productividad del Ecuador, 2018) no se fabrican en Ecuador mencionados cuerpos aislantes, es decir, todos son importados. Y según (SENAE, 2018) se importan las bobinas de encendido completas, lo que significa, la bobina y el aislante en conjunto. Por lo tanto, es necesario investigar los materiales y los métodos con que se podrían fabricar dichos cuerpos aislantes, mismos que son los que presentan fallas muy conocidas dentro del mundo automotriz. Para ello, lo primero que se pretende hacer en esta investigación, es determinar el material idóneo, de una lista de materiales pre seleccionados, que se pueden encontrar en el mercado local, empleando métodos de selección multicriterio. Para (Caliskan, Kursuncu, Kurbanglu, & Güven, 2013) los métodos de selección multi criterio MCDM (Multi Criteria Decision Making) de materiales, se basan en el estudio comparativo entre materiales candidatos. Es decir, los métodos multicriterio son técnicas que ayudan a definir las características de lo que se busca, para ello, antes de seleccionar un material se debe establecer una lista de materiales candidatos, para lo cual, es necesario determinar la función principal que va desempeñar, misma que, en este estudio, es la función de aislar eléctricamente un circuito de alta tensión, correspondiente al

sistema de encendido de un motor de combustión interna. Uno de los principales sistemas de un motor de combustión interna alimentado por gasolina, o motor ciclo Otto (MCICO), es el sistema de encendido, el cual provee la energía eléctrica de alta tensión (34 KV), o chispa para encender la mezcla de aire – combustible (mezcla estequiométrica ME). En la actualidad, casi todos los fabricantes de motores MCICO, que circulan por las vías ecuatorianas, utilizan sistemas de encendido, comprendidos por bobinas de encendido insertadas en medio de las barras de levas (Twin Cam, DOHC, etc.), en la culata del motor (CM), es decir, sobre cada bujía. Estos dispositivos son conocidos como bobinas independientes (Coil On Plug COP). Las bobinas COP están compuestas por dos partes principales, la una es el cuerpo de la bobina o transformador de alta tensión (TAT), donde se alojan los componentes eléctricos y electrónicos encargados de proveer la alta tensión, y la segunda parte, es el conductor eléctrico de alta tensión (CEAT) que transporta la energía desde la bobina hacia la bujía, cabe recalcar que, el CEAT es desmontable de la bobina como tal. Mencionado conductor CEAT se encuentra recubierto de un aislante eléctrico, que evita que la energía eléctrica fugue fuera de este circuito, a este aislante se le conoce como bota de bujía (Spark Plug Boot SPB). El aislante de alta tensión SPB sufre degradaciones tecnológicas del material, debido a las condiciones de trabajo, provocando fallas como: excesiva holgura de la bota, en el sector que cobija a la parte superior de bujía o fallas de fisuras en el material. El resultado de esta degradación, es una fuga de energía eléctrica, lo que ocasiona, que la combustión de la ME en el cilindro donde se produce la degradación, sea incompleta o nula, originando así fallas tales como: pérdidas de potencia del motor (25% aproximadamente), consumo excesivo de combustible, debido a las compensaciones gestionadas por el sistema de inyección electrónica (MPFI) y elevadas emisiones contaminantes (EC). Por estas razones, es necesario reemplazar el cuerpo aislante SPB. Sin embargo, en el mercado

ecuatoriano no se encuentra la pieza de recambio como tal, si no, la bobina COP completa, es decir la bota aislante SPB y el cuerpo de la bobina TAT juntos. Al encontrarse la falla, solo en el cuerpo aislante SPB, el comprar la bobina COP completa, se convierte en un gasto innecesario, mismo que trae fuertes consecuencias económicas y ambientales (Huella de carbono). Por lo tanto, sería ideal poder encontrar en el mercado nacional solo los SPB.

El presente estudio tiene por objetivo: seleccionar un material de iguales o mejores características que el material original, utilizando MCDM, luego diseñar un modelo CAD para realizar simulaciones con las características del material, simulaciones de naturaleza térmica y dieléctrica en el software NX, fabricar un prototipo con el material ganador, al cual se le realizarán ensayos en laboratorio, y de este modo sugerir el material idóneo para fabricar aislantes SPB de manera local. Reduciendo así las importaciones de autopartes y creando posibles nuevas fuentes de empleo. Ya que según (SENAE, 2018) se han importado 23838 unidades de bobinas de encendido hasta en febrero del 2018 causando una salida de divisas por un valor de \$ 292927,78. Cabe recalcar que el estudio del material, es con el fin de poder usarlo en cualquier marca de vehículo con motor MCICO, claro está que, se deberá variar la geometría del mismo, para usarlo en un vehículo determinado.

Objetivo General.

Seleccionar un material aislante eléctrico de alta tensión de bobinas de encendido COP, mediante simulación y de forma experimental con la técnica MCDM para innovarse la construcción de aislantes SPB.

Objetivos Específicos.

1. Seleccionar un material aislante eléctrico de alta tensión, de una selección de siete materiales, que poseen características aislantes aproximadas a las de fábrica, para evaluarse su aplicación en SPBs.

2. Aplicar métodos de simulación virtuales de naturaleza térmica, a un modelo CAD de SPB con las características del material seleccionado, utilizando el módulo de simulación del Software Siemens NX para comprobarse su desempeño.

3. Realizar pruebas de laboratorio, a un prototipo de SPB fabricado con el material ganador de la selección, para validar los resultados de la simulación.

Marco Teórico.

Motor de Combustión Interna Ciclo Otto (MCICO de gasolina).

Los motores de combustión interna se caracterizan por obtener la potencia como resultado de la combustión de combustibles fósiles en el interior de ellos, o para ser más específico en la cámara de combustión. Para que se cumpla el proceso del fuego necesitan los tres componentes principales de la combustión que son: el combustible, el cual es la gasolina; el oxígeno, tomado de la atmósfera y la temperatura, la cual es introducida en forma de descarga eléctrica, a través de un elemento conocido como bujía. El motor de ciclo Otto es el motor de gasolina de 4 tiempos, que lleva el nombre de su inventor Nicolaus Otto, quien en el año 1876 introdujo al mercado un motor de combustión interna, mismo que realiza el proceso de combustión en 4 tiempos: tiempo 1: admisión, tiempo 2: compresión, tiempo 3: explosión y tiempo 4: escape. Esta investigación se centra en el tiempo número 3, el de explosión, en el cual la mezcla de aire - gasolina se inflama violentamente y produce la fuerza del motor producto de la transformación de la energía química de la mezcla en energía mecánica por medio de un émbolo. Para que se origine dicha explosión, es necesario introducir en la cámara comprimida un pulso de alta tensión, o chispa, por el orden de los treinta y cuatro mil voltios (34KV). Esta alta tensión se origina en un dispositivo llamado bobina de encendido. Y es introducida al cilindro comprimido de aire - gasolina a través de un elemento conocido como bujía, mismo que es un conductor eléctrico.

Bobina de encendido.

La bobina de encendido es un dispositivo capaz de transformar un voltaje de entrada de doce voltios a un voltaje de salida por el orden de los veinte mil voltios. Esto lo hace gracias al fenómeno conocido como Efecto de Autoinducción (EA), en donde un campo magnético es

creado en un bobinado o arrollamiento metálico conocido como bobinado primario, al ser alimentado por 12 voltios de corriente continua (DC). Dicho bobinado primario está conectado a otro bobinado conocido como secundario mismo que transforma el voltaje de entrada en los 34KV. de voltaje de salida, justo cuando se interrumpe la alimentación de energía en el bobinado primario. A este fenómeno se lo conoce como autoinducción (EA) y es la forma en la que operan todas las bobinas de encendido en el campo automotriz. Existen varios tipos de bobinas de encendido automotrices, la diferencia principal entre ellas es la geometría. La geometría de una bobina de encendido depende del lugar que va a ocupar en el motor y la cantidad de cilindros que va a encender. Por lo tanto, hay motores que poseen una sola bobina, hay motores que poseen dos bobinas y hay motores que poseen tantas bobinas como cilindros posee el motor. A estas últimas se las conoce como bobinas individuales o bobinas COP por las siglas en inglés Coil On Plug. Lo que significa que cada bujía, de cada cilindro del motor está conectado directamente a una bobina de encendido de manera individual.

Bobina de encendido independiente (Coil On Plug COP).

La bobina de encendido tipo COP, se caracteriza por estar ubicada sobre cada bujía de encendido del MCICO, es decir, un motor de este tipo, posee tantas bobinas como cilindros. La función principal de una bobina COP, es proveer alta tensión para encender la mezcla ME en el momento preciso, es decir hay un sistema que gobierna a la bobina. “La bobina de encendido es tanto un acumulador de energía como un transformador. Se alimenta de la red de corriente continua del vehículo y suministra los pulsos de encendido a la bujía con la alta tensión o energía de chispa requerida. La energía acumulada en el campo magnético viene determinada por la etapa final de encendido, con corriente de desconexión prefijada, así como también por el bobinado primario.” (Bosch, Manual de la técnica de automóvil, p. 439) Por lo tanto, se podría

llamar a la bobina un transformador de tensión, ya que transforma los 12V de alimentación, en valores alrededor de los 34KV a este efecto se lo conoce como efecto de la autoinducción EA. De este modo, también existen gran variedad de modelos de bobinas COP desde el punto de vista geométrico, pero solo dos diferencias técnicas entre ellas:

- a. Bobinas COP de dos pines. Son las que reciben un pulso negativo proveniente del módulo de control del motor ECM, para originar el efecto EA y generar la chispa de alta tensión.
- b. Bobinas COP de tres pines. Son las que poseen su propio módulo de encendido integrado en la bobina y solo reciben una pequeña señal positiva de la ECM, para originar el efecto EA y generar la chispa de alta tensión.

Por lo tanto al hablar de bobinas tipo COP, se habla también de su respectivo aislante de alta tensión o Spar Plug Boot (SPB) por sus siglas en inglés, los cuales se han desarrollado a través de investigaciones que desembocan en patentes comerciales o en data sheets resultantes de mencionadas investigaciones y citadas en el desarrollo de esta investigación. (Bosch, 2011).



Figura 1. Bobina COP, con SPB en corte

Fuente: (Standard, 2018)

Aislantes de Alta Tensión (Spark Plug Boot SPB).

Los aislantes de alta tensión son los encargados de no permitir que la energía generada en la bobina de encendido fugue fuera del circuito de alta tensión. Como se ve en la figura 2, el SPB es la cubierta aislante que guarda dentro de sí 3 elementos que son: 1 el punto de salida de la bobina, 2 el conductor eléctrico en forma de espiral y 3 el punto de entrada o cabeza de bujía.

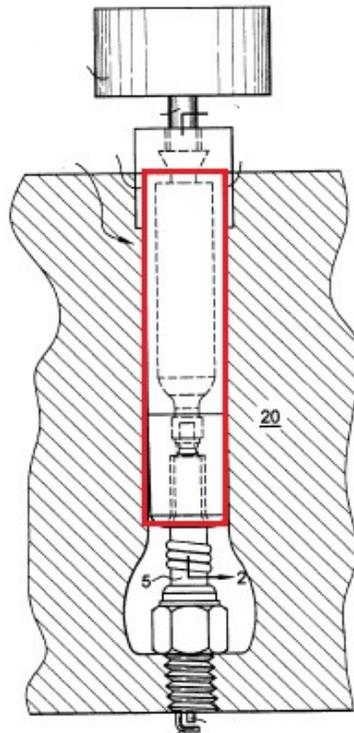


Figura 2. Representación esquemática de un SPB en el motor

Fuente: (Funk & Eiler, 2003)

Por lo tanto, como se ha mencionado, el rol principal de del SPB es aislar dieléctricamente el circuito de alta tensión del sistema de encendido y permitir que la descarga eléctrica de la bobina sea únicamente a la bujía. Debido a las diferentes geometrías de los motores, existen varias geometrías de SPB también, ya que deben adaptarse al entorno geométrico que les ofrece el motor en el que se van a alojar. En la presente investigación se

trata de determinar el material idóneo para fabricarlos, y que este pueda adquirir la geometría deseada, además de conservar el espesor del SPB, ya que, al variar el espesor, también varían las características del material, por esta razón, se toma un valor de espesor promedio, ya que el diámetro de las bujías cumple una norma y son todas de un mismo diámetro en la zona de acoplamiento Bujía – SPB.

Falla técnica de aislamiento eléctrico de SPB.

El problema técnico, es la fuga de energía eléctrica, ocasionada por la degradación técnica del material con que está fabricado un SPB, (Caucho o Silconset) mismo que es provocado principalmente por:

- a. Temperatura de trabajo en función del tiempo. La temperatura promedio a la que trabaja un SPB, hace que el material se cristalice y falle en función del tiempo. “A altas temperaturas las fibras celulósicas se oxidan y llegan a carbonizarse quedando zonas expuestas sin aislante, generando gases y agua que contaminan el aislante eléctrico”. (Alvarez & del Pozo, 2007, p. 3), es decir, los materiales aislantes sufren deformaciones estructurales permanentes debido a la continua exposición térmica (100 - 140°C en un Motor de Combustión Interna Ciclo Otto MCICO).
- b. Filtraciones de lubricante del motor. Lo que evita que el aceite se filtre a la cavidad de la bujía, son unos empaques o anillos de caucho, mismos que sufren degradaciones de origen térmico al igual que los SPB y permiten de ese modo, filtraciones de lubricante que deforman al SPB, por tanto, se necesita un material que soporte la acción química de hidrocarburos, ya que el lubricante está contaminado con residuos de

gasolina, siendo ese un efecto propio de MCICO. Según (Front Pérez & Hernández Arias, 2011) los gases de cárter contienen hasta un 0,4 % de hidrocarburos.

Es así que, el aislante SPB al cabo de cierto tiempo de trabajo, termina permitiendo la descarga indeseada de energía eléctrica, fuera del circuito de alta tensión. Cuando mencionada falla aparece, usualmente se ven grietas como las mostradas en la figura 3.



Figura 3. Bobina COP con grietas en SPB

Métodos de Selección Multicriterio MCDM.

En ingeniería, al igual que en cualquier asignatura, llega un momento en el cual se deben tomar decisiones, y de ellas dependerán en gran porcentaje el éxito de un determinado proyecto. De este modo surge la necesidad de poseer uno o varios métodos que respalden una elección. Para ello se han desarrollado los métodos multicriterio, los cuales, como su nombre lo indica se caracterizan por cotejar varias variables o criterios transformadas en algoritmos o modelos matemáticos. No existe una metodología para seleccionar métodos de selección, ya que todos están diseñados para el mismo fin, sin embargo, para esta investigación se han tomado métodos

que tienen antecedentes de haber funcionado bastante bien en otras investigaciones de selección de materiales. Lo que se espera es, hallar el material idóneo de una lista de materiales que tiene características similares. Para llevar a cabo, mencionada selección numérica se deben seguir 5 pasos elementales:

1. Determinar el problema. “En primer lugar, antes de profundizar en el estudio de los métodos de decisión que se desarrollan y aplican, es necesario definir los elementos que componen un problema de decisión” (Muñoz & Romana, 2016, p. 4). En este paso se debe tener de forma precisa el objetivo que se desea alcanzar. Para ello se necesitan determinar 3 puntos imprescindibles: las opciones, los criterios y los pesos.
 - a. Opciones. Son los materiales candidatos de los cuales saldrá el ganador o material idóneo.
 - b. Criterios. Son las características relevantes que deben poseer los materiales candidatos.
 - c. Pesos. Son las prioridades que se dan a los criterios en la selección.
2. Matriz de decisión. En este paso se debe construir una matriz que contenga a las opciones y a los criterios con sus respectivos valores.
3. Ponderación de pesos. Para asignar pesos o prioridad a un criterio, existen varios métodos, los cuales pueden ser: 1. Subjetivos, los cuales se basan en la experiencia o juicio del decisor y 2. Objetivos, los cuales utilizan modelos matemáticos para respaldar la decisión. En esta investigación se trabaja con los métodos objetivos, de los cuales se han tomado tres para su aplicación: ENTROPÍA, DESVIACIÓN ESTÁNDAR y VARIACIÓN ESTADÍSTICA. Al final, solo se tomará los resultados en uno de ellos para trabajar con los métodos multicriterio.

4. Aplicación de Método Multicriterio. En este paso es donde se aplican los métodos multicriterio, para esta investigación se han determinado los siguientes métodos: VIKOR, PUGH, TOPSIS, PROMETHEE, DOMINIC y COPRAS, los cuales poseen su propio proceso de aplicación.

5. Ranking. Es la posición que ocupará determinado material en una escala que va de menor a mayor al final de cada método multicriterio.

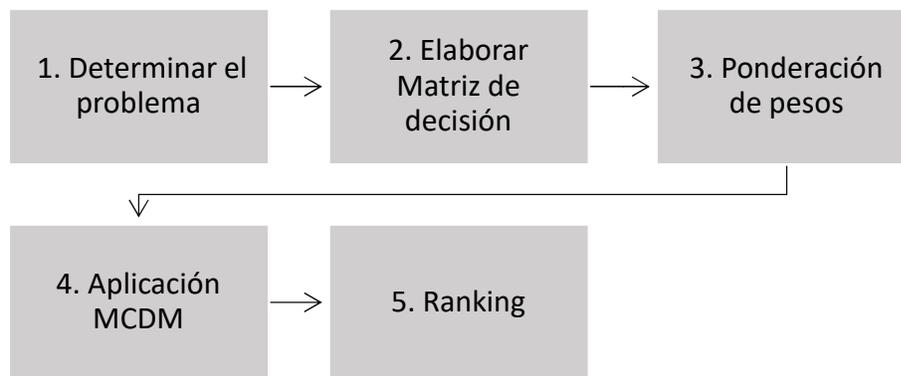


Figura 4. Pasos para aplicación de métodos multicriterio MCDM

Ponderación de pesos:

Método de Entropía.

La entropía es un término bien conocido en el mundo de la mecánica y de la termodinámica, sin embargo fue Claude E. Shannon en el año de 1948 quien logró acoplar este concepto a la teoría de la información y manejar datos con el principio de este concepto. (Estrada García, 2002). Para ello debemos recordar que la entropía es una magnitud que indica el grado de caos que posee un sistema, y que, al juntarlo con la información, nos va a indicar el grado de caos que tiene determinado proceso de valoración. Su proceso es el siguiente:

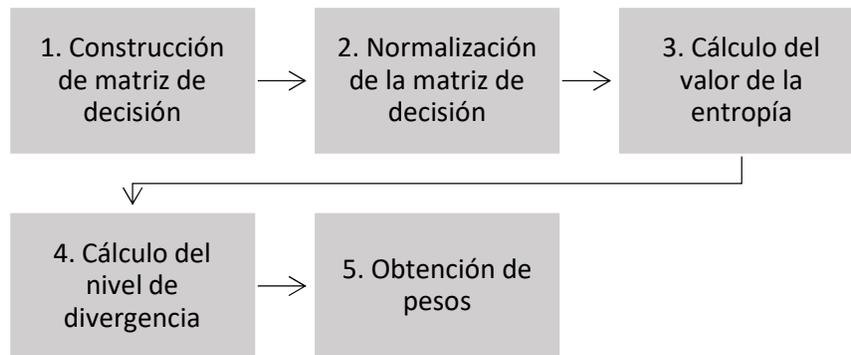


Figura 5. Proceso de aplicación método de Entropía

1. Construcción de la matriz de decisión. Esta matriz (X), se construye con la asociación de dos variables, las cuales son los materiales candidatos (M) en las columnas ($M1, M2, M3\dots$) y los criterios (C) en las filas ($C1, C2, C3\dots$), los valores de los criterios varían respecto a la característica de cada material.

$$X = \begin{bmatrix} C_{1M1} & C_{2M1} & \cdots & C_{1n} \\ C_{1M2} & C_{2M2} & \cdots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{m1} & C_{m2} & \cdots & C_{mn} \end{bmatrix}$$

Donde: CM son los valores de la Matriz de decisión, más adelante serán conocidos como Xij

2. Normalización de la matriz de decisión. En este paso es donde se obtiene los valores de cada criterio de forma normalizada, es decir combinados entre sí, para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} m \quad (1)$$

Donde:

p_{ij} : son los valores resultantes

m : son la cantidad de criterios

Xij : Son los valores de la matriz de decisión.

La matriz normalizada se obtiene al juntar de forma ordenada los valores obtenidos.

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix}$$

3. Cálculo del valor de la entropía. En este paso se calcula el valor de la Entropía aplicado la siguiente ecuación:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (2)$$

$$k = \frac{1}{\ln m} = \frac{1}{\ln 7} = 0,514 \quad (3)$$

Donde:

k : $\frac{1}{\ln}$: es una constante que corresponde a un valor que establece que $0 \leq e_j \leq 1$

m : es el número de materiales.

e_j : es el valor de entropía

P_{ij} : son los valores de la matriz normalizada

\ln : Logaritmo Natural

4. Cálculo del nivel de divergencia. En este paso se calcula la divergencia de los valores, es decir, que cada criterio contiene información relativa la cual se aclara aplicando la siguiente operación:

$$d_j = 1 - e_j \quad (4)$$

Donde:

d_j : es el grado de divergencia

e_j : es el valor de entropía

5. Obtención de pesos. En este paso se obtienen los valores finales o atributos que han adquirido cada uno de los criterios, para ello se aplica la siguiente ecuación:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (5)$$

Donde:

W_j = Pesos

Σdj = es la sumatoria de los grados de divergencia

Método de Desviación Estándar.

Es un método estadístico que nos permite hallar el punto aritmético más cercano a un punto central o de partida. Es decir que, al aplicar este método en la priorización de pesos, nos dará como resultado un mayor peso a la cualidad que más incida en el objetivo. Para ello se debe seguir la siguiente secuencia de pasos:

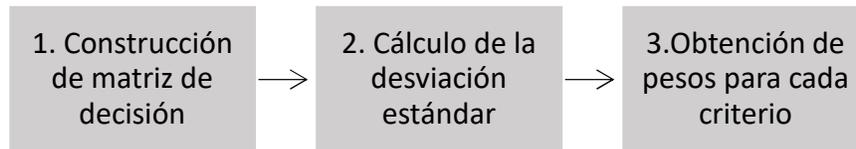


Figura 6 . Proceso de aplicación método de Desviación Estándar

1. Construcción de la matriz de decisión. Para ello utilizamos la misma matriz del método de la Entropía.
2. Cálculo de la desviación estándar. Para ello calculamos los valores dispersos en función de los valores promedios, usando la siguiente ecuación:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{m}} \quad (6)$$

Donde:

x_{ij} : son los valores de la matriz de decisión.

m : son número de materiales.

σ_j : son los valores de la desviación estándar.

\bar{x}_j : es el valor de la sumatoria de los criterios dividido para m

3. Obtención de pesos para cada criterio. Los atributos que obtienen cada uno de los criterios en este método se obtiene de la siguiente ecuación:

$$w_j = \frac{\sigma_j}{\sum_{j=1}^n \sigma_j} \quad (7)$$

Donde:

w_j : es el peso de cada criterio.

$\sum_{j=1}^n \sigma_j$: es la sumatoria de los valores de la desviación estándar.

Método de Variación Estadística.

Es un método estadístico objetivo que junta los valores de todas las variables de una matriz de decisión preestablecida y los concatena unos con otros de forma numérica hasta hallar el valor que más se acerque al ideal. De este modo se asignará un peso más alto al criterio que numéricamente sea más alto. Los pasos a seguir en su aplicación son:

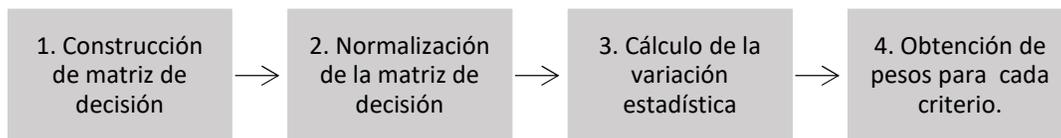


Figura 7. Proceso de aplicación método de Variación Estadística

1. Construcción de la matriz de decisión. Para ello utilizamos la misma matriz del método de la Entropía.
2. Normalización de la matriz de decisión. Para ello se deben tomar los valores de la matriz de decisión del método de la Entropía.

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (8)$$

Donde:

p_{ij} : son los valores de la matriz normalizada

m : pertenece al número de evaluaciones de los criterios.

X_{ij} : son los valores de la matriz de decisión.

Para normalizar la matriz, a los valores obtenidos se les debe aplicar la siguiente fórmula utilizando los valores máximos y mínimos:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{ij_{max}}} \quad (9)$$

$$p_{ij} = \frac{x_{ij_{min}}}{x_{ij}} \quad (10)$$

3. Cálculo de la variación estadística. A lo cual se le podría denominar como el valor promedio de un grupo de iteraciones entre los valores de cada criterio, usando para ello la siguiente ecuación:

$$V_j = \frac{\sum_{i=1}^m (p_{ij} - \bar{p}_j)^2}{m} \quad (11)$$

Donde:

P_{ij} : corresponde a los valores de la matriz de decisión normalizada.

m : corresponde al número de materiales evaluados.

V_j : es el valor de la variación estadística.

p_j : es la sumatoria de P_{ij}

4. Obtención de pesos para cada criterio. En este paso se torga el valor o atributo que este método asignará a cada criterio, para lo cual aplicamos la siguiente ecuación:

$$w_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^m V_j} \quad (12)$$

Donde:

w_j : es el peso de cada criterio.

Métodos multicriterio:

Existen dos tipos de método multicriterio, unos basados en la asignación de valor y otros basados en métodos de clasificación.

Métodos basados en asignación de valor: son los métodos en los que se usan escalas numéricas para asignar valores a los criterios.

Método VIKOR.

Método de Optimización Multidisciplinar y Solución de Compromiso. “El método VIKOR es apropiado para resolver problemas de decisión con criterios en conflicto y no conmensurables, es decir, con distintas unidades, o en el caso de que haya criterios cuantitativos y cualitativos.” (Muñoz & Romana, 2016, p.8) Es decir, este método se puede aplicar cuando existe una inseguridad de posición de prioridades. Su proceso es el siguiente:

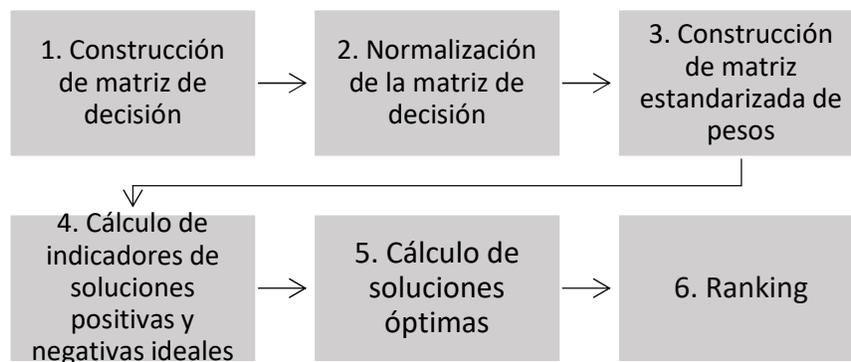


Figura 8. Proceso de aplicación del método VIKOR

1. Construcción de la matriz de decisión. Para ello utilizamos la matriz del método de la Entropía.

2. Normalización de la matriz de decisión. Para ello se toman a los valores de la matriz de decisión y se les aplica la siguiente ecuación:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a^2_{ij}}} \quad (13)$$

Donde:

a_{ij} = son los valores pertenecientes a la matriz de decisión

r_{ij} = son los valores pertenecientes a la matriz normalizada

$\sum_{i=1}^m a^2_{ij}$ = es la sumatoria de los valores de la matriz de decisión elevados al cuadrado.

Al final se obtiene la siguiente matriz normalizada R_{ij} , con los valores ordenados

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

3. Construcción de la matriz estandarizada de pesos. Para ello se multiplican los valores de la matriz normalizada por los pesos de lo cual se obtiene la matriz V_{ij} :

$$V = (wr) \tag{14}$$

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \cdots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \cdots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \cdots & w_n r_{mn} \end{bmatrix}$$

Donde:

w_n = es el valor de los pesos para cada criterio
 r = son los valores de la matriz normalizada.

V_{ij} = es la matriz estandarizada de pesos

4. Cálculo de indicadores de soluciones positivas y negativas ideales. Para ello se deben determinar los valores máximos y mínimos de la matriz estandarizada de pesos utilizando las siguientes operaciones:

$$A^* = \left\{ \max_i M_{ij} \mid j \in J, (\min_i M_{ij} \mid j \in J') \right\} = \{M_1^{max}, M_2^{max}, \dots, M_n^{max}\} \tag{15}$$

$$A^- = \left\{ \max_i M_{ij} \mid j \in J, (\min_i M_{ij} \mid j \in J') \right\} = \{M_1^{min}, M_2^{min}, \dots, M_n^{min}\} \tag{16}$$

Donde:

A^* = es el resultado de la operación del criterio positivo

A^- = es el resultado de la operación del criterio negativo

5. Cálculo de soluciones óptimas. En este paso se determinan los valores que determinarán el rango de valores de cada criterio, para ello se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$U_i = \sum_{j=1}^n \frac{w_j (f_j^{max} - f_{ij})}{(f_j^{max} - f_j^{min})} \tag{17}$$

$$R_i = \max_j \left[\frac{W_f(f_j^{max} - f_{ij})}{(f_j^{max} - f_j^{min})} \right] \quad (18)$$

$$V_i = \frac{\alpha(U_i - U_{min})}{(U_{max} - U_{min})} + \frac{(1-\alpha)(R_i - R_{min})}{(R_{max} - R_{min})} \quad (19)$$

Donde:

U_i = es la matriz resultante de la sumatoria

W_f = son los valores de los pesos

F_j = son los valores de la matriz estandarizada de pesos

R_i = es la matriz de los valores de rango

V_i = son los valores finales de cada criterio

α = es una constante cuyo valor es 0,5

6. Ranking. Es la ubicación de los valores obtenidos en el proceso de selección en una secuencia ascendente, de 1 a 7, siendo el valor 1 el valor idóneo, en el método VIKOR, el valor 1 se le otorga al valor que más se acerca a cero.

Método PUGH.

Para (Martínez, Vaca, Orozco, Montero, & Carrión, 2015), éste es un método usado para evaluar opciones en un proceso de diseño, categorizando y cuantificando los criterios, el material, los procesos, las características, etc. Dándoles determinada importancia, a fin de crear una escala. Este proceso contiene 4 pasos:

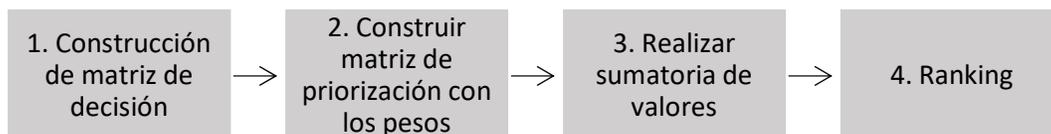


Figura 9. Proceso de aplicación del método PUGH

Su proceso es el siguiente:

1. Asignar valor puntual a cada criterio y construir la matriz de decisión. Para lo cual usamos la matriz del método de la Entropía.

Dar valores positivos (+) o negativos (-) a las características, según lo que se busca y construir la matriz de priorización. En esta matriz se compara los criterios de las opciones con los criterios originales.

A esta comparación se les asigna valores numéricos.

Donde:

Mejor que el original = 1
 Igual al original = 0
 Peor que el original = -1

2. El segundo paso en la obtención de la Matriz de Priorización de Pesos es aplicar la siguiente fórmula:

$$P = (M1i \times W1i), (M2ix W2i) \dots \quad (20)$$

Donde:

P = La matriz de los valores resultantes de la sumatoria

M = Son los valores de los criterios

W = son los valores de los pesos

3. Y luego se realiza la sumatoria de los resultantes.

$$\sum M1, M2 \dots \quad (21)$$

4. Ranking. Es el paso en el cual se debe seleccionar la alternativa de mayor resultado y otorgarle un lugar en la escala, siendo el valor más alto el que ocupa la primera posición.

Método TOPSIS.

Según (Martínez, Vaca, Orozco, Montero, & Carrión, 2015), es un método conocido por tener el principio en que, la distancia más corta a la solución ideal es positiva y la distancia más larga a la solución ideal es negativa, pero la importancia relativa entre distancias no es considerada.

Su proceso es el siguiente:

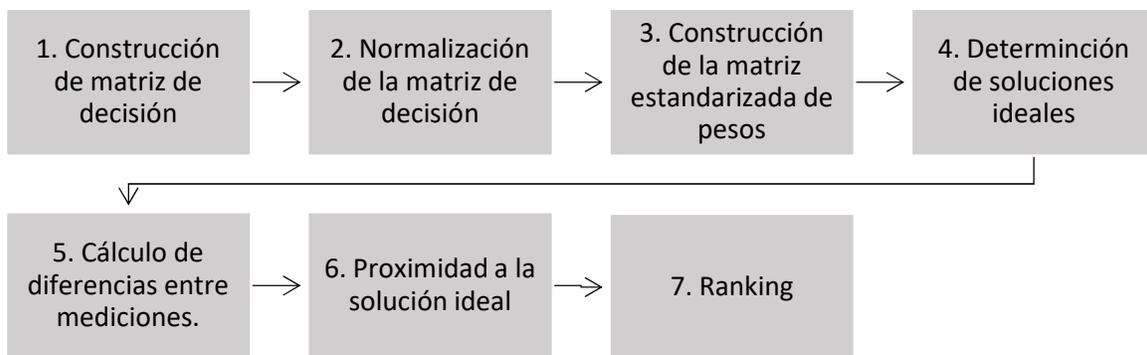


Figura 10. Proceso de aplicación del método TOPSIS

1. Construcción de la matriz de decisión. Para ello ocupamos la misma matriz del método de la Entropía.
2. Normalización de la matriz de decisión. Para ello ocupamos la misma matriz normalizada del método VIKOR.
3. Construcción de la matriz estandarizada de pesos. Para ello ocupamos la misma matriz estandarizada de pesos del método VIKOR.
4. Determinación de las soluciones ideales. Donde los valores relativamente cercanos o coeficiente de proximidad se determinan mediante la siguiente ecuación:

$$A^* = \left\{ \max_i v_{ij} \mid j \in J \right\}, \left\{ \min_i v_{ij} \mid j \in J' \right\} = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*\} \quad (22)$$

$$A^* = \{v_1^*, v_2^*, v_3^*\}$$

Donde:

A^* =Corresponde a los valores positivos ideales

A^- = Corresponde a los valores negativos ideales

V = son los valores de la matriz normalizada de pesos

5. Cálculo de diferencias entre mediciones. Este paso trata de calcular las distancias promedio entre las alternativas aplicando las siguientes ecuaciones:

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (23)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (24)$$

Donde:

S_i^* = Separaciones positivas

S_i^- = Separaciones negativas

6. Proximidad a la solución ideal. E este paso se calculan los valores más cercanos a los valores relativos de las alternativas, para ello usamos la siguiente ecuación:

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*} \quad (25)$$

Donde:

C_i^* = coeficiente de proximidad relativa

Ranking. Es el paso en el cual se debe seleccionar la alternativa de mayor resultado y otorgarle un lugar en la escala, siendo el valor más alto el que ocupa la primera posición.

Métodos de clasificación (Outranking): Para (Liao & Xu, 2014), estos métodos usados para determinar si las opciones candidatas son factibles o indiferentes a las otras, sobre el criterio. Contrariamente a la teoría de valores los métodos de clasificación utilizan escales

ordinarias, en donde cada elemento utiliza sus propias características gramaticales y son tratados como tal, sin asignarles otros valores arbitrarios. Es decir, son más amigables debido a que sus cualidades siempre están presentes y no necesitan de tablas de traducción. Entre ellos tenemos:

Método PROMETHEE II.

Según (Liao & Xu, 2014), el método PROMETHEE involucra utilizar una lista de alternativas y construir en serie de escalas, mismas que pueden ser positivas o negativas y netas, según las características deseadas.

que tiene determinado proceso de valoración. Su proceso es el siguiente:

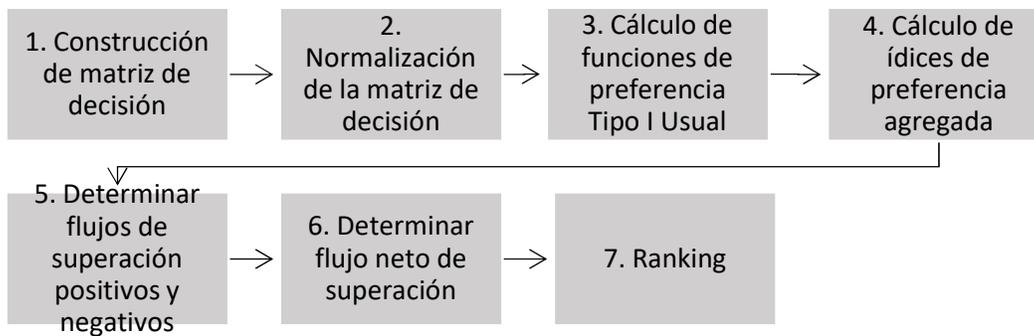


Figura 11. Proceso de aplicación del método PROMETHEE II

1. Construcción de la matriz de decisión. Para ello ocupamos la matriz de decisión del método VIKOR.
2. Normalización de la matriz de decisión. Para ello ocupamos la matriz normalizada del método VIKOR.
3. Cálculo de Funciones de Diferencias para cada Criterio, Tipo Usual.

Paso 1. Se realiza la diferencia entre el valor de dos alternativas.

Paso 2. Se reemplazan los valores de las matrices de diferencias por código binario, siendo usado el 0 y el 1 según se determine en cada criterio.

$$C_k = \begin{bmatrix} Ch1 - Ch1 & Ch1 - Ch2 & Ch1 - Ch3 \dots \\ Ch2 - Ch1 & Ch2 - Ch2 & Ch2 - Ch3 \dots \\ Ch3 - Ch1 & Ch3 - Ch2 \dots & \\ Ch4 - Ch1 \dots & & \end{bmatrix}$$

4. Cálculo de índices de preferencia agregada. Para ello aplicamos la siguiente ecuación:

$$\Pi(i, i') = \left[\frac{\sum_{j=1}^m W_j * P_j(i, i')}{\sum_{j=1}^m W_j} \right] \quad (26)$$

Donde:

Π = La matriz de preferencias

$\sum_{j=1}^m$ = Sumatoria valores coincidentes de cada matriz preferencia

W = Peso década criterio.

P_j = El número de criterios mayores que 0

5. Determinar Flujos de Superación Positivos y Negativos

$$\phi^+(i) = \sum_{i'=1}^n \Pi / n \quad (27)$$

$$\phi^-(i) = \sum_{i'=1}^n \Pi / n \quad (28)$$

Donde:

ϕ^+ = Flujo positivo

ϕ^- = Flujo negativo

$\sum_{i'=1}^n \Pi / n$ = Sumatoria de valores dividido para el número de criterios

$n = 3$

6. Determinar Flujo Neto de Superación.

$$\phi (Ci) = (\phi^+) - (\phi^-) \tag{29}$$

$$\phi (N) = [(Ci) + (Cj) + (Ck)]/3 \tag{30}$$

Donde:

$\phi (Ci) = \text{Flujo Neto de Superación para cada criterio}$

$\phi (N) = \text{Flujo Neto de superación Total}$

7. Ranking.

Donde mayor es mejor.

Método DOMINIC.

“El procedimiento “Dominic es un método cualitativo de selección de materiales, que considera factores de peso en los criterios de selección. La selección se hace con matrices, en las filas se incluirán los criterios y los factores de peso, mientras que las columnas contendrán los materiales candidatos, identificados con una letra.” (Martínez, Vaca, Orozco, Montero, & Carrión, 2014, p. 5) El método operativo se puede describir de la siguiente manera:

Su proceso es el siguiente:

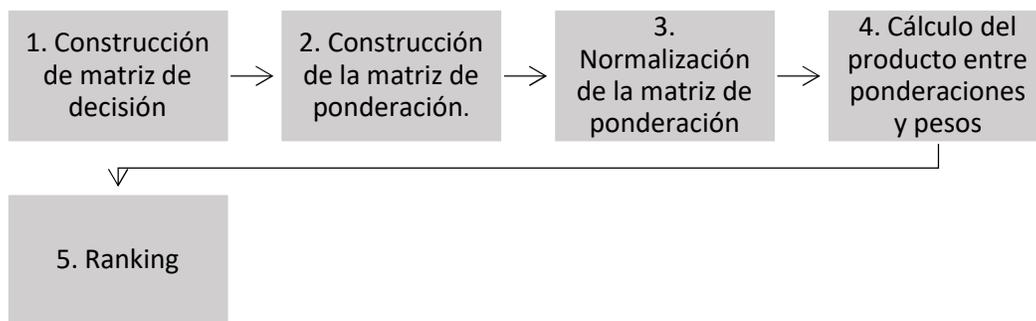


Figura 12. Proceso de aplicación del método DOMINIC

1. Construcción de la matriz de decisión. Para ello utilizamos la matriz de decisión del método VIKOR.

2. Construcción de la Matriz de Ponderación. En este paso del método se construye una matriz en la que se otorga grados de prioridad a los criterios. Para ello se utilizan palabras las cuales obedecen a un rango otorgado de la siguiente manera:

EXCELENTE = 10

BUENO = 7

RAZONABLE = 5

POBRE = 1

3. Normalización de la Matriz de Ponderación. Para ello multiplicamos los valores de la matriz de ponderación por los pesos utilizando la siguiente ecuación:

$$K = [M_{ij} * W_{ij}] \quad (31)$$

Donde:

K= Matriz Normalizada

M_{ij}= Los valores en M de la matriz de ponderación

W_{ij}= Pesos de cada criterio

4. Cálculo de valores finales. Para ello utilizamos la siguiente ecuación:

$$V_i = \sum_i^n / n \quad (32)$$

Donde:

V_i = Valores finales de cada criterio.

n = La cantidad de criterios

5. Ranking. Donde el valor más elevado ocupará la primera posición.

Método COPRAS.

El método COPRAS es un método de decisión el cual conjuga los valores de los criterios con los pesos de los criterios, para luego de ello obtener prioridades, las mismas que son relativas, en función de las cualidades que buscamos en un material. Dichas prioridades positivas y negativas, son evaluadas de manera tal que se puedan observar niveles de rendimiento de cada

opción de material, es decir, su medición es porcentual. De este modo, se puede alcanzar una clasificación de los materiales en función de su desempeño numérico.

Su proceso es el siguiente:

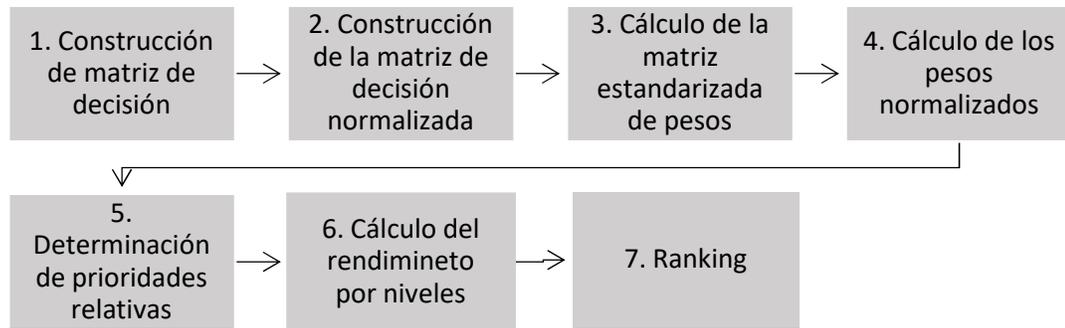


Figura 13. Proceso de aplicación del método COPRAS

1. Construcción de la matriz de decisión. Donde hemos ocupado la matriz del método VIKOR.
2. Cálculo de la Matriz de Decisión Normalizada. Para ello aplicamos la siguiente ecuación:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad (33)$$

Donde:

r_{ij} = Matriz de decisión normalizada

a_{ij} = El valor de cada criterio

$\sum_{i=1}^m a_{ij}$ = Sumatoria de los valores de los criterios

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots \\ r_{21} & r_{22} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots \end{bmatrix}$$

3. Cálculo de la Matriz Estandarizada de Pesos. Para ello utilizamos la siguiente ecuación:

$$V_{ij} = (w_i)(r_{ij}) \quad (34)$$

Donde:

V_{ij} = Matriz estandarizada de pesos
 W_i = Pesos de cada criterio
 R_{ij} = Valores de la matriz normalizada

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \dots \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \dots \end{bmatrix}$$

4. Cálculo de pesos Normalizados. En este paso damos peso a cada criterio según su característica comparada con la característica buscada. Para ello empleamos las siguientes ecuaciones:

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^m y_{+i} \quad (35)$$

$$S_{-i} = V3 \quad (36)$$

Donde:

S_{+i} = Peso Normalizado Positivo

S_{-i} = Peso Normalizado Negativo

$\sum_{j=1}^m y_{+ij}$ = Sumatoria de los pesos Positivos entre cada criterio

V3 = Pesos normalizados del criterio de precio

5. Cálculo de prioridades relativas. En Este paso buscamos los grados de satisfacción de cada alternativa. Para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_i = S_{+i} + \frac{\sum_{j=1}^m S_{-i}}{S_{-i} \sum_{j=1}^m \frac{1}{S_{-i}}} \quad (37)$$

Donde:

Q_i = Prioridad Relativa

S_{+i} = Peso normalizado positivo

S_{-i} = Peso normalizado negativo

6. Cálculo del Rendimiento por Niveles. Este paso trata de comparar las cualidades de cada alternativa a fin de buscar la más eficiente de forma porcentual. Para ello empleamos la siguiente ecuación:

$$U_i = \frac{Q_i}{Q_{max}} * 100 \quad (38)$$

Donde:

U_i = Rendimiento

Q_i = Prioridad

Q_{max} = Prioridad máxima

7. Ranking. Donde el valor más elevado ocupará la primera posición.

Coeficiente de Corelación de SPEARMAN.

Una vez obtenidos los resultados de los MCDM, se debe medir la existencia de una correlación entre los ellos, para lo cual se utiliza la herramienta conocida como la Correlación de Spearman, Según (Barrera, 2014), los valores obtenidos con este método pueden puntuar desde -1.0 hasta 1.0, pasando por el 0 absoluto, interpretándose de la siguiente manera, si se acercan al 1.0 significa que existe una correlación positiva, si se acercan al -0.1 existe una correlación negativa, y si el valor es cero, no existe correlación. Es decir, que en el caso de la correlación positiva existe una asociación en la cual, al incrementar el valor en un rango, también aumenta el relacionado, de modo inverso en la correlación negativa y ausente en el caso de ser cero. Para ello se deben analizar los resultados de los MCDM en parejas, realizando combinaciones de modo tal que todos lleguen a combinarse. La correlación de Spearman obedece a la siguiente ecuación:

$$R_s = 1 - \frac{6 \sum_y^x d^2}{n(n^2-1)} \quad (39)$$

Donde:

R_s = Coeficiente de Correlación de Spearman.

$\sum_y^x d^2$ = La sumatoria de las diferencias entre los factores X y Y elevadas al cuadrado.

n = la cantidad de variables.

Simulación.

Una vez realizado el proceso de selección con los métodos MCDM, el siguiente paso es recrear las condiciones en que van a trabajar los SPB construidos virtualmente con los materiales seleccionados, con el objeto de validar virtualmente la selección. El proceso de simular trata de usar un software especializado para esta tarea a fin de recrear las condiciones de trabajo que va a realizar el aislante SPB en un motor real, de este modo utilizando el método de elementos finitos, el software nos ayuda de forma gráfica y con datos reales a observar el comportamiento del elemento puesto en funcionamiento virtual. Para elaborar el modelo utilizamos el módulo de CAD y para simular el módulo de Nastran del software NX. La geometría se ha tomado de forma arbitraria, ya que la idea es determinar un material mismo que podría ser usado para fabricar SPB de cualquier geometría.

Todas las características y datos de la simulación se ven en el método en el punto de desarrollo de la simulación, en la tabla 51.

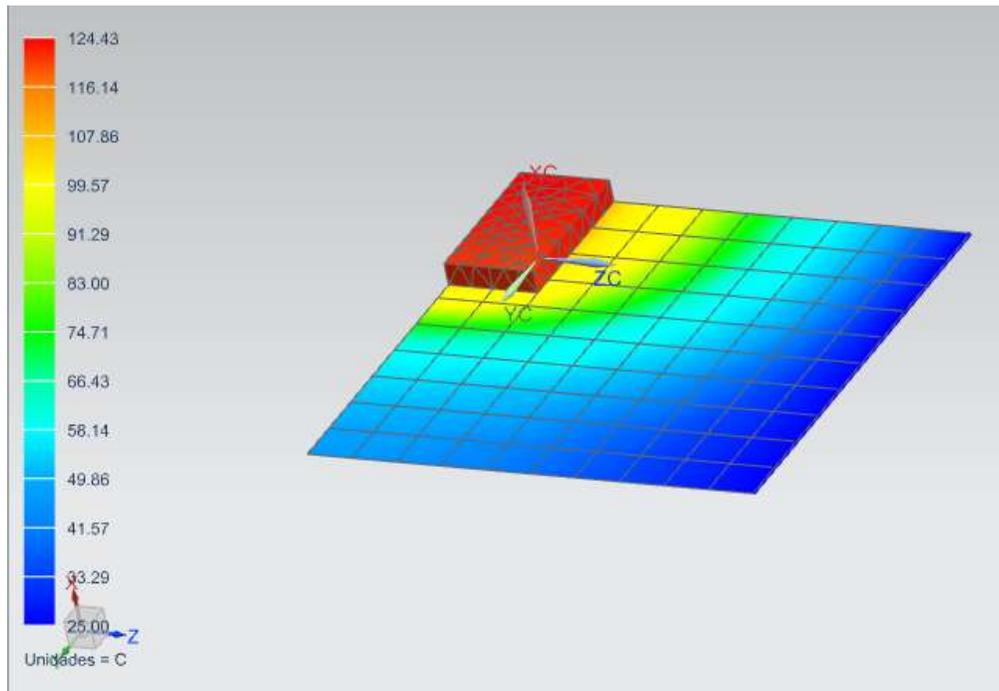


Figura 14. Ejemplo de Simulación Térmica

Experimentación.

Usando como referencia los datos de las características de un SPB. Según el Servicio Ecuatoriano de Normalización (Ministerios de Industrias, 2011) los cables de bujías automotrices y accesorios fabricados en el Ecuador, deben cumplir la norma **ISO 3808** que se equipara con la norma **SAE J2031** y con la norma **ASTM D3850-12**. Según (Standarization, 2002), la norma ISO 3808 se aplica a todos los cables de encendido de alta tensión, en el sector automotriz y describe la siguiente prueba:

- Degradación termo gravitacional

Al ser polímeros caracterizados, se posee todos los datos sobre estos materiales aislantes seleccionados, datos tales como: resistencia dieléctrica, temperatura de trabajo y resistencia a hidrocarburos, los cuales son los datos esenciales de un SPB y se pueden observar en las hojas de datos de los materiales.

No obstante, es necesario conocer el dato de degradación térmica, ya que este no se encuentra en la hoja de datos del material, dicha degradación térmica es la principal amenaza que degrada a los SPB. La degradación Térmica se define como los efectos físico degenerativos que produce la variación de temperatura en un material, es decir, en esta prueba se puede observar a qué temperatura el material empieza a sufrir cambios estructurales o de estado físico. Razón por la cual es imperativo realizar una prueba de degradación térmica y de este modo comprobar los daños que va a sufrir determinado material, expuesto a las elevadas temperaturas típicas de un motor de combustión interna.

Para obtener mencionado dato, se debe realizar una prueba denominada Termogravimétrica, la cual es una prueba que requiere el uso de un analizador termogravimétrico conocido como TGA, el cual es un equipo que permite someter al material a un entorno de temperatura controlada y con capacidad de observar de manera medible, la degradación del material en función de la temperatura.

En el Ecuador son pocas las instituciones que poseen un equipo de estas características en la época en que se lleva a cabo esta investigación, siendo uno de ellos el Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros CIAP, de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador.

En el laboratorio del CIAP, se sometió a un prototipo de SPB fabricado con el material ganador de la selección MCDM a mencionada prueba Termogravimétrica.

Las características de la experimentación se observan en el punto de desarrollo de la experimentación, en la tabla 53.



Figura 15. Analizador Termogravimétrico TGA

Se puede observar que, sin importar las características técnicas de la bobina tipo COP, todas necesitan de un aislante SPB, determinar qué material podría ser el idóneo para fabricarlos, es la tarea que va a desempeñar la aplicación de los métodos MCDM, los mismos que se según (Caliskan, Kursuncu, Kurbanglu, & Güven, 2013) son métodos que ayudan a encontrar, en este caso el material deseado, empleando para ello una clasificación de materiales candidatos y cotejando sus características propias con las características buscadas.

Método.

La presente investigación se realizará en tres etapas: 1. Selección de material usando MCDM, 2. Simulación virtual, y 3. Experimentación. Para ello se han definido 5 pasos a seguir durante el desarrollo de esta investigación.

1. Determinar las características que posee un material con que se fabrican aislantes de alta tensión SPB para bobinas COP.
2. Determinar 7 materiales que posean dichas características para fabricar aislantes de alta tensión SPB para bobinas de encendido COP.
3. Aplicar los métodos MCDM para seleccionar el material idóneo.
4. Realizar simulaciones de carácter térmico al material ganador.
5. Realizar pruebas experimentales que validen la simulación de carácter térmico al material ganador.

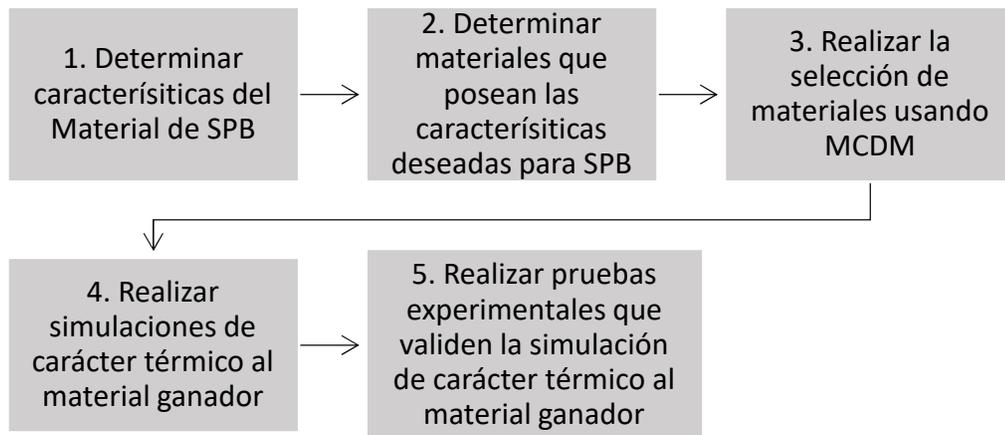


Figura 16. Secuencia metodológica

Determinar las características que debe tener un material para aislar alta tensión SPB para bobinas COP.

En este punto se determina las características técnicas que poseen los materiales con que se fabrican en la actualidad los aislantes SPB, para entender mejor la función de un SPB es importante conocer también su geometría, el porqué de ella y su funcionamiento.

Características de material de SPB.

En nuestros días existen una amplia variedad de materiales que poseen cualidades aislantes eléctricas, o características dieléctricas, sin embargo, no todos cumplen las necesidades específicas que debe poseer un aislante de alta tensión SPB para bobinas COP. Para (Rao, 2008) al seleccionar un material se deben conocer características como: propiedades químicas, mecánicas, físicas, eléctricas, manufacturabilidad, desempeño, costo, impacto ambiental, reciclabilidad, aspecto, entre otras. Según (Bosch, 2011), (Funk & Eiler, 2003), (Fukumori, et al., 1981), las características que debe poseer un SPB son de carácter eléctrico, dieléctrico, térmico y químico. Antes de identificar las características de un SPB se debe analizar las magnitudes con las que un SPB debe trabajar.

Determinar los materiales con que se fabrican aislantes de alta tensión SPB para bobinas de encendido COP en la actualidad.

Según (Funk & Eiler, 2003), los materiales más usados en la actualidad, para la fabricación de SPB son:

a. Caucho: es un polímero elástico de origen natural.

b. Silicón: es un polímero inorgánico constituido por oxígeno y silicio.

c. Silicón dieléctrico SILCOSET. (Funk & Eiler, 2003), es un tipo de silicón en estado puro con capacidad de ser inyectado a altas temperaturas y tomar sus características a temperatura ambiente.

Estos materiales cumplen con un promedio de características presentadas en el punto uno, razón por la cual son los más comunes para fabricar SPB, sin embargo, mencionados materiales son los que luego de cierto tiempo de trabajo presentan las fallas técnicas de material, al perder su módulo de elasticidad y presentar deformaciones plásticas permanentes, provocadas por agentes como el combustible o la temperatura, razón por la cual se busca superar sus cualidades en este sentido.

Magnitudes dieléctricas:

Resistencia dieléctrica.

Es una forma de medir la capacidad de aislamiento eléctrico que posee un material, y este se define por la cantidad o espesor del material siendo su unidad los Voltios por metro Vxm siendo el valor: $20 \times 10^6 \text{ V x m}$

Magnitudes térmicas:

Temperatura de trabajo.

Es el rango de temperatura mínimo y máximo al cual puede trabajar determinado material sin sufrir alteraciones estructurales. Debe tomarse en cuenta que la transferencia de calor es por conducción. Siendo su valor -20 a 140 °C.

Coefficiente de expansión térmica.

Es un coeficiente numérico que permite determinar el cambio de longitud de un material al ser sometido a un incremento de temperatura.

Conductividad térmica.

Es la propiedad de los materiales que permite medir la capacidad de transmitir el calor que posee determinado material.

Magnitudes Químicas:

Prueba de hidrocarburos.

Es la resistencia de un material a no alterar su estructura física al contacto con hidrocarburos, es decir, aceites y combustibles de origen fósil.

Prueba de grasas y aceites.

Es la capacidad de un material a alterar su composición química y física ante la presencia de grasa y aceites.

Precio.

Este valor se toma del costo por kilogramo de material en el mercado ecuatoriano, utilizando como fuentes a los distribuidores locales de estos materiales. El precio referencial se ha tomado del proveedor ecuatoriano de plásticos ECUAPLAST.

Magnitudes mecánicas:

Módulo de elasticidad.

También conocido como módulo de Young, es un factor que exprese la capacidad de un material a deformarse elásticamente al ser aplicada una determinada fuerza.

A continuación, se presenta una tabla donde se agrupan las magnitudes características de un SPB que se encuentra en el mercado y fabricado por la casa comercial Bosch, y sus respectivos valores:

Tabla 1.

Características de un SPB

Magnitudes	Valores máximos de trabajo
Constante dieléctrica	20×10^6 V x m
Temperatura de trabajo	140 °C
Magnitud Química	Si
Resistencia a Hidro Carburos	Si
Coefficiente expansión térmica	$250 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$
Conductividad térmica	$0.22 \text{ Wm}^{-1} \text{K}^{-1} @ 23^\circ\text{C}$
Módulo de elasticidad	4.0 GPa
Precio Promedio \$ x Kg.	3

Fuente: (Bosch, 2011)

Selección de materiales.

Seleccionar 7 materiales candidatos que posean las características para fabricar aislantes de alta tensión SPB.

Según (Biluirbina, Alter, & Liesa, 1990), los materiales aislantes son aquellos que poseen un número par de electrones en sus átomos, de forma tal que no pueden ceder electrones, en este sentido se han hecho muchos descubrimientos sobre materiales a los que se los denominó polímeros, datando el más antigua en 1909 a la Baquelita. Es decir, la ciencia de los materiales aislantes artificiales o sintéticos posee más de un siglo de antigüedad oficialmente, luego de lo cual han aparecido un grupo sustancial de aislantes eléctricos en el mercado mundial de los cuales se tomarán 7 para la selección.

“Los polímeros viene caracterizados por funciones de distribución de pesos moleculares, que pueden representarse por medio de una curva en la que el porcentaje de cada especie se representa frente al peso molecular.” (Bilurbina & Liesa, 1990, p.16).

Los materiales tradicionales con que se fabrican SPB sufren las degradaciones técnicas antes mencionadas, por tanto, se busca materiales alternativos que superen a dichos materiales y

pueda de este modo, alargarse el tiempo de recambio. Para pre seleccionar los materiales que van ser estudiados se ha tomado tres características principales:

1. Que se igualen o superen las características técnicas de un SPB.
2. Que se encuentren fácilmente en el mercado ecuatoriano
3. Que sean de bajo costo

Para ello se ha desarrollado una tabla preliminar de criterios, en la cual se puede observar la importancia que tiene las características o criterios preliminares.

Tabla 2.
Criterios de Selección Preliminares

Características Técnicas	Disponibilidad Mercado Ecuatoriano	Precio
≥ Al material original	Si	Mínimo

De este modo, los materiales que se han seleccionado son:

Polietileno HDPE (Alta Densidad).

Para (Valero & Díaz, 2016), los poliuretanos presentan formidables características para ser usadas en biomedicina, una de ellas es la cualidad dieléctrica. Es decir, aparte de las cualidades mecánicas y de biocompatibilidad de poliuretano, es importantes que no sea un conductor eléctrico, para mayor seguridad de los pacientes que lo van a usar en prótesis. Según (Goodfellow, 2018)

Tabla 3.
Propiedades del Polietileno AD Alta Densidad

Espesor	2.0 mm
Resistencia dieléctrica	22x10 ⁶ V x m
Temperatura de trabajo	120°C

Resistencia a Hidro Carburos	Si
Precio \$ x Kg. En Ecuador	4
Coefficiente de expansión térmica	$100 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$
Conductividad térmica	$0.33 \text{ Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$
Módulo de elasticidad	0.3 GPa
Resistencia a grasas y aceites	Si

Polietileno LDPE (Baja Densidad).

Según (Montoliu, 1993), termoplásticos de cadenas de carbono como el polietileno poseen una densidad relativamente baja, característica que causa una alta resistencia al flujo de electrones. Es decir, esta cualidad convierte a este material en un muy buen aislante eléctrico.

Según (Goodfellow, 2018)

Tabla 4.

Propiedades del Polietileno BD Baja Densidad

Espesor	2.0 mm
Resistencia dieléctrica	$27 \times 10^6 \text{ V x m}$
Temperatura de trabajo	90°C
Resistencia a Hidro Carburos	Si
Precio \$ x Kg. En Ecuador	4
Coefficiente de expansión térmica	$100 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$
Conductividad térmica	$0.52 \text{ Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$
Módulo de elasticidad	1.2 GPa
Resistencia a grasas y aceites	Si

Poliestireno PS.

Según (Muja Rosas, Genesca, & Juan, 2013) el poliestireno puede ser usado en la fabricación de aislantes eléctricos para la industria a partir de mezclas con cauchos. Es decir, las propiedades dieléctricas del poliestireno pueden ser mejoradas a mezclarlas con otros materiales aislantes. Según (Goodfellow, Todos los materiales para la Investigación Científica y Fabricación, 2018)

Tabla 5.

Propiedades del Poliestireno

Espesor	2.0 mm
Resistencia dieléctrica	$20 \times 10^6 \text{ V x m}$
Temperatura de trabajo	95°C
Resistencia a Hidro Carburos	Si
Precio \$ x Kg. En Ecuador	4.25
Coefficiente de expansión térmica	$70 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Conductividad térmica	$0.17 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Módulo de elasticidad	4.65 GPa
Resistencia a grasas y aceites	Si

Policloruro de vinilo – No Plastificado PVC.

Para (Instituto Nacional de Higiene, 2016) el polivinilo o PVC es uno de los mayores aislantes eléctricos conocidos en la industria. Es decir, la cualidad dieléctrica que presenta el PVC lo convierten en un aislante muy versátil a la hora de usarlo como aislante eléctrico, de hecho, es el aislante que recubre la mayoría de cables eléctricos. Según (Goodfellow, Todos los materiales para Investigación Científica y Fabricación, 2018)

Tabla 6.

Propiedades del Polivinilo

Espesor	2.0 mm
Resistencia dieléctrica	$14 \times 10^6 \text{ V x m}$
Temperatura de trabajo	75°C
Resistencia a Hidro Carburos	Si
Precio \$ x Kg. En Ecuador	4
Coefficiente de expansión térmica	$75 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Conductividad térmica	$0.25 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Módulo de elasticidad	4.0 GPa
Resistencia a grasas y aceites	Si

Poliamida 6 – Nylon PA6.

Para (Guerrero Salazar & González González, 2002) desde los años 90 alrededor del 15% del peso total de un vehículo está constituido por polímeros como el nylon, el cual se usa entre otras cosas para fabricar partes de dispositivos eléctricos y electrónicos. Por lo tanto, la

aplicación del nylon en la industria automotriz no es nueva, sin embargo, sus características dieléctricas lo hacen candidato fuerte en este estudio. Según (Goodfellow, Todos los materiales para Investigación Científica y Fabricación, 2018)

Tabla 7.
Propiedades del Nylon

Espesor	2.0 mm
Resistencia dieléctrica	$25 \times 10^6 \text{ V x m}$
Temperatura de trabajo	160°C
Resistencia a Hidro Carburos	Si
Precio \$ x Kg. En Ecuador	4.5
Coefficiente de expansión térmica	$95 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Conductividad térmica	$0.28 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Módulo de elasticidad	3.0 GPa
Resistencia a grasas y aceites	Si

Copolímero de Etileno – Tetrafluoretileno ETFE – Teflón.

Según (Girbal & Amalvy, 2016) debido a las buenas propiedades dieléctricas del teflón es usado como aislante en el proceso de asilamiento entre placas de las baterías de litio de alto desempeño. Por lo tanto, convierten al teflón en un material candidato debido a su ya conocido comportamiento aislante. Según (Goodfellow, Todos los materiales para Investigación Científica y Fabricación, 2018)

Tabla 8.
Propiedades del Teflón

Espesor	2.0 mm
Resistencia dieléctrica	$25 \times 10^5 \text{ V x m}$
Temperatura de trabajo	160°C
Resistencia a Hidro Carburos	Si
Precio \$ x Kg. En Ecuador	4.5
Coefficiente de expansión térmica	$90 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Conductividad térmica	$0.24 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Módulo de elasticidad	0.8 GPa
Resistencia a grasas y aceites	Si

Polipropileno PP.

El Polipropileno es un polímero reconocido por sus cualidades mecánicas y dieléctricas en el campo automotriz y mecánico en general, con él se fabrican muchas piezas para conducción de fluidos a elevadas temperaturas como acoples para calefones de agua y varias autopartes a bajo costo. Según (Goodfellows, 2018)

Tabla 9.

Propiedades del Polipropileno

Espeor	2.0 mm
Resistencia dieléctrica	30×10^6 V x m
Temperatura de Trabajo	120°C
Resistencia a Hidro Carburos	Si
Precio \$ x Kg. En Ecuador	5
Coefficiente de expansión térmica	$100 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$
Conductividad térmica	$0.22 \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Módulo de elasticidad	01.5 GPa
Resistencia a grasas y aceites	Si

A continuación, se presenta una tabla con una selección de 7 materiales candidatos para ser estudiados mediante la técnica multicriterio MCDM.

Según (Company S. S., 2008), (Company D. , 2007), (M., 2011), (JQ, 2016), (Tecnimacor, 2018)

Tabla 10.
Materiales Candidatos

Material: Espesor: 2.0mm	Polietileno BD	Polietileno AD	Poliestireno	PVC	Nylon	Teflón	Polipropileno	Valores deseados
Características Dieléctricas								
Resistencia Dieléctrica	22x10 ⁶ V x m	27x10 ⁶ V x m	20x10 ⁶ V x m	14x10 ⁶ V x m	25x10 ⁶ V x m	25x10 ⁶ V x m	30x10 ⁶ V x m	20x10 ⁶ V x m
Características Térmicas								
Temperatura de trabajo	120 °C	90 °C	95 °C	75 °C	160 °C	160 °C	120 °C	140 °C
Coefficiente de expansión térmica	100 x10 ⁻⁶ K ⁻¹	100 x10 ⁻⁶ K ⁻¹	70 x10 ⁻⁶ K ⁻¹	75 x10 ⁻⁶ K ⁻¹	95 x10 ⁻⁶ K ⁻¹	90 x10 ⁻⁶ K ⁻¹	100 x10 ⁻⁶ K ⁻¹	100 x10 ⁻⁶ K ⁻¹
Conductividad térmica	0.33 Wm ⁻¹ K ⁻¹	0.52 Wm ⁻¹ K ⁻¹	0.17 Wm ⁻¹ K ⁻¹	0.25 Wm ⁻¹ K ⁻¹	0.28 Wm ⁻¹ K ⁻¹	0.24 Wm ⁻¹ K ⁻¹	0.22 Wm ⁻¹ K ⁻¹	0.25 Wm ⁻¹ K ⁻¹
Características Químicas								
Hidro Carburos	Si							
Grasa y aceites	Si							
Características económicas								
Precio \$ x Kg.	4	4	4.25	4	4.5	4.5	5	3
Características Mecánicas								
Módulo de elasticidad	0.3 GPa	1.2 GPa	1.65 GPa	4.0 GPa	3.0 GPa	0.8 GPa	1.2 GPa	4.0 GPa

A continuación, se presenta una tabla de variables donde se presentan los materiales candidatos y las variables que se van a analizar.

Tabla 11.
Tabla de variables técnicas de materiales

Variable	Niveles						
Materiales:	Polietileno BD	Polietileno AD	Poliestireno	Polivinilo	Nylon	Teflón	Polipropileno
Propiedades térmicas:	Temperatura de trabajo/Coeficiente de expansión térmica/Conductividad térmica						
Propiedades dieléctricas:	Constante Dieléctrica						
Resistencia a Hidrocarburos:	Si			No			
Precio \$:							

Luego de poseer una lista de materiales candidatos, se procederá a realizar la selección multicriterio MCDM, la misma que deber ser enfocada a buscar un método que se apegue a las necesidades de este estudio, para ello se debe definir los problemas de decisión.

Desarrollo de métodos de ponderación (Pesos):

Método de Entropía.

Para empezar a desarrollar los métodos de ponderación y multicriterio respectivamente, debemos poseer los datos de los materiales con que se va a trabajar agrupados en una sola matriz:

Tabla 12.
Matriz de materiales y criterios.

Materiales	Resistencia Dieléctrica V x m	Temperatura de trabajo °C	Precio \$ x Kg.	Coefficiente de expansión térmica $\times 10^{-6}K^{-1}$	Conductividad térmica $Wm^{-1}K^{-1}$	Módulo de elasticidad GPa	Resistencia a Hidrocarburos	Resistencia grasa y aceites
(M)	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)	(C6)	(C7)	(C8)
Polietileno AD (M1)	22	120	4	100	0.33	0.3	Si	Si
Polietileno BD (M2)	22	90	4	100	0.52	1.2	Si	Si

Poliestireno (M3)	20	95	4.25	70	0.17	1.65	Si	Si
PVC (M4)	14	75	4	75	0.25	4.0	Si	Si
Nylon (M5)	25	160	4	95	0.28	3.0	Si	Si
Teflón (M6)	25	160	4.5	90	0.24	0.8	Si	Si
Polipropileno (M7)	30	120	5	100	0.22	1.5	Si	Si

Esta tabla se usará desde aquí en adelante para todos los métodos de ponderación y para los métodos MCDM. Los materiales se codificarán con la letra **M** y un número. Los criterios se codificarán con la letra **w** y un número. La columna de la resistencia a Hidrocarburos y la de Resistencia a Grasas y Aceites no se tomarán en cuenta en el resto del proceso debido a que todos poseen el mismo valor (Si).

1. Matriz de Decisión Resultante:

$$X = \begin{bmatrix} 22 & 120 & 4 & 100 & 0.33 & 0.3 \\ 22 & 90 & 4 & 100 & 0.52 & 1.2 \\ 20 & 95 & 4.25 & 70 & 0.17 & 1.65 \\ 14 & 75 & 4 & 75 & 0.25 & 4 \\ 25 & 160 & 4.5 & 95 & 0.28 & 3 \\ 25 & 160 & 4.5 & 90 & 0.24 & 0.8 \\ 30 & 120 & 5 & 100 & 0.22 & 1.5 \end{bmatrix}$$

2. Normalización de la Matriz de Decisión

Para normalizar la matriz de decisión utilizamos la ecuación número 1. Con los valores obtenidos de esa operación formamos la matriz P_{ij}

2.1 Matriz Normalizada Resultante:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} 0.13 & 0.14 & 0.13 & 0.15 & 0.16 & 0.02 \\ 0.13 & 0.10 & 0.13 & 0.15 & 0.25 & 0.096 \\ 0.12 & 0.11 & 0.14 & 0.11 & 0.08 & 0.13 \\ 0.08 & 0.09 & 0.13 & 0.11 & 0.12 & 0.32 \\ 0.15 & 0.19 & 0.14 & 0.15 & 0.13 & 0.24 \\ 0.15 & 0.19 & 0.14 & 0.14 & 0.11 & 0.06 \\ 0.18 & 0.14 & 0.16 & 0.15 & 0.10 & 0.12 \end{bmatrix}$$

3. Cálculo del valor de la Entropía

Para realizar el cálculo del valor de la entropía aplicamos la ecuación número 2 y luego de ello la ecuación número de 3 donde se emplea la constante K .

e_j : corresponde al valor de entropía

De este modo obtenemos los valores e para cada criterio mostrados en la tabla 13.

4. Cálculo del grado de divergencia.

Para obtener el grado de divergencia aplicamos la ecuación número 4, de donde se obtiene los valores d , mostrados en la tabla 13.

Tabla 13.

Resultados Intermedios de Cálculo de la Entropía(e) y Grado de Divergencia (d).

Numeral e	Valor	Numeral d	Valor
$e1$	0.98	$d1$	0.001
$e2$	0.98	$d2$	0.011
$e3$	0.99	$d3$	0.001
$e4$	0.99	$d4$	0.004
$e5$	0.96	$d5$	0.031
$e6$	0.88	$d6$	0.115

5. Obtención de pesos.

Para obtener los valores de los pesos utilizando el método de la Entropía aplicamos a continuación la ecuación número 5, de donde se obtiene valores d_j y con la sumatoria de ellos se obtiene la constante d que sirve en el paso final del cálculo de los pesos W , mostrados en la tabla número 14.

Tabla 14.

Tabla de pesos obtenida mediante método Entropía.

$w1$	$w2$	$w3$	$w4$	$w5$	$w6$
0,061	0,098	0,008	0.024	0.172	0.637

Método de Desviación Estándar.

1. Matriz de decisión:

Para ello utilizamos el mismo procedimiento del método de la Entropía:

2. Cálculo de la desviación Estándar

Para calcular los valores de la desviación estándar utilizamos la ecuación número 6, donde obtenemos como resultado los valores σ_j : que corresponde al valor de la desviación estándar, siendo esta una constante que servirá en el siguiente paso y observados en la tabla 15.

Tabla 15.

Resultados Intermedios de Cálculo de la Desviación Estándar (σ).

Numeral de Desviación	Valor
$\sigma1$	147.71
$\sigma2$	6692.86
$\sigma3$	0.84
$\sigma4$	950.0
$\sigma5$	0.08
$\sigma6$	10.0

3. Obtención de pesos para cada criterio.

Para obtener los pesos para cada criterio en este paso utilizamos la ecuación número 7, en la cual se obtiene los valores W , los cuales se han agrupado en la tabla 16.

Tabla 16.

Pesos obtenidos mediante el Método de Desviación Estándar

w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6
0.09	0.63	0.007	0.23	0.002	0.024

Método de Variación Estadística.

1. Matriz de decisión:

En este método se usa como matriz de decisión a la misma matriz de decisión del método de la Entropía.

2. Normalización de matriz de decisión

Para normalizar la matriz de decisión utilizamos la ecuación número 8

La matriz normalizada se obtiene mediante los valores obtenidos luego de aplicar las fórmulas 9 y 10 respectivamente para hallar los valores máximos y mínimos. Los valores obtenidos se agrupan en la matriz de la tabla número 17. Donde los valores P , indican el número del material acompañado del valor del criterio al que representan.

Tabla 17.

Matriz de decisión normalizada método de variación estadística

P11	0.63	P12	0.62	P13	1	P14	0.75	P15	0.51	P16	1.0
P21	0.63	P22	0.39	P23	1	P24	0.75	P25	0.32	P26	0.25
P31	0.7	P32	0.78	P33	0.94	P34	1.07	P35	1.0	P36	0.18
P41	1	P42	1	P43	1	P44	1.0	P45	0.68	P46	0.07
P51	0.56	P52	0.46	P53	0.88	P54	0.78	P55	0.60	P56	0.1
P61	0.56	P62	0.46	P63	0.88	P64	0.83	P65	0.70	P66	0.37
P71	0.46	P72	0.62	P73	0.8	P73	0.75	P75	0.77	P76	0.20

3. Cálculo de la variación estadística

Para calcular la variación estadística aplicamos la ecuación número 11, al final se obtendrá un valor denominado V_j , el mismo que sirva en la siguiente ecuación del proceso y se muestran en la tabla 18.

Tabla 18.

Resultados Intermedios de la Variación Estadística (V).

Numeral de Variación	Valor
V1	0.025
V2	0.033
V3	0.005
V4	0.015
V5	0.035
V6	0.087

4. Obtención de pesos para cada criterio.

Para la obtención de los pesos se debe aplicar la ecuación número 12, de ello se obtiene los valores W , los cuales se han agrupado en la tabla número 19.

Tabla 19.

Pesos obtenidos mediante el método de Variación Estadística

w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6
0,123	0,163	0,025	0.074	0.186	0.429

Comparación y selección de valores de métodos de ponderación.

Al final de realizar los métodos de ponderación, se realiza una comparación de pesos obtenidos agrupados en la tabla número 20.

Tabla 20.

Comparación de Valores de Ponderación

Método:	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6
Entropía	0.008	0.061	0.098	0.024	0.172	0.637
Desviación Estándar	0.007	0.094	0.633	0.239	0.002	0.024
Variación Estadística	0.163	0.025	0.123	0.074	0.186	0.429

Debido a que el material buscado va a desempeñar principalmente la función de aislamiento eléctrico bajo cierta temperatura de trabajo, se toma como pesos a los valores del método de la Variación Estadística, ya que en este se encuentra el valor más alto correspondiente a w_1 y w_2 , los cuales pertenecen a los valores de la resistencia eléctrica y temperatura de trabajo respectivamente, estos valores serán usados en el desarrollo de los métodos de selección multicriterio y son mostrados en la tabla número 21.

Tabla 21.

Tabla de pesos a utilizar en MCDM (Variación Estadística)

w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6
0,163	0,025	0,123	0.074	0.186	0.429

Aplicación de Métodos Multicriterio MCDM:

A continuación, el desarrollo y aplicación de los métodos multicriterio.

Método VIKOR.

1. Construcción De la Matriz de Decisión.

En la tabla 22 se muestra la matriz de decisión en donde se agrupan los valores de los criterios y los materiales que se van a estudiar. Esta matriz es el punto de partida para todos los métodos multicriterio aplicados en esta investigación. De ella se deriva la matriz X , la cual agrupa los valores numéricos de mencionada matriz.

Tabla 22.

Datos para formar la Matriz de Decisión VIKOR

Materiales	Resistencia Dieléctrica V x m	Temperatura de trabajo °C	Precio \$ x Kg.	Coefficiente de expansión térmica $\times 10^{-6}K^{-1}$	Conductividad térmica $Wm^{-1}K^{-1}$	Módulo de elasticidad GPa
(M)	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)	(C6)
Polietileno AD	22	120	4	100	0.33	0.3

(M1)						
Polietileno	22	90	4	100	0.52	1.2
BD						
(M2)						
Poliestireno	20	95	4.25	70	0.17	1.65
(M3)						
PVC	14	75	4	75	0.25	4.0
(M4)						
Nylon	25	160	4	95	0.28	3.0
(M5)						
Teflón	25	160	4.5	90	0.24	0.8
(M6)						
Polipropileno	30	120	5	100	0.22	1.5
(M7)						

Matriz de Decisión VIKOR:

$$X = \begin{bmatrix} 22 & 120 & 4 & 100 & 0.33 & 0.3 \\ 22 & 90 & 4 & 100 & 0.52 & 1.2 \\ 20 & 95 & 4.25 & 70 & 0.17 & 1.65 \\ 14 & 75 & 4 & 75 & 0.25 & 4 \\ 25 & 160 & 4.5 & 95 & 0.28 & 3 \\ 25 & 160 & 4.5 & 90 & 0.24 & 0.8 \\ 30 & 120 & 5 & 100 & 0.22 & 1.5 \end{bmatrix}$$

2. Normalización de la Matriz de Decisión.

Para normalizar la matriz de decisión en el método VIKOR, se utiliza la ecuación número 13.

De lo cual se obtienen los valores r , con ellos se obtiene la matriz R_{ij} , la cual agrupa los valores normalizados y que se pueden observar ordenados en la matriz normalizada de la tabla número 23.

Matriz de decisión Normalizada VIKOR:

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} 0.36 & 0.37 & 0.34 & 0.41 & 0.40 & 0.053 \\ 0.36 & 0.28 & 0.34 & 0.41 & 0.64 & 0.21 \\ 0.32 & 0.29 & 0.37 & 0.29 & 0.21 & 0.29 \\ 0.22 & 0.23 & 0.34 & 0.31 & 0.30 & 0.70 \\ 0.41 & 0.49 & 0.39 & 0.39 & 0.34 & 0.52 \\ 0.41 & 0.49 & 0.39 & 0.37 & 0.29 & 0.14 \\ 0.49 & 0.37 & 0.43 & 0.41 & 0.27 & 0.26 \end{bmatrix}$$

Tabla 23.

Datos ordenados de la Matriz Normalizada VIKOR(Rij) con sus respectivos criterios y materiales

Código	C1	C2	C3	C4	C5	C6
M1	0.36	0.37	0.34	0.41	0.40	0.053
M2	0.36	0.28	0.34	0.41	0.64	0.21
M3	0.32	0.29	0.37	0.29	0.21	0.29
M4	0.22	0.23	0.34	0.31	0.30	0.70
M5	0.41	0.49	0.39	0.39	0.34	0.52
M6	0.41	0.49	0.39	0.37	0.29	0.14
M7	0.49	0.37	0.43	0.41	0.27	0.26

3. Construcción de la Matiz Estandarizada de Pesos.

Para ello se multiplican los pesos, por el valor ponderado ya normalizado, como se muestra en la ecuación número 14, de la cual se obtienen los valores agrupados en la matriz V_{ij} , mostrados en la tabla número 24.

Matriz estandarizada de pesos VIKOR:

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} 0.058 & 0.009 & 0.042 & 0.030 & 0.075 & 0.022 \\ 0.058 & 0.007 & 0.042 & 0.030 & 0.119 & 0.090 \\ 0.053 & 0.007 & 0.045 & 0.021 & 0.039 & 0.088 \\ 0.037 & 0.005 & 0.042 & 0.023 & 0.057 & 0.302 \\ 0.066 & 0.012 & 0.048 & 0.029 & 0.064 & 0.227 \\ 0.066 & 0.012 & 0.048 & 0.027 & 0.055 & 0.060 \\ 0.080 & 0.009 & 0.053 & 0.030 & 0.050 & 0.113 \end{bmatrix}$$

Tabla 24.

Datos ordenados de la Matiz Estandarizada de Pesos VIKOR

Código	C1	C2	C3	C4	C5	C6
M1	0.058	0.009	0.042	0.030	0.075	0.022
M2	0.058	0.007	0.042	0.030	0.119	0.090
M3	0.053	0.007	0.045	0.021	0.039	0.088
M4	0.037	0.005	0.042	0.023	0.057	0.302
M5	0.066	0.012	0.042	0.029	0.064	0.227
M6	0.066	0.012	0.042	0.027	0.055	0.060
M7	0.080	0.009	0.042	0.030	0.050	0.113

4. Cálculo de indicadores de resultados positivos y negativos de forma ideal.

Para ello aplicamos las siguientes ecuaciones 15 y 16, de donde se debe extraer los criterios f , de los cuales se debe tomar el valor mayor en los criterios C donde el valor más alto es el más importante y el mínimo donde el valor más importante es el menor, siendo así el precio el valor mínimo deseado.

$$A^* = \left\{ \max_i M_{ij} \mid j \in J, (\min_i M_{ij} \mid j \in J') \right\} = \{M_1^{max}, M_2^{max}, \dots, M_n^{max}\} \quad (15)$$

$$A^- = \left\{ \max_i M_{ij} \mid j \in J, (\min_i M_{ij} \mid j \in J') \right\} = \{M_1^{min}, M_2^{min}, \dots, M_n^{min}\} \quad (16)$$

Para C1 (mayor es mejor)

Para C2 (mayor es mejor)

Para C3 (menor es mejor)

Para C4 (mayor es mejor)

Para C5 (mayor es mejor)

Para C6 (mayor es mejor)

5. Cálculo de soluciones óptimas (U_i); (R_i).

Las soluciones óptimas son de dos clases dependiendo de su relevancia y covalencia, las cuales serán denominadas (U_i); (R_i), respectivamente, para calcular las primeras, se aplica la ecuación número 17, de donde se obtienen los valores agrupados en la matriz del mismo nombre y que servirán para el siguiente paso del método.

Para obtener los valores de R_i , se utiliza la ecuación número 18, de donde se obtiene los valores mostrados con los resultados U_i , en la tabla 25 .

Tabla 25.

Resultados intermedios VIKOR.

Soluciones óptimas U	Valor	Soluciones óptimas R	Valor	Numerales V_{ij}	Valor
U_1	0.623	R_1	0.429	$V1$	0.81
U_2	0.427	R_2	0.325	$V2$	0.58
U_3	0.741	R_3	0.329	$V3$	1.01
U_4	0.393	R_4	0.163	$V4$	0.27
U_5	0.368	R_5	0.128	$V5$	0.18
U_6	0.657	R_6	0.371	$V6$	0.79
U_7	0.584	R_7	0.290	$V7$	0.74
$U_i \text{ Max}=0.741$	$U_i \text{ Min}=0.368$	$R_i \text{ Min}=0.429$	$R_i \text{ Min}=0.128$	$\alpha =$	0.5

En el siguiente paso del método se deben calcular los valores denominados V_{ij} , para los cuales se utilizan los valores U y R respectivamente reemplazados en la ecuación número 19. Los valores V obtenidos son los valores finales del método y que son ubicados en el ranking de la tabla 25 y 26

6. Ranking

El ganador es el valor que más se aproxima a Cero, y la escala va de 1 a 7.

Tabla 26.

Ranking VIKOR

Alternativa	V_i	Ranking
M1	0.81	6
M2	0.58	3
M3	1.01	7
M4	0.27	2
M5	0.18	1
M6	0.79	5
M7	0.74	4

Método PUGH.

1. Construcción de la matriz de decisión.

Para ello se utiliza la matriz del método VIKOR representada en la tabla número 27.

Tabla 27.

Matriz de decisión PUGH

Materiales	Resistencia Dieléctrica V x m	Temperatura de trabajo °C	Precio \$ x Kg.	Coefficiente de expansión térmica $\times 10^{-6}K^{-1}$	Conductividad térmica $Wm^{-1}K^{-1}$	Módulo de elasticidad GPa
(M)	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)	(C6)
Polietileno AD (M1)	22	120	4	100	0.33	0.3
Polietileno BD (M2)	22	90	4	100	0.52	1.2
Poliestireno (M3)	20	95	4.25	70	0.17	1.65
PVC (M4)	14	75	4	75	0.25	4.0
Nylon (M5)	25	160	4	95	0.28	3.0
Teflón (M6)	25	160	4.5	90	0.24	0.8
Polipropileno (M7)	30	120	5	100	0.22	1.5

2. Matriz de Priorización de Pesos.

En esta matriz se compara los criterios de las opciones con los criterios originales.

A esta comparación se les asigna valores numéricos.

Donde:

Mejor que el original = 1

Igual al original = 0

Peor que el original = -1

Al final los valores de esta asignación se agrupan en una matriz representada en la tabla 28.

Tabla 28.

Matriz de ponderación de pesos primer paso PUGH

Criterios	Valor Original	W	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
C1	20	0.163	1	1	0	-1	1	1	1
C2	140	0.025	-1	-1	-1	-1	1	1	-1
C3	3	0.123	1	1	1	1	1	1	1

C4	250	0.074	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
C5	0.22	0.186	1	1	-1	1	1	1	0
C6	5.0	0.429	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

En el segundo paso en la obtención de la Matriz de ponderación de Pesos es aplicar la ecuación número 20, de lo cual se obtienen los valores agrupados en la matriz de ponderación de pesos de la tabla número 29.

Tabla 29.
Matriz de ponderación de pesos segundo paso PUGH

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
C1	0.163	0.163	0	-0.163	0.163	0.163	0.163
C2	-0.025	-0.025	-0.025	-0.025	0.025	0.025	-0.025
C3	0.123	0.123	0.123	0.123	0.123	0.123	0.123
C4	-0.074	-0.074	-0.074	-0.074	-0.074	-0.074	-0.074
C5	0.186	0.186	0.186	0.186	0.186	0.186	0
C6	-0.429	-0.429	-0.429	-0.429	-0.429	-0.429	-0.429

3. Sumatoria de valores.

En este paso se realiza una sumatoria de valores tal como lo describe la ecuación número 21, de donde se obtiene los valores *M*, los mismo que son agrupados en una tabla de ranking como se muestra en la tabla número 30.

Tabla 30.
Resultados intermedios PUGH

Materiales	Valor
M1	0.056
M2	0.056
M3	0.219
M4	0.382
M5	0.006
M6	0.006
M7	0.242

4. Ranking.

El valor más alto es que ocupa la posición 1

Tabla 31.
Ranking PUGH

Alternativa	Valores	Ranking
M1	-0.056	2
M2	-0.056	2
M3	-0.219	3
M4	-0.382	5
M5	-0.006	1
M6	-0.006	1
M7	-0.242	4

Método TOPSIS.

1. Construcción de la Matriz de Decisión.

Se emplea la misma matriz del método VIKOR

2. Normalización de la Matriz de Decisión.

Se emplea la misma matriz normalizada del método VIKOR.

3. Construcción de la Matriz Estandarizada de Pesos.

Se emplea la misma matriz estandarizada de pesos del método VIKOR.

4. Determinación de Soluciones Ideales.

Para ello se aplica la ecuación número 22, de donde se obtienen los valores de las soluciones ideales agrupadas en la matriz de la tabla 32.

Tabla 32.
Matriz soluciones ideales positivas y negativas TOPSIS

Solución Ideal Positiva	0.3091	3.2250	0.0849	1.4939	0.0245	0.9538
-------------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Solución Ideal Negativa	0.0514	2.3299	0.0255	0.8039	0.0093	0.3907
----------------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

5. Cálculo de diferencias entre mediciones

Para calcular estas diferencias se aplica las ecuaciones 23 y 24, donde se obtiene los valores S positivos y negativos respectivamente, agrupados en la matriz de la tabla número 33.

Tabla 33.

Resultados intermedios de distancias entre soluciones positivas y negativas ideales TOPSIS

Código	Distancia hacia Solución Positiva ideal	Distancia hacia Solución Negativa ideal	Proximidad Solución Ideal (C)
M1	3.621	0.044	0.01192
M2	3.605	0.108	0.02907
M3	3.613	0.067	0.01831
M4	3.581	0.281	0.07265
M5	3.567	0.208	0.05517
M6	3.605	0.052	0.01412
M7	3.579	0.102	0.02773

6. Cálculo de la proximidad a la solución ideal

Para ello se aplica la siguiente ecuación número 25, de ella se obtienen los valores C , los cuales son los valores obtenidos para cada material y se clasifican en el ranking construido en la tabla número 33.

Donde:

C_i^* = coeficiente de proximidad relativa

7. Ranking.

El valor de C_i^* más alto será el ganador.

Tabla 34.
Ranking TOPSIS

Código	Solución Ideal Positiva	Ranking
M1	0.01192	7
M2	0.02907	3
M3	0.01831	6
M4	0.07265	1
M5	0.05517	2
M6	0.01412	5
M7	0.02773	4

Método PROMETHEE II.

1. Construcción de la Matriz de Decisión.

Para ello se utiliza el mismo proceso del método VIKOR, como se muestra en la tabla número 35.

Tabla 35.
Matriz de decisión PROMETHEE II

Materiales (M)	Resistencia Dieléctrica V x m (C1)	Temperatura de trabajo °C (C2)	Precio \$ x Kg. (C3)	Coefficiente de expansión térmica $\times 10^{-6}K^{-1}$ (C4)	Conductividad térmica $Wm^{-1}K^{-1}$ (C5)	Módulo de elasticidad GPa (C6)
Polietileno AD (M1)	22	120	4	100	0.33	0.3
Polietileno BD (M2)	22	90	4	100	0.52	1.2
Poliestireno (M3)	20	95	4.25	70	0.17	1.65
PVC (M4)	14	75	4	75	0.25	4.0
Nylon (M5)	25	160	4	95	0.28	3.0
Teflón (M6)	25	160	4.5	90	0.24	0.8
Polipropileno (M7)	30	120	5	100	0.22	1.5

2. Normalización de la Matriz de Decisión.

Para ello se utiliza el mismo proceso del método VIKOR, como se muestra en la tabla número 36.

Tabla 36.

Matriz normalizada PROMETHEE II

Código	C1	C2	C3	C4	C5	C6
M1	0.36	0.37	0.34	0.41	0.40	0.053
M2	0.36	0.28	0.34	0.41	0.64	0.21
M3	0.32	0.29	0.37	0.29	0.21	0.29
M4	0.22	0.23	0.34	0.31	0.30	0.70
M5	0.41	0.49	0.39	0.39	0.34	0.52
M6	0.41	0.49	0.39	0.37	0.29	0.14
M7	0.49	0.37	0.43	0.41	0.27	0.26

3. Cálculo de Funciones de Diferencias para cada Criterio, Tipo Usual.

Paso 1. Se realiza la diferencia entre el valor de dos alternativas, matriz Ck, empezando por el primero y restando de sí mismo.

Paso 2. Se reemplazan los valores de las matrices de diferencias por código binario, siendo usado el 0 y el 1 según se determine en cada criterio.

$$C_k = \begin{bmatrix} Ch_1 - Ch_1 & Ch_1 - Ch_2 & Ch_1 - Ch_3 \dots \\ Ch_2 - Ch_1 & Ch_2 - Ch_2 & Ch_2 - Ch_3 \dots \\ Ch_3 - Ch_1 & Ch_3 - Ch_2 \dots & \\ Ch_4 - Ch_1 \dots & & \end{bmatrix}$$

Matriz de diferencia para el Criterio 1 (Ch).

$$Ch = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 8 & -3 & -3 & -8 \\ 0 & 0 & 2 & 8 & -3 & -3 & -8 \\ -2 & -2 & 0 & 6 & -5 & -5 & -10 \\ -8 & -8 & -6 & 0 & -9 & -9 & -16 \\ 3 & 3 & 5 & 9 & 0 & 0 & -5 \\ 3 & 3 & 5 & 9 & 0 & 0 & -5 \\ 8 & 8 & 10 & 16 & 5 & 5 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de Preferencia para el Criterio 1 (C1).

C1 es un criterio donde mayor es mejor.

Donde: Si $Ch \leq 0 = 0$; Si $Ch > 0 = 1$

$$C1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de diferencia para el Criterio 2 (Ci).

$$Ci = \begin{bmatrix} 0 & 30 & 25 & 45 & -40 & -40 & 0 \\ -30 & 0 & -5 & 15 & -70 & -70 & -30 \\ -25 & 5 & 0 & 20 & -65 & -65 & -25 \\ -45 & -15 & 20 & 0 & -85 & -85 & -45 \\ -40 & 70 & 65 & 85 & 0 & 0 & 40 \\ -40 & 370 & 65 & 85 & 0 & 0 & 40 \\ 0 & 30 & 25 & 45 & -40 & -40 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de Preferencia para el Criterio 2 (C2).

C2 es un criterio donde mayor es mejor.

Donde: Si $Ci \leq 0 = 0$; Si $Ci > 0 = 1$

$$C2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de diferencia para el Criterio 3 (Cj).

$$C_j = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0.25 & 0 & -0.5 & -0.5 & -1 \\ 0 & 0 & -0.25 & 0 & -0.5 & -0.5 & -1 \\ 0.25 & 0.25 & 0 & 0.25 & -0.25 & -0.25 & -0.75 \\ 0 & 0 & -0.25 & 0 & -0.5 & -0.5 & -1 \\ 0.5 & 0.5 & 0.25 & 0.5 & 0 & 0 & -0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.25 & 0.5 & 0 & 0 & -0.5 \\ 1 & 1 & 0.75 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de Preferencia para el Criterio 3 (C3).

C3 es un criterio donde menor es mejor.

Donde: Si $C_j \geq 0 = 0$; Si $C_j < 0 = 1$

$$C3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de diferencia para el Criterio 4 (Ck).

$$Ck = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 30 & 25 & 5 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 30 & 25 & 5 & 10 & 0 \\ -30 & -30 & 0 & -5 & -25 & -20 & -30 \\ -25 & -25 & 5 & 0 & -20 & -15 & -25 \\ -5 & -5 & 25 & 20 & 0 & 5 & -5 \\ -10 & -10 & 20 & 15 & -5 & 0 & -10 \\ 0 & 0 & 30 & 25 & 5 & 10 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de Preferencia para el Criterio 4 (C4).

C4 es un criterio donde mayor es mejor.

Donde: Si $C_i \leq 0 = 0$; Si $C_i > 0 = 1$

$$C4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de diferencia para el Criterio 5 (Cl).

$$C1 = \begin{bmatrix} 0 & -0.19 & 0.16 & 0.08 & 0.05 & 0.09 & 0.11 \\ 0.19 & 0 & 0.16 & 0.08 & 0.24 & 0.28 & 0.11 \\ -0.16 & -0.35 & 0 & -0.08 & -0.11 & -0.07 & -0.05 \\ -0.08 & -0.27 & 0.08 & 0 & -0.03 & 0.01 & 0.03 \\ -0.05 & -0.24 & 0.11 & 0.03 & 0 & 0.04 & 0.06 \\ -0.09 & -0.28 & 0.07 & -0.01 & -0.04 & 0 & 0.02 \\ -0.11 & -0.3 & 0.05 & -0.03 & -0.06 & -0.02 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de Preferencia para el Criterio 5 (C5).

C5 es un criterio donde mayor es mejor.

Donde: Si $C_i \leq 0 = 0$; Si $C_i > 0 = 1$

$$C5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de diferencia para el Criterio 6 (Cm).

$$Cm = \begin{bmatrix} 0 & -0.9 & -1.35 & -3.7 & -2.7 & -0.5 & -1.2 \\ 0.9 & 0 & -1.35 & -3.7 & -1.8 & 0.4 & -1.2 \\ 1.35 & 0.45 & 0 & -2.35 & -1.35 & 0.85 & 0.15 \\ 3.7 & 2.8 & 2.35 & 0 & 1 & 3.2 & 2.5 \\ 2.7 & 1.8 & 1.35 & -1 & 0 & 2.2 & 1.5 \\ 0.5 & -0.4 & -0.85 & -3.2 & -2.2 & 0 & -0.7 \\ 1.2 & 0.3 & -0.15 & -0.15 & -1.5 & 0.7 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de Preferencia para el Criterio 6 (C6).

C6 es un criterio donde mayor es mejor.

Donde: Si $C_i \leq 0 = 0$; Si $C_i > 0 = 1$

$$C6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

4. Cálculo de Índices de Preferencia Agregado.

Para ello se desarrolla la ecuación número 26, de lo cual se obtiene las matrices C1, C2, C3, C4, C5 y C6

Matriz de preferencia para el criterio 1

$$C1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.163 & 0.815 & 0.652 & 0.489 & 0.489 & 0.326 \\ 0.326 & 0 & 0.652 & 0.652 & 0.489 & 0.652 & 0.326 \\ 0.163 & 0.326 & 0 & 0.326 & 0.163 & 0.326 & 0.326 \\ 0.163 & 0.163 & 0.815 & 0 & 0.326 & 0.489 & 0.489 \\ 0.326 & 0.326 & 0.815 & 0.652 & 0 & 0.489 & 0.652 \\ 0.326 & 0.326 & 0.652 & 0.815 & 0 & 0 & 0.489 \\ 0.326 & 0.326 & 0.652 & 0.489 & 0.326 & 0.489 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de preferencia para el criterio 2

$$C2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.025 & 0.125 & 0.1 & 0.075 & 0.075 & 0.05 \\ 0.05 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0.075 & 0.1 & 0.05 \\ 0.025 & 0.05 & 0 & 0.05 & 0.025 & 0.05 & 0.05 \\ 0.025 & 0.025 & 0.125 & 0 & 0.05 & 0.075 & 0.075 \\ 0.05 & 0.05 & 0.125 & 0.1 & 0 & 0.075 & 0.1 \\ 0.05 & 0.05 & 0.1 & 0.125 & 0 & 0 & 0.075 \\ 0.05 & 0.05 & 0.1 & 0.075 & 0.05 & 0.075 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de preferencia para el criterio 3

$$C3 = \begin{bmatrix} 0 & 0.123 & 0.615 & 0.492 & 0.369 & 0.369 & 0.246 \\ 0.246 & 0 & 0.492 & 0.492 & 0.369 & 0.492 & 0.246 \\ 0.123 & 0.246 & 0 & 0.246 & 0.123 & 0.246 & 0.246 \\ 0.123 & 0.123 & 0.615 & 0 & 0.246 & 0.369 & 0.369 \\ 0.246 & 0.246 & 0.615 & 0.492 & 0 & 0.369 & 0.492 \\ 0.246 & 0.246 & 0.492 & 0.615 & 0 & 0 & 0.369 \\ 0.246 & 0.246 & 0.492 & 0.369 & 0.246 & 0.369 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de preferencia para el criterio 4

C4 =	0	0.074	0.37	0.296	0.222	0.222	0.148
	0.148	0	0.296	0.296	0.222	0.296	0.148
	0.074	0.148	0	0.148	0.074	0.148	0.148
	0.074	0.074	0.37	0	0.148	0.222	0.222
	0.148	0.148	0.37	0.296	0	0.222	0.296
	0.148	0.148	0.296	0.37	0	0	0.222
	0.148	0.148	0.296	0.222	0.148	0.222	0

Matriz de preferencia para el criterio 5

C5 =	0	0.186	0.93	0.744	0.558	0.558	0.372
	0.372	0	0.744	0.744	0.558	0.744	0.372
	0.186	0.372	0	0.372	0.186	0.372	0.372
	0.186	0.186	0.93	0	0.372	0.558	0.558
	0.372	0.372	0.93	0.744	0	0.558	0.744
	0.372	0.372	0.744	0.93	0	0	0.558
	0.372	0.372	0.744	0.558	0.372	0.558	0

Matriz de preferencia para el criterio 6

C6 =	0	0.429	2.145	1.716	1.287	1.287	0.858
	0.858	0	1.716	1.716	1.287	1.716	0.858
	0.429	0.858	0	0.858	0.429	0.858	0.858
	0.429	0.429	2.145	0	0.858	1.287	1.287
	0.858	0.858	2.145	1.716	0	1.287	1.716
	0.858	0.858	1.716	2.145	0	0	1.287
	0.858	0.858	1.716	1.287	0.858	1.287	0

5. Determinar Flujos de Superación Positivos y Negativos

Para determinar los flujos positivos se utiliza la ecuación número 27 y para los negativos la ecuación número 28, de ello se obtienen los valores agrupados en las tablas número 32, 33, 34, 35, 36 y 37 respectivamente.

Tabla 37.

Tabla de flujos para el criterio 1 PROMETHEE II

Código	ϕ^+	ϕ^-
M1	0.489	0.271667
M2	0.516167	0.271667
M3	0.271667	0.7335
M4	0.4075	0.597667
M5	0.543333	0.298833
M6	0.434667	0.489
M7	0.434667	0.434667

Tabla 38.

Tabla de flujos para el criterio 2 PROMETHEE II

Código	ϕ^+	ϕ^-
M1	0.075	0.041667
M2	0.079167	0.041667
M3	0.041667	0.1125
M4	0.0625	0.091667
M5	0.083333	0.045833
M6	0.066667	0.075
M7	0.066667	0.066667

Tabla 39.

Tabla de flujos para el criterio 3 PROMETHEE II

Código	ϕ^+	ϕ^-
M1	0.369	0.205
M2	0.3895	0.205
M3	0.205	0.5535
M4	0.3075	0.451
M5	0.41	0.2255
M6	0.328	0.369
M7	0.328	0.328

Tabla 40.

Tabla de flujos para el criterio 4 PROMTSEE II

Código	ϕ^+	ϕ^-
M1	0.222	0.123333
M2	0.234333	0.123333
M3	0.123333	0.333
M4	0.185	0.271333
M5	0.246667	0.135667
M6	0.197333	0.222
M7	0.197333	0.197333

Tabla 41.

Tabla de flujos criterio 5 PROMTSEE II

Código	ϕ^+	ϕ^-
M1	0.558	0.31
M2	0.589	0.31
M3	0.31	0.837
M4	0.465	0.682
M5	0.62	0.341
M6	0.496	0.558
M7	0.496	0.496

Tabla 42.

Tabla de flujos criterio 6. PROMTSEE II

Código	ϕ^+	ϕ^-
M1	1.287	0.715
M2	1.3585	0.715
M3	0.715	1.9305
M4	1.0725	1.573
M5	1.43	0.7865
M6	1.144	1.287
M7	1.144	1.144

6. Determinar Flujo Neto de Superación.

Para determinar los flujos netos de superación positivos se utiliza la ecuación número 29 y para los negativos la ecuación número 30, de ello se obtienen los valores agrupados en

al tabal número 43. Luego de los cual, se obtienen los valores finales del método agrupados en la tabla de ranking número 44.

Tabla 43.

Resultados intermedios Matriz Flujo Neto de Superación PROMETHEE II

Código	ϕ^{C1}	ϕ^{C2}	ϕ^{C3}	ϕ^{C4}	ϕ^{C5}	ϕ^{C6}
M1	0.21733333	0.03333333	0.164	0.09866667	0.248	0.572
M2	0.2445	0.0375	0.1845	0.111	0.279	0.6435
M3	-0.46183333	-0.07083333	-0.3485	-0.20966667	-0.527	-1.2155
M4	-0.19016667	-0.02916667	-0.1435	-0.08633333	-0.217	-0.5005
M5	0.2445	0.0375	0.1845	0.111	0.279	0.6435
M6	-0.05433333	-0.00833333	-0.041	-0.02466667	-0.062	-0.143
M7	0	0	0	0	0	0

7. Ranking.

Donde mayor es mejor.

Tabla 44.

Ranking PROMETHEE II

Código	Flujo Neto Total	Ranking
M1	1.333333	2
M2	1.5	1
M3	-2.833333	6
M4	-1.16667	5
M5	1.5	1
M6	-0.333333	4
M7	0	3

Método DOMINIC.

1. Construcción de la Matriz de Decisión.

Para ello se emplea el mismo modelo de la matriz del método VIKOR, mostrada en a la tabla número 45.

Tabla 45.

Matriz de decisión DOMINIC

Materiales	Resistencia Dieléctrica V x m	Temperatura de trabajo °C	Precio \$ x Kg.	Coefficiente de expansión térmica $\times 10^{-6}K^{-1}$	Conductividad térmica $Wm^{-1}K^{-1}$	Módulo de elasticidad GPa
(M)	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)	(C6)
Polietileno AD (M1)	22	120	4	100	0.33	0.3
Polietileno BD (M2)	22	90	4	100	0.52	1.2
Poliestireno (M3)	20	95	4.25	70	0.17	1.65
PVC (M4)	14	75	4	75	0.25	4.0
Nylon (M5)	25	160	4	95	0.28	3.0
Teflón (M6)	25	160	4.5	90	0.24	0.8
Polipropileno (M7)	30	120	5	100	0.22	1.5

2. Construcción de la Matriz de Ponderación.

En este paso del método se construye una matriz en la que se otorga grados de prioridad a los criterios. Para ello se utilizan palabras las cuales obedecen a un rango otorgado de la siguiente manera:

EXCELENTE = 10

BUENO = 7

RAZONABLE = 5

POBRE = 1

Como se pueden observar los valores agrupados en la matriz de la tabla número 46.

Tabla 46.

Matriz de ponderación DOMINIC

	Prioridad	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
C1	Alta	Razonable	Razonable	Razonable	Bueno	Excelente	Excelente	Excelente
C2	Alta	Razonable	Razonable	Pobre	Pobre	Excelente	Excelente	Bueno
C3	Moderada	Excelente	Excelente	Bueno	Excelente	Bueno	Bueno	Pobre
C4	Alta	Excelente						
C5	Alta	Excelente	Excelente	Razonable	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
C6	Moderada	Pobre	Razonable	Bueno	Pobre	Excelente	Razonable	Bueno

En el segundo paso reemplazamos las palabras por los valores correspondientes, como se puede observar en la matriz de la tabla número 47.

Tabla 47.

Matriz de ponderación numérica DOMINIC

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
C1	5	5	5	7	10	10	10
C2	5	5	1	1	10	10	7
C3	10	10	7	10	7	7	1
C4	10	10	10	10	10	10	10
C5	10	10	5	10	10	10	10
C6	1	5	7	1	10	5	7

3. Normalización de la Matriz de Ponderación.

Para ello empleamos la ecuación número 31, de la cual obtenemos los valores agrupados en la matriz de la tabla número 48.

Tabla 48.

Matriz de ponderación normalizada DOMINIC

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
C1	0.815	0.815	0.815	1.141	1.63	1.63	1.63
C2	0.125	0.125	0.025	0.025	0.25	0.25	0.175
C3	1.23	1.23	0.861	1.23	0.861	0.615	0.123
C4	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74
C5	1.86	1.86	0.93	1.86	1.86	1.86	1.86
C6	0.429	2.145	3.003	0.429	4.29	2.145	3.003

4. Cálculo de valores finales.

Para este paso empleamos la ecuación número 32, de donde se obtienen los valores V_i , los mismos que corresponde al valor final del método DOMINIC y se ven agrupados en la tabla número 49.

Tabla 49.
Resultados intermedios DOMINIC

Material	Valores
V1	5.199
V2	6.915
V3	6.374
V4	5.452
V5	9.631
V6	7.486
V7	7.531

5. Ranking.

Donde: Mayor es mejor.

Tabla 50.
Ranking DOMINIC

Código	Valores	Ranking
M1	5.199	7
M2	6.915	4
M3	6.374	5
M4	5.425	6
M5	9.631	1
M6	7.486	3
M7	7.531	2

Método COPRAS.

1. Construcción de la Matriz de Decisión.

Para ello se ha utilizado el mismo proceso del método VIKOR y se puede observar en la tabla número 51.

Tabla 51.

Matriz de decisión método COPRAS

Materiales	Resistencia Dieléctrica V x m	Temperatura de trabajo °C	Precio \$ x Kg.	Coefficiente de expansión térmica $\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$	Conductividad térmica $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	Módulo de elasticidad GPa
(M)	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)	(C6)
Polietileno AD (M1)	22	120	4	100	0.33	0.3
Polietileno BD (M2)	22	90	4	100	0.52	1.2
Poliestireno (M3)	20	95	4.25	70	0.17	1.65
PVC (M4)	14	75	4	75	0.25	4.0
Nylon (M5)	25	160	4	95	0.28	3.0
Teflón (M6)	25	160	4.5	90	0.24	0.8
Polipropileno (M7)	30	120	5	100	0.22	1.5

2. Cálculo de la Matriz de Decisión Normalizada.

Para ello aplicamos la siguiente ecuación número 33, de la cual se obtienen la matriz denominada R_{ij} , y sus valores se pueden observar agrupados en la tabla número 52.

Matriz de decisión normalizada COPRAS:

R _{ij} =	0.13924051	0.14634146	0.1322314	0.15873016	0.1641791	0.02409639
	0.13924051	0.1097561	0.1322314	0.15873016	0.25870647	0.09638554
	0.12658228	0.11585366	0.14049587	0.11111111	0.08457711	0.13253012
	0.08860759	0.09146341	0.1322314	0.11904762	0.12437811	0.32128514
	0.15822785	0.19512195	0.14876033	0.15079365	0.13930348	0.24096386
	0.15822785	0.19512195	0.14876033	0.14285714	0.11940299	0.06425703

| 0.18987342 0.14634146 0.16528926 0.15873016 0.10945274 0.12048193 |

Tabla 52.
Matriz de decisión Normalizada COPRAS

Código	C1	C2	C3	C4	C5	C6
M1	0.13924051	0.14634146	0.1322314	0.15873016	0.1641791	0.02409639
M2	0.13924051	0.1097561	0.1322314	0.15873016	0.25870647	0.09638554
M3	0.12658228	0.11585366	0.14049587	0.11111111	0.08457711	0.13253012
M4	0.08860759	0.09146341	0.1322314	0.11904762	0.12437811	0.32128514
M5	0.15822785	0.19512195	0.14876033	0.15079365	0.13930348	0.24096386
M6	0.15822785	0.19512195	0.14876033	0.14285714	0.11940299	0.06425703
M7	0.18987342	0.14634146	0.16528926	0.15873016	0.10945274	0.12048193

3. Cálculo de la Matriz Estandarizada de Pesos.

Para ello utilizamos la ecuación número 34, resultando en la matriz V_{ij} , la cual ofrece los valores agrupados en la matriz de pesos estandarizados de la tabla 53.

Matriz estandarizada de pesos COPRAS:

$V_{ij} =$

0.0226962	0.00365854	0.01626446	0.01174603	0.03053731	0.01033735
0.0226962	0.0027439	0.01626446	0.01174603	0.0481194	0.0413494
0.02063291	0.00289634	0.01728099	0.00822222	0.01573134	0.05685542
0.01444304	0.00228659	0.00177649	0.00880952	0.02313433	0.13783133
0.02579114	0.00487805	0.00317231	0.01115873	0.02591045	0.10337349
0.02579114	0.00487805	0.01829752	0.01057143	0.02220896	0.02756627
0.03094937	0.00365854	0.02033058	0.01174603	0.02035821	0.05168675

Tabla 53.
Matriz Estandarizada de Pesos COPRAS

Código	C1	C2	C3	C4	C5	C6
M1	0.0226962	0.00365854	0.01626446	0.01174603	0.03053731	0.01033735
M2	0.0226962	0.0027439	0.01626446	0.01174603	0.0481194	0.0413494
M3	0.02063291	0.00289634	0.01728099	0.00822222	0.01573134	0.05685542
M4	0.01444304	0.00228659	0.00177649	0.00880952	0.02313433	0.13783133
M5	0.02579114	0.00487805	0.00317231	0.01115873	0.02591045	0.10337349
M6	0.02579114	0.00487805	0.01829752	0.01057143	0.02220896	0.02756627
	0.03094937	0.00365854	0.02033058	0.01174603	0.02035821	0.05168675

4. Cálculo de pesos Normalizados.

Para ello empleamos las ecuaciones 35 y 36, de lo cual se obtiene los pesos normalizados positivos y los pesos normalizados negativos respectivamente, agrupados en la tabla 54.

Tabla 54.
Pesos normalizados positivos y negativos

Código	S+	S-
M1	0.0952399	0.01626446
M2	0.1429194	0.01626446
M3	0.12161923	0.01728099
M4	0.18828129	0.00177649
M5	0.17428417	0.00317231
M6	0.10931336	0.01829752
M7	0.13872947	0.02033058

5. Cálculo de prioridades relativas.

Para ello se desarrolla la ecuación 37, de ella se obtienen los valores agrupados en la tabla 55.

$$\sum_{j=1}^m \frac{1}{s_{-i}} = 1162.80802$$

Tabla 55.
Resultados intermedios - Prioridades Relativas

	Qi
Q1	0.100177746
Q2	0.14785725
Q3	0.12626662
Q4	0.23348915
Q5	0.199600569
Q6	0.113702557
Q7	0.142679749
Max: Qi	0.23348915

6. Cálculo del Rendimiento por Niveles

Para ello empleamos la ecuación 38, de donde se obtiene el rendimiento en porcentaje y con ello se puede dar un valor en el ranking mostrado en la tabla número 56.

7. Ranking

Donde mayor es mejor.

Tabla 56.

Ranking Método COPRAS

Código	Valores	Ranking
M1	42.9046686	7
M2	63.3251051	3
M3	54.0781529	5
M4	100	1
M5	85.4860147	2
M6	48.6971481	6
M7	61.1076572	4

Desarrollo de la Simulación.

Los pasos a seguir para realizar la simulación son:

1. Insertar la geometría 3D del SPB en el software.
2. Asignar material.
3. Realizar el mallado.
4. Ingresar las condiciones de borde.
5. Resolver.

Se ha utilizado un computador con las características mostradas en la figura 52 de los anexos.

Modelado CAD.

El primer paso para realizar el proceso de simulación, es definir la geometría del elemento que se va a analizar. En este estudio se busca sugerir un material alternativo con el que se pueda fabricar aislantes SPB, de este modo al momento de aplicar el material, la geometría varía dependiendo de la marca del motor en que va a funcionar. Sin embargo, para este estudio se ha tomado arbitrariamente la geometría del aislante SPB de un motor Suzuki G16B incorporado en un vehículo Grand Vitara, los planos se muestran a continuación:

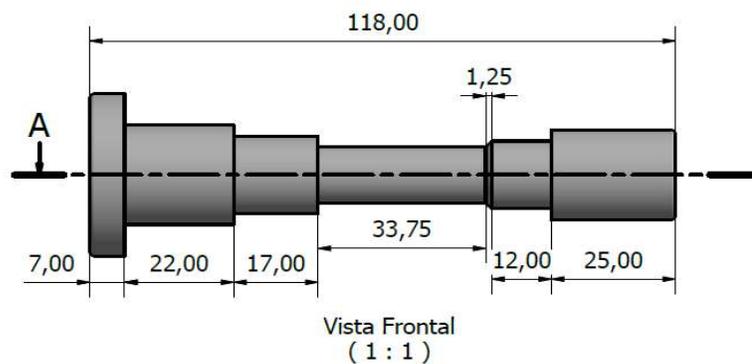


Figura 16. Plano de SPB Vista Frontal.

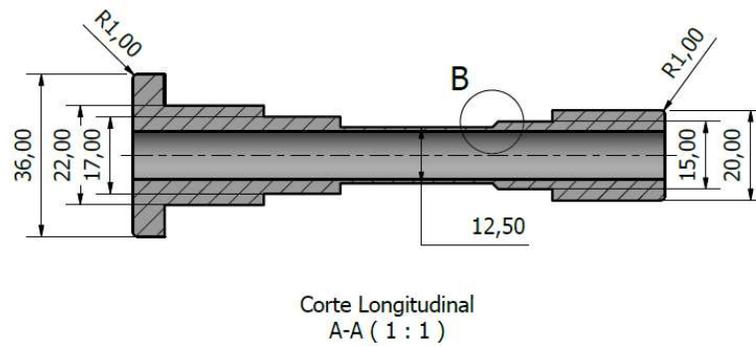


Figura 17. Plano de SPB Vista Longitudinal

Simulación Térmica.

Para ello es necesario cargar el entorno de Simulación Térmico, señalando el tipo de análisis térmico este entorno es conocido como Fem y Sim, los cuales son los lugares virtuales donde se llevará a cabo la simulación, en el software NX y cargar el modelo CAD del SPB., como se muestra en la figura 18.

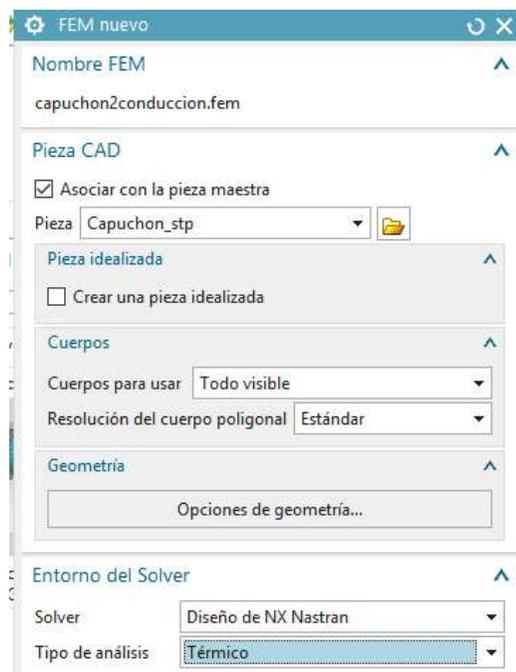


Figura 18. Cargando el entorno de Simulación Térmica en NX

El siguiente paso es cargar el tipo de material, al seleccionar el material se cargan todas las características, mismas que constan en la biblioteca del software., como se muestra en la figura 19.

Lista de materiales

Nombre	Usado	Categoría	Tipo
Iron_Nodular		METAL	Isótropo
Isobutane_(R600a)_Gas		OTHER	Fluido
Isobutane_(R600a)_Liq		OTHER	Fluido
Lead_Liquid		OTHER	Fluido
Magnesium_Cast		METAL	Isótropo
Mercury_Liquid		OTHER	Fluido
Methane_CH4_Gas		OTHER	Fluido
Methanol_CH3(OH)		OTHER	Fluido
Nak(22-78)_Liquid		OTHER	Fluido
Nak(45-55)_Liquid		OTHER	Fluido
Nitrogen_Gas_N2		OTHER	Fluido
Nylon		PLASTIC	Isótropo

Figura 19. Lista de Materiales NX

El siguiente paso es crear en el modelo CAD 3D del SPB, un mallado de elementos finitos, el cual debe ser de tipo tetraédrico debido a la geometría del aislante, el tamaño de la malla es calculado por el software, mismo que lo ha definido en 5.82mm. por elemento, como se muestra en la figura 20.

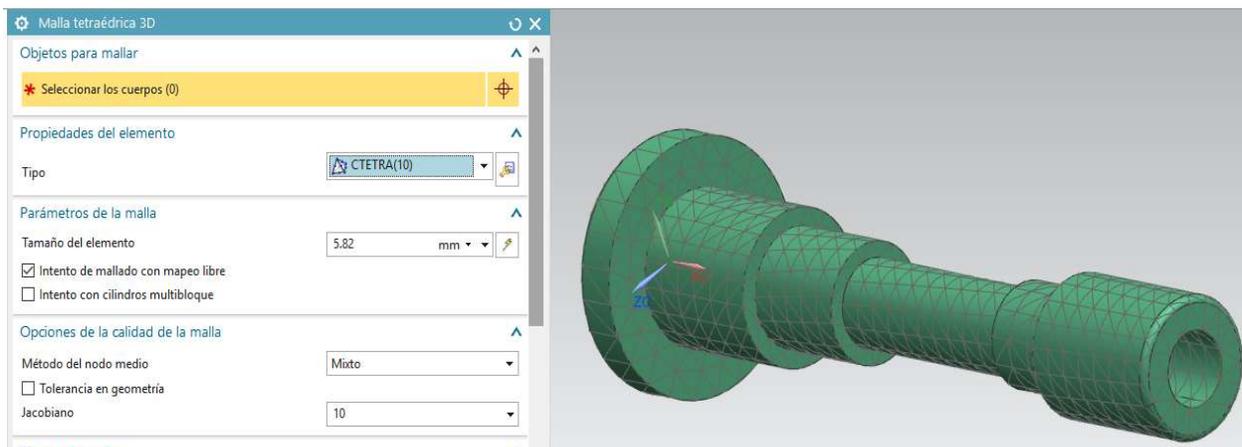


Figura 20. Mallado Tetraédrico de SPB

El siguiente paso es asignar la carga térmica W , para lo cual utilizamos las siguientes ecuaciones:

$$Q = m \cdot C_e \cdot (T_f - T_i) \quad (40)$$

$$m = d \cdot v \quad (41)$$

$$W = e/t \quad (42)$$

Donde:

Q = Cantidad de energía requerida

m = Masa del objeto = 0.04 Kg.

C_e = Calor específico = $1670 \text{ Jk}^{-1}\text{kg}^{-1}$

T_f = Temperatura final = 100°C

T_i = Temperatura inicial = 25°C

d = Densidad del material = 1.14 g/cm^3

v = Volumen de la pieza = 36 cm^3

W = Carga = 8.35 W

e = Energía = 5010 J

t = Tiempo = 600 Sec.

Aplicamos la ecuación 40 para hallar la masa, luego la ecuación 39 para hallar la cantidad de energía y con ella la potencia requerida aplicando la ecuación 41. Ingresamos el valor de carga de calor como se muestra en la figura 21.

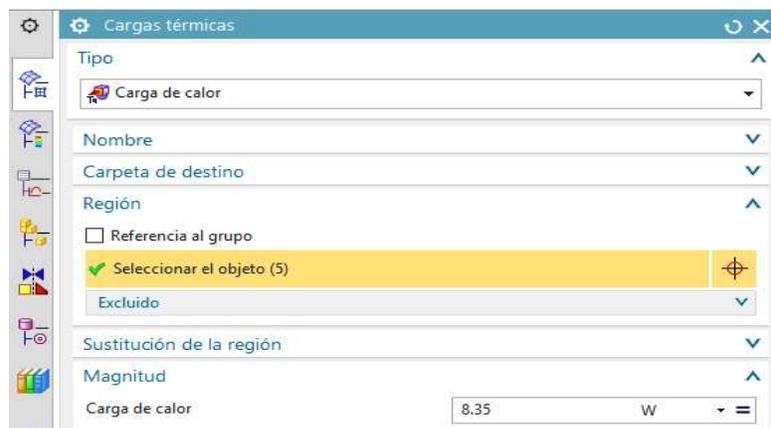


Figura 21. Asignando carga térmica al SPB

El siguiente paso es asignar restricciones térmicas, para lo cual es necesario conocer el coeficiente de conductividad térmica de cada material, como se muestra en la figura 22.

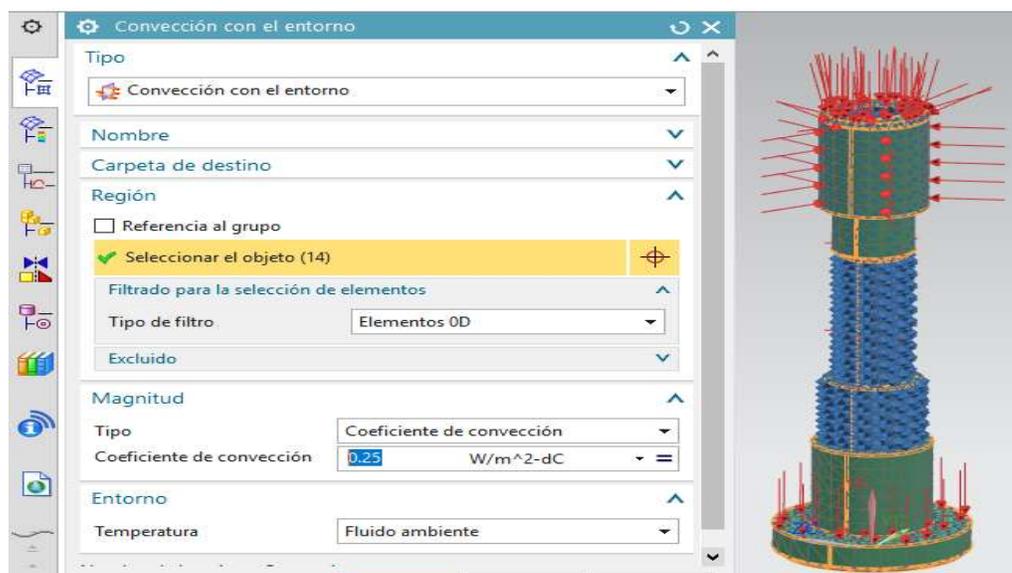


Figura 22. Aplicación de restricciones térmica.

Condiciones de borde para la simulación.

Las condiciones de borde, son el conjunto de cargas y restricciones que se manejan en forma de datos para ingresar en el software, manteniéndose las mismas para todas las simulaciones con excepción del material y del coeficiente de convección. Mencionados datos se muestran en la tabla 48.

Tabla 57.

Condiciones de borde para la simulación

Material	Carga (W)	Temperatura °C	Coeficiente de conductividad térmica a 23 °C ($V m^{-1} K^{-1}$)	Tiempo de exposición térmica De 0 sec. A 600 Sec.	Tiempo informático por simulación (Min.)
Polietileno BD	30	160	0.3	Si	10
Polietileno AD	30	160	1.2	Si	12
Poliestireno	30	160	1.65	Si	14
PVC	30	160	4.0	Si	15
Nylon	30	160	3.0	Si	20
Teflón	30	160	0.8	Si	17
Polipropileno	30	160	1.5	Si	21

Las características técnicas de la computadora utilizada se encuentran en el anexo 51.

Se ha tomado un mismo valor de carga para todos los materiales ya que la diferencia de carga resultante de ellos es muy pequeña para ser visible en la simulación. Además, se ha utilizado un valor con un factor de seguridad aproximado de 3. La temperatura se ha fijado en 160 grados centígrados para todos los materiales para obtener un factor de seguridad aproximado de 1,5 en este sentido.

Para facilitar el análisis de los resultados se ha dividido a la pieza en 6 cuadrantes como se muestran en la figura 23, en donde los cuadrantes poseen nombres numéricos dependiendo de su ubicación, siendo el cuadrante 1, el cuadrante ubicado en la parte superior y 6, el cuadrante ubicado en la parte inferior.

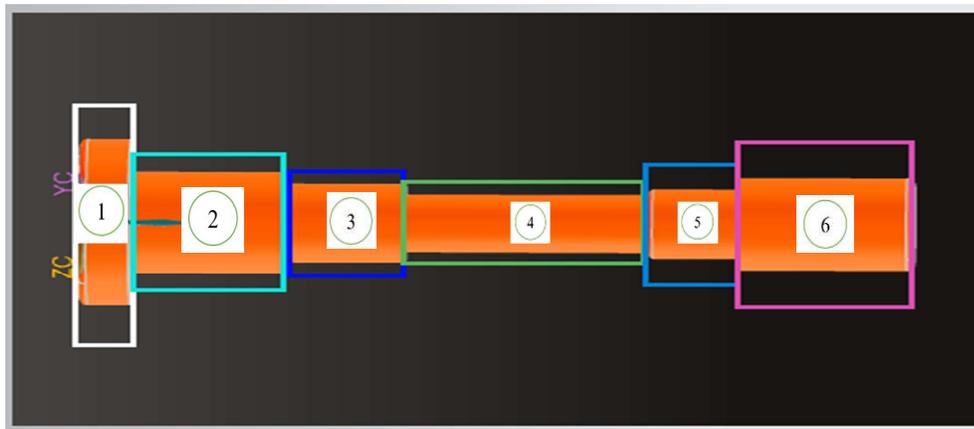


Figura 23. SPB dividido en 6 cuadrantes

Con el objeto de poder apreciar los cambios que sufre el material en función del tiempo, se van a juntar 6 imágenes correspondientes a simulaciones realizadas en distintas fases de

tiempo, siendo cada una a 120 segundos de diferencia, con un total de 10 minutos, tiempo en el cual el motor alcanza la temperatura de trabajo, misma que es constante a partir de ese momento.

(A)0 s.	(B)120 s.	(C)240 s.
(D)360 s.	(E)480 s.	(F)600 s.

Figura 24. Ejemplo de ubicación de simulaciones en función del tiempo, en las figuras de resultados

Desarrollo de la Experimentación.

El proceso de experimentación trata de probar las características térmicas de un prototipo de SPB construido con el material ganador, llevadas hasta valores extremos, más allá de los que posee el material.

Para ello se debió fabricar un SPB con nylon, el cual ha sido el material ganador, para ello se ha usado la misma geometría de la simulación, siendo esta la de un SPB de un Motor G16B de Suzuki, montado en los vehículos Grand Vitara modelo 2011, los cuales son unos de los que más presentan problemas de aislamiento eléctrico en el SPB. El método de construcción ha sido por mecanizado manual, y el producto se puede visualizar en la figura

El proceso experimental Termogravimétrico, se llevó a cabo en el laboratorio del Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros CIAP, de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador EPN, en la ciudad de Quito el 29 de diciembre del 2018, con la orden de trabajo número DC-OT0103-2018, bajo la siguiente identificación de la muestra y servicio:

Tabla 58.

Identificación de Muestra y Servicio Termogravimétrico EPN

Nro. Muestra	ID Muestra	Descripción de muestra	Servicio/Analito	Laboratorio
2	DC-MU4751	SPB Aislante de Bobina	TGA	CIAP

Identificación de origen de la muestra “SPB Aislante de Bobina”

1. Análisis termogravimétrico (TGA)

Metodología:

Se procedió de acuerdo con lo estipulado en la norma ASTM D3850-12 “Rapid Thermal Degradation of Solid Electrical Insulating Materials By Thermogravimetric Methods (TGA)”

Equipos:

- Termobalanza

Condiciones de ensayo:

Tabla 59.
Condiciones del Ensayo

Factores	Características/Valores
Laboratorio:	CIAP/EPN
Norma:	ASTM D3850-12
Equipo:	Termobalanza
Velocidad de calentamiento:	10°C/min
Gas:	Nitrógeno
Flujo de gas:	50 ml/min
Crisol:	Platino

Resultados.

Resultados Métodos de ponderación.

Los resultados obtenidos luego de la aplicación de los métodos de ponderación a los criterios estudiados en esta selección de materiales son los mostrados en la tabla 60 y evaluados gráficamente en la figura 25.

Tabla 60.
Resultados de métodos de ponderación de pesos.

Método:	w 1	w 2	w 3	w 4	w 5	w 6
Entropía	0.008	0.061	0.098	0.024	0.172	0.637
Desviación Estándar	0.007	0.094	0.633	0.239	0.002	0.024
Variación Estadística	0.163	0.025	0.123	0.074	0.186	0.429

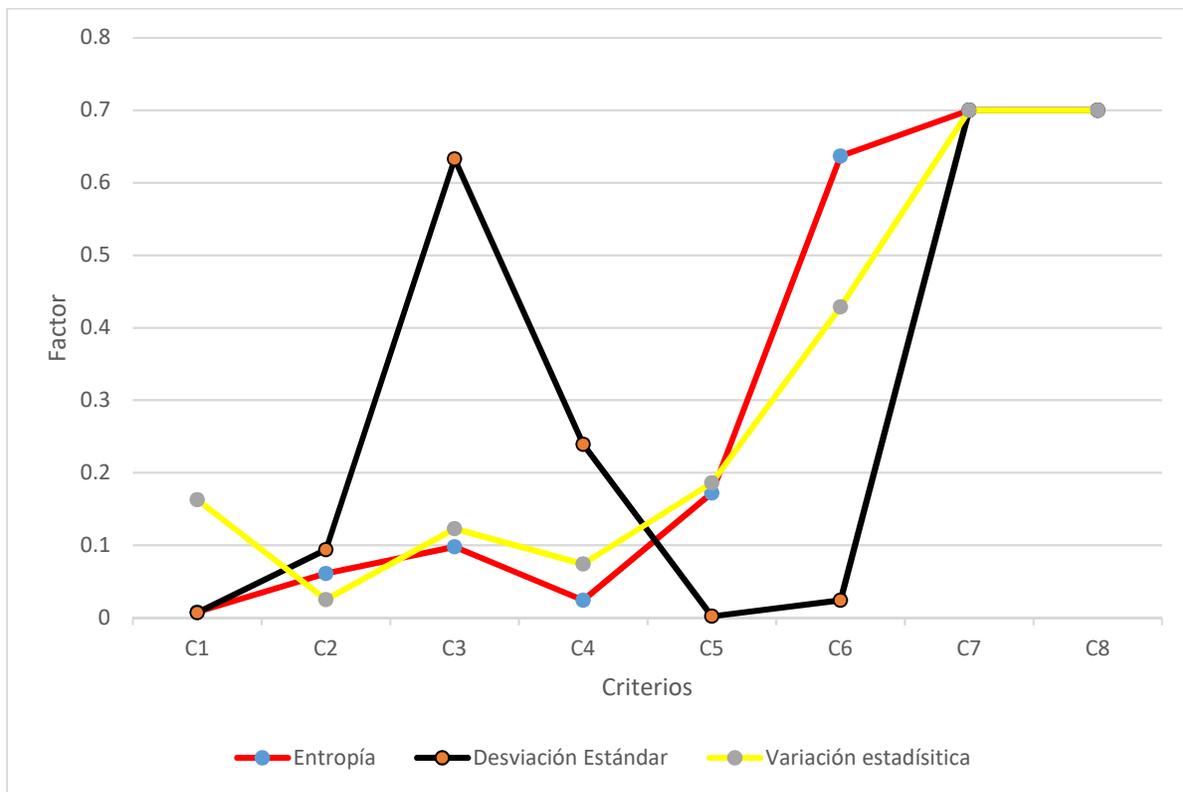


Figura 25. Comparación de métodos de ponderación

En la figura 25 se observa que, en el criterio de resistencia dieléctrica (C/w_1) el valor más alto lo ha otorgado el método de la Variación Estadística, con un valor de 1.63. Luego de ello, en el criterio de temperatura de trabajo (w_2) fue el valor más alto en el método de la Desviación Estándar, con un valor de 0.094. Para el criterio del precio (w_3), vuelve a ser el método de la Desviación Estándar quien asigna el valor más alto, con un valor de 0.633. En el criterio de coeficiente de expansión térmica (w_4), el más alto valor lo tiene la Desviación Estándar, con un valor de 0.239. Para el criterio de conductividad térmica (w_5), lo tiene la Variación estadística, con un valor de 0.186. El criterio de módulo de elasticidad (w_6), más alto lo posee la Entropía con un valor de 0.429. Los criterios químicos poseen valores gramaticales, los cuales son coincidentes en la resistencia de hidrocarburos (w_7) y en resistencia a grasas y lubricantes (w_8), de este modo, al ser de igual valor en todos los materiales forman una recta que se ve en la figura número 25, donde se unen los puntos C7 y C8.

De este modo, al buscar un material para fabricar aislantes eléctricos, se escogió el valor de la Variación Estadística ya que es el método que posee el valor más alto en el criterio w_1 , el cual es el criterio de Resistencia Dieléctrica, con un valor de 0.163, el cual es varias veces mayor que sus contendores.

Los valores de los pesos alcanzados con este método de ponderación, son los valores que se utilizaron a lo largo de toda la investigación.

Resultados Métodos Multicriterio MCDM:

Resultados Método VIKOR.

Tabla 61.
Resultados Método VIKOR

Alternativa	Ranking
Polietileno BD	6
Polietileno AD	3
Poliestireno	7
PVC	2
Nylon	1
Teflón	4
Polipropileno	5

En la tabla 61 y figura 26 se muestra el ranking alcanzado por los materiales seleccionados luego de la aplicación del método VIKOR, donde se observa que en la posición número uno como ganador al Nylon y al PVC en segunda posición. La razón por la cual el método VIKOR otorga estas posiciones a estos materiales, radica en que, este método utiliza una secuencia de tareas matemáticas difusas, que otorgan un grado de preferencia a los materiales que poseen las cualidades más cercanas a la solución ideal. Es decir, si revisamos los criterios en las tablas número 10 y número 12 respectivamente, podemos observar que el Nylon y el PVC son los materiales que poseen los valores más cercanos a los valores ideales, en los criterios C2, C3, C4, C5 y C6, razón por la cual el método VIKOR otorga las primeras posiciones a estos materiales en particular.

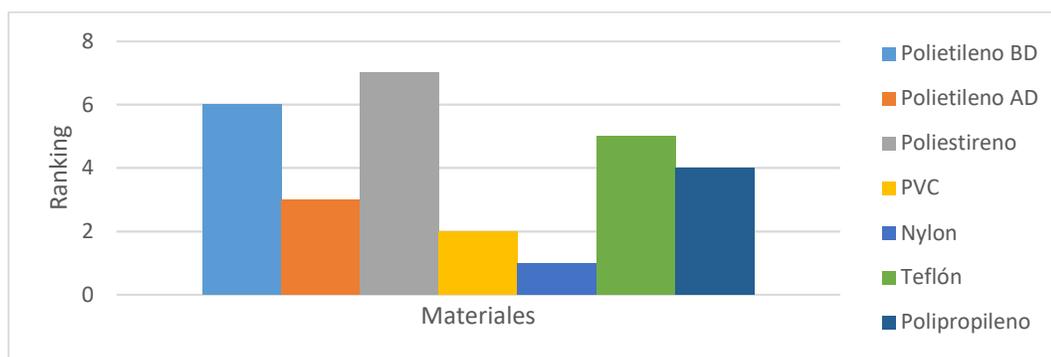


Figura 26. Ranking Método VIKOR

Resultados Método PUGH.

Tabla 62.

Resultados Método PUGH

Alternativa	Ranking
Polietileno BD	2
Polietileno AD	2
Poliestireno	3
PVC	5
Nylon	1
Teflón	1
Polipropileno	4

En la tabla 62 y figura 27 se muestra el ranking alcanzado por los materiales seleccionados luego de la aplicación del método PUGH, donde se observa que en la posición número uno, se ubican como ganadores el Nylon y el Teflón. El método PUGH otorga estas posiciones a estos materiales debido a que, es un método que compara directamente los valores de los criterios de las alternativas con los valores de los criterios del material original, para con ello, obtener datos numéricos y con estos datos, realizar un sistema de eliminación simple. Es decir, da mayor preferencia los materiales que tienen criterios con valores más altos que el original, en este sentido ganan el Nylon y el Teflón ya que son los materiales que poseen valores más altos en casi todos los criterios, a excepción del C6.

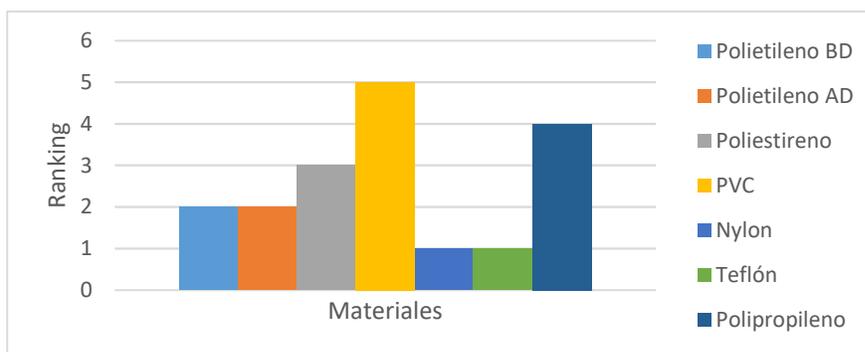


Figura 27. Ranking Método PUGH

Resultados Método TOPSIS.

Tabla 63.

Resultados Método TOPSIS

Alternativa	Ranking
Polietileno BD	7
Polietileno AD	3
Poliestireno	6
PVC	1
Nylon	2
Teflón	5
Polipropileno	4

En la tabla 63 y figura 28 se muestra el ranking alcanzado por los materiales seleccionados luego de la aplicación del método TOPSIS, donde se observa que en la posición número uno como ganador se ubica el PVC y en segundo lugar el Nylon. Como se puede observar los resultados son muy similares a los del método VIKOR, lo cual no es una coincidencia, ya que ambos métodos aplican las matemáticas difusas, sin embargo hay variación de posición en el resultado final, y esto se explica, ya que el método TOPSIS es capaz de analizar la eficiencia de cada alternativa, en este sentido, la eficiencia del PVC se ve elevada ya que posee un precio menor y un módulo de elasticidad mayor, en comparación con el Nylon, como se observa respectivamente en el criterio C3 de la tabla 12 .

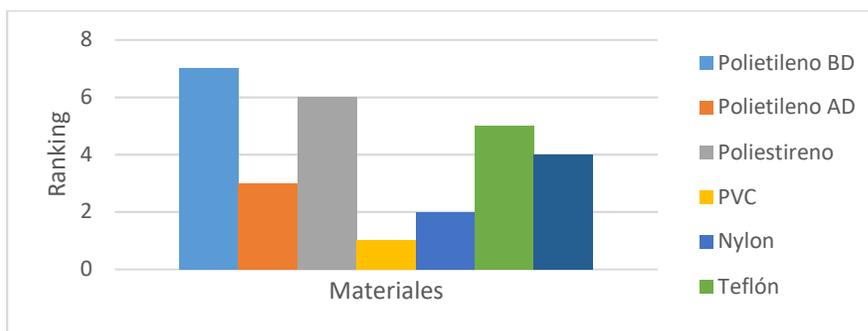


Figura 28. Ranking Método TOPSIS

Resultados Método PROMETHEE II.

Tabla 64.

Resultados Método PROMETHEE II

Alternativa	Ranking
Polietileno BD	2
Polietileno AD	1
Poliestireno	6
PVC	5
Nylon	1
Teflón	4
Polipropileno	3

En la tabla 64 y figura 29 se muestra el ranking alcanzado por los materiales seleccionados luego de la aplicación del método PROMETHEE II, donde se observa que en la posición número uno la comparten el Nylon y el Polietileno de Alta Densidad. Este resultado se explica reconstruyendo el método PROMETHEE II, el cual básicamente, realiza una discretización numérica de los criterios, comparando las alternativas en parejas. Es decir, compara un par de alternativas, de las cuales obtiene una preferencia, la misma que es comparada con la preferencia de otra comparación, de un modo secuencial y ordenado, al final, aparecen como ganadores el Polietileno AD y el Nylon, ya que son los materiales que coinciden en el número de veces que han logrado valores más altos en un número de comparaciones finitas.

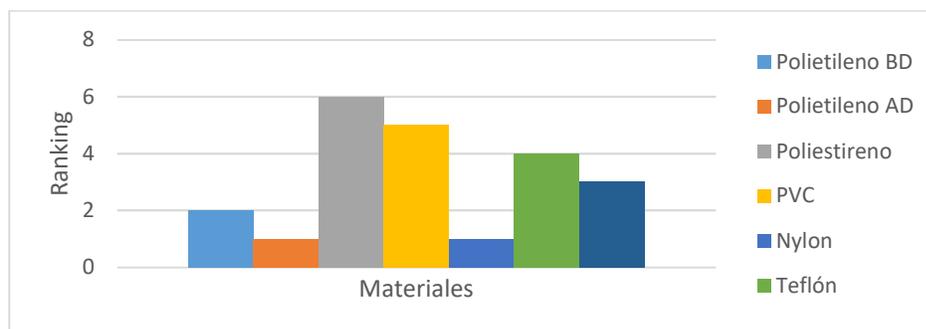


Figura 29. Ranking Método PROMETHEE II

Resultados Método DOMINIC.

Tabla 65.

Resultados Método DOMINIC

Alternativa	Ranking
Polietileno BD	7
Polietileno AD	4
Poliestireno	5
PVC	6
Nylon	1
Teflón	3
Polipropileno	2

En la tabla 65 y 30 se muestra el ranking alcanzado por los materiales seleccionados luego de la aplicación del método DOMINIC, donde se observa que en la posición número uno se ubican el Nylon en la segunda posición el Polipropileno. Para entender mejor los resultados arrojados por este método, se debe recordar que en el método DOMINIC, los resultados son una sumatoria de los valores otorgados a los criterios, y que estos, obtienen esta calificación en función a la cualidad buscada en el material por cada criterio. De este modo, el Nylon se impone al Polipropileno, ya que el Nylon posee un mayor módulo de elasticidad y un mayor grado de conductividad térmica, como se observa en la tabla 12.

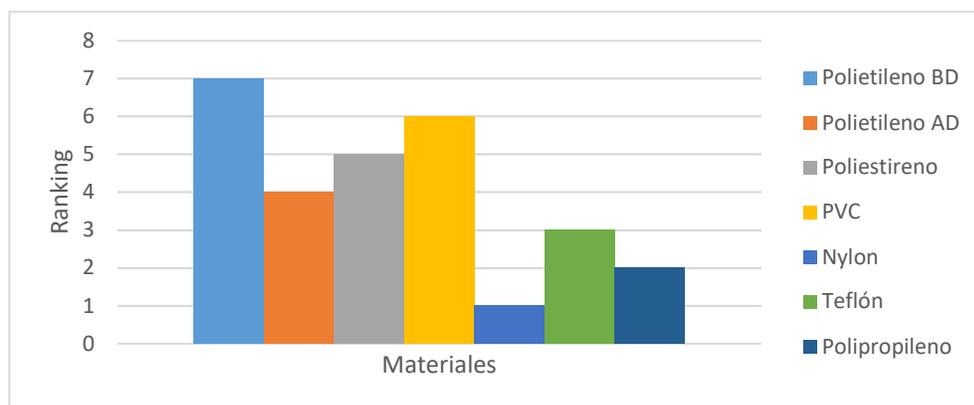


Figura 30. Ranking Método DOMINIC

Resultados Método COPRAS.

Tabla 66.

Resultados Método COPRAS

Alternativa	Ranking
Polietileno BD	7
Polietileno AD	3
Poliestireno	5
PVC	1
Nylon	2
Teflón	6
Polipropileno	4

En la tabla 66 y figura 31 se muestra el ranking alcanzado por los materiales seleccionados luego de la aplicación del método COPRAS, donde se observa que en la posición número uno se ubican el PVC y el Nylon se ubica en la posición dos. La razón por la cual se obtienen estos resultados, es porque el Método COPRAS utiliza umbrales ideales y no ideales para calcular la solución óptima, dentro de lo cual inciden fuertemente los valores de los pesos ponderados. En este sentido, el peso más fuerte es el w_6 , correspondiente al módulo de elasticidad, en el cual el valor más alto lo posee el PVC, como se observa en la tabla 12. De este modo, el Teflón se coloca en la primera posición y el Nylon en segunda.

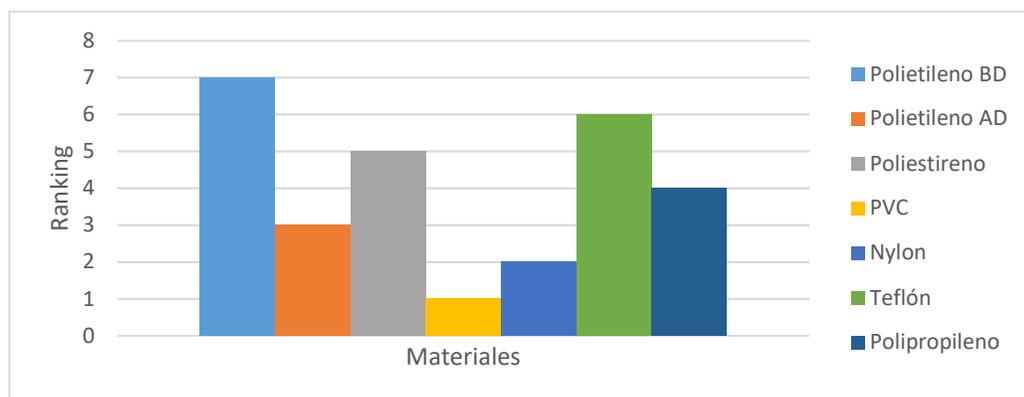


Figura 31. Ranking método COPRAS

Resultados de Correlación de SPEARMAN.

Tabla 67.
Correlación de Spearman en resultados MCDM.

	VIKOR	PUGH	TOPSIS	PROMETHEE	DOMINIC
PUGH	0.071	-	-	-	-
TOPSIS	0.92	-0.17	-	-	-
PROMETHEE	0.5	0.54	0.2	-	-
DOMINIC	0.46	0.42	0.46	0.38	-
COPRAS	0.85	-0.3	0.85	0.85	0.28

En la tabla 67 y figura 32 respectivamente, se observan los datos obtenidos de la correlación de Spearman en los resultados de los MCDM de forma emparejada. La mayoría de las combinaciones muestran resultados ascendentes desde un promedio de 0.45 hasta 0.92 lo que implica una correlación positiva entre ellos, es decir, que a medida que un método le otorga la primera posición al Nylon, el otro también. Un par de métodos poseen una correlación negativa, los cuales son el método COPRAS y PUGH, los cuales muestran una tendencia inversamente proporcional, es decir que, a medida que uno de estos métodos otorga posiciones elevadas a cierto material, el otro otorga las posiciones opuestas, cabe resaltar que sus valores varían entre -0.17 y -0.3, lo que indica que su relación negativa es moderada, ya que el extremo es -1.0. Por otro lado, también se observa que no existen valores equivalentes a cero, es decir que la correlación nula es inexistente, es decir el Nylon gana de forma consistente.

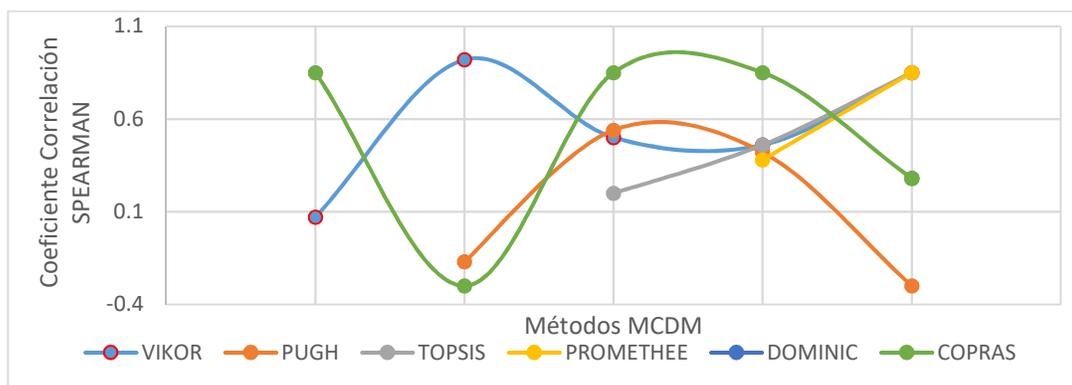


Figura 32. Análisis De Coeficiente de Spearman en MCDM

Resultados Simulación, Temperatura Vs. Tiempo.

Los resultados presentados a continuación corresponden a la temperatura nodal, es decir que muestran los valores térmicos alcanzados en las intersecciones o nodos de cada elemento en que se ha dividido la pieza, según el método de elementos finitos.

Resultados de la Simulación con Polietileno BD.

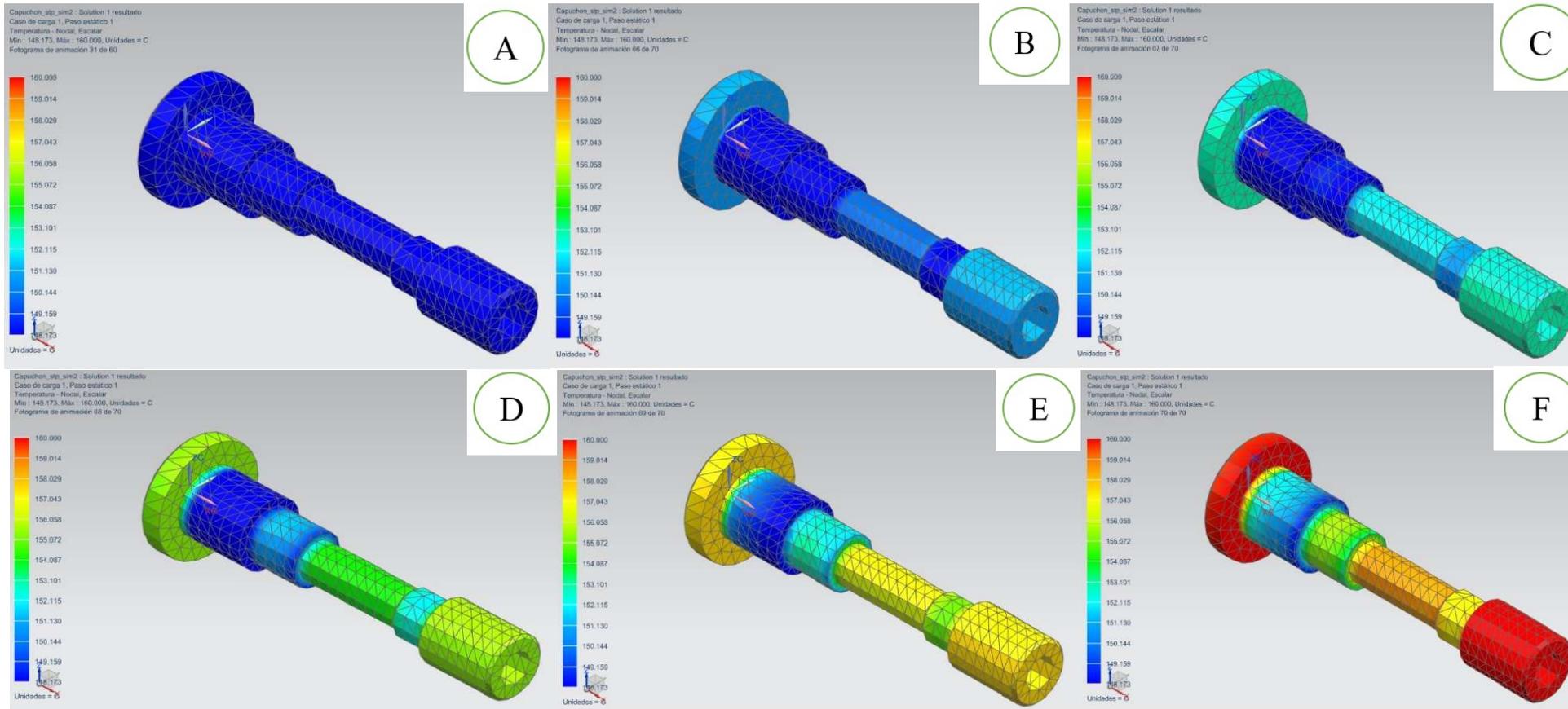


Figura 33. Secuencia térmica del Polietileno BD

En la imagen 33A del Polietileno de Baja Densidad, se observa la pieza, a cero segundos de tiempo de transcurrido de simulación, es decir a temperatura ambiente, donde el color azul indica la ausencia de carga térmica.

En la imagen 33B, han transcurrido ya, 120 segundos de iniciada la simulación y el entorno de trabajo de la pieza empieza a calentarse, de ese modo se observa un cambio de color de azul a celeste en los cuadrantes 1 y 6 de la pieza, lo que significa un cambio térmico ascendente por el orden de los 140 grados centígrados. Debido a que son las zonas fuentes de calor, donde existe contacto con la bujía en el cuadrante 6 y con 1 tapa de válvulas den el cuadrante 1 respectivamente.

En la imagen 33C han transcurrido 240 segundos, y el incremento de temperatura en los cuadrantes 1, 4, 5 y 6 se hace notorio con un color más claro que en la figura anterior con una temperatura de 154 grados centígrados.

En la imagen 33D, los cuadarntes1, 4 y 6 se han elevado hasta 156 grados con color amarillo y los cuadrantes 2 y 3 permanecen en color celeste, a partir de este momento empieza el cambio de fase de este material, según los datos observados en la tabla 10, es posible que el resto de características aislantes y térmicas se ven afectadas al rebasar este umbral.

En la figura 33E, la temperatura alcanza los 157 grados en los cuadrantes 1, 4 y 6, mientras que el resto permanece con variaciones menores.

En la figura 33F, el motor ha alcanzado ya la temperatura ideal de trabajo, programada en el software y los cuadrantes 1 y 6, con un color rojo intenso son los más afectados con 160 grados centígrados, mientras el resto de cuadrantes permanecen con elevaciones mínimas y no rebasan la barrera de los 157 y 158 grados centígrados.

Resultados de la Simulación con Polietileno AD.

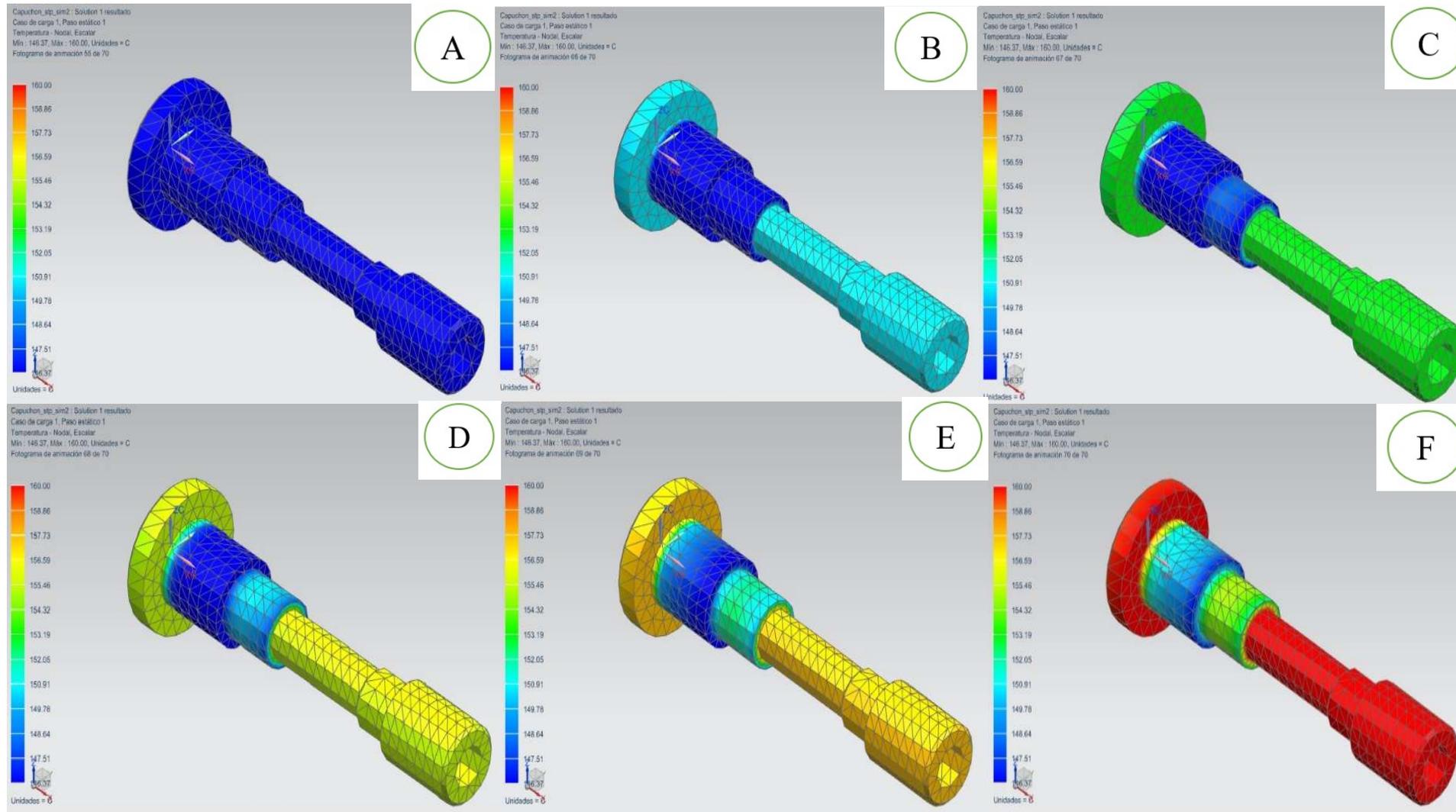


Figura 34. Secuencia térmica del Polietileno AD

En la imagen 34A del Polietileno de Alta Densidad, se observa la pieza, a cero segundos de tiempo de transcurrido de simulación, es decir a temperatura ambiente, donde el color azul indica la ausencia de carga térmica.

En la imagen 34B, han transcurrido ya, 120 segundos de iniciada la simulación y el entorno de trabajo de la pieza empieza a calentarse, de ese modo se observa un cambio de color de azul a celeste en los cuadrantes 1,4,5 y 6 de la pieza, lo que significa un cambio térmico de 140 grados centígrados. El aparecimiento temprano de temperatura en estos cuadrantes, antes que el resto de cuadrantes, se debe a que en estas zonas es donde existe contacto con las partes más calientes del motor.

En la imagen 34C han transcurrido 240 segundos, y el incremento de temperatura en los cuadrantes 1, 4, 5 y 6 se hace notorio con un color más claro que en la figura anterior con una temperatura de 154 grados centígrados.

En la imagen 34D, los cuadrantes 1, 4 y 6 se han elevado hasta 156 grados con color amarillo y los cuadrantes 2 y 3 permanecen en color azul y celeste respectivamente.

En la figura 34E, la temperatura alcanza los 157 grados en los cuadrantes 1, 4, 5 y 6, mientras que el resto permanece con variaciones menores excepto el cuadrante 3, el mismo que presenta un incremento notable en la sección media por el orden de los 154 grados.

En la figura 34F, el motor ha alcanzado la temperatura ideal de trabajo programada en el software y los cuadrantes 1, 4, 5 y 6, con un color rojo intenso son los más afectados con 160 grados centígrados, mientras el resto de cuadrantes permanecen con elevaciones mínimas y no rebasan la barrera de los 150 y 154 grados centígrados. Cabe recalcar que, en este material, a esta temperatura no existen cambios como, cambio de fase, conductividad, etc.

Resultados de la Simulación con Poliestireno.

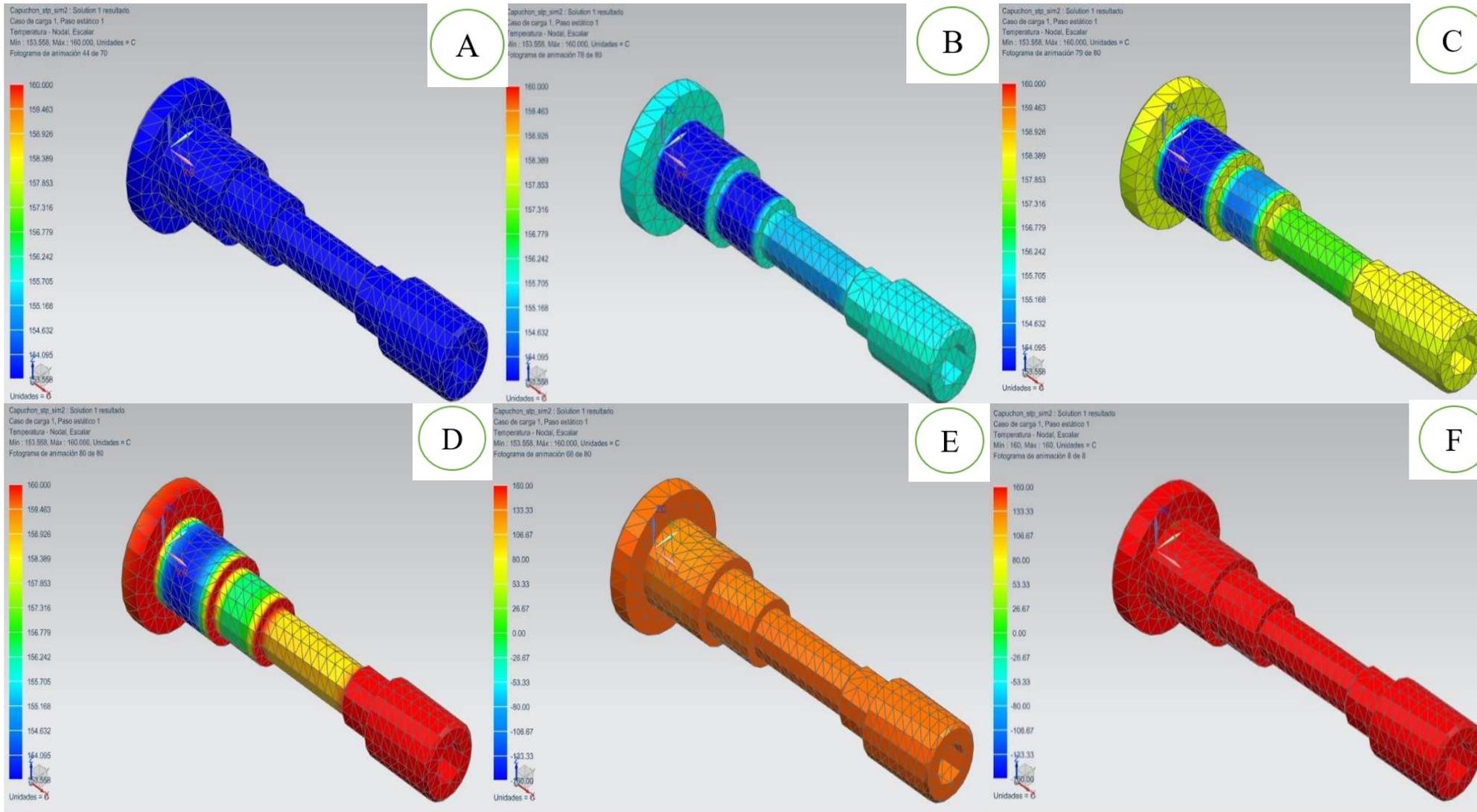


Figura 35. Secuencia térmica del Poliestireno

En la imagen 35A del Poliestireno, se observa la pieza, a cero segundos de tiempo de transcurrido de simulación, es decir a temperatura ambiente, donde el color azul indica la ausencia de carga térmica.

En la imagen 35B, han transcurrido ya, 120 segundos de iniciada la simulación y el entorno de trabajo de la pieza empieza a calentarse, de ese modo se observa un cambio de color de azul a celeste en los cuadrantes 1, 4, 5 y 6 de la pieza, lo que significa un cambio térmico ascendente por el orden de los 140 grados centígrados. Mientras que los cuadrantes 2 y 3 presentan incremento térmico solo en los extremos inferiores.

En la imagen 35C han transcurrido 240 segundos, y el incremento de temperatura en los cuadrantes 1, 5 y 6 se hace notorio con un color amarillo con una temperatura de 154 grados centígrados y los cuadrantes 2 y 3 con el mismo incremento en las zonas inferiores, por su lado el cuadrante 4, presenta un color verde indicando una temperatura de 154 grados centígrados.

En la imagen 35D, los cuadrantes 1, 5 y 6 se han elevado hasta la temperatura más alta y con el color rojo muestran una temperatura de 160 grados, mientras el mismo tono lo presentan solo las partes inferiores de los cuadrantes 2 y 3. Con color amarillo, verde y celeste los cuadrantes 4,3, y 2 indicando un incremento de hasta 157 grados en estas zonas de la pieza.

En la figura 35E, con 480 segundos, la pieza se torna de color anaranjado en casi su totalidad, indicando una temperatura de 158 grados centígrados

En la figura 35F, con 600 segundos, la pieza se ha tornado totalmente roja en todos sus cuadrantes indicando 160 grados centígrados en todos los cuadrantes. Cabe recalcar que, en este material, a esta temperatura no existen cambios como, cambio de fase, conductividad, etc.

Resultados de la Simulación con PVC.

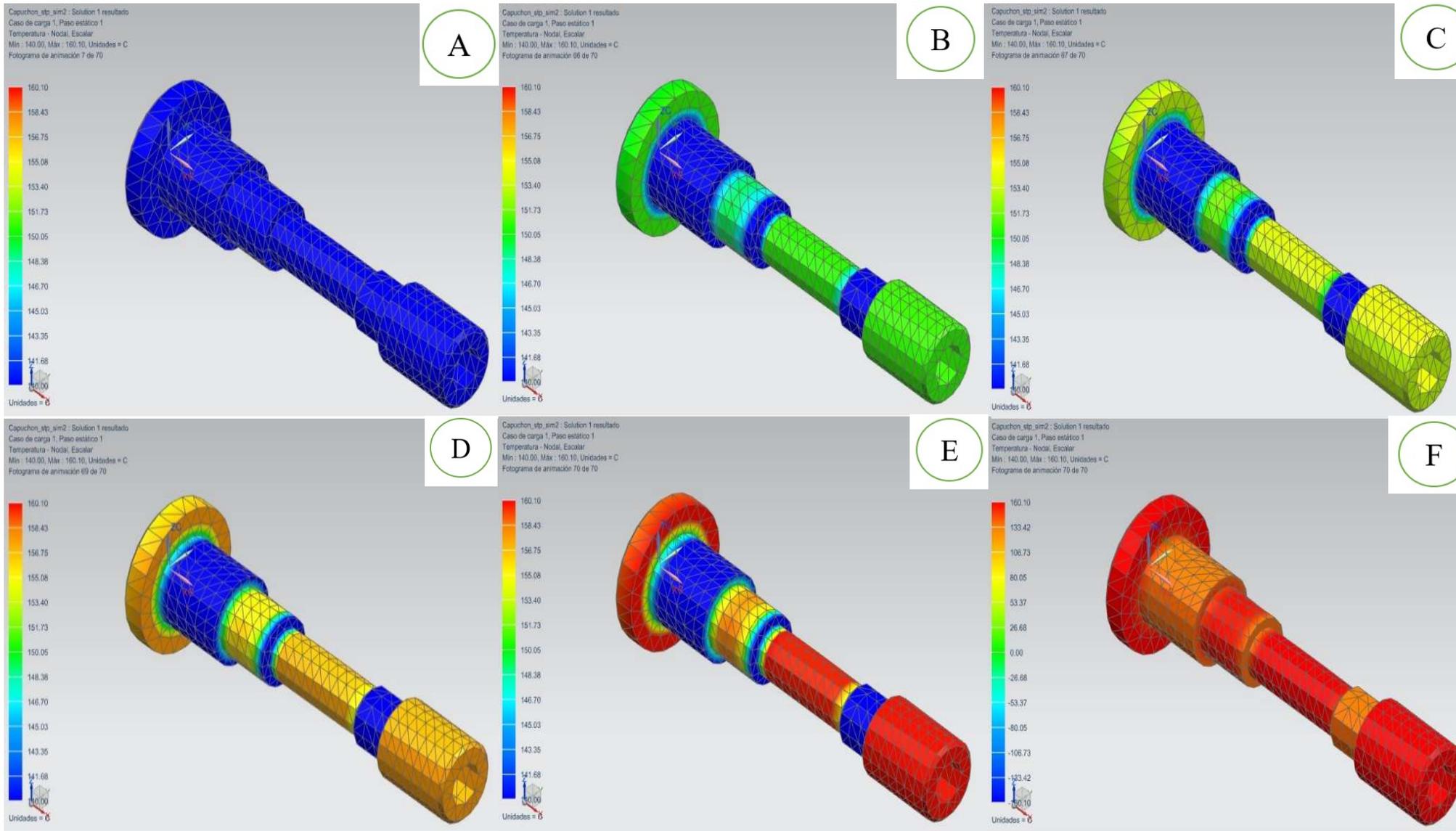


Figura 36. Secuencia térmica del PVC

En la imagen 36A del PVC, se observa la pieza, a cero segundos de tiempo de transcurrido de simulación, es decir a temperatura ambiente, donde el color azul indica la ausencia de carga térmica.

En la imagen 36B, han transcurrido ya, 120 segundos de iniciada la simulación y la pieza empieza a calentarse rápidamente, de ese modo se observa un cambio de color de azul a verde en los cuadrantes 1, 3, 4 y 6, lo que significa un cambio térmico ascendente por el orden de los 154 grados centígrados. El cambio térmico con el PVC ha sido más rápido debido a las características del material.

En la imagen han 36C transcurrido 240 segundos, y el incremento de temperatura en los cuadrantes 1, 3, 4, y 6 se hace notorio con un amarillo, con una temperatura de 157 grados centígrados y los cuadrantes 2 y 5 permanecen en color azul, con un ligero celeste en la intersección de los cuadrantes 1 y 2, indicando incremento térmico en esta zona.

En la imagen 36D, a 360 segundos transcurridos, los cuadrantes 1, 3, 4 y 6 se han elevado hasta 157 grados con color amarillo. Los cuadrantes 2 y 5 permanecen azules.

En la figura 36E, con 480 segundos, la temperatura alcanza los 160 grados en los cuadrantes 1, 4 y 6 solamente, el cuadrante 3 llega a 157 grados y los restantes se mantienen azules.

En la figura 36F, con 600 segundos transcurridos, el cuadrante 2, 5 y la parte inferior de cuadrante 3 alcanzan los 158 grados, mientras que el resto de la pieza llega a los 160 grados de forma casi uniforme.

Cabe recalcar que, en este material, a esta temperatura no existen cambios como, cambio de fase, conductividad, etc.

Resultados de la Simulación con Nylon.

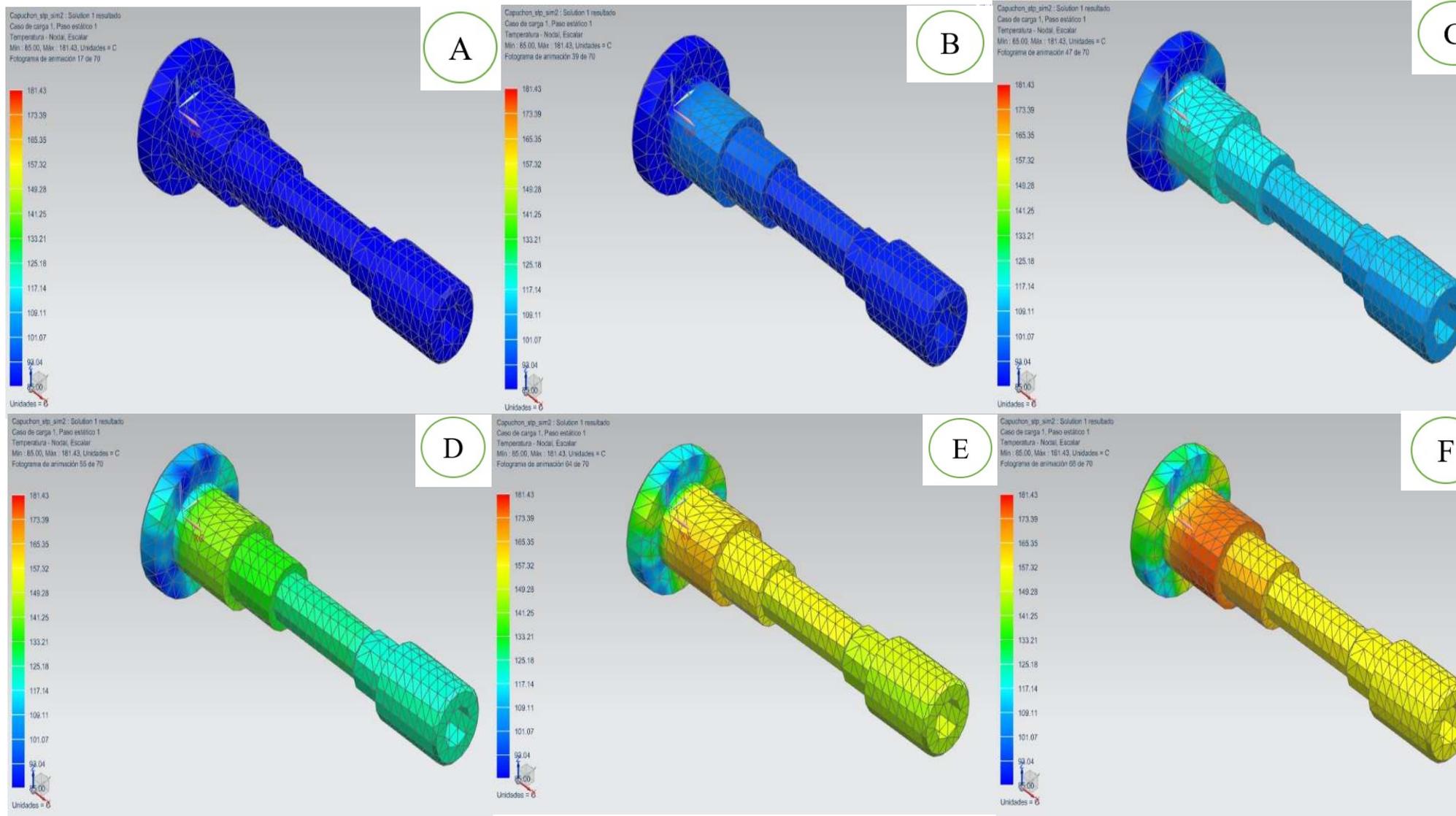


Figura 37. Secuencia térmica del Nylon

En la imagen 37A del Nylon, se observa la pieza, a cero segundos de tiempo de transcurrido de simulación, es decir a temperatura ambiente, donde el color azul indica la ausencia de carga térmica.

En la imagen 37B, han transcurrido ya, 120 segundos de iniciada la simulación y el entorno de trabajo de la pieza empieza a calentarse, pero en este material apenas se observa cambios significativos con incrementos térmicos por el orden de los 90 grados en el cuadrante 2.

En la imagen 37C han transcurrido 240 segundos, solo los cuadrantes 2, 3, 4, 5 y 6 han alcanzado los 120 grados centígrados, mientras que el cuadrante 1 posee todavía zonas frías de color azul.

En la imagen 37D, con 360 segundos transcurridos, apenas se observa un incremento térmico de 3 grados aproximadamente, en comparación con la imagen anterior, el cuadrante 1 se mantiene relativamente frío.

En la figura 37E, con 480 segundos de tiempo, la temperatura alcanza los 157 grados centígrados aproximadamente, en los cuadrantes de casi toda la pieza, con un ligero incremento en el cuadrante 2, el cual presenta una ligera pigmentación naranja en una zona central, registrando alrededor de 155 grados centígrados.

En la figura 37F, correspondiente a la simulación con un tiempo de 600 segundos, la pieza se mantiene térmicamente estable con relación a la medición anterior, mostrando un incremento notable en el cuadrante 2, por el orden de los 157 grados centígrados, mientras que el cuadrante 1 se pueden apreciar todavía zonas frías.

Cabe recalcar que. en este material, a esta temperatura no existen cambios como, cambio de fase, conductividad, etc.

Resultados de la Simulación con Teflón.

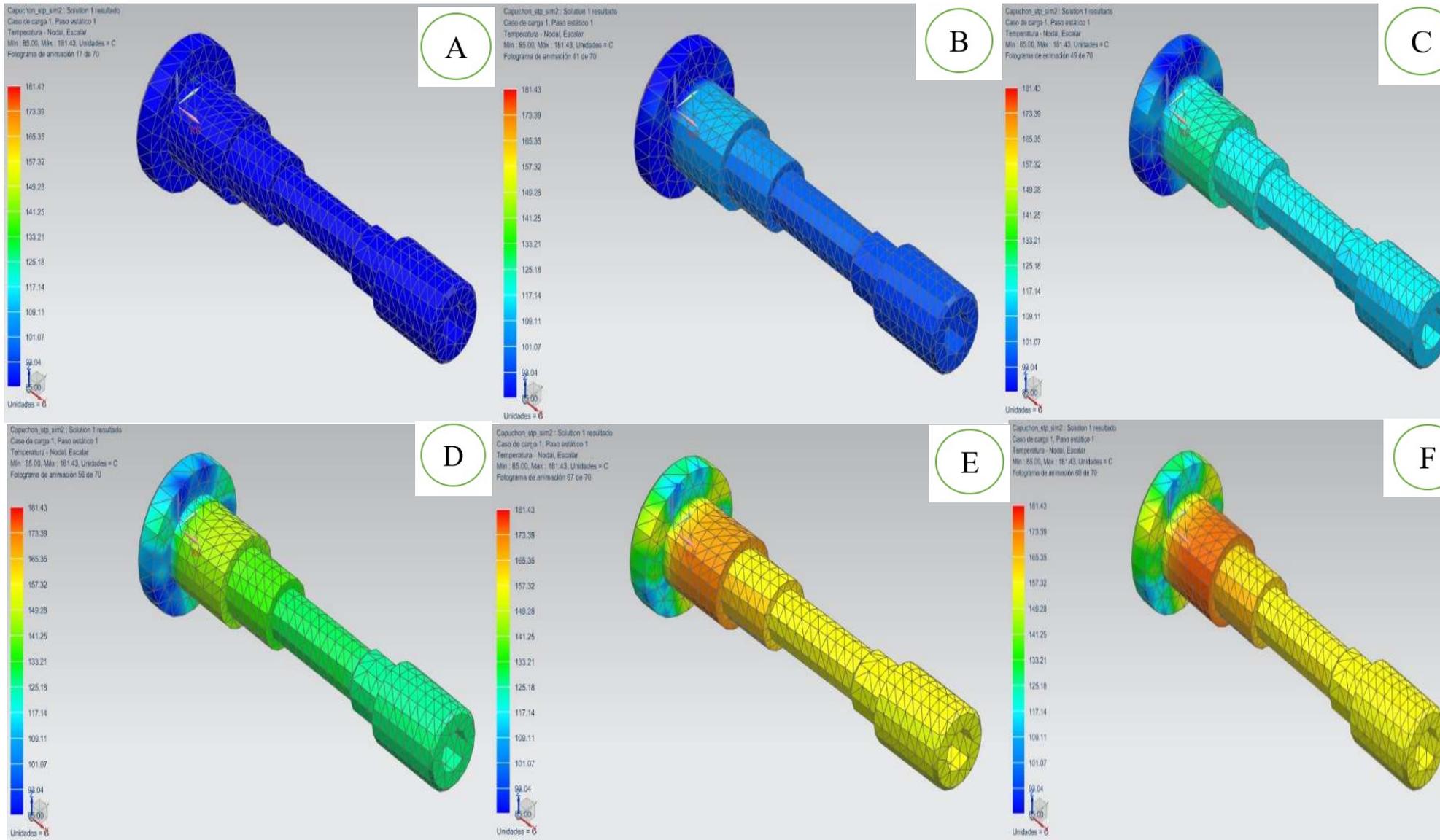


Figura 38. Secuencia térmica del Teflón

En la imagen 38A del Teflón, se observa la pieza, a cero segundos de tiempo de transcurrido de simulación, es decir a temperatura ambiente, donde el color azul indica la ausencia de carga térmica, acción realizada a fin de notar los cambios en función del tiempo.

En la imagen 38B, han transcurrido ya, 120 segundos de iniciada la simulación y el entorno de trabajo de la pieza empieza a calentarse, pero en este material apenas se observa cambios significativos con incrementos térmicos por el orden de los 95 grados en el cuadrante 2.

En la imagen 38C han transcurrido 240 segundos, solo los cuadrantes 2, 3, 4, 5 y 6 han alcanzado los 125 grados centígrados, mientras que el cuadrante 1 posee todavía zonas frías de color azul.

En la imagen 38D, con 360 segundos transcurridos, apenas se observa un incremento térmico de 5 grados aproximadamente, en comparación con la imagen anterior, el cuadrante 1 se mantiene relativamente frío.

En la figura 38E, con 480 segundos de tiempo, la temperatura alcanza los 157 grados centígrados aproximadamente, en los cuadrantes de casi toda la pieza, con un ligero incremento en el cuadrante 2, el cual presenta una ligera pigmentación naranja en una zona central, registrando alrededor de 156 grados centígrados.

En la figura 38F, correspondiente a la simulación con un tiempo de 600 segundos, la pieza se mantiene térmicamente estable con relación a la medición anterior, mostrando un incremento notable en el cuadrante 2, por el orden de los 157 grados centígrados, mientras que el cuadrante 1 se pueden apreciar todavía zonas frías.

Cabe recalcar que, en este material, a esta temperatura no existen cambios como, cambio de fase, conductividad, etc.

Resultados de la Simulación con Polipropileno.

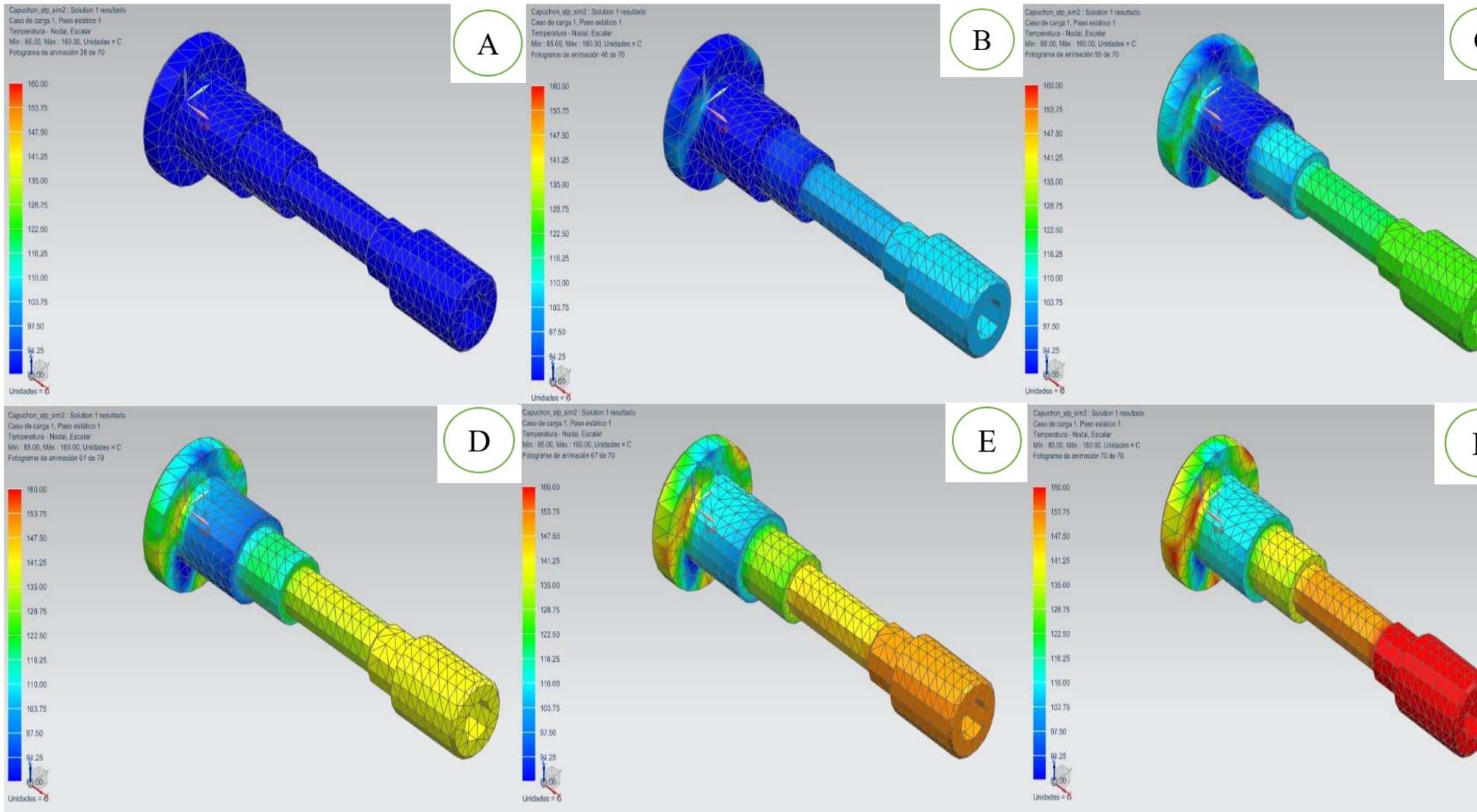


Figura 39. Secuencia térmica del Polipropileno

En la imagen 39A del Polipropileno, se observa la pieza, a cero segundos de tiempo de transcurrido de simulación, es decir a temperatura ambiente, donde el color azul indica la ausencia de carga térmica, acción realizada a fin de notar los cambios en función del tiempo.

En la imagen 39B, han transcurrido ya, 120 segundos de iniciada la simulación y el entorno de trabajo de la pieza empieza a calentarse, de ese modo se observa un cambio de color de azul a celeste en ellos cuadrantes 4, 5 y 6 de la pieza, lo que significa un cambio térmico ascendente por el orden de los 140 grados centígrados. Mientras que los cuadrantes 1, 2, y 3 permanecen fríos.

En la imagen 39C han transcurrido 240 segundos, y el incremento de temperatura en los cuadrantes 4, 5 y 6 se hace notorio un color verde, indicando incremento térmico de alrededor de 154 grados centígrados, mientras que en el resto de cuadrantes, permanecen colores fríos a excepción del cuadrante 3.

En la imagen 39D, los cuadrantes 4, 5 y 6 se han elevado hasta 157 grados con color amarillo y los cuadrantes 1, 2, y 3 permanecen en color celeste con ligeros pigmentos verdes, señalando temperaturas de 153 grados centígrados.

En la figura 39E, con 480 segundos transcurridos, la temperatura alcanza los 157 grados en los cuadrantes 5 y 6 solamente, mientras que el cuadrante 4 permanece en 155 grados y el resto de cuadrantes no supera los 153 grados centígrados.

En la figura 39F, el motor ha alcanzado la temperatura ideal de trabajo programada en el software y los cuadrantes 5 y 6, con un color rojo intenso son los más afectados con a60 grados centígrados, mientras el resto de cuadrantes permanecen con elevaciones mínimas y no rebasan

la barrera de los 156 grados centígrados. Cabe recalcar que, en este material, a esta temperatura no existen cambios como, cambio de fase, conductividad, etc.

Convergencia de datos de simulación térmica.

Los datos arrojados por el software luego de la simulación contemplan un análisis de convergencia de datos realizado por el mismo software. Estos resultados indican el punto de convergencia estable, donde se unen los datos del cambio de temperatura máximo con el número de iteraciones o ecuaciones que ha realizado el programa al momento de encontrar los resultados.

Los resultados de convergencia, coinciden en todas las 42 simulaciones realizadas, ya que los datos ingresados como condiciones de borde en cada simulación, son iguales, solo cambia el tipo de material, los mismos que son de naturaleza polimérica, razón por la cual los resultados convergen en el mismo punto cada vez, como se ve en la figura 40.

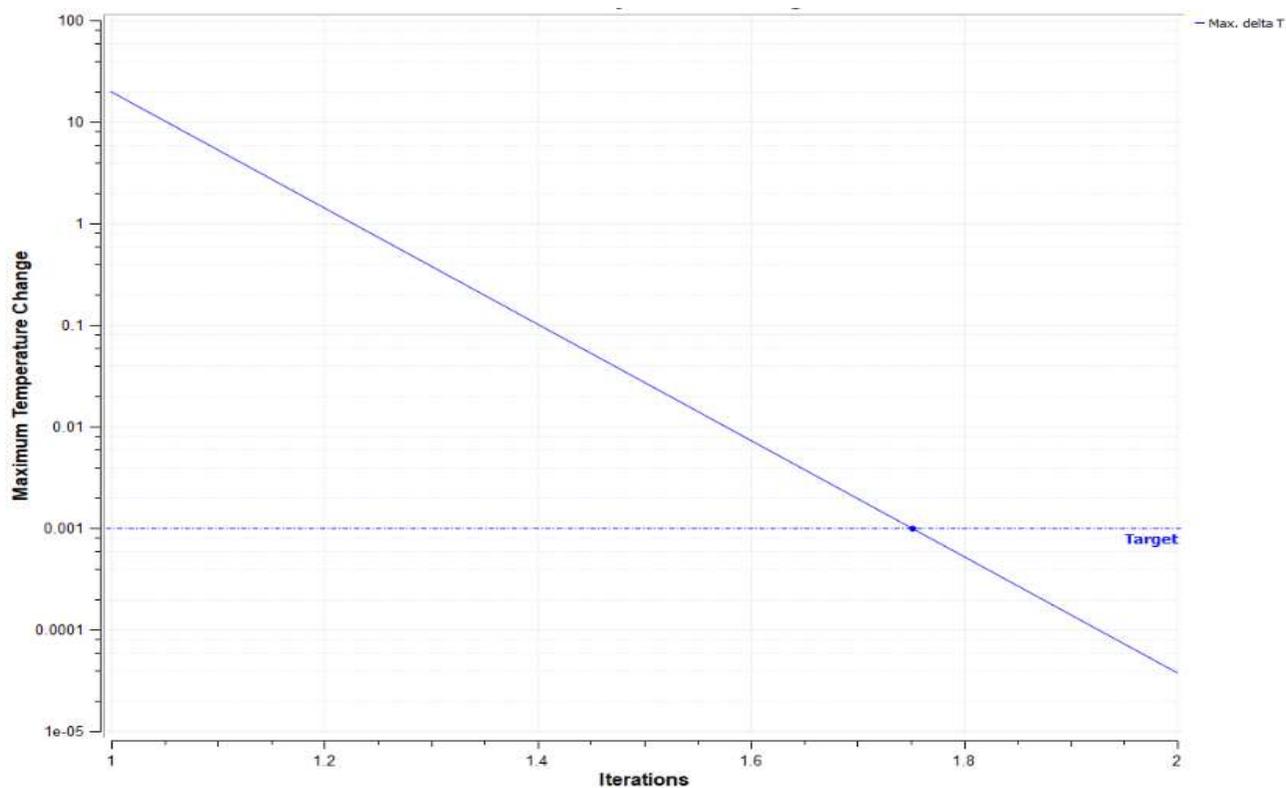


Figura 40. Convergencia de datos de simulación térmica

Resultados de la Experimentación pruebas TGA.

La experimentación se llevó a cabo sobre un prototipo de SPB fabricado de nylon, el cual fue el material ganador de la selección MCDM, y mostró su comportamiento ideal en la simulación virtual. El proceso de fabricación fue el mecanizado manual. La geometría utilizada fue la misma de la simulación, la cual es la de un SPB equipado en el motor Suzuki G16B que utilizan los vehículos Grand Vitara.



Figura 41. Prototipo de SPB Mecanizado en Nylon Vs. Original

Los resultados obtenidos luego de la prueba Termogravimétrica TGA, a un prototipo construido con Poliamida 6 (Nylon), se pueden observar gráficamente en la figura 41, donde la

curva de degradación térmica del material empieza a partir de los 400 °C aproximadamente, evidenciando que el SPB construido por Nylon va a soportar perfectamente los 140 °C que va a tener que enfrentar insertado en la culata de un motor de combustión interna.

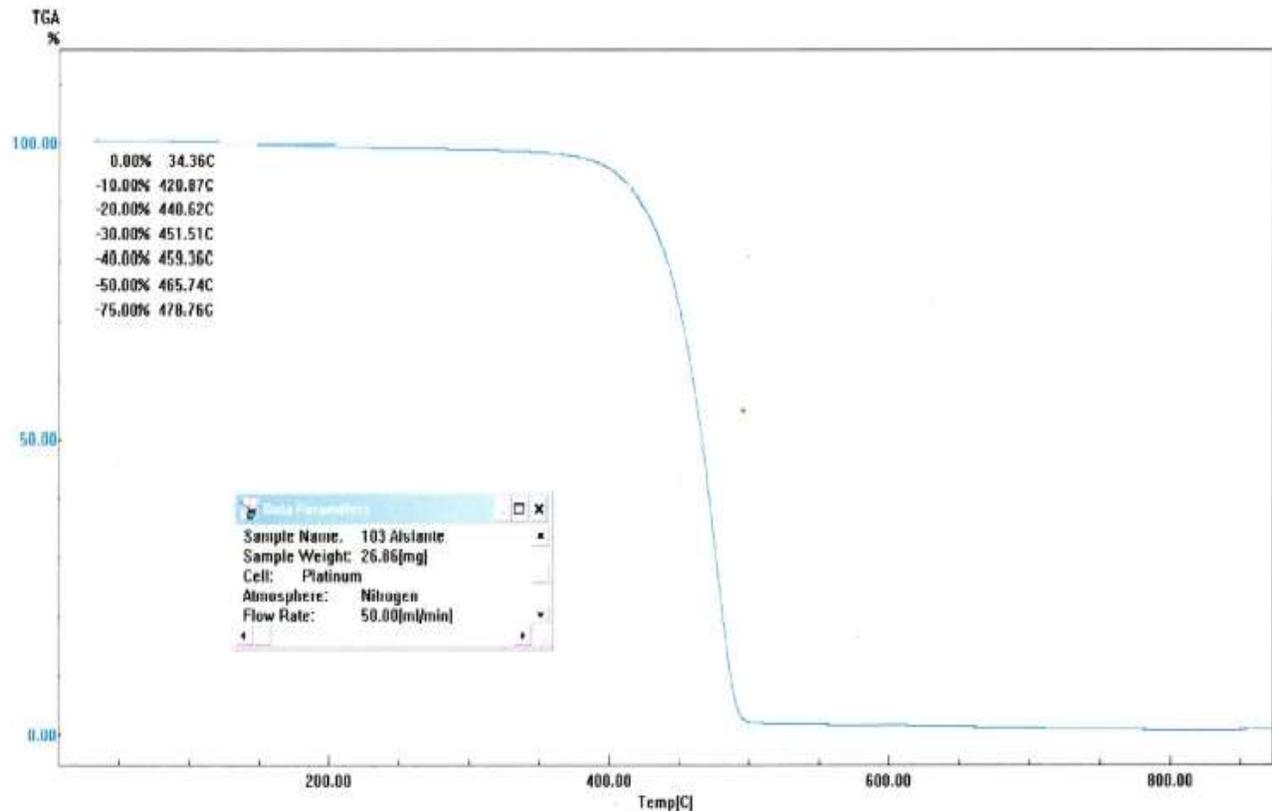


Figura 42. Resultados Experimentación TGA

En la tabla 56 se pueden observar los valores exactos arrojados por el TGA, los cuales advierten de una degradación calculado como pérdida de peso del SPB a partir de los 420 °C.

Tabla 68.

Valores de Degradación Térmica del SPB construido con Nylon en el TGA

Pérdida de peso (%)	Temperatura (°C)
10	420,9
20	440,6
30	451,5
40	459,4
50	465,7
75	478,8

Discusión de resultados.

Resolver problemas, es la razón de ser de la ingeniería, en este proceso ordenado de tareas que siguen una secuencia lógica de eventos, se ven involucradas principalmente la toma de decisiones. Los métodos multicriterio ofrecen un soporte técnico en este proceso, de forma puntual, al momento de elegir un material idóneo, en este caso, para fabricar aislantes para bobinas de encendido. Según (Liao & Xu, 2014), la selección de materiales envuelve a una cantidad determinada de atributos deseados en un material requerido. Es decir, antes de empezar la selección se deben determinar claramente las características que debe poseer un determinado material, en función de su trabajo. En este sentido se han tomado las características que posee un aislante SPB de los que se encuentra en el mercado. Según (Funk & Eiler, 2003), las características de un aislante SPB son principalmente de origen dieléctrico y térmico.

El primer paso de esta secuencia lógica, fue elaborar una lista con siete materiales de tipo polimérico, los cuales fueron evaluados bajo los siguientes criterios preliminares: 1. que posean cualidades dieléctricas, térmicas, químicas y mecánicas, necesarias para cumplir la función indicada, 2. que se encuentren fácilmente en el mercado ecuatoriano y 3. que posean un precio competitivo. Como resultado de esta selección aparecieron los siguientes materiales: polietileno de alta densidad, polietileno de baja densidad, poliestireno, PVC, nylon, teflón y polipropileno. Para (Rao, 2008), elegir el material correcto, no es tarea simple, ya que en ingeniería se deben tomar en cuenta todos o casi todos los aspectos que involucran el accionar de un material. Es decir, para construir un aislante eléctrico, se debe tomar en cuenta más criterios que la resistencia dieléctrica, razón por la cual se han tomado 7 criterios dentro del grupo de criterios técnicos y 1 criterio económico.

El siguiente paso fue aplicar los métodos multicriterio para poder determinar de manera técnica el material más conveniente para fabricar los aislantes SPB. Para poder aplicar los métodos multicriterio se debía tener de forma precisa los criterios con que se iba a realizar la selección, los cuales fueron: la resistencia dieléctrica, la temperatura de trabajo, el coeficiente de expansión térmica, la conductividad térmica, el módulo de elasticidad, la resistencia a hidrocarburos, la resistencia a grasas y aceites y el precio. Una vez determinados los criterios, se debía dar pesos a cada criterio, es decir, determinar cuál de los criterios es el más importante en esta selección de materiales. Según (Martínez, Vaca, Orozco, Montero, & Carrión, 2015), los factores de ponderación expresan la importancia relativa de cada criterio. De ese modo, para ello, se utilizaron métodos que permiten realizar esta tarea, denominados métodos de ponderación, los cuales fueron: entropía, variación estadística y valoración estándar.

Para realizar la selección multicriterio es necesario determinar los valores de los pesos de cada criterio, para ello, se tomó como pesos a los valores obtenidos en el método de Variación Estadística, ya que los resultados en este, fueron mayores en el criterio de resistencia dieléctrica. Debido a que, lo que se pretende en esta investigación es sugerir un material para fabricar aislantes de alta tensión para bobinas COP, es importante tomar en cuenta los valores obtenidos en este criterio en particular. Para (Chérrez-Troya, Martínez-Gómez, Peralta-Zurita, & Llanes-Cedeño, 2018), un criterio tiene mayor peso cuando hay mayor diversidad en la evaluación de cada alternativa, es decir, que es importante contar con varios métodos de los cuales se puede comparar sus resultados entre sí.

Una vez determinados los pesos, el siguiente paso fue la aplicación los MCDM, los métodos aplicados fueron: VIKOR, PUGH TOPSIS, PRMETHEE II, DOMINIC y COPRAS. La idea de usar tantos métodos es para validar y reforzar la selección de un material determinado.

Para (Girubha & Vinodth, 2011), los métodos MCDM son procesos lingüísticos – matemáticos, los cuales emplean números difusos que permiten solventar una decisión selectiva. Es decir, las necesidades y las ofertas se expresan de forma numérica, por decirlo de algún modo, permitiendo así realizar iteraciones con los valores a fin de que uno o varios de ellos sobre salgan, convirtiéndose en indicadores.

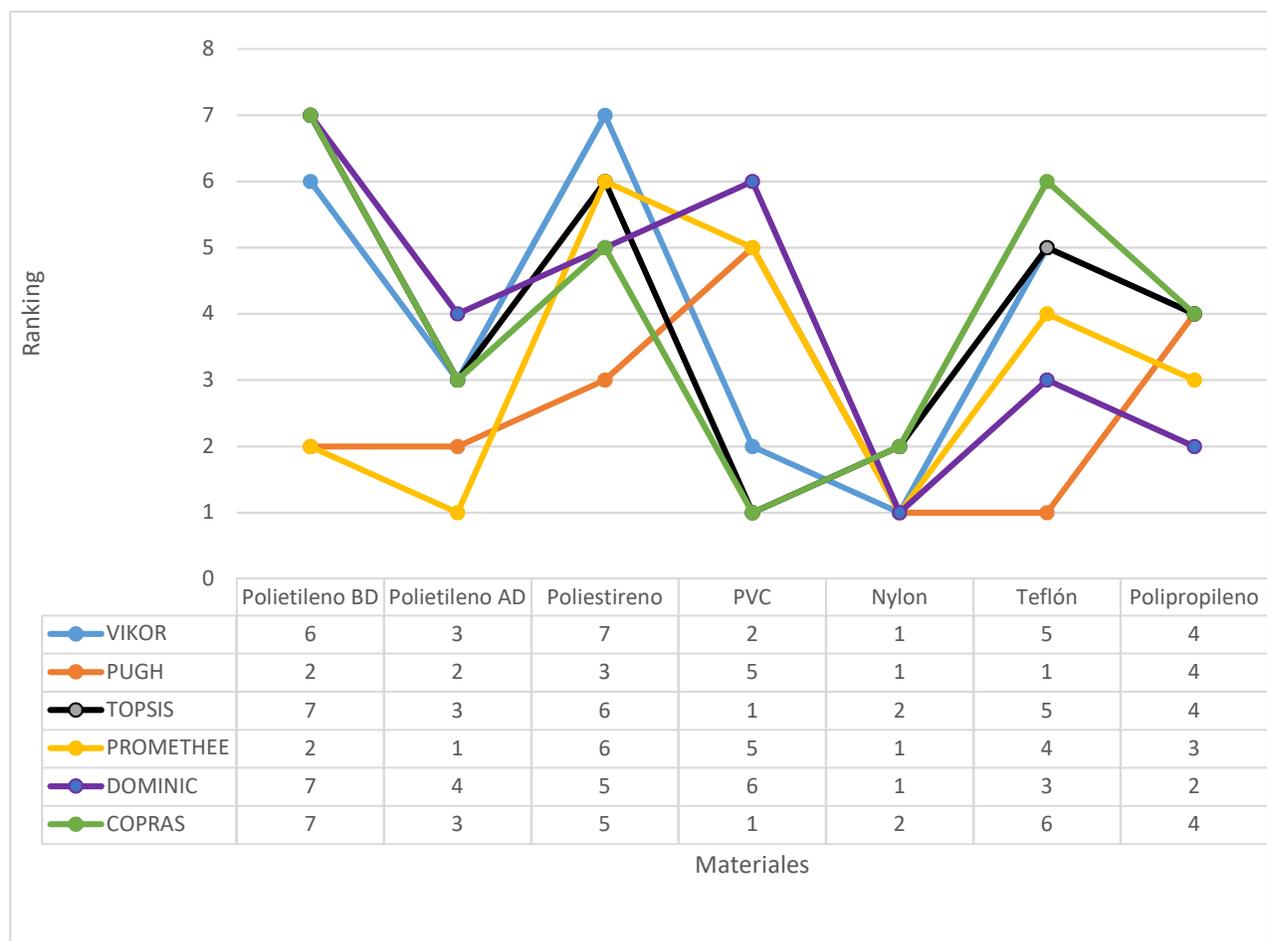


Figura 43. Comparación de resultados MCDM

En la aplicación del método VIKOR, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 61 y en la figura 26, donde se puede observar que el nylon alcanzó la posición número uno, lo que significa que, según este método, el nylon podría ser efectivo en la fabricación de SPB. Para (Liu, Liu, & Wu, 2013), el método VIKOR emplea un sistema de ranking en el cual el mejor

valor es el que se acerca a cero. Es decir, que el Nylon obtuvo un valor más cercano a cero que el resto de los materiales.

El siguiente método aplicado fue el PUGH, en el cual se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla número 62 y figura 27 se puede observar que hay dos materiales ganadores, el nylon y el teflón, sugiriendo de este modo a estos materiales como idóneos para fabricar SPB. Según (Martínez, Vaca, Orozco, Montero, & Carrión, 2015), dentro de un proceso de diseño de producto el método PUGH es el método que mejor evalúa las opciones disponibles en una selección de materiales. Es decir, mencionado método permite manejar de forma clara las variables y sus características.

El método TOPSIS fue el siguiente método aplicado, el cual arrojó como resultados los observados en la tabla 63 y figura 28, donde el PVC se muestra como vencedor de la selección ocupando el primer lugar, lo que evidencia que los valores que poseen los materiales fueron muy apretados y que los métodos son muy sensibles en su aplicación, de allí la necesidad de que sean varios los MCDM aplicados. Para (Khorshidi & Hassani, 2013), el método TOPSIS es capaz de identificar soluciones desde un número finito de alternativas, de las cuales la mejor es la que más se acerca a la solución positiva ideal. Es decir, el PVC presentó resultados al ser evaluado con este método, que se acercaron a la solución positiva propuesta por este método.

El método aplicado a continuación fue el PROMETHEE II, el cual arrojó como resultados los visualizados en la tabla 64 y figura 29, donde el nylon aparece como único ganador de la selección. Según (Peng & Xiao, 2012), los pesos juegan un rol determinante en la aplicación de este método, el cual utiliza efectos de compensación para hallar la solución y sus resultados han sido validados en el campo real y en comparación con métodos como: TOPSIS,

ELECTER, WAA, lo que muestra la eficacia de su aplicación. Es decir, el Nylon al ser el ganador en este método posee un alto grado de probabilidad de éxito, ya que este método ha sido contrastado con métodos aplicados en investigaciones similares.

El método DOMINIC fue el siguiente, arrojando los datos visibles en la tabla 65 y figura 30, donde el Nylon ocupa la locación uno en el ranking, como material idóneo de entre la selección de 7 materiales. Según (Martínez, Vaca, Orozco, Montero, & Carrión, 2015), los materiales seleccionados por este método han sido estudiados de forma cualitativa y tomando también en consideración su peso. Es decir, que el Nylon desde el punto de vista cualitativo es mejor que sus contendores para fabricar SPB, el Polipropileno ocupa la segunda posición en este método, puesto que los dos materiales muestran los valores más elevados en los criterios en el proceso de aplicación del método DOMINIC.

El sexto y último MCDM fue el método COPRAS, en el cual se determina como ganador el PVC, resultados mostrados en la tabla 66 y figura 31. Un punto interesante de este método es que otorga la segunda posición al Nylon, el cual posee un alto rendimiento en la mayoría de resultados en los demás métodos. Según (Salazar Loor, Martínez Gómez, & Rocha, 2018), el nivel de rendimiento para cada alternativa se consigue comparando las prioridades de todas las alternativas con la más eficiente. Es decir, que el nivel de rendimiento del PVC, evaluado con este método es el más alto comparado con el rendimiento de los demás materiales, seguido del Nylon.

En la figura 42 se realiza una comparación estadística de los resultados, en donde se puede observar que el material ganador es el que posee un mayor número de veces la primera

posición del ranking general, siendo este el Nylon obteniendo 4 en primer lugar y 2 en segundo lugar.

De este modo, como resultado de la aplicación de los MCDM, se sugiere como material idóneo para construir aislantes SPB al Nylon.

Comparación de Resultados MCDM.

Comparando los resultados de los métodos multicriterio, el material ganador de la selección MCDM es el Nylon, como se observa en la figura 42, donde el valor 1 es la mejor opción, en este punto se observa como en él convergen casi todos los métodos MCDM, con las excepciones de los métodos TOPSIS y COPRAS, en los cuales obtiene la segunda posición, es decir, el único material que muestra esta consistencia en todos los métodos. Por lo tanto, los métodos en los que no gana el Nylon, no difieren en mucho a los métodos en los que si gana. De este modo el Nylon triunfa consistentemente en los métodos MCDM, por decirlo de algún modo.

Correlación de Spearman.

Según (Martínez - Gómez, 2018), los resultados de los MCDM se deben validar buscando una correlación entre ellos, el método de correlación de Spearman mide la relación no lineal de un conjunto de datos. En este sentido, la correlación entre métodos, posee una tendencia positiva, es decir que, los resultados son directamente proporcionales, lo que significa que, si en un método el ganador ha sido el Nylon, en otro método también, o por lo menos está en segunda posición, como es el caso de los métodos TOPSIS y COPRAS. De esta manera, se observa la consistencia de los resultados de los MCDM.

Ahora bien, luego de poseer un material idóneo teóricamente hablando, lo lógico es comprobar si el material puede trabajar bajos las condiciones térmicas de un motor de

combustión interna, para ello se han definido dos caminos, uno de ellos fue la simulación virtual y el otro la experimentación normada.

Comparación de Resultados Simulación.

Según (Ferrer J. & Salas, 2013), existen investigaciones en las cuales la simulación es el único método de validación, además se pueden obtener resultados en función del periodo de medición establecido. Luego de llevar a cabo la simulación virtual utilizando un software especializado en simulaciones térmicas se obtuvieron resultados mostrados en las figuras 33, 34, 35, 36, 37, 38 y 39, donde se puede observar de manera gráfica y numérica que los valores térmicos más altos a los que se va a enfrentar el SPB fabricado con nylon están dentro de los parámetros deseados, siendo como temperatura máxima la de 143 grados centígrados, y la temperatura de trabajo del nylon es de 160 grados centígrados a un espesor de 2 milímetros, que es el espesor promedio del SPB. De este modo se comprueba que, hasta aquí, los resultados de la selección MCDM son validados de forma positiva en el mundo virtual.

En la figura 44 se puede visualizar gráficamente la comparación de resultados globales obtenidos en la simulación virtual, con una temperatura constante y a diferentes mediciones en función del tiempo, buscando reflejar la realidad que se enfrentan los SPB en un motor de combustión interna.

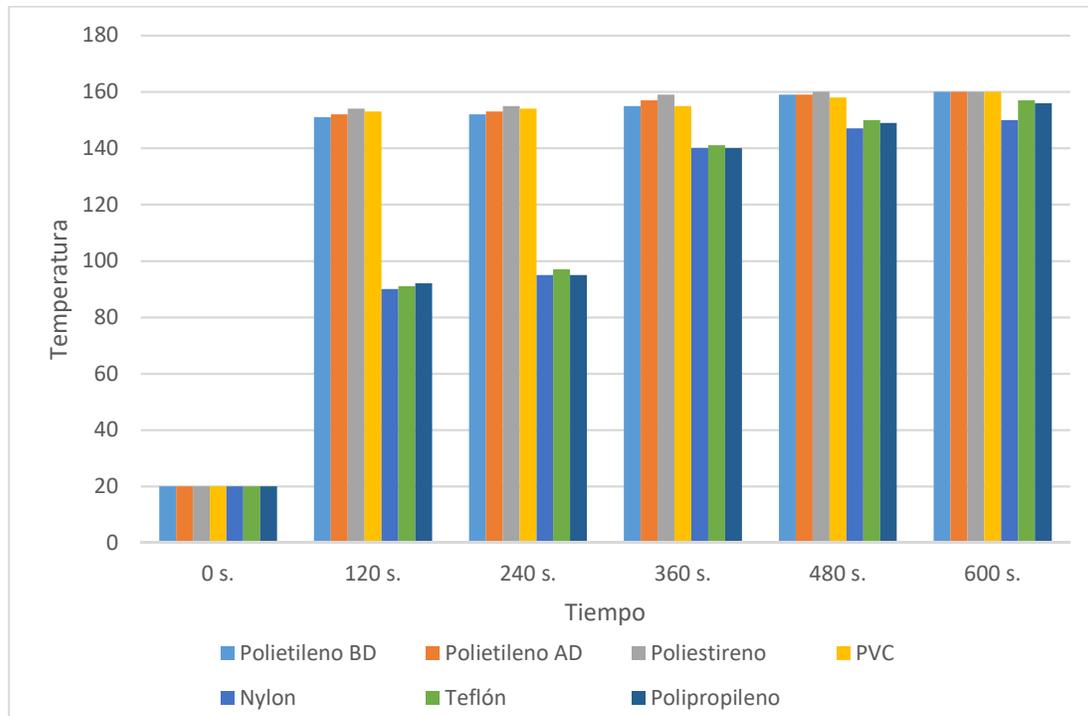


Figura 44. Comparación de Resultados de Simulación Térmica Global

La figura 44 muestra que la simulación arranca desde un punto en el cual la temperatura de constante en todos los materiales y en cada fase de la simulación el Nylon, el Teflón y el Polipropileno son los materiales que muestran más estabilidad térmica durante casi toda la prueba. Ahora bien, en mencionada figura se aprecia el comportamiento de la pieza de forma global, es decir de la pieza en toda su estructura, de este modo es interesante también observar lo que sucede en cada uno de los cuadrantes en que se ha dividido virtualmente la pieza para su estudio. Ya que, como se observó en el marco teórico, la falla más común de un SPB se evidencia en lo que viene a ser el cuadrante número 6, es decir, en la zona en la que tomo contacto directo con el asiento de bujía, la cual es la fuente de calor.

A continuación, un análisis de los resultados de la simulación por cuadrantes, en donde se comparan el comportamiento de cada cuadrante, en cada fracción de tiempo y de cada material.

Los cuadrantes se han identificado en cada figura con la letra “C” acompañado con el número y color correspondiente.

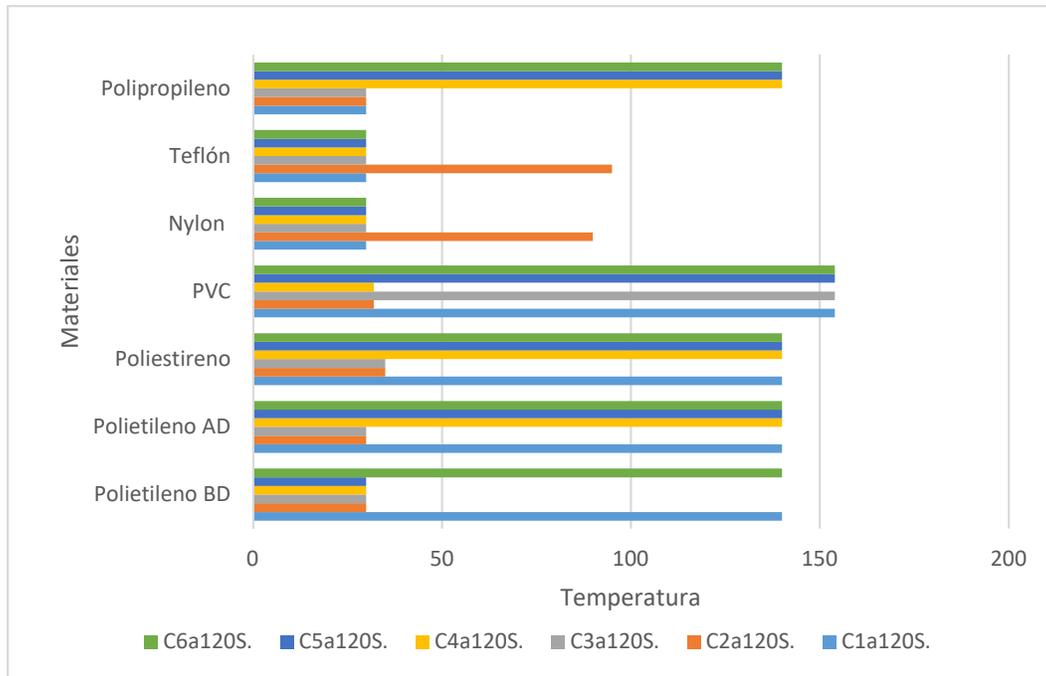


Figura 45. Comparación de resultados de simulación por cuadrantes, a 120 S.

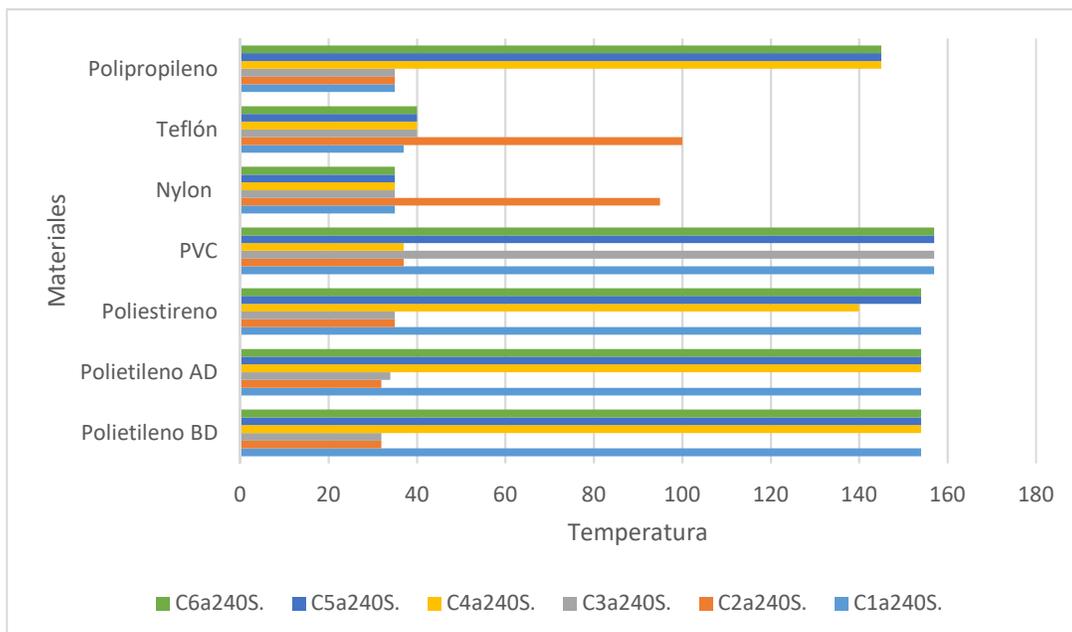


Figura 46. Comparación de resultados de simulación por cuadrantes, a 240 S.

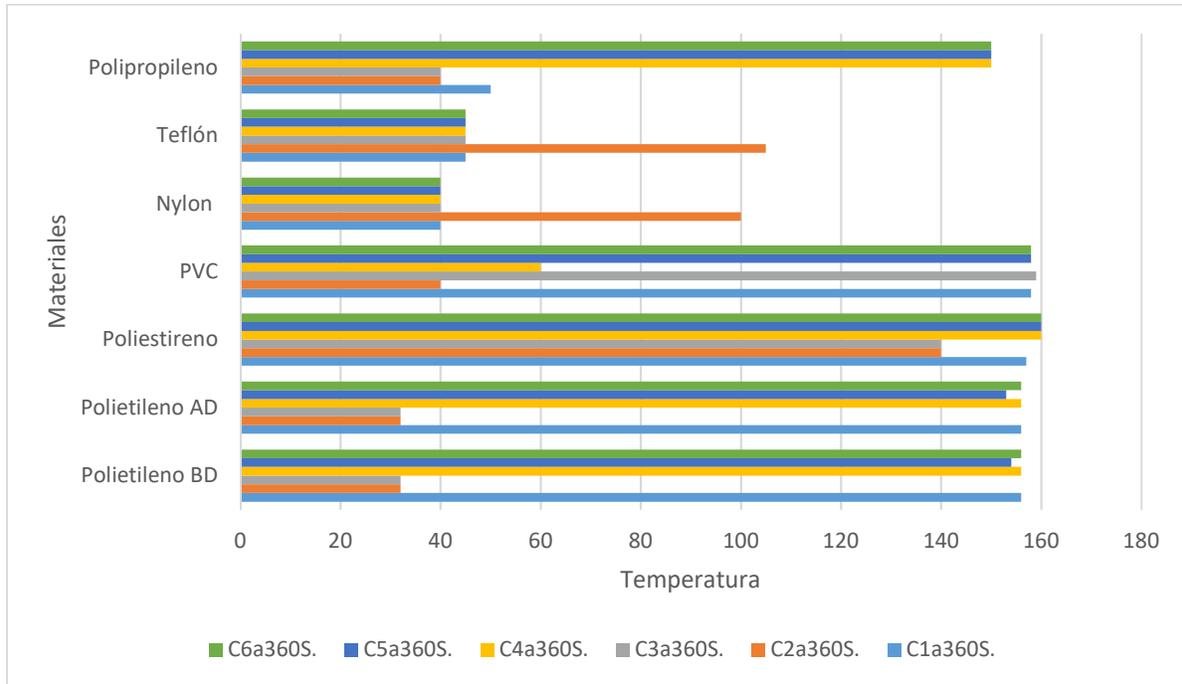


Figura 47. Comparación de resultados de simulación por cuadrantes, a 360 S.

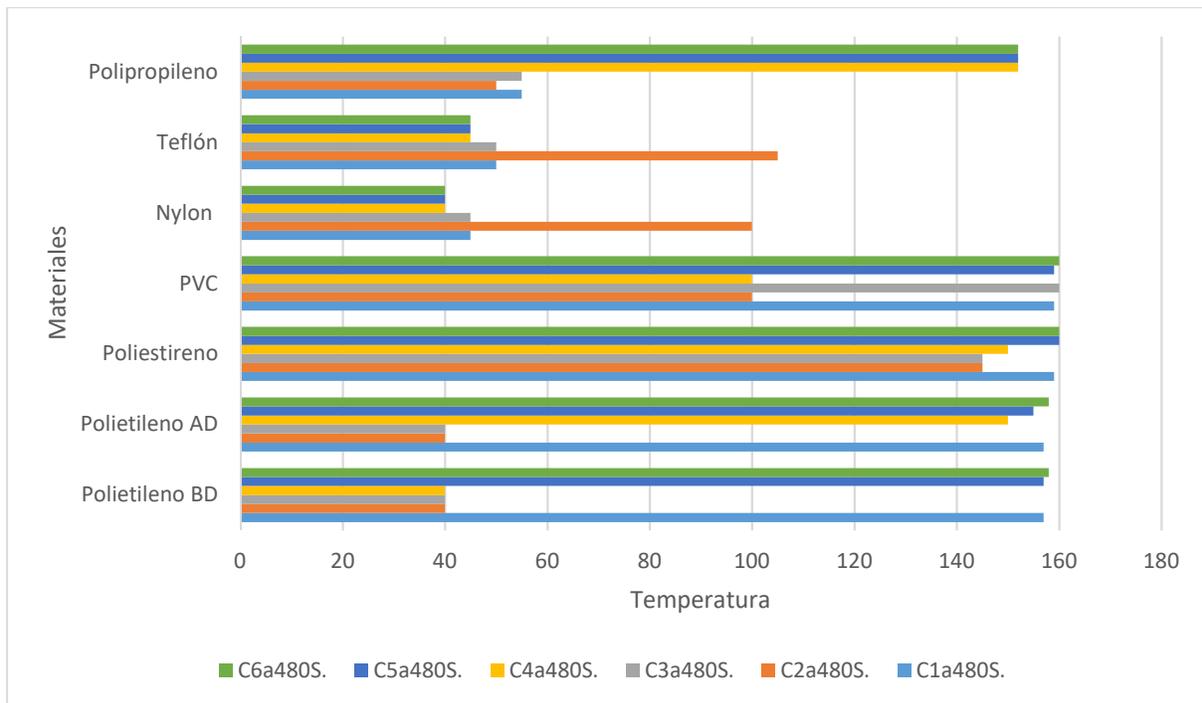


Figura 48. Comparación de resultados de simulación por cuadrantes, a 480 S.

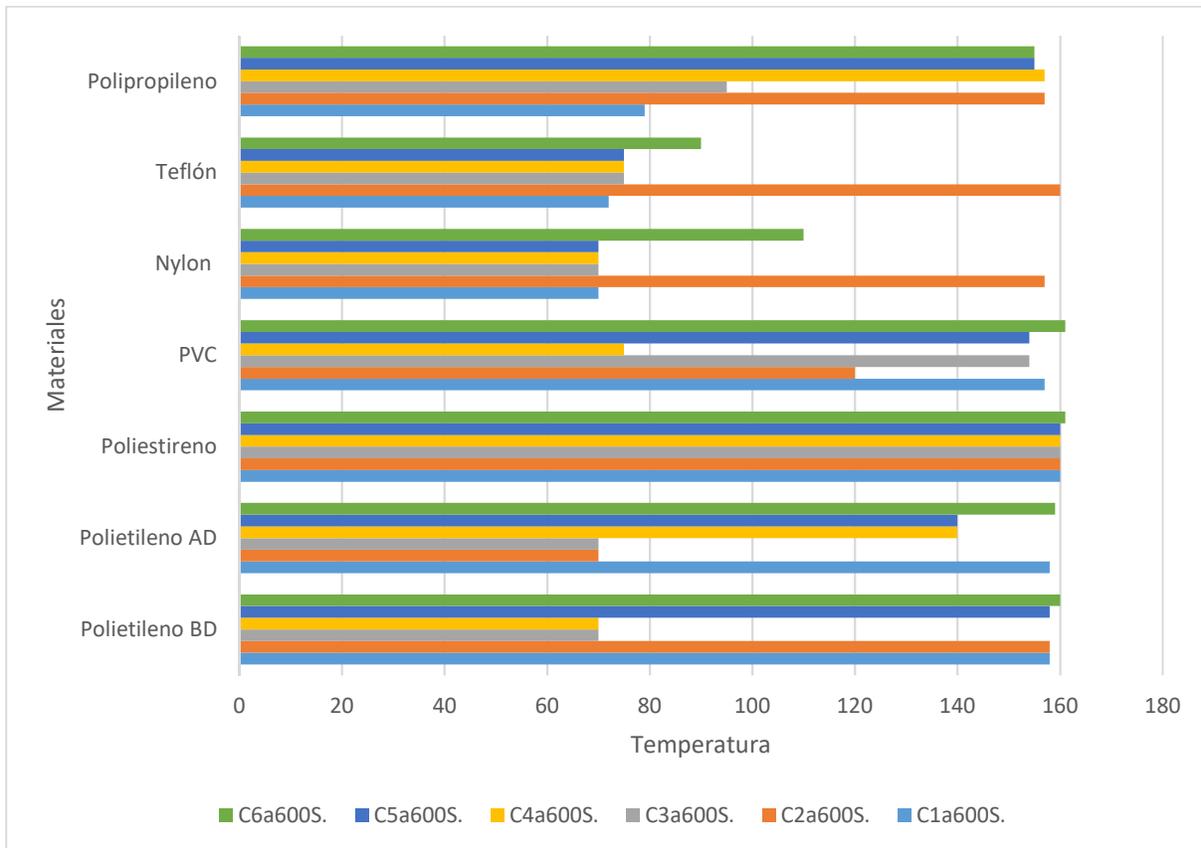


Figura 49. Comparación de resultados de simulación por cuadrantes, a 600 S.

En las figuras 45, 46, 47, 48 y 49, se observa cómo influye el tiempo de encendido del motor, en el incremento de la temperatura en cada uno de los cuadrantes de la pieza. Hasta estabilizarse en los 140°C aproximadamente y mantener este patrón a temperaturas más elevadas. También se observa que, dependiendo del tipo de material, el efecto en cada cuadrante varía, sin embargo en el Nylon y en el Teflón, el incremento térmico en casi todos los cuadrantes es menor que el resto de materiales.

El siguiente y definitivo paso, es la comprobación experimental normada, la cual se denomina Prueba de Degradación Térmica Gravitacional o TGA, los resultados obtenidos en esta prueba en el mundo real, se pueden observar en la figura 40 y en la tabla 60, donde es posible visualizar que los efectos destructivos de la temperatura se empiezan a notar a partir de los 400

grados centígrados aproximadamente, lo que significa, si comparamos estos resultados con los datos de MCDM y de simulación virtual, que el SPB fabricado con nylon va a poder soportar fácilmente las condiciones de trabajo en un motor de combustión interna. Según (Menchaca-Campos, et al., 2011), el nylon por sí solo se comporta como un aislante a cualquier temperatura. Es decir, que sus propiedades aislantes se mantienen normales a la temperatura de trabajo de un motor de combustión interna, la cual está muy debajo de la temperatura en la que se observan alteraciones físicas según el TGA.

Calculando el factor de seguridad con los datos de la experimentación, el nylon ofrece un FC de 2,5 aproximadamente.

Por lo tanto, en base a los resultados obtenidos en las tres fases de la investigación, el material sugerido en esta investigación, como material alternativo para fabricar aislantes de alta tensión SPB, para bobinas de encendido COP es el Nylon.

Conclusiones.

Se determinó que, 4 de los 6 métodos de selección multicriterio utilizados en esta investigación colocan al Nylon como primera opción y los 2 restantes lo colocan como segunda opción, lo que representa el 66.7% de aceptación del Nylon como material idóneo para fabricar SPB, según los MCDM.

Se estableció que, en una selección de materiales con fines aplicativos, es de suma relevancia realizar las tres etapas de selección, las cuales en esta investigación fueron, la aplicación de métodos multicriterio, la simulación virtual y la experimentación, ya que cada una valida a la anterior y permiten establecer límites reales.

Mediante el proceso de simulación virtual, se determinó que en un mismo entorno donde las condiciones de borde son las mismas, el comportamiento térmico de los materiales varía significativamente, ya que los cuadrantes muestran alteraciones de comportamiento según el material, siendo la única constante en el cuadrante 6 el cual suele ser el más afectado incluso en el material original (Silicón) como se observa en la figura 3.

Se determinó que, al ser el Nylon un material de fácil acceso en el Ecuador, construir SPB, es una tarea accesible incluso dentro del campo artesanal, ya que se podría mecanizar el Nylon en un torno tradicional, como se pudo observar en la figura 40.

Se estableció que, para que se cumpla el proceso de aislamiento dieléctrico del SPB construido con Nylon, son determinantes las dimensiones, ya que el Nylon posee un módulo de elasticidad bajo en comparación con el silicón, de este modo para acoplarse a la geometría de la bujía y realizar el aislamiento ideal, necesita tener una holgura mínima, pero de este mismo modo, esta desventaja se convierte en fortaleza ya que de esta manera permite que el material no

se deforme al ser sometido a elevadas temperaturas y presente menor posibilidad de falla por este motivo, cosa que no sucede con el silicón, como se ve en la figura 3.

Debido a que en el mercado ecuatoriano no se encuentran los SPB de manera independiente de las bobinas COP, (esto hace que su valor sea elevado) se determinó que fabricarlos de manera local es la mejor opción, ya que de este modo se reduce el precio de adquisición, se incrementa la demanda laboral local y se reducen importaciones, el precio promedio de fabricación de un SPB de manera artesanal es de \$17 sin IVA, incluyendo el material.

Se determinó que, de los materiales no tradicionales para fabricar SPB estudiados en esta investigación, el material que se sugiere para construir aislantes de alta tensión para bobinas COP es el Nylon.

Recomendaciones.

Debido a que el Nylon es un material de fácil acceso en Ecuador, se recomienda difundir los resultados de esta investigación, a fin de impulsar la industria nacional y fabricar mencionados aislantes con este material, de forma masiva y monitoreada, , a fin de crear un banco de datos a nivel nacional para de este modo poder monitorear las novedades que se presenten con la aplicación de SPB fabricados con Nylon.

Referencias.

- Aly, M. F., Hamza, K. T., & Farag, M. M. (2014). A materials selection procedure for sandwiched beams via parametric optimization with applications in automotive industry. *Materials & Design*, (1980-2015), 56, 219-226.
- Barrera, M. A. (2014). Uso de la correlación de Spearman en un estudio de intervención en fisioterapia. *Revista Movimineto Científico*, 9.
- Biluirbina, L., Alter, L. B., & Liesa, F. (1990). *Materiales no metálicos resistentes a la corrosión (Vol.1 40)*. Marcombo.
- Bosch. (2011). Single fire coil P35-T data sheet. *Bosch Motorsport*, 3.
- Caliskan, H., Kursuncu, B., Kurbanglu, C., & Güven, S. (2013). Material selection for the tool holder working under hard milling conditions using different multi criteria decision making methods. *Materials & Design*, 45, 473-479.
- Chérrez-Troya, M., Martínez-Gómez, J., Peralta-Zurita, D., & Llanes-Cedeño, E. (2018). Métodos multicriterio aplicados en la selección de un material para discos de freno. *Ingenius*, 12.
- Company, D. (2007). Dow LDPE 132G. *Dow products*, 4.
- Company, S. S. (2008). Ignition Accesorioes. *Ignition accesorioes*, 34.
- Estrada García, J. M. (2002). Asignación de pesos no subjetivos para la evaluación. *D. D. Federal*, 54.
- Ferrer J., M. I., & Salas, J. M. (2013). Dimensionado de un sistema térmico solar mediante simulación y su validación energética; Sizing of a solar thermal system by means of simulation and their energy validation. *Ingeniería Energética*, 12.
- Front Pérez, M., & Hernández Arias, F. L. (2011). Estudio de los principales proceso que originan emisiones de gases a la atmósfera. *Ciencias Holguín*, 10.
- Funk, W., & Eiler, T. L. (2003). Apparatus and method for combustion initiation. *United States Patent*, 19.
- Girbal, P., & Amalvy, J. I. (2016). Desarrollo y evaluación de electrolitos poliméricos con aplicaciones en baterías de litio. *In Investigación Joven (Vol. 3)*.
- Girubha, R. J., & Vinodth, S. (2011). Application of fuzzy VIKOR and enviromental impact analysis for material selection of an automotive component. *Materials and Design*, 9.
- Goodfellow. (5 de 10 de 2018). Obtenido de http://www.goodfellow.com/catalogue/GFCat4I.php?ewd_token=7DKGfX1ZAZsn5kSKwj3b7NGmoosIkD&n=IZsegnMjf5OHYrXe7qaosywEUNHNUx&ewd_urlNo=GFCatSe aRed6&Catite=ET317920&CatSearNum=2

- Goodfellow. (5 de 10 de 2018). *Todos los materiales para Investigación Científica y Fabricación*. Obtenido de <http://www.goodfellow.com/S/Polietileno-Alta-Densidad.html>
- Goodfellow. (12 de 10 de 2018). *Todos los materiales para Investigación Científica y Fabricación*. Obtenido de http://www.goodfellow.com/catalogue/GFCat4I.php?ewd_token=nvvUTTKvaKBYtsX0i3sTBaipEKV6Cw&n=6iVfKinofvGemPTuDKCkLgqRPhYwc7&ewd_urlNo=GFCatSeaRed6&Catite=AM303020&CatSearNum=3
- Goodfellow. (12 de 10 de 2018). *Todos los materiales para Investigación Científica y Fabricación*. Obtenido de http://www.goodfellow.com/catalogue/GFCat4I.php?ewd_token=NzZwHIIJ9eS4S947BfBeJHYyhHscTy&n=05L45XOGI08vzQBYMbnTV29UmFaxw3&ewd_urlNo=GFCat4B11&Catite=CV313025&CatSearNum=4
- Goodfellow. (12 de 10 de 2018). *Todos los materiales para Investigación Científica y Fabricación*. Obtenido de http://www.goodfellow.com/catalogue/GFCat4I.php?ewd_token=zqlbgOkCkYQOSsznB3F5jT6xNHLfIH&n=KkcNSMeBTildbIbZCM97KaxelvBN43&ewd_urlNo=GFCat4B11&Catite=FP367920&CatSearNum=5
- Goodfellow. (12 de 10 de 2018). *Todos los materiales para la Investigación Científica y Fabricación*. Obtenido de http://www.goodfellow.com/catalogue/GFCat4I.php?ewd_token=5734oEKyBq5iQcXN7FITRkUEIb2fu1&n=vxILvSyQJuQKXS2ITnFVZ4Jyz51f02&ewd_urlNo=GFCat411&Catite=ST313200&CatSearNum=2
- Goodfellow. (12 de 10 de 2018). *Todos los materiales para Investigación Científica y Fabricación*. Obtenido de http://www.goodfellow.com/catalogue/GFCat4I.php?ewd_token=aIrZNW9ubCgxkXL94BBdO1ZW2TTDFt&n=Yy6V4hFVBx7y6U7nuLv0tSdGe1Qql&ewd_urlNo=GFCat4B11&Catite=PP303300&CatSearNum=6
- Guerrero Salazar, C. A., & González González, V. A. (2002). Algunas aplicaciones de los plásticos en las industrias del empaque y automotriz. *Ingenierías*, 5(17), 40-45.
- Instituto Nacional de Higiene. (2016). Cloruro de Polivinilo (PVC) Fracción respirable. *Docuemtacion Límites Exposició Profesional*, 9.
- JQ, I. (20 de 07 de 2016). *Plásticos de ingeniería*. Obtenido de <http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/Poliamida6/Poliam6/dtecnicos.htm>
- Khorshidi, R., & Hassani, A. (2013). Comparative analysis between TOPSIS and PSI methods of materials selection to achive a desirable combination of strength and workability in Al/SiC composite. *Materials and Design*, 12.
- Liao, H., & Xu, Z. (2014). Multi-criteria decision making with intuitionistic fuzzy PROMETHEE. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 27(4), 1703-1717.

- Liu, H. C., Liu, L., & Wu, J. (2013). Material selection using an interval 2-tuple linguistic VIKOR method considering subjective and objective weights. *Materials and Design (1980-2015)*, 52, 158-167.
- M., M. (1 de junio de 2011). *Tecnología de los plásticos*. Obtenido de <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/polietileno-de-alta-densidad.html>
- Martínez - Gómez, J. (2018). Material selection for multi-tubular fixed bed reactor Fischer-Tropsch reactor. *Journal of Mathematics in Operational Research*, 29.
- Martínez, J., Vaca, D., Orozco, M., Montero, A., & Carrión, D. (2015). Aplicación de métodos multicriterio para la selección de materiales para menaje de cocinas de inducción. *Revista Técnica Energía*, 11, 116.
- Menchaca-Campos, C., Hernández-del Fabbro, S., Sarmiento-Bustos, E., Cruz-Silva, R., García-Sánchez, M. A., Bahena, D., & Uruchurtu, J. (2011). Análisis de ruido electro químico de materiales híbridos nylon/titanio. *ECS Sociedad Mexicana de electroquímica*, 10.
- Ministerio de Industrias y Productividad del Ecuador. (19 de julio de 2018). *Catálogo de productos nacionales*. Obtenido de <https://www.industrias.gob.ec/13573-2/>
- Ministerios de Industrias, E. (2011). Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 171. *Secretaría de la Calidad*, 6.
- Montoliu, F. C. (1993). Clasificaciones de los materiales. *Revista de la Real Academia de Medicina de Catalunya.*, 8(3), 139-151.
- Muja Rosas, R. M., Genesca, M. M., & Juan, X. R. (2013). Aplicaciones dieléctricas del poliestireno (PS) cargado con neumáticos fuera de uso (GTR). *DYNA*, 10.
- Opricovic, S., & Tzeng, G.-H. (2002). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 11.
- Peng, A.-H., & Xiao, X.-M. (2012). Material selection using PROMETHEE combined with analytic network process under hybrid environment. *Materials and Design*, 10.
- Rao, R. V. (2008). A decision making methodology for material selection using an improved compromise ranking method. *Materials & Design*, 29(10), 1949-1954.
- Salazar Loor, R. B., Martínez Gómez, J., & Rocha, J. C. (2018). Selección de materiales mediante métodos multicriterio aplicado a la parte lateral de un aestructura autportante para vehículos livianos, verificación mediante simulación FEM. *UISEK*, 120.
- SENAE, S. N. (2018). *Importaciones de bobinas de encendido hasta febrero 2018*.
- Skinner, A. A., & Lovers, H. O. (2013). Ignition Coil. *United States Patent*, 7.
- Standard. (2018). *Standard Motor Products*. Obtenido de <http://www.standardbrand.com/es/products/ignition-components/igniton-coil-on-plug-cop/>

Standardization, I. O. (2002). ISO 3808. *When the world agrees*, 2.

Tecnimacor. (2018). *Técnicas y Materiales Adherentes*. Obtenido de <https://www.tecnimacor.es/caracteristicas-del-teflon/>

Valero, M. F., & Díaz, L. E. (2016). Bioadhesivos tipo poliuretano obtenidos a partir polioles derivados de aceite de higuera y almidón modificado por glucosilación con etilenglicol candidatos en aplicaciones biomédicas. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 36(1), 9-19.

Anexos.

Características de los Materiales:

Silconset (Material Original)

Technical Data for	Silicone Elastomer	Rod
Chemical Resistance		
Acids - concentrated		Good-Poor
Acids - dilute		Good-Poor
Alcohols		Good-Fair
Alkalis		Good-Fair
Aromatic hydrocarbons		Poor
Greases and Oils		Good-Poor
Halogenated Hydrocarbons		Poor
Halogens		Poor
Ketones		Poor
Electrical Properties		
Volume resistivity (Ohmcm)		10^{18} - 10^{210}
Mechanical Properties		
Elongation at break (%)	200-800	
Hardness - Rockwell	60 degrees Shore A	
Tensile strength (MPa)	6.5	
Physical Properties		
Density (g cm ⁻³)		1.1 - 1.5
Radiation resistance		Poor
Thermal Properties		
Coefficient of thermal expansion ($\times 10^{-6}$ K ⁻¹)		250-300
Lower working temperature (C)		-70 to -50
Specific heat (J K ⁻¹ kg ⁻¹)		1300 - 1500
Thermal conductivity @23C (W m ⁻¹ K ⁻¹)		0.22
Upper working temperature (C)		200-260

Materiales alternativos:

Polietileno baja densidad

Technical Data for

Polyethylene - Low Density Rod

Chemical Resistance		
Acids - concentrated		Good-Fair
Acids - dilute		Good
Alcohols		Good
Alkalis		Good
Aromatic hydrocarbons		Fair-Poor
Greases and Oils		Good-Fair
Halogenated Hydrocarbons		Fair-Poor
Halogens		Fair-Poor
Ketones		Good-Fair
Electrical Properties		
Dielectric constant @1MHz		2.2-2.35
Dielectric strength (kV mm ⁻¹)		27
Dissipation factor @ 1MHz		1-10 x 10 ⁻⁴
Surface resistivity (Ohm/sq)		10 ¹³
Volume resistivity (Ohmcm)		10 ¹⁵ -10 ¹⁸
Mechanical Properties		
Elongation at break (%)	400	
Hardness - Rockwell	D41-46 - Shore	
Izod impact strength (J m ⁻¹)	>1000	
Tensile modulus (GPa)	0.1-0.3	
Tensile strength (MPa)	5-25	
Physical Properties		
Density (g cm ⁻³)		0.92
Flammability		HB
Limiting oxygen index (%)		17
Radiation resistance		Fair
Refractive index		1.51
Resistance to Ultra-violet		Poor
Water absorption - over 24 hours (%)		<0.015

Thermal Properties	
Coefficient of thermal expansion ($\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)	100-200
Heat-deflection temperature - 0.45MPa (C)	50
Heat-deflection temperature - 1.8MPa (C)	35
Lower working temperature (C)	-60
Specific heat ($\text{J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$)	1900-2300
Thermal conductivity @23C ($\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	0.33
Upper working temperature (C)	50-90

Polietileno alta densidad

Technical Data for	Polyethylene - High density	Rod
Chemical Resistance		
Acids - concentrated		Good-Fair
Acids - dilute		Good
Alcohols		Good
Alkalis		Good
Aromatic hydrocarbons		Fair
Greases and Oils		Good-Fair
Halogenated Hydrocarbons		Fair-Poor
Halogens		Fair-Poor
Ketones		Good-Fair
Electrical Properties		
Dielectric constant @1MHz		2.3-2.4
Dielectric strength (kV mm^{-1})		22
Dissipation factor @ 1MHz		$1-10 \times 10^{-4}$
Surface resistivity (Ohm/sq)		10^{13}
Volume resistivity (Ohmcm)		$10^{15}-10^{18}$

Mechanical Properties		
Coefficient of friction	0.29	
Hardness - Rockwell	D60-73 - Shore	
Izod impact strength (J m ⁻¹)	20-210	
Poisson's ratio	0.46	
Tensile modulus (GPa)	0.5-1.2	
Tensile strength (MPa)	15-40	
Physical Properties		
Density (g cm ⁻³)		0.95
Flammability		HB
Limiting oxygen index (%)		17
Radiation resistance		Fair
Refractive index		1.54
Resistance to Ultra-violet		Poor
Water absorption - over 24 hours (%)		<0.01
Thermal Properties		
Coefficient of thermal expansion ($\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)		100-200
Heat-deflection temperature - 0.45MPa (C)		75
Heat-deflection temperature - 1.8MPa (C)		46
Specific heat (J K ⁻¹ kg ⁻¹)		1900
Thermal conductivity @23C (W m ⁻¹ K ⁻¹)		0.45-0.52
Upper working temperature (C)		55-120

Poliestireno

Technical Data for

Polystyrene - Cross-linked

Rod

Chemical Resistance		
Acids - concentrated		Fair-Poor
Acids - dilute		Good(-Fair?)
Alcohols		Good(-Fair?)
Alkalis		Good-Fair
Aromatic hydrocarbons		Poor
Greases and Oils		Fair-Poor
Halogenated Hydrocarbons		Poor
Halogens		Poor
Ketones		Poor
Electrical Properties		
Dielectric constant @1MHz		2.5
Dielectric strength (kV mm ⁻¹)		27-47
Dissipation factor @ 1MHz		0.0002
Surface resistivity (Ohm/sq)		>10 ¹⁵
Volume resistivity (Ohmcm)		>10 ¹⁵
Mechanical Properties		
Abrasive resistance - ASTM D1044 (mg/1000 cycles)		60-100
Elongation at break (%)		3-5
Hardness - Rockwell		R110-120
Tensile modulus (GPa)		1.65
Tensile strength (MPa)		55-70
Physical Properties		
Density (g cm ⁻³)		1.05
Flammability		HB
Radiation resistance		Good
Refractive index		1.59
Water absorption - over 24 hours (%)		0.02-0.03
Thermal Properties		
Coefficient of thermal expansion (×10 ⁻⁶ K ⁻¹)		70-90
Thermal conductivity @23C (W m ⁻¹ K ⁻¹)		0.17
Upper working temperature (C)		93

PVC

Technical Data for

Polyvinylchloride - Unplasticized

Rod

Chemical Resistance		
Acids - concentrated		Good-Poor
Acids - dilute		Good
Alcohols		Good
Alkalis		Good
Aromatic hydrocarbons		Poor
Greases and Oils		Good
Halogenated Hydrocarbons		Fair-Poor
Halogens		Fair
Ketones		Poor
Electrical Properties		
Dielectric constant @1MHz		2.7-3.1
Dielectric strength (kV mm ⁻¹)		14
Dissipation factor @ 1kHz		0.025
Volume resistivity (Ohmcm)		10 ¹⁶
Mechanical Properties		
Elongation at break (%)		60
Hardness - Rockwell		R106-120
Izod impact strength (J m ⁻¹)		20-1000
Tensile modulus (GPa)		2.5-4.0
Tensile strength (MPa)		25-70
Physical Properties		
Density (g cm ⁻³)		1.4
Flammability		V0
Limiting oxygen index (%)		42
Radiation resistance		Fair
Refractive index		1.54
Resistance to Ultra-violet		Good
Water absorption - over 24 hours (%)		0.03-0.4

Thermal Properties	
Coefficient of thermal expansion ($\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)	75-100
Heat-deflection temperature - 0.45MPa (C)	70
Heat-deflection temperature - 1.8MPa (C)	67
Lower working temperature (C)	-30
Specific heat ($\text{J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$)	1000-1500
Thermal conductivity @23C ($\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	0.12-0.25
Upper working temperature (C)	50-75

Nylon

Technical Data for

Polyamide - Nylon 6 Sheet

Chemical Resistance	
Acids - concentrated	Poor
Acids - dilute	Poor
Alcohols	Good
Alkalis	Good-Fair
Aromatic hydrocarbons	Good
Greases and Oils	Good
Halogenated Hydrocarbons	Good-Poor
Halogens	Poor
Ketones	Good
Electrical Properties	
Dielectric constant @1MHz	3.6
Dielectric strength (kV mm^{-1})	25
Dissipation factor @ 1kHz	0.2
Surface resistivity (Ohm/sq)	5×10^{10}
Volume resistivity (Ohmcm)	5×10^{12}

Mechanical Properties	
Abrasive resistance - ASTM D1044 (mg/1000 cycles)	5
Coefficient of friction	0.2-0.3
Hardness - Rockwell	M82
Izod impact strength (J m ⁻¹)	30-250
Poisson's ratio	0.39
Tensile modulus (GPa)	2.6-3.0
Tensile strength (MPa)	78
Physical Properties	
Density (g cm ⁻³)	1.13
Flammability	HB
Limiting oxygen index (%)	25
Radiation resistance	Fair
Refractive index	1.53
Resistance to Ultra-violet	Poor
Water absorption - equilibrium (%)	>8
Water absorption - over 24 hours (%)	2.7
Thermal Properties	
Coefficient of thermal expansion (x10 ⁻⁶ K ⁻¹)	95
Heat-deflection temperature - 0.45MPa (C)	200
Heat-deflection temperature - 1.8MPa (C)	80
Lower working temperature (C)	-40
Specific heat (J K ⁻¹ kg ⁻¹)	1700
Thermal conductivity @23C (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.24-0.28
Upper working temperature (C)	80-160

Teflón

Technical Data for	Ethylene-Tetrafluoroethylene Copolymer	Rod
Chemical Resistance		
Acids - concentrated		Good
Acids - dilute		Good
Alcohols		Good
Alkalis		Good
Aromatic hydrocarbons		Good
Greases and Oils		Good
Halogenated Hydrocarbons		Good
Halogens		Good
Ketones		Good
Electrical Properties		
Dielectric constant @1MHz		2.6
Dielectric strength (kV mm ⁻¹)		25
Dissipation factor @ 1MHz		0.0005
Surface resistivity (Ohm/sq)		>10 ¹⁴
Volume resistivity (Ohmcm)		10 ¹⁶
Mechanical Properties		
Elongation at break (%)		250-350
Hardness - Rockwell		R50
Izod impact strength (J m ⁻¹)		>1000
Tensile modulus (GPa)		0.8
Tensile strength (MPa)		28-48
Physical Properties		
Density (g cm ⁻³)		1.7
Flammability		V0
Limiting oxygen index (%)		30-32
Radiation resistance		Fair
Refractive index		1.403
Resistance to Ultra-violet		Excellent
Water absorption (%)		0-0.03

Thermal Properties	
Coefficient of thermal expansion ($\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)	90-170
Heat-deflection temperature - 0.45MPa (C)	105
Heat-deflection temperature - 1.8MPa (C)	70
Lower working temperature (C)	<-100
Specific heat ($\text{J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$)	1900-2000
Thermal conductivity @23C ($\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	0.24
Upper working temperature (C)	150-160

Polipropileno

Technical Data for

Polypropylene Rod

Chemical Resistance	
Acids - concentrated	Good-Fair
Acids - dilute	Good-Fair
Alcohols	Good
Alkalis	Good
Aromatic hydrocarbons	Fair
Greases and Oils	Good-Fair
Halogenated Hydrocarbons	Good-Poor
Halogens	Poor
Ketones	Good
Electrical Properties	
Dielectric constant @1MHz	2.2-2.6
Dielectric strength (kV mm^{-1})	30-40
Dissipation factor @ 1MHz	0.0003 - 0.0005
Surface resistivity (Ohm/sq)	10^{13}
Volume resistivity (Ohmcm)	10^{16} - 10^{18}

Mechanical Properties	
Abrasive resistance - ASTM D1044 (mg/1000 cycles)	13-16
Coefficient of friction	0.1-0.3
Elongation at break (%)	150-300, for biax film >50
Hardness - Rockwell	R80-100
Izod impact strength (J m ⁻¹)	20-100
Tensile modulus (GPa)	0.9-1.5, for biax film 2.2-4.2,
Tensile strength (MPa)	25-40, for biax film 130-300,
Physical Properties	
Density (g cm ⁻³)	0.9
Flammability	HB
Limiting oxygen index (%)	18
Radiation resistance	Fair
Refractive index	1.49
Resistance to Ultra-violet	Poor
Water absorption - equilibrium (%)	0.03

Thermal Properties	
Coefficient of thermal expansion ($\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)	100-180
Heat-deflection temperature - 0.45MPa (C)	100-105
Heat-deflection temperature - 1.8MPa (C)	60-65
Lower working temperature (C)	-10 to -60
Specific heat (J K ⁻¹ kg ⁻¹)	1700 - 1900
Thermal conductivity @23C (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.1-0.22
Upper working temperature (C)	90-120



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIA DE ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA (DECAB)
CENTRO DE INVESTIGACIONES APLICADAS A POLÍMEROS
C I A P

Campus Politécnico José Rubén Cevallos Ricaurte, Direc. Ladrón de Guevara E1 1-253
 Personas de Contacto: Tita, Elizabeth Venegas
 Telfonos: 2976300 ext. 2122, 2120, 2121 E-mail: elizabeth.venegas@epn.edu.ec / tyvenegas4@yahoo.es
 Quito- Ecuador



INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS O TRABAJO

ORDEN: DC-OT0103-2018

IDENTIFICACIÓN DE LA(S) MUESTRA(S) Y SERVICIO (S)

No. muestra	ID Muestra	Descripción de muestra	Servicio/Analito	Laboratorio
2	DC-MU4751	SPB AISLANTE DE BOBINA	TGA	CIAP

IDENTIFICACIÓN DE ORIGEN DE LA MUESTRA "SPB AISLANTE DE BOBINA"

1. Análisis termogravimétrico (TGA)

Metodología:

Se procedió de acuerdo con lo estipulado en la norma ASTM D3850-12 "*Rapid Thermal Degradation of Solid Electrical Insulating Materials By Thermogravimetric Method (TGA)*"

Equipos:

- ✓ Termobalanza

Condiciones del ensayo:

- ✓ Velocidad de calentamiento: 10° C/min
- ✓ Gas: Nitrógeno
- ✓ Flujo de gas: 50 ml/min
- ✓ Crisol: Platino



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIA DE ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA (DECAB)
CENTRO DE INVESTIGACIONES APLICADAS A POLIMEROS
C I A P

Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte, Direc.: Ladrón de Guevara E11-253

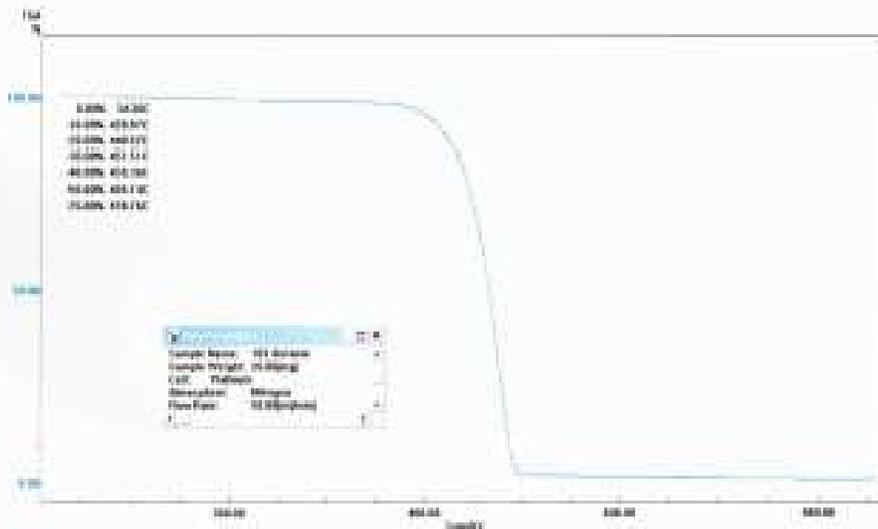
Personas de Contacto: Tita: Elizabeth Venegas

Tropical: 2978300 ext. 2122, 2120, 2121 E-mail: elizabeth.venegas@con.edu.ec / lvvenegas4@yahoo.es

Quito- Ecuador



Resultados:



Pérdida de peso (%)	Temperatura (°C)
10	420,9
20	440,6
30	451,5
40	459,4
50	465,7
75	478,8

PROFESIONAL RESPONSABLE
DEL ANÁLISIS

Dr. Iván Chango V

AUTORIDAD AUTENTICADORA
(DIRECTOR CIAP)

Ing. Francisco Quiroz



Figura 50. Peso de un SPB original Kg.



Figura 51. Peso de un SPB fabricado con Nylon Kg.

Windows edition

Windows 10 Home
© 2018 Microsoft Corporation. All rights reserved.



System

Processor:	Intel(R) Celeron(R) CPU N2840 @ 2.16GHz 2.16 GHz
Installed memory (RAM):	4.00 GB (3.89 GB usable)
System type:	64-bit Operating System, x64-based processor
Pen and Touch:	No Pen or Touch Input is available for this Display



[Support Information](#)

Computer name, domain, and workgroup settings

Computer name:	EduardoPC	Change settings
Full computer name:	EduardoPC	
Computer description:		
Workgroup:	WORKGROUP	

Windows activation

Windows is activated [Read the Microsoft Software License Terms](#)

Product ID: 00326-10000-00000-AA022

[Change product key](#)

Figura 52. Características de la Computadora utilizada en todo el proceso de tesis