

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería Mecánica



Metodologías para la caracterización de propiedades  
físicas y  
termodinámicas de la cera de abeja *Apis mellifera* en  
Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Edgar Rodrigo  
Castellanos Padilla para optar al grado académico de  
Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala,

2020



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería Mecánica



Caracterización de propiedades físicas y termodinámicas  
de la cera de abeja *Apis mellifera* en Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Edgar Rodrigo  
Castellanos Padilla para optar al grado académico de  
Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala,

2020

Vo.Bo.



F.

---

Víctor Hugo Ayerdi Bardales

Tribunal examinador:



F.

---

Víctor Hugo Ayerdi Bardales

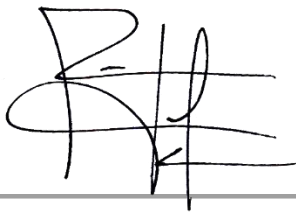
F.



---

Andrés Rodrigo Viau Najarro

F.



---

Rony José Herrarte Estevez

Fecha de aprobación del examen de graduación:

(Guatemala, 9 de diciembre de 2020)

## Contenido

Lista de figuras .....	VI
Lista de Tablas.....	V
Resumen.....	V
Abstract.....	VI
I. Introducción.....	1
II. Justificación.....	2
III. Objetivos.....	1
IV. Marco teórico.....	2
A. Abejas y apicultura en Guatemala.....	2
B. Antecedentes de investigaciones en Guatemala y otros países.....	2
C. Utilización de combustibles sólidos y características.....	7
D. Propiedades físicas y termodinámicas y equipos para realizar mediciones.....	13
V. Marco metodológico.....	18
A. Densidad de la cera de abeja.....	18
B. Rango de temperatura de fusión de la cera de abeja.....	28
C. Viscosidad en estado líquido de la cera de abeja.....	31
D. Poder calorífico Ácido Benzoico.....	39
E. Capacidad calorífica de la cera de abeja.....	54
VI. Resultados.....	64
VII. Discusión de resultados.....	66
VIII. Conclusiones.....	66
IX. Recomendaciones.....	69
X. Bibliografía.....	71
XI. Anexos.....	74

## Lista de figuras

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 1: Capacidad calorífica de muestras.....	5
Figura 2: Propiedades térmicas de ceras de abeja usando un calorímetro diferencial de escaneo. ....	6
Figura 3: Sistema de un cohete líquido bi-propulsante. ....	8
Figura 4: Sistema de un cohete híbrido. ....	9
Figura 5: Diseño de combustible sólido de puerto único versus multi-puerto. ....	9
Figura 6: Flujo combustión capa límite.....	10
Figura 7: Tensión superficial y viscosidad en función de la temperatura. ...	11
Figura 8: Capa líquida formada en el combustible sólido.....	13
Figura 9: Comparación tasa de regresión.....	17
Figura 10: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la primera muestra de ácido benzoico. ....	49
Figura 11: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la primera muestra de ácido benzoico. ....	50
Figura 12: Representación del termograma obtenido en el proceso de combustión. ....	51
Figura 13: Cambio de temperatura para el termograma. ....	52
Figura 14: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la segunda muestra de ácido benzoico. ....	74
Figura 15: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la segunda muestra de ácido benzoico. ....	75
Figura 16: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la tercera muestra de ácido benzoico. ....	76
Figura 17: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la tercera muestra de ácido benzoico. ....	76
Figura 18: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la primera muestra de cera de abeja A. ....	77
Figura 19: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la primera muestra de la cera de abeja A.....	77
Figura 20: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la segunda muestra de cera de abeja A.....	78
Figura 21: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la segunda muestra de la cera de abeja A. ....	79

<b>Figura 22: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la tercera muestra de cera de abeja A.....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 23: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la tercera muestra de la cera de abeja A.....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 24: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la cuarta muestra de cera de abeja A.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 25: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la cuarta muestra de la cera de abeja A.....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 26: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la quinta muestra de cera de abeja A.....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 27: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la quinta muestra de la cera de abeja A. ....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 28: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la primera muestra de cera de abeja B.....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 29: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la primera muestra de la cera de abeja B.....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 30. Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la segunda muestra de cera de abeja B.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 31: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la segunda muestra de la cera de abeja B. ....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 32: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la tercera muestra de cera de abeja B.....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 33: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la tercera muestra de la cera de abeja B.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 34: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la cuarta muestra de cera de abeja B.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 35: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la cuarta muestra de la cera de abeja B.....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 36: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la quinta muestra de cera de abeja B.....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 37: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la quinta muestra de la cera de abeja B. ....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 38: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la primera muestra de cera de abeja C. ....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 39: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la primera muestra de la cera de abeja C.....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 40: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la segunda muestra de cera de abeja C.....</b>	<b>91</b>

<b>Figura 41: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la segunda muestra de la cera de abeja C.....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 42: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la tercera muestra de cera de abeja C. ....</b>	<b>93</b>
<b>Figura 43: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la tercera muestra de la cera de abeja C.....</b>	<b>93</b>
<b>Figura 44: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la cuarta muestra de cera de abeja C. ....</b>	<b>94</b>
<b>Figura 45: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la cuarta muestra de la cera de abeja C.....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 46: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la quinta muestra de cera de abeja C. ....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 47: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la quinta muestra de la cera de abeja C.....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 48: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la primera muestra de cera de abeja D.....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 49: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la primera muestra de la cera de abeja D. ....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 50: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la segunda muestra de cera de abeja D. ....</b>	<b>98</b>
<b>Figura 51: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la segunda muestra de la cera de abeja D. ....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 52: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la tercera muestra de cera de abeja D.....</b>	<b>100</b>
<b>Figura 53: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la tercera muestra de la cera de abeja D. ....</b>	<b>100</b>
<b>Figura 54: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la cuarta muestra de cera de abeja D.....</b>	<b>101</b>
<b>Figura 55: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la cuarta muestra de la cera de abeja D. ....</b>	<b>101</b>
<b>Figura 56: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la quinta muestra de cera de abeja D. ....</b>	<b>102</b>
<b>Figura 57: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la quinta muestra de la cera de abeja D. ....</b>	<b>102</b>
<b>Figura 58: Ejemplo para encontrar el tiempo inicial.....</b>	<b>3</b>
<b>Figura 59: Ejemplo para encontrar el tiempo final. ....</b>	<b>3</b>
<b>Figura 60: Ejemplo para encontrar el tiempo d. ....</b>	<b>4</b>

## Lista de tablas

Tabla	Página
Tabla 1: Propiedades de ceras de parafina .....	11
Tabla 2: Abreviaciones metodología de la densidad de la cera de abeja.....	19
Tabla 3: Peso del picnómetro vacío. ....	19
Tabla 4: Evaluación bajo el estándar ASTM D854 – 02.....	19
Tabla 5: Procedimiento para pruebas con agua destilada ASTM D70 – 03..	20
Tabla 6: Diferencia entre el peso promedio del viscosímetro y peso antes de cada prueba. ....	22
Tabla 7: Peso del volumen de agua con el viscosímetro y la temperatura del agua. ....	22
Tabla 8: Procedimiento para pruebas con cera de abeja ASTM D70 – 03. ...	23
Tabla 9: Masa de la cera de abeja en el picnómetro y la temperatura prueba de densidad.....	25
Tabla 10: Masa de la cera de abeja y la temperatura prueba densidad. ....	26
Tabla 11: Densidad de la cera de abeja.....	27
Tabla 12: Abreviaciones metodología rango de temperatura de fusión. ....	28
Tabla 13: Lista de equipo a utilizar rango temperatura de fusión.....	28
Tabla 14: Pasos a seguir para el montaje y realización de las pruebas rango de temperatura de fusión. ....	29
Tabla 15: Temperatura inicial y final de la cera en el rango de fusión. ....	30
Tabla 16: Ensamblaje del soporte y cabezal viscosímetro Brookfield. ....	31
Tabla 17: Inicio del viscosímetro Brookfield.....	32
Tabla 18: Preparación de las muestras de cera para la prueba de viscosidad. ....	33
Tabla 19: Procedimiento a seguir para la realización de las pruebas de viscosidad con cera de abeja.....	34
Tabla 20: Resultados dados por el Viscosímetro A 60°C. ....	37
Tabla 21: Resultados dados por el Viscosímetro A 70°C. ....	38
Tabla 22: Resultados dados por el Viscosímetro A 80°C. ....	38
Tabla 23: Peso de las pastillas de ácido benzoico .....	39
Tabla 24: Peso del alambre antes y después de la combustión.....	40
Tabla 25: Lista de validación para el ensamblaje del calorímetro y bomba de oxígeno. ....	40

<b>Tabla 26: Coeficientes del polinomio para cada muestra de ácido benzoico.</b>	<b>50</b>
<b>Tabla 27: Tiempos y temperaturas inicial y final para cada muestra de ácido benzoico.</b>	<b>51</b>
<b>Tabla 28: Tiempo d y cambio de temperatura.</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 29: Capacidad calorífica del calorímetro a volumen constante para cada muestra de ácido benzoico.</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 30: Evaluación ácido benzoico bajo el estándar ASTM D5865.</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 31. Proveedores de las muestras de cera.</b>	<b>54</b>
<b>Tabla 32: Peso de las muestras de cera de abeja para cada proveedor</b>	<b>54</b>
<b>Tabla 33: Peso de alambre y energía liberada en cada prueba.</b>	<b>55</b>
<b>Tabla 34: Coeficientes de los polinomios de cuarto grado para cada tipo de cera.</b>	<b>56</b>
<b>Tabla 35. Tiempos y temperaturas inicial, final y tiempo d para cada muestra de cera de abeja.</b>	<b>56</b>
<b>Tabla 36: Poder calorífico de cada muestra de cera de abeja.</b>	<b>57</b>
<b>Tabla 37: Entalpía de combustión obtenida en cada prueba con cera de abeja.</b>	<b>58</b>
<b>Tabla 38: Capacidad del calorímetro para cada muestra de cera.</b>	<b>59</b>
<b>Tabla 39: Eficiencia de combustión para cada muestra de cera.</b>	<b>59</b>
<b>Tabla 40: Análisis de varianza para el poder calorífico de la cera de abeja.</b>	<b>62</b>
<b>Tabla 41: Análisis de varianza para la entalpia de combustión de la cera de abeja.</b>	<b>62</b>
<b>Tabla 42: Análisis de varianza para la eficiencia de combustión en un calorímetro.</b>	<b>62</b>
<b>Tabla 43: Análisis de varianza para la capacidad del calorímetro.</b>	<b>63</b>
<b>Tabla 44: Evaluación bajo el estándar ASTM D5865</b>	<b>64</b>
<b>Tabla 45: Propiedades termodinámicos Cera A.</b>	<b>64</b>
<b>Tabla 46: Propiedades termodinámicos Cera B.</b>	<b>64</b>
<b>Tabla 47: Propiedades termodinámicos Cera C.</b>	<b>64</b>
<b>Tabla 48: Propiedades termodinámicos Cera D.</b>	<b>64</b>
<b>Tabla 49: Análisis de varianza del poder calorífico.</b>	<b>65</b>
<b>Tabla 50: Análisis de varianza de la entalpía de combustión.</b>	<b>65</b>
<b>Tabla 51: Análisis de varianza de la energía absorbida por el calorímetro.</b>	<b>65</b>
<b>Tabla 52: Análisis de varianza de la eficiencia de combustión en el calorímetro.</b>	<b>65</b>
<b>Tabla 53: Propiedades termodinámicos globales.</b>	<b>65</b>

## Resumen

Los combustibles sólidos para cohetes más utilizados son la parafina y el polibutadieno terminado en hidroxilo, estos combustibles presentan problemas de contaminación en la manufactura, además de sus costos altos de producción, esto ha llevado realizar experimentos con cera de abeja para ser un sustituto de ellos. Actualmente no se cuenta con información sobre propiedades físicas y termodinámicas de la cera de abeja nativa de Guatemala, por lo que se busca caracterizar las propiedades físicas y termodinámicas de la cera de abeja *Apis mellifera* en Guatemala mediante un termograma obtenido del proceso de combustión y mediciones directas de las propiedades físicas. Las ceras utilizadas fueron obtenidas de la Finca Virgen del Socorro, Apícola Méndez e hijos y Apiario Mercedes. Se utilizó un calorímetro de bomba de oxígeno marca Parr y balanza analítica. Siguiendo las metodologías basadas en las normas ASTM, manuales de los equipos, empleando hojas electrónicas de Excel y realizando un análisis estadístico se encontró que la cera de abeja de *Apis mellifera* en Guatemala presenta con un 95% de confianza un valor de poder calorífico promedio mayor o igual 43.70 kJ/kg o menor o igual a 44.53 kJ/kg. Los resultados mostraron que la cera de la *Apis mellifera* se encuentra en el rango de 30 kJ/kg y 50 kJ/kg donde es considera como una cera con un poder calorífico bajo.

## **Abstract**

The most used solid rocket fuels are paraffin and hydroxyl-terminated polybutadiene, these fuels present contamination problems during manufacturing, in addition to their high production costs. This has carried out experiments with beeswax to be a substitute for this solid fuels. Currently there is no information on the physical and thermodynamic properties of the native Guatemalan beeswax, so this work seeks to characterize the physical and thermodynamic properties of the *Apis mellifera* beeswax in Guatemala by a thermogram obtained from the combustion process and direct measurements of the physical properties. The waxes used were obtained from the Virgen del Socorro farm, Apícola Méndez e Hijos and Apiario Mercedes. A Parr brand oxygen bomb calorimeter and analytical balance were used. Following the methodologies based on ASTM standards, equipment manuals, using Excel electronic sheets and statistical analysis, it was found that beeswax from *Apis mellifera* in Guatemala presents with 95% confidence an average calorific value greater or equal to 43.70 kJ/kg or less or equal to 44.53 kJ/kg. The results show that the wax of *Apis mellifera* is in the range of 30 kJ/kg and 50 kJ/kg and is considered to be a wax with a low calorific value.

## **I. Introducción**

La cera de abeja ha sido utilizada como combustible en sistemas híbridos de propulsión de cohetes, que consta de un propelente sólido y un oxidante líquido. Al utilizar esta cera como combustible sólido junto con el oxidante líquido se logró obtener una tasa de regresión alta lo cual permite tener una mayor optimización de uso del combustible comparado con otros propelentes.

Para diferenciar, categorizar y comparar los propelentes sólidos de forma más completa es necesario conocer varias propiedades físicas y termodinámicas. Las propiedades a definir para evaluar su factibilidad de ser utilizada como combustible sólido es la densidad, viscosidad en estado líquido, rango de temperatura de fusión, poder calorífico, eficiencia de combustión y entalpía de combustión.

Caracterizar la cera de abeja contribuirá a la investigación de alternativas a combustibles sólidos convencionales logrando así utilizar este tipo de hidrocarburos en diferentes aplicaciones como el sistema de propulsión híbrido utilizado en CubeSat donde se utilizan combustibles sólidos para controlar la altitud, corrección de trayectoria y maniobras de inserción en las órbitas.

## **II. Justificación**

La búsqueda de alternativas a combustibles sólidos convencionales ha llevado a realizar experimentos con ceras de abejas. Los resultados de estos experimentos han demostrado que la cera al ser utilizada como combustible sólido en cohetes híbridos tienen una tasa de regresión mayor que los combustibles convencionales (Evans, 2007; Makled, 2019). Esta tasa es un indicativo de que este material es buen candidato a ser utilizado como combustible. Se quiere realizar las metodologías necesarias para la obtención de propiedades físicas y termodinámicas de ceras de abeja nacionales y extranjeras; esto con el fin de estimar la factibilidad de su uso como combustible sólido por ejemplo, para CubeSats en el espacio.

La búsqueda de nuevos combustibles sólidos es impulsada por la contaminación que provocan los gases de efecto invernadero formados luego de realizarse la combustión de los combustibles sólidos convencionales, los problemas de manufactura y el factor económico ya que el proceso de elaboración y almacenamiento elevan el costo de estos. Actualmente en Guatemala no hay información disponible sobre estas características, por lo cual se pretende documentar las metodologías para obtenerlas y plantear el análisis estadístico correspondiente para la determinación de las propiedades físicas y termodinámicas más importantes de la cera de abeja, tales como densidad, poder calorífico, eficiencia de combustión, viscosidad en estado líquido y rango de temperatura de fusión.

### **III. Objetivos**

#### **A. General**

Definir la metodología para la caracterización de las propiedades físicas y termodinámicas de la cera de abeja de una especie de Guatemala mediante un termograma obtenido del proceso de combustión y mediciones directas de las propiedades físicas.

#### **B. Específicos**

1. Especificar la preparación y manejo de las muestras en cada prueba para asegurar la calidad, homogeneidad de las muestras y evitar alterar los resultados.
2. Elaborar las metodologías siguiendo estándares ASTM o siguiendo las normativas de los equipos para realizar las pruebas requeridas en los laboratorios de la Universidad del Valle de Guatemala.
3. Realizar los formatos electrónicos para el análisis de los resultados y poder determinar las propiedades físicas y termodinámicas al realizar las diferentes pruebas.
4. Plantear el análisis estadístico para definir la confiabilidad de las mediciones de las propiedades termodinámicas y físicas.
5. Presentar un ejemplo de las propiedades termodinámicas para ser utilizada como guía en la sistematización de las metodologías.

## **IV. Marco teórico**

### **A. Abejas y apicultura en Guatemala**

Las abejas son un grupo de insectos de diferentes tamaños, que poseen un papel muy importante en la polinización de los bosques, proporcionando una mejor producción de frutos y semillas, y por ende el mantenimiento de los ecosistemas. Algunos de sus criadores elaboran y almacenan miel, cera, polen, entre otros (Schuster, 2012).

En Guatemala hay una gran variedad de estos insectos, según Schuster (2012), Guatemala cuenta con 97 géneros de abejas y 356 especies, que han sido estudiadas por diversos autores. Asimismo, sus estudios se centraron en el análisis de 3500 especímenes de abejas que fueron recolectadas y estudiadas durante su investigación. Sin embargo, Schuster (2012) menciona que:

El número de especies podría ser alrededor de 500, distribuidas en las siguientes familias: *Apidae* (52 géneros, 227 especies) 64% de las especies; *Halictidae* (15 géneros, 51 especies) 14% *Megachilidae* (17 géneros, 48 especies) 13% *Colletidae* (8 géneros, 18 especies) 5% y *Andrenidae* (5 géneros, 13 especies) 4% (P. 281).

En el área de la agricultura es común que la polinización se lleve a cabo por la abeja melífera (de la familia *Apidae*), también conocida como abeja doméstica. Debido a su alta capacidad de producir miel, almacenarlo y al ser sociables, las abejas melíferas han sido criadas en todo el mundo. Actualmente, se han realizado diferentes estudios y se ha reportado que diversos apicultores de Santa Rosa, Chiquimula, Jutiapa y Alta Verapaz siguen practicando su crianza (Schuster. 2012).

### **B. Antecedentes de investigaciones en Guatemala y otros países**

Dada la capacidad de las abejas de vivir en comunidad y ser sociables con el ser humano se han realizado diferentes estudios en Guatemala. Una de las investigaciones llevadas a cabo por Dardón (2008) caracterizó las propiedades fisicoquímicas y antimicrobianas de la miel de

nueve especies de abejas sin aguijón, debido al interés de utilizar la miel con fines terapéuticos. También se ha estudiado las características del polen de abeja melífera en siete departamentos de Guatemala, con el fin de conocer y describir el estado microbiológico del polen producido por esta especie (López, 2013).

Se ha investigado la capacidad calorífica de la cera de abeja combinado con grafeno a diferentes porcentajes de peso (wt%), como almacenamiento de energía para aplicaciones de construcción, sin ninguna especie en específico. El fin de esta investigación es el de poder crear un aislante térmico que pueda ser utilizado en paredes de los edificios y que sirva para épocas de invierno y verano. (Prawiro, 2006).

**Figura 1: Capacidad calorífica de muestras**

<b>Muestras</b>	<b>Capacidad calorífica (KJ/Kg*K)</b>
Cera de abeja	0.508
Cera de abeja / Grafeno 0.05 wt%	0.527
Cera de abeja / Grafeno 0.1 wt%	0.530
Cera de abeja / Grafeno 0.15 wt%	0.534
Cera de abeja / Grafeno 0.2 wt%	0.535
Cera de abeja / Grafeno 0.25 wt%	0.556
Cera de abeja / Grafeno 0.3 wt%	0.561

**(Prawiro, 2006)**

Otros autores como Setyawan (2013) caracterizaron las propiedades físicas y lipídicas de la cera de abeja, y la combinación de la cera con glicerina para obtener una tasa de cera de abeja y glicerina, para la producción de nanopartículas lipídicas sólidas para una alternativa a los fármacos coloidales. Estos fármacos son una reposición del volumen intravascular que es uno de los pilares básicos en la resucitación de pacientes en estado de shock.

Se han realizado estudios de puntos de fusión de diferentes ceras, esto con el fin de tener un manejo y almacenamiento adecuado. En el caso de Buchwald (2007) se utilizaron diez especies de abejas de diferentes regiones de Estados Unidos. Es importante mencionar que en este estudio

recomiendan utilizar un calorímetro de escaneo diferencial (DSC), este tipo de equipo permite una caracterización más precisa de estas propiedades. Las propiedades obtenidas en este estudio fueron calor específico y temperatura de fusión. En esta investigación establecieron rangos donde un poder calorífico de 150 kJ/kg a 100 kJ/kg se considera que la cera posee un poder calorífico alto, un rango de 100 kJ/kg a 50 kJ/kg es una cera con un poder calorífico medio y en el rango de 50 kJ/kg a 30 kJ/kg la cera se considera que tiene un poder calorífico bajo.

**Figura 2: Propiedades térmicas de ceras de abeja usando un calorímetro diferencial de escaneo.**

Species	Colonies tested	Onset (°C)	End (°C)	Range (°C)	Peak (°C)	Heat of fusion (mJ mg <sup>-1</sup> )
<b>Apini</b>						
<b>Dwarf honeybees</b>						
<i>Apis andreniformis</i> Smith	2	34.6±0.92	69.0±0.42	34.3±1.33	67.0±0.33	145.1±1.70
<i>Apis florea</i> Fabricius	5	40.1±1.10	69.2±0.40	29.1±1.22	66.7±0.37	117.9±11.83
<b>Giant honeybees</b>						
<i>Apis dorsata binghami</i> Cockerell	1	37.9	67.5	29.7	64.9	149.9
<i>Apis dorsata dorsata</i> Fabricius	11	35.2±0.50	66.5±0.22	31.3±0.57	63.5±0.29	128.1±11.32
<b>Cavity-nesting honeybees</b>						
<i>Apis cerana cerana</i> Fabricius	4	37.1±0.05	69.4±0.23	32.3±0.25	67.7±0.18	152.3±1.60
<i>Apis cerana indica</i> Fabricius	12	37.4±0.32	70.5±0.46	33.1±0.39	68.6±0.46	168.8±0.99
<i>Apis mellifera</i> Linnaeus	4	40.4±0.72	67.0±0.50	26.6±0.93	64.6±0.67	170.7±4.48
<i>Apis nigrocincta</i> Smith	2	37.4±0.25	69.6±0.41	32.2±0.67	67.6±0.25	165.8±1.74
Mean ± s.e.m.		37.3±0.36	68.6±0.30	31.3±0.41	66.3±0.36	148.5±4.57
<b>Bombini</b>						
<i>Bombus impatiens</i> Cresson	1	34.2	55.2	21.0	50.2	33.7
<i>Bombus rufocinctus</i> Cresson	1	29.4	51.9	22.5	48.5	78.7
Mean ± s.e.m.		31.8±2.42	53.5±1.67	21.8±0.75	49.4±0.83	56.2±22.47
<b>Meliponini</b>						
<i>Plebia schrottkyi</i> Friese	1	53.9	73.7	19.8	67.7	85.9
<i>Melipona quadrifasciata</i> Lepeletier	1	57.7	76.7	19.0	68.9	75.4
<i>Nanotrigona testaceicornis</i> Iratim	1	69.0	85.3	16.3	79.4	n.a.
<i>Plebia quadripunctata</i> Lepeletier	1	58.4	76.0	17.7	71.9	67.8
<i>Trigona angustula</i> Latreille	1	57.2	75.0	17.8	67.9	75.4
<i>Melipona beecheii</i> Bennett	1	55.8	72.7	16.9	67.8	101.2
Mean ± s.e.m.		59.2±2.57	77.4±2.06	18.1±0.60	71.1±2.19	76.1±3.73

(Buchwald, 2007)

La universidad de Tennessee realizó experimentos utilizando cera de abeja como combustibles sólidos en cohetes híbridos, utilizaron rangos de presión de 100 - 222 psi y un nivel de empuje en los rangos de 40 a 170 N. Como oxidante para la experimentación utilizaron oxígeno y óxido nitroso. Al comparar la tasa de regresión de la cera de abeja como combustible con combustibles convencionales, como el polibutadieno terminado en hidroxilo (por sus siglas en inglés HTPB), se obtuvo una tasa de regresión tres veces mayor. Estos resultados son evidencia de que la mayor debilidad de un motor de cohete híbrido de gran empuje que usa un puerto único de geometría simple es que posee una tasa de regresión baja, y esta puede ser superada utilizando cera de abeja como combustible. Se realizó un modelaje matemático para evaluar el rendimiento teórico de la cera de abeja, grasa, mezcla de parafina y combinación de cera de abeja con aluminio al ser usado como combustibles. Este análisis muestra que se debería tener un mejor rendimiento para una cámara de combustión con presión de 500 psi (Evans, 2007).

El Centro de Tecnología Espacial en El Cairo, Egipto, buscaba alternativas a los combustibles sólidos convencionales. Para la experimentación usaron la cera de abeja, que es un hidrocarburo bio derivado, utilizando una presión de 42.06 psi, flujo másico de 9.34 g/s y oxígeno como el oxidante. Los resultados de este experimento fue una tasa de regresión de mayor magnitud que combustibles convencionales como el Polimetilmetacrilato (por sus siglas en inglés PMMA) y que el Polietileno, con una eficiencia de 60.3%. Por lo cual estos resultados muestran que el rendimiento de la cera de abeja puede superar las desventajas de los sistemas híbridos (Makled, 2018).

La universidad nacional de Tenaga buscaba definir el poder calorífico de dos tipos de madera a diferentes niveles de humedad por su potencial a ser materia prima para combustibles sólidos. Se utilizó un calorímetro de bomba de oxígeno para analizar el poder calorífico de la madera por lo que concluyeron que es posible utilizar este equipo para analizar esta propiedad de una biomasa a diferentes niveles de humedad (Hossain, 2017).

La universidad de Napoli Federico II realizó un modelo de simulación computacional del comportamiento de combustibles a base de parafina en cohetes híbridos. Aquí se debió de realizar un análisis de la viscosidad de seis diferentes combustibles con diferentes niveles de parafina, donde utilizaron un viscosímetro Brookfield DV-E. Gracias a este análisis concluyeron que la viscosidad de los combustibles combinados disminuye cuando aumenta el porcentaje de parafina en el combustible logrando así una tasa de regresión mayor. (Giuseppe, 2018).

La universidad estatal de Pennsylvania caracterizó el rendimiento del combustible sólido de parafina combinado con  $\text{LiAlH}_4$  en un sistema de cohetes híbridos para examinar sus características en el proceso de combustión. De este estudio se determinó que tanto la densidad y la tasa de regresión son parámetros los cuales al ser bajos entregan un nivel bajo de impulso (Larson, 2011).

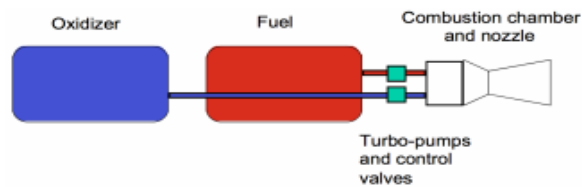
## **C. Utilización de combustibles sólidos y características**

### **1. Cohetes sistema líquido**

Los cohetes convencionales utilizan un sistema líquido de dos propulsores (Figura 3). El oxígeno y el combustible se encuentran en diferentes tanques alimentados por presión o por una bomba hacia la

cámara de combustión donde ocurren los procesos de atomización, mezclado, ignición y combustión. Este sistema de propulsores líquidos es bastante complejo, debido a que la presión en la cámara de combustión es muy alta y puede que los propulsores sean criogénicos afectando así la densidad de estos, provocando que se requiera una turbina o bomba de alto rendimiento ya que el flujo masico en este sistema es alto. Algunos de los fallos más grandes de cohetes han sido provocados por este sistema de bi-propulsores líquidos por explosiones químicas (Cantwell, 2010).

**Figura 3: Sistema de un cohete líquido bi-propulsante.**



(Cantwell, 2010)

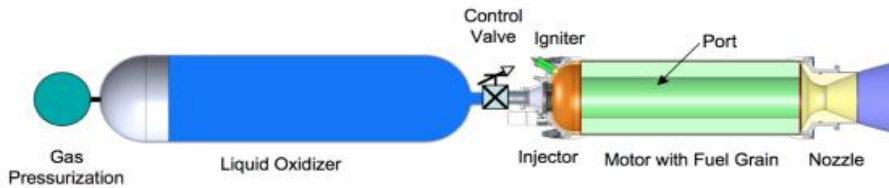
## 2. Cohetes sistema sólido

Un cohete de sistema sólido utiliza un motor el cual usa propelentes sólidos, este tipo de cohetes fueron utilizados durante el siglo XIII, y el más conocido fue el que utilizó pólvora como propulsante, los cuales fueron utilizados hasta el siglo XX. Sin embargo, el sistema de cohete sólido fue dejado de utilizar ya que los sistemas líquidos daban una mayor eficiencia y variables que se podían controlar. Actualmente, los sistemas de cohete sólidos se pueden encontrar en armamentos militares, ya que sus combustibles para cohetes pueden almacenarse por un periodo largo de tiempo sin que el propelente se degrade. El diseño consiste en una carcasa, boquilla, grano de propelente y la llama (Hall, s.f.).

## 3. Cohetes sistema híbrido

Los cohetes híbridos son una opción más segura que otros diseños de cohetes, debido a que su diseño los hace menos propensos a explosiones químicas ya que el combustible y oxidante se encuentran almacenados por separado. Además, de que se tiene una válvula de control la cual permite controlar el flujo del oxidante por medio de la presión, características que no se presentan en los otros diseños convencionales de cohetes (Cantwell, 2010). La Figura 4 a continuación presenta el diseño de los cohetes híbridos.

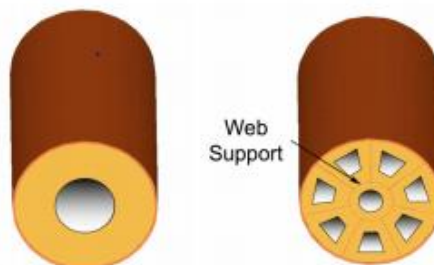
**Figura 4: Sistema de un cohete híbrido.**



(Cantwell, 2010).

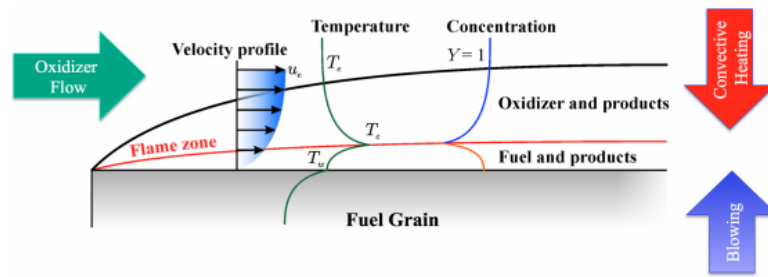
El combustible en este sistema se encuentra en la cámara de combustión en forma de un cilindro que posee un canal circular interno en el eje axial llamado puerto o “port” (Figura 5). El mecanismo de combustión por el cual funciona este diseño es la combustión de capa límite el cual es representado en la Figura 6, en este esquema se muestra como sobre la pared inferior del cilindro ahuecado de combustible se genera una llama la cual vaporiza el combustible mientras que por medio de una válvula de control el flujo de oxidante líquido es liberado para pasar sobre esta capa de combustible vaporizado. Al darse la mezcla del combustible vaporizado, el oxidante y el calor producido por la llama, se da la combustión, y con ello los productos generados de esta reacción química, debido al perfil de velocidad del flujo de oxidante al estar dentro de un tubo se crea un gradiente de velocidad, temperatura y concentración de oxidante, en el que en el centro de este cilindro se encuentran los valores máximos de velocidad y concentración de oxidante, mientras que para la temperatura su valor máximo se da cerca de la capa límite debido al calor producido por la llama. La razón por la cual los cohetes híbridos no son utilizados a gran escala es porque utilizan combustibles poliméricos, los cuales se evaporan a una velocidad lenta y no se puede producir un impulso alto lo cual se busca en muchas aplicaciones (Cantwell, 2010).

**Figura 5: Diseño de combustible sólido de puerto único versus**



(Cantwell, 2010).

Figura 6: Flujo combustión capa límite.



(Cantwell, 2010).

#### 4. Combustibles sólidos

Una característica muy importante de los combustibles sólidos es que tienden a evitar explosiones químicas, lo cual lleva a una manufactura y operación más segura. Estos tipos de combustibles pueden ser manufacturados en cualquier fábrica comercial y ser utilizados en cualquier área sin riesgo de sufrir explosiones. Además, los costos de los combustibles sólidos suelen reducirse por el proceso de manufactura y su utilización operativa. Las ventajas que posee la utilización de combustibles sólidos en los cohetes consisten en la obtención de un mejor impulso específico y optimización de trayectoria. Algunos combustibles sólidos convencionales son: Parafina, HTPB, Plexiglás, entre otros (Cantwell, 2010).

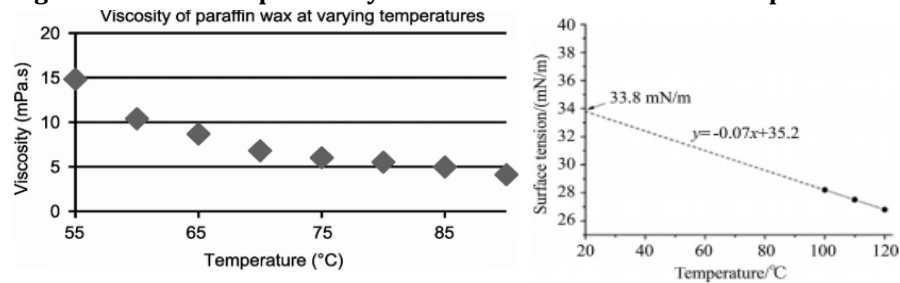
La parafina es utilizada como combustible en cohetes sólidos e híbridos. Dicho combustible muestra características de reignición, capacidad de aceleración y una tasa de regresión mayor que los combustibles convencionales como el hidroxilo y HTPB. Esto se debe a que la parafina forma una delgada e hidrodinámica capa líquida inestable, que ayuda a tener una tasa de regresión mayor. Sin embargo, el problema de utilizar la parafina es que muestra problemas en su manufactura, ya que hay formación de cavidades, burbujas, grietas y roturas internas, que pueden afectar el proceso de combustión y el sistema provocando explosiones químicas. Estos problemas son perjudiciales para las propiedades mecánicas y la integridad estructural del combustible sólido. En la Tabla 1 se encuentran las propiedades físicas y termodinámicas de la cera de parafina, adicionalmente en la Figura 7 se tienen la tensión superficial y viscosidad a diferentes temperaturas (Piscitelli, 2018).

**Tabla 1: Propiedades de ceras de parafina**

Propiedad	Valor
Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) @ 25°	0.93
Temperatura de fusión (65°)	53.7
Poder calorífico (MJ/Kg)	48
Conductividad térmica (W/m*K)	0.24
Temperatura de ignición (°C)	238-263
Entalpía de combustión (KJ/Kg*K)	2

(Piscitelli, 2018)

**Figura 7: Tensión superficial y viscosidad en función de la temperatura.**



(Piscitelli, 2018).

## 5. Ley de tasa de regresión

La ley de la tasa de regresión consiste en que el flujo másico total se incrementa a lo largo del eje axial del puerto, esto se debe a que en un determinado punto del tiempo y el espacio la tasa local de regresión o flujo de combustible vaporizado y el flujo másico local de oxidante se acoplan, esto evidencia que el flujo total de masa dentro del cilindro dependen del tiempo y su posición en el eje x, por lo que para el análisis del comportamiento del sistema es necesario plantear un par de ecuaciones diferenciales de primer orden que relacionen estos dos procesos:

La ecuación que gobierna la tasa de regresión es la siguiente

$$\frac{\partial r(x, t)}{\partial t} = \frac{a}{x^m} \left( \frac{\dot{m}_{port}}{\pi r^2} \right)^n$$

(Ec. 1)

Donde se expresa la derivada parcial del radio respecto a su posición en el eje x y al tiempo, el cual puede ser expresado como la razón entre la constante empírica ( $a$ ) y la posición axial ( $x$ ) elevado al exponente teórico  $m$ , multiplicado el flux másico total ( $\dot{m}_{port}$ ) dentro del área del puerto elevado al exponente teórico ( $n$ ).

Asimismo, se plantea el aumento del flujo másico en el puerto mediante la siguiente ecuación

$$\frac{\partial \dot{m}_{port}(x, t)}{\partial x} = \rho f(2\pi r) \frac{a}{x^m} \left( \frac{\dot{m}_{port}}{\pi r^2} \right)^n$$

(Ec. 2)

En esta se expresa la derivada parcial del flujo másico total del puerto respecto a su posición en el eje x y el tiempo, lo cual es igual al área transversal del cilindro por la densidad del combustible a la temperatura de vaporización por la expresión de la derivada parcial de la tasa de regresión (Ecuación 1).

Es necesario expresar el flux másico dentro del puerto, es decir, la tasa a la cual se transfiere la masa; la cual es igual a la sumatoria de los flujos másicos de oxidante ( $\dot{m}_{ox}$ ) y combustible vaporizado ( $\dot{m}_f$ ) por unidad de área transversal.

$$G = \frac{\dot{m}_{port}}{\mu r^2} = \frac{\dot{m}_{ox} + \dot{m}_f}{\pi r^2}$$

(Ec. 3)

Generalmente, se asume que en el cálculo de la tasa de regresión el flux másico depende únicamente del flux másico del oxidante el cual es constante a lo largo del puerto. Esta aproximación es razonable si se tiene una razón de diseño entre el flujo másico de oxidante y de combustible relativamente grande, es decir, si es mayor a una magnitud de 5. Tal aproximación se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{dr}{dt} = a_o G_{ox}^m$$

(Ec. 4)

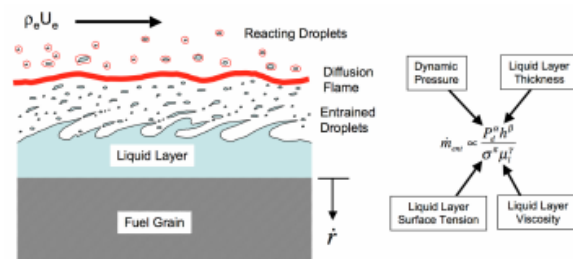
En donde  $a_o$  es una función del tiempo y el espacio expresada de la siguiente manera:

$$a_o = a(1 + 1/(OF(x, t)))^n$$

(Ec. 5)

En 1990, la fuerza aérea de Estados Unidos realizó diseños e investigaciones de cohetes híbridos. Gracias a sus experimentaciones con pentano, un combustible sólido el cual se quemaba de 3 a 4 veces más rápido que los combustibles sólidos convencionales, se demostró que este combustible produce una capa líquida en la superficie cuando se está quemando (Figura 8). La capa que presenta es delgada, de baja viscosidad y de baja tensión superficial. La inestabilidad de esta capa al entrar en contacto con el oxidante provoca un aumento en la tasa transferencia de masa (Cantwell, 2010).

**Figura 8: Capa líquida formada en el combustible**



(Cantwell, 2010).

El principal problema de tener una tasa de regresión baja es que el proceso de combustión tendrá un mecanismo relativamente lento de utilización de combustible, evaporación y mezcla de gases como es el caso de los sistemas híbridos. En otros sistemas de cohetes como el sistema sólido, la flama está más cerca de la superficie del grano del combustible, provocando una tasa de regresión mayor (Cantwell, 2010).

## **D. Propiedades físicas y termodinámicas y equipos para realizar mediciones**

### **1. Propiedades termodinámicas y físicas**

Hay una serie de características claves en los combustibles para poder definir si son un buen candidato para su uso en un proceso de combustión. Algunos de estos factores son la densidad, reactividad de

oxidación, capacidad de absorción física, temperatura de ignición, entalpía de combustión, poder calorífico y su eficiencia de combustión, entre otras. Al ser propiedades claves están fuertemente influenciadas con la cantidad de compuestos carbonados presente en el momento de su combustión, así como su comportamiento y residuos sólidos producidos, por lo cual es importante su estudio (Hurt, 2000).

Las características seleccionadas para la presente investigación son: densidad, entalpía de combustión, poder calorífico, temperatura de fusión, conductividad térmica, viscosidad en estado líquido y tensión superficial.

Estas propiedades son un indicativo del potencial que tendrá una sustancia como combustible y su comportamiento. Además, de ser esenciales para categorizar, identificar y comparar con otros tipos de combustibles (Cengel, 2015).

La densidad es una propiedad la cual depende de la temperatura y presión. Sin embargo, la cera al ser un sólido es no compresible por lo cual su densidad no se ve afectada por la presión. La importancia de esta propiedad se deriva de los diferentes estudios y análisis térmicos que son realizados a diferentes combustibles (Cengel, 2015).

La temperatura de fusión es de suma importancia para los combustibles sólidos ya que, es un indicativo que muestra cuando el combustible estará completamente fundido y para controlar la temperatura de la cámara de combustión para lograr la formación de la capa límite en el grano de combustible y para resguardar la estructura física del mismo. (Cantwell, 2010).

El coeficiente de conductividad térmica indica la capacidad de conducir calor, este valor es de suma importancia para realizar análisis y predicciones sobre el comportamiento del material al aumento de temperatura (Cengel, 2015).

La viscosidad es la característica que indicará la resistencia de un material a deformaciones y a fluir. La importancia de esta propiedad es que al tener una magnitud de viscosidad alta puede afectar el comportamiento de la capa límite del combustible sólido (Cengel, 2015).

Las propiedades termodinámicas son características que indicaran cómo se comporta el combustible al entrar en contacto con el calor. Al tener estas propiedades se puede definir que tan bien se realiza un proceso de

transferencia de calor, cuanta energía libera el combustible y así poder definir el rendimiento del combustible (Cengel, 2015).

La calorimetría es una prueba fundamental para determinar el poder calorífico de gran importancia para la producción o utilización de combustibles sólidos o líquidos, para esta prueba se utilizan los calorímetros, los cuales son dispositivos utilizados para determinar el poder calorífico de muestras de combustibles. Básicamente, este dispositivo quema una muestra de combustible y transfiere el calor de una masa de agua conocida. El poder calorífico se calcula a partir del peso de la muestra de combustible y el aumento de temperatura del agua (Cengel, 2015).

## **2. Normas ASTM**

La Sociedad Estadounidense para Ensayos y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) es una organización la cual se encarga de desarrollar y publicar diferentes designaciones, normas técnicas o acuerdos las cuales son utilizadas para el desarrollo y elaboración de pruebas, materiales, productos, servicios y sistemas.

Las designaciones por las cuales se regirá el método de procedimiento serán D240, D5865; ya que el equipo está diseñado bajo estas normas. La designación D240, es la norma estándar de realizar pruebas para el calor de combustión de combustibles de hidrocarburos líquidos por un calorímetro de bomba de oxígeno.

La designación D5865 es el procedimiento estándar para pruebas de poder calorífico bruto del carbón por un calorímetro de bomba de oxígeno. En estas designaciones se menciona como debe de ser el ensamblado del equipo, precauciones de uso y seguridad, preparación de pruebas, número de pruebas para la estandarización del proceso, condiciones físicas y estadísticas que se deben cumplir para que los resultados sean aceptados.

## **3. CubeSat y cera de abeja como combustible**

Los CubeSat son nanosatélites que son programados y diseñados para realizar diferentes tareas. Su desarrollo e investigaciones llevan varios años, como por ejemplo los proyectos en universidades para aprender el proceso que conlleva este tipo de desarrollo aeroespaciales. Un CubeSat es un satélite en forma de un cubo con dimensiones 10 cm x 10 cm x 10 cm y posee una masa hasta 1.33 kg. Estos satélites están conformados por

diferentes subsistemas, incluyendo carga útil, estructura, alimentación térmica, computadora a bordo, comunicación a bordo, sistema de propulsión, mecanismo de despliegue de antena, estación de control a tierra, determinación y control de altitud (Martínez *et al.*, 2019).

Como se mencionó anteriormente el desarrollo e investigaciones sobre los CubeSat y sus subsistemas han sido llevadas a cabo desde hace varios años hasta la actualidad. Uno de ellos es el sistema de propulsión el cual es el encargado de proveer control de altitud, corrección de trayectoria, maniobras de inserción en órbita y completar maniobras de limpieza de la órbita (Jens, *et al.*, 2017).

Actualmente hay dos tecnologías que son prometedoras a corto plazo para estos sistemas de propulsión los cuales son sistemas de propulsión de Mono-Propelente Líquido (por sus siglas en inglés LMP) y sistemas de propulsión híbridos. Siendo el sistema híbrido obligado a utilizar combustibles sólidos convencionales, para poder controlar el satélite durante la operación del motor. (Jens, *et al.*, 2017).

El laboratorio de propulsión de jet que se encuentra en el Instituto de Tecnología de California Pasadena desarrolló pruebas con motores híbridos, enfocándose en combustibles convencionales como el Polietileno de alta densidad (por sus siglas en inglés HDPE) con 30% de aluminio y con Polimetilmetacrilato (por sus siglas en inglés PMMA). En la elaboración de estas pruebas es importante mencionar que el HDPE tuvo problemas en su manufactura, sufrió de inestabilidad en el proceso de combustión y baja eficiencia. El PMMA en comparación fue estable en un amplio rango de condiciones iniciales. También la tasa de regresión fue mayor al compararse con la literatura lo cual llevo a realizar pruebas y caracterizarla en pruebas de mayor duración. Por lo cual los sistemas híbridos están siendo desarrollados para ser implementados en los CubeSat (Jens, *et al.*, 2017).

En la actualidad se están buscando nuevas alternativas a los combustibles sólidos convencionales. Las razones por las cuales se están buscando nuevos combustibles es debido al alto nivel de gases contaminantes que se producen durante el proceso de combustión. Además, la manufactura de estos biocombustibles es más sencilla comparada con los combustibles convencionales y poseen un costo menor (Evans, 2007).

La Universidad de Tennessee y el Centro de Tecnología Espacial en Egipto han realizado estudios sobre las nuevas alternativas a combustibles convencionales. En ambos estudios se determinó que la cera

de las abejas puede ser utilizado como un combustible sólido. Así mismo, se realizaron pruebas con cera de abeja y diferentes oxidantes, para comparar la tasa de regresión de la cera de abeja y los combustibles convencionales (véase Figura 9). En la Figura 6 se puede apreciar que la cera de abeja posee una tasa de regresión mayor que los otros combustibles usados convencionalmente. Es importante mencionar que todos estos estudios recomiendan hacer un análisis de eficiencia en el proceso de combustión con sus características termodinámicas (Evans, 2007).

**Figura 9: Comparación tasa de regresión**



(Evans, 2007)

## V. Marco metodológico

Se realizó una investigación sobre los combustibles sólidos y sus características más importantes al ser utilizados en diferentes sistemas de propulsión, con el fin de delimitar las propiedades a estudiar. Al tener estas cualidades establecidas, se verificó la disponibilidad de los laboratorios de la Universidad Del Valle de Guatemala para su determinación y realizar el procedimiento metodológico para la estandarización de las pruebas, tomando en cuenta que el procedimiento cumpla con los requisitos de la Sociedad Estadounidense para Ensayos y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés). Con esto establecido se investigó sobre las abejas y la apicultura en Guatemala con la finalidad de obtener información sobre, especies, población, apicultura y proveedores. Al tener toda esta información se seleccionó la abeja *Apis mellifera* y se realizó una lista de proveedores que manejan esta especie en Guatemala. Para obtener las propiedades de esta cera de abeja se evaluaron cuatro muestras; la primera muestra (Cera A) proviene del Apiario Finca Virgen del Socorro en la zona 14 de la Ciudad de Guatemala, de la cual se adquirió una libra; la segunda muestra (Cera B), con una apariencia laminada, y la tercera muestra (Cera C), con una apariencia similar a la cera en bruto, son procedentes del apiario Apícola Méndez e hijos ubicado en Coatepeque, Quetzaltenango de las cuales se contó con una libra para la muestra B y dos libras para la muestra C y la cuarta muestra (Cera D) obtenida del Apiario Mercedes ubicado en Ixcán, Quiché de la cual se obtuvo una libra.

### A. Densidad de la cera de abeja

Para obtener la densidad de la cera de abeja se propone utilizar un picnómetro de aluminio para mediciones de grasas marca Fisher Scientific. Se utilizó el manual *Fisher Scientific Pycnometer No. 03-247Q*. Este Manual está basado en el estándar ASTM D70 – 03 “Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method)”, por lo que se propuso la metodología y estandarización bajo estas normas.

Para la estandarización del proceso se debe de realizar varias mediciones con el picnómetro vacío y analizar los resultados con la norma ASTM D854 – 02 “Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by water Pycnometer”. Para esto se debe de pesar el picnómetro vacío y limpio 5 veces utilizando una

balanza dando 4 cifras significativas. (Tabla 3). A continuación, se encuentra la tabla de abreviaciones (Tabla 2).

**Tabla 2: Abreviaciones metodología de la densidad de la cera de abeja.**

Abreviación	Significado
mpA	Masa del agua en el picnómetro.
mpC	Masa de la muestra en el picnómetro.
mp	Masa del picnómetro vacío.
mpe	Masa del picnómetro para estandarización.
TA	Temperatura del agua
TC	Temperatura de cera

**Tabla 3: Peso del picnómetro vacío.**

Peso del viscosímetro para estandarización	Peso ( $\pm 0.0001$ g)
mpe 01	
mpe 02	
mpe 03	
mpe 04	
mpe 05	

Posteriormente se debe de obtener el promedio y desviación estándar de las mediciones de la masa. Para la aceptación de la estandarización la desviación estándar debe ser igual o menor a 0.02 gramos. Asegúrese que las mediciones sean exactas, en el caso que esto no se cumpla agregue más mediciones o bien utilice una balanza más precisa (Tabla 4).

**Tabla 4: Evaluación bajo el estándar ASTM D854 - 02.**

Promedio (mpe)		g
Varianza		
Desviación estándar		
$\sigma$	$\leq$	0.02

Al cumplirse la norma ASTM D854 -02, se acepta la estandarización y el peso promedio de las mediciones del picnómetro será utilizado para comparar el peso del picnómetro vacío cuando se requiera realizar una prueba y si se tiene una diferencia mayor a 0.06 gramos entre el peso promedio y el peso del picnómetro vacío, entonces puede que haya residuos de pruebas anteriores y se debe limpiar cualquier residuo en el picnómetro.

Para realizar las pruebas se deberá seguir el estándar ASTM D70 – 03, se debe de realizar únicamente una prueba con agua destilada como se muestra en la (Tabla 5).

**Tabla 5: Procedimiento para pruebas con agua destilada ASTM D70 – 03.**

<b>Paso</b>	<b>Condición por cumplir</b>	<b>Usuario/Fecha (DD/MM/AA)</b>
1	Lávese las manos o utilice los guantes quirúrgicos para realizar las pruebas.	
Desviaciones encontradas		
2	Coloque todos los materiales y equipo en el área de trabajo, para alcanzar equilibrio térmico.	
Desviaciones encontradas		
3	Pese el picnómetro ensamblado y vacío.	
Desviaciones encontradas		
4	Anote el peso del picnómetro vacío en la Tabla 6.	
Desviaciones encontradas		

5	Revise que la diferencia con el peso promedio sea menor a 0.06 gramos.	
Desviaciones encontradas		
6	Tome la temperatura del agua y anótela en la tabla 6.	
Desviaciones encontradas		
7	Posteriormente remueva la tapa con el grifo y llene completamente la copa con el agua destilada.	
Desviaciones encontradas		
8	Coloque el grifo encima de la copa y enrosque la tapa.	
Desviaciones encontradas		
9	Para asegurarse que esté completamente lleno, agua debe de salir por el agujero en la parte superior del grifo.	
Desviaciones encontradas		
10	Debe secar el picnómetro por afuera con kimwipes y asegúrese de no tocar el agujero del grifo.	
Desviaciones encontradas		
11	Pese el picnómetro lleno con la solución y anótela en la Tabla 7.	

**Tabla 6: Diferencia entre el peso promedio del viscosímetro y peso antes de cada prueba.**

	Peso del viscosímetro vacío	Peso ( $\pm 0.0001g$ )	Diferencia del peso promedio (g)
Agua destilada	mp 01		
Cera A	mp 02		
	mp 03		
	mp 04		
	mp 05		
	mp 06		
Cera B	mp 07		
	mp 08		
	mp 09		
	mp 10		
	mp 11		
Cera C	mp 12		
	mp 13		
	mp 14		
	mp 15		
	mp 16		
Cera D	mp 17		
	mp 18		
	mp 19		
	mp 20		
	mp 21		



**Tabla 7: Peso del volumen de agua con el viscosímetro y la temperatura del agua.**

Muestra	Peso ( $\pm 0.0001g$ )	Temperatura ( $^{\circ}C$ )
mpA 01		

Posteriormente se deberá realizar las pruebas con las muestras de acera de abeja siguiendo la norma ASTM D70 - 03 (Tabla 8).

**Tabla 8: Procedimiento para pruebas con cera de abeja ASTM D70 - 03.**

<b>Paso</b>	<b>Condición por cumplir</b>	<b>Usuario/Fecha (DD/MM/YY)</b>
1	Lávese las manos o utilice los guantes quirúrgicos para realizar las pruebas.	
Desviaciones encontradas		
2	Coloque todo los materiales y equipo en el área de trabajo, para alcanzar equilibrio térmico.	
Desviaciones encontradas		
3	Debe pesar el picnómetro ensamblado y vacío.	
Desviaciones encontradas		
4	Anote el peso del picnómetro vacío en la Tabla 6.	
Desviaciones encontradas		
5	Revise que la diferencia con el peso promedio sea menor a 0.06 gramos.	
Desviaciones encontradas		
6	Tome la temperatura de la muestra y anótela en la Tabla 9.	
Desviaciones encontradas		

7	<p>Llene el picnómetro con la muestra, al tener una sustancia que no fluya fácilmente debe asegurarse que la copa quede llena sin espacios o burbujas de aire como se muestra a continuación;</p>  <p>Utilice una espátula pequeña para lograr esto ya que manipular la muestra con la mano puede aumentar la temperatura y alterar los resultados.</p>	
Desviaciones encontradas		
8	Coloque el grifo encima de la copa y enrosque la tapa;	
Desviaciones encontradas		
9	<p>Al enroskar la tapa, un exceso de muestra debería de salir por el agujero del grifo. Limpie este exceso, si la sustancia tiene la característica de ser absorbida por kimwipes tenga cuidado al momento de quitar el exceso del agujero del grifo.</p> 	

Paso siguiente		
10	Pese el picnómetro lleno con la muestra y anótelos en la Tabla 9.	
Paso siguiente		
11	Saque la muestra y limpie completamente el picnómetro. Repita este procedimiento 5 veces para cada muestra de cera.	

**Tabla 9: Masa de la cera de abeja en el picnómetro y la temperatura prueba de densidad**

Muestra	Peso (0.0001±g)	Temperatura (°C)
mpC A 01		
mpC A 02		
mpC A 03		
mpC A 04		
mpC A 05		
mpC B 01		
mpC B 02		
mpC B 03		
mpC B 04		
mpC B 05		
mpC C 01		
mpC C 02		
mpC C 03		
mpC C 04		
mpC C 05		
mpC D 01		
mpC D 02		
mpC D 03		
mpC D 04		
mpC D 05		

Posteriormente se debe de obtener la masa de Agua destilada y de cera que cabe dentro del volumen del viscosímetro (Tabla 10). Para esto se debe restar el

peso del viscosímetro vacío antes de la prueba y el peso del viscosímetro lleno con la muestra (ecuación 6).

$$mX = mp01 - mpX01$$

(Ec. 6)

**Tabla 10: Masa de la cera de abeja y la temperatura prueba densidad.**

Muestra	Peso (0.0001±g)	Temperatura (°C)
mA 01		
mC A 01		
mC A 02		
mC A 03		
mC A 04		
mC A 05		
mC B 01		
mC B 02		
mC B 03		
mC B 04		
mC B 05		
mC C 01		
mC C 02		
mC C 03		
mC C 04		
mC C 05		
mC D 01		
mC D 02		
mC D 03		
mC D 04		
mC D 05		

Para obtener la densidad de la cera se utilizará la gravedad específica la cual es la relación de densidad de una sustancia y densidad de una sustancia de referencia (Cengel, 2010). Esta relación también se puede obtener entre la masa de una sustancia y la masa de la sustancia de referencia a un mismo volumen dado (ecuación 7). Al tener la gravedad específica se puede multiplicar por la densidad del agua destilada a la temperatura respectiva (ecuación 8) y así obtener la

densidad de la cera de abeja (Tabla 11). En este caso nuestra sustancia de referencia es el agua destilada a una temperatura de 4°C.

$$GE = \frac{\rho_{Cera\ de\ abeja}}{\rho_{Agua\ destilada}} = \frac{\frac{m_{Cera}}{V}}{\frac{m_{agua\ destilada}}{V}} = \frac{m_{Cera} * g}{m_{agua\ destilada} * g} = \frac{m_{Cera}}{m_{agua\ destilada}}$$

(Ec. 7)

$$\rho_{Cera\ de\ abeja} = GE * \rho_{Agua\ destilada\ @\ 4^{\circ}C}$$

(Ec. 8)

**Tabla 11: Densidad de la cera de abeja**

Muestra	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
ρ CA 01	
ρ CA 02	
ρ CA 03	
ρ CA 04	
ρ CA 05	
ρ CB 01	
ρ CB 02	
ρ CB 03	
ρ CB 04	
ρ CB 05	
ρ CC 01	
ρ CC 02	
ρ CC 03	
ρ CC 04	
ρ CC 05	
ρ CD 01	
ρ CD 02	
ρ CD 03	
ρ CD 04	
ρ CD 05	

## B. Rango de temperatura de fusión de la cera de abeja

Para obtener el rango de temperatura de fusión de la cera de abeja se propuso una prueba a macro escala utilizando el equipo de laboratorio de química orgánica. A continuación, se encuentra una tabla de abreviaciones (Tabla 12).

**Tabla 12: Abreviaciones metodología rango de temperatura de fusión.**

Abreviación	Significado
Ti	Temperatura inicial de punto de fusión
Tf	Temperatura final de punto de fusión

Para poder realizar esta prueba se debe de realizar un sistema utilizando diferentes equipos del laboratorio de química orgánica listados en la Tabla 13.

**Tabla 13: Lista de equipo a utilizar rango temperatura de fusión.**

Cantidad	Parte	Marca	Modelo	Serial No.
1	Tubo de ensayo			
1	termómetro			
1	Tapa de tubo de ensayo para termómetro.			
1	Mechero Bunsen o estufa			
1	Mortero			
1	Cuchillo de precisión			

Este equipo es necesario para el montaje del sistema para obtener el rango de temperaturas de fusión. La metodología del montaje del equipo fue elaborado

siguiendo las normas de seguridad de los manuales de cada equipo utilizado, así como precauciones al manejarlos al momento de realizar la práctica. (Tabla 14).

**Tabla 14: Pasos a seguir para el montaje y realización de las pruebas rango de temperatura de fusión.**

<b>Paso</b>	<b>Condición</b>	<b>Usuario/Fecha (DD/MM/YY)</b>
1	Encienda el mechero y modifique la llama hasta obtener la llama azul.	
Desviaciones encontradas		
2	Coloque el mechero en la parte inferior del soporte.	
Desviaciones encontradas		
3	Tome el tubo de ensayo y coloque la cera de abeja en el fondo de este.	
Desviaciones encontradas		
4	Coloque la tapa del termómetro en el tubo de ensayo.	
Desviaciones encontradas		
5	Tome el termómetro y colóquelo dentro del tubo de ensayo. Asegúrese que el termómetro está en contacto con la cera de abeja y que no toque en ningún momento al tubo de ensayo.	
Desviaciones encontradas		

6	Coloque el tubo de ensayo en el soporte, asegúrese que la llama del mechero aumente la temperatura del tubo de ensayo lentamente.	
Desviaciones encontradas		
7	Observe el comportamiento de la cera hasta que la primera gota de cera líquida aparezca y anote esa temperatura en la tabla 15.	
Desviaciones encontradas		
8	Deje que la cera de abeja cambie a estado líquido completamente y anote la temperatura hasta que esta sea constante en la tabla 15.	

A continuación, en la Tabla 15 se encuentran las temperaturas obtenidas para cada muestra de cera de abeja utilizada durante la prueba.

**Tabla 15: Temperatura inicial y final de la cera en el rango de fusión.**

Muestra de cera	Ti (°C)	Tf (°C)	Incertidumbre
CA 01			
CA 02			
CA 03			
CA 04			
CA 05			
CB 01			
CB 02			
CB 03			
CB 04			
CB 05			
CC 01			
CC 02			
CC 03			
CC 04			
CC 05			
CD 01			
CD 02			
CD 03			

Muestra de cera	Ti (°C)	Tf (°C)	Incertidumbre
CD 04			
CD 05			

### C. Viscosidad en estado líquido de la cera de abeja

Para obtener la viscosidad de la cera de abeja en estado líquido se propuso la utilización de un viscosímetro Brookfield DV-E. El procedimiento se basó en el estándar D2669 – 87 (2000) “Standard Test Method for Apparent Viscosity of Petroleum Waxes Compounded With Additives (Hot Melts) “.

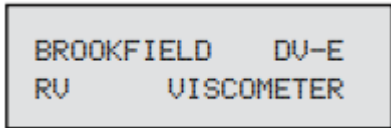
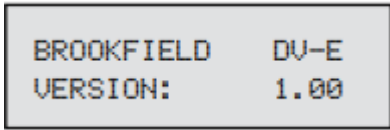
Para el procedimiento de ensamblaje e inicio del equipo (Tablas 16 y 17) está basado en el manual “Operating Instructions Brookfield Digital Viscometer” para su correcta nivelación y manejo.

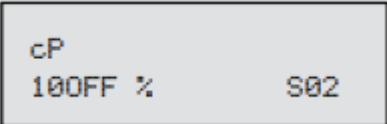
**Tabla 16: Ensamblaje del soporte y cabezal viscosímetro Brookfield.**

Paso	Condición para cumplir	Usuario/Fecha (DD/MM/YY)
1	Quite el tornillo y la roldana del soporte utilizando una llave de media pulgada.	
Desviaciones encontradas		
2	Coloque el soporte en la base.	
Desviaciones encontradas		
3	Atornille el soporte con la base utilizando el tornillo que fue previamente retirado, aprete con la llave de media pulgada.	
Desviaciones encontradas		

4	El cabezal debe ser colocado en las perillas ubicadas en el soporte la perilla de lado izquierdo debe ser aflojada para que permita la entrada de este. Antes de colocar el cabezal la nuez debe ser apretada con un destornillador.	
Desviaciones encontradas		
5	Luego debe de nivelar el viscosímetro utilizando el nivel que se encuentra en la parte de enfrente del cabezal. Para esto se debe de manipular la perilla de apriete del cabezal y los tornillos en la parte de debajo de la base.	
Desviaciones encontradas		
6	Colocar el cordón de toma de corriente en la parte trasera del cabezal (no lo conecte a la corriente).	

**Tabla 17: Inicio del viscosímetro Brookfield.**

Paso	Condición por cumplir	Usuario/Fecha (DD/MM/AA)
1	Encienda el equipo utilizando el interruptor ubicado en la parte posterior del cabezal. Aparecerá esta información en la pantalla; 	
Desviaciones encontradas		
2	Después de unos segundos, aparecerá esta información en la pantalla; 	

Desviaciones encontradas		
3	Luego de un periodo de tiempo, la pantalla mostrara el menú del equipo;	
		

Para la preparación de las pruebas se planteó la metodología bajo el estándar ASTM D2196 (2018) “Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) Viscometer”. Al tener que realizar las pruebas a 3 diferentes temperaturas (60°C, 70°C y 80°C) el cambio de temperatura debe ser controlado por lo cual se seguirá la metodología mostrada en la Tabla 18.

**Tabla 18: Preparación de las muestras de cera para la prueba de viscosidad.**

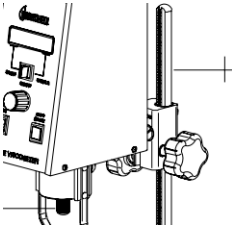
Paso	Condición para cumplir	Usuario/Fecha (DD/MM/YY)
1	Se debe de utilizar 200 ml de cera de abeja y colocarse en un beaker de 250 ml.	
Desviaciones encontradas		
2	Se introduce el beaker con la cera en un recipiente de cocina metálico con agua. El agua debe ser la necesaria para cubrir al menos la mitad del beaker.	
Desviaciones encontradas		
3	Introduzca el beaker adentro del recipiente con agua.	
Desviaciones encontradas		
4	Coloque el recipiente junto con el beaker en el soporte.	

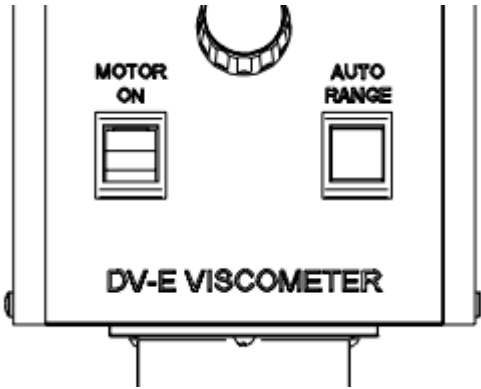
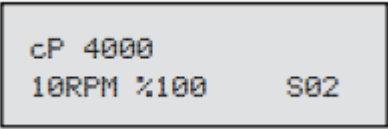
Desviaciones encontradas		
5	Prenda el mechero y posicónelo debajo del recipiente haciendo que esta suba su temperatura lentamente.	
Desviaciones encontradas		
6	Introduzca el termómetro dentro del beaker con cera.	
Desviaciones encontradas		
7	Al llegar la cera a 60°C y esta sea constante mueva el mechero para que no siga calentando la cera.	
Desviaciones encontradas		

A continuación, se encuentra la metodología a seguir para las realizar las pruebas (Tabla 19), este procedimiento está basado en el estándar ASTM D2669 – 87.

**Tabla 19: Procedimiento a seguir para la realización de las pruebas de viscosidad con cera de abeja.**

Paso	Condición para cumplir	Usuario/Fecha (DD/MM/YY)
1	La selección del spindle depende de la viscosidad de la muestra por lo cual se debe de realizar un procedimiento de prueba y error hasta encontrar el spindle y las RPM a la cual de un resultado satisfactorio (Donde se tenga un porcentaje de torque entre los valores de 10% y 100%). El laboratorio cuenta con spindles clasificación HV (High viscosity) y LV (Low Viscosity), por lo que, se debe empezar con la clasificación LV y variar las revoluciones hasta cumplir la condición mencionada con anterioridad.	

Desviaciones encontradas		
2	Coloque el spindle, para esto se debe sujetar el pivote firmemente y enroscar la aguja seleccionada en dirección a las manecillas del reloj hasta el tope, no debe ser apretada.	
Desviaciones encontradas		
	Luego Introduzca la velocidad en RPM, para esto debe de colocar el interruptor "Select" en la posición de "Speed" y utilizar la perilla para seleccionarlas.	
Desviaciones encontradas		
4	Luego de haber introducido esta información dejar en interruptor "Select" en el medio.	
Desviaciones encontradas		
5	Luego coloque el beaker con la cera a 60°C debajo de la aguja del viscosímetro.	
Desviaciones encontradas		
6	Con la perilla en el lado derecho baje el cabezal e introduzca la aguja hasta la marca indicada en ella. Asegúrese que la aguja este en el centro del beaker.	
Desviaciones encontradas		

7	<p>Presione el botón "Motor On" para iniciar la prueba y asegúrese que la temperatura de la cera sea 60°C durante toda la prueba.</p> 	
Desviaciones encontradas		
8	<p>Después de 7 revoluciones observe la pantalla y anote en la Tabla 20 el valor que aparezca más frecuentemente de las revoluciones (XXRPM), No. De aguja utilizada (SXX), porcentaje (%XXX), (Asegúrese que el porcentaje este en valores de 10% y 100% para que la experimentación sea válida) y el valor de viscosidad en centipoise (cP XXXX);</p> 	
Desviaciones encontradas		
9	<p>Seleccione la aguja que se colocó en el equipo, para esto debe de mover el interruptor "Select" hacia "Spindle" y con la perrilla seleccionar el número de aguja;</p>	

Desviaciones encontradas		
10	Realice este mismo procedimiento calentando la misma cera a 70 °C y 80°C posteriormente anote los resultados en la tabla 21 y 22.	

A continuación, se muestra los resultados obtenidos en el viscosímetro a 60°C, 70°C y 80°C. Es importante mencionar que la cera fue calentada a 60°C se retira del calor y se realizó la medición, posteriormente se calienta hasta alcanzar los 70°C y se repite el procedimiento hasta los 80°C (Tabla 19, 20 y 21).

**Tabla 20: Resultados dados por el Viscosímetro A 60°C.**

Muestra	Revoluciones (RPM)	Tipo y No. De aguja utilizada	Porcentaje de torque (%)	Viscosidad (Cp)
CA 01				
CA 02				
CA 03				
CA 04				
CA 05				
CB 01				
CB 02				
CB 03				
CB 04				
CB 05				
CC 01				
CC 02				
CC 03				
CC 04				
CC 05				
CD 01				
CD 02				

Muestra	Revoluciones (RPM)	Tipo y No. De aguja utilizada	Porcentaje de torque (%)	Viscosidad (Cp)
CD 03				
CD 04				
CD 05				

**Tabla 21: Resultados dados por el Viscosímetro A 70°C.**

Muestra	Revoluciones (RPM)	Tipo y No. De aguja utilizada	Porcentaje de torque (%)	Viscosidad (Cp)
CA 01				
CA 02				
CA 03				
CA 04				
CA 05				
CB 01				
CB 02				
CB 03				
CB 04				
CB 05				
CC 01				
CC 02				
CC 03				
CC 04				
CC 05				
CD 01				
CD 02				
CD 03				
CD 04				
CD 05				

**Tabla 22: Resultados dados por el Viscosímetro A 80°C.**

Muestra	Revoluciones (RPM)	Tipo y No. De aguja utilizada	Porcentaje de torque (%)	Viscosidad (Cp)
CA 01				
CA 02				
CA 03				
CA 04				
CA 05				
CB 01				
CB 02				
CB 03				
CB 04				
CB 05				

Muestra	Revoluciones (RPM)	Tipo y No. De aguja utilizada	Porcentaje de torque (%)	Viscosidad (Cp)
CC 01				
CC 02				
CC 03				
CC 04				
CC 05				
CD 01				
CD 02				
CD 03				
CD 04				
CD 05				

A continuación, a manera de ejemplo se presentará la metodología del poder calorífico con sus resultados para ser Guía de cómo trabajarlas y su respectiva sistematización.

#### **D. Poder calorífico Ácido Benzoico**

Para obtener el poder calorífico de la cera de abeja se utilizó un calorímetro de bomba de oxígeno Parr 1341. Este modelo está fabricado bajo los estándares ASTM D240 (2017) “Standard test method for heat of combustion of liquid hydrocarbon fuels by bomb calorimeter”, por lo cual se realizó la metodología y estandarización bajo estas normas.

Para la estandarización del proceso se realizaron las pruebas con ácido benzoico y se analizaron los resultados con la norma ASTM D5865 (2011), “Standard test method for gross calorific value of coal and coke by the isoperibol bomb calorimeter”. Para esto se prepararon tres pellets de ácido benzoico con la pastilladora Parr 2811 con una masa aproximada de un gramo cada una (Tabla 23).

**Tabla 23: Peso de las pastillas de ácido benzoico**

Pellet ácido benzoico	Peso ( $\pm 0.0001$ g)	Energía liberada ( $\pm 0.0006$ cal)
AB 01	1.0041	6.343
AB 02	1.0025	6.333
AB 03	1.0062	6.535

Se procedió a pesar el alambre o electrodo antes y después de realizar las pruebas (Tabla 24). Esto es importante ya que es necesario conocer la masa total

de alambre que se incineró durante la combustión, esto para realizar las correcciones por la energía liberada asociada a esta reacción.

**Tabla 24: Peso del alambre antes y después de la combustión**

Alambre / Electrodo	Peso inicial ( $\pm$ 0.0001 g)	Peso final ( $\pm$ 0.0001 g)	Energía liberada ( $\pm$ 0.07 cal)
MA 01	0.0140	0.0040	0.01400
MA 02	0.0140	0.0035	0.01470
MA 03	0.0147	0.0040	0.01498

Posteriormente, se procedió a ensamblar la bomba de oxígeno y el calorímetro siguiendo el estándar ASTM D240 (Tabla 25). El calorímetro proporcionará una base de datos las cuales se analizarán una hoja electrónica para la elaboración del termograma.

**Tabla 25: Lista de validación para el ensamblaje del calorímetro y bomba de oxígeno.**

Paso	Condición para cumplir	Usuario/Fecha (DD/MM/YY)
1	Coloque la bomba en un soporte A38A y fije un cable fusible de 10 cm de longitud entre los dos electrodos.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
2	Coloque la cápsula de combustible con su muestra ya pesada en el circuito del electrodo y doble el cable hacia abajo hacia la superficie de la carga. No es necesario sumergir el cable en una muestra en polvo. Cuando use muestras sólidas o pastillas, doble el cable de modo que el lazo se apoye contra la parte superior de la muestra con suficiente firmeza para evitar que se deslice contra el costado de la cápsula.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
3	La mayoría de los procedimientos de combustión de bombas requieren que se coloque una pequeña cantidad de líquido en el fondo de la bomba como agente secuestrante	

	y absorbente. Agregue 1.0 mL de agua destilada y desionizada con una pipeta.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
4	Verifique el empaque para asegurarse de que esté en buenas condiciones y humedezca con un poco de agua para que se deslice libremente en el cilindro; luego deslice la cabeza dentro del cilindro y presione hacia abajo tanto como sea posible.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
5	Coloque el tapón de rosca en el cilindro y firmemente con la mano hasta un tope sólido. Para cerrar correctamente se debe asegurar que no quede ninguna parte del cilindro sin enroscar.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Procedimiento siguiente		
6	Desenrosque la tapa protectora del tanque e inspeccione las roscas en la salida de la válvula de oxígeno para asegurarse de que estén limpias y en buenas condiciones.	
Desviaciones encontradas		
7	Coloque el extremo esférico de la conexión en el zócalo de salida y extraiga firmemente la tuerca de unión con una llave, manteniendo el dinamómetro en 0-55 atm, se debe tener el dinamómetro en posición vertical.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
8	Deslice el conector sobre el cuerpo de la válvula de entrada y presione hacia abajo tanto como sea posible. Si no se desliza fácilmente, una gota de agua esparcida alrededor de la válvula de entrada lubricara los anillos de sellado.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		

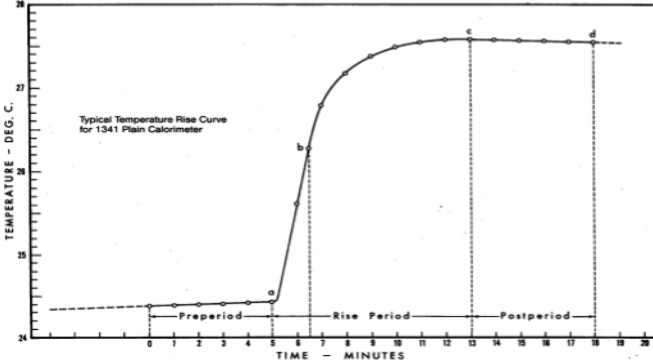
9	Cierre la válvula de salida en la cabeza de la bomba; luego abra la válvula del tanque de oxígeno no más de un cuarto de vuelta.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
10	Abra lentamente la válvula de control de la conexión de llenado y observe el medidor a medida que la presión de la bomba aumenta a la presión de llenado deseada (generalmente 30 atm., Pero nunca más de 40 atm.); luego cierre la válvula de control.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
11	Libere la presión residual en la manguera de llenado empujando hacia abajo la palanca unida a la válvula de alivio. El instrumento ahora debería volver a cero. Si la presión cae lentamente y se escapa una gran cantidad de gas cuando se abre la válvula de alivio de presión, la válvula de retención en el cabezal de la bomba no está funcionando correctamente.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Procedimiento siguiente		
12	Desempaque el calorímetro con cuidado y compruebe las partes individuales en la lista de embalaje.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Procedimiento siguiente		
13	Coloque la chaqueta en un banco o mesa resistente en un lugar que esté razonablemente libre de corrientes de aire y esté protegido de fuentes de calor radiante, preferiblemente en una habitación con aire acondicionado. Debe haber un acceso conveniente al agua, a un desagüe y a una toma de corriente con conexión a tierra adecuada. Se requerirán aproximadamente 8 pies cuadrados de espacio de trabajo.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Procedimiento siguiente		
14	Coloque la cubierta de la chaqueta.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)

Procedimiento siguiente		
15	Retire los dos tornillos del costado de la cubierta y conecte el motor de accionamiento del agitador.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
16	Ensamble los soportes de soporte de la cubierta.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Procedimiento siguiente		
17	Instale el termistor deslizándose a través de la abertura en la cubierta del calorímetro.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Procedimiento siguiente		
18	Ajuste la longitud del termistor para que coincida con la longitud del eje de agitación.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Procedimiento siguiente		
19	Apriete a mano la tuerca para asegurar el termistor.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Procedimiento siguiente		
20	Verifique la cubeta del calorímetro, observando los tres hoyuelos en el fondo que descansan sobre pasadores de soporte en la parte inferior de la chaqueta. El hoyuelo único siempre debe mirar hacia adelante al colocar la cubeta en la chaqueta.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Procedimiento siguiente		
21	Conecte la unidad de encendido.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Procedimiento siguiente		

22	Conecte uno de los cables conductores de la camisa del calorímetro al terminal con la etiqueta "10 cm". Conecte el segundo cable al terminal con la etiqueta "Común".	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Procedimiento siguiente		
23	Conecte el cable de alimentación a una toma de corriente con conexión a tierra. El cable de alimentación es el principal dispositivo de desconexión eléctrica de la unidad de encendido.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Procedimiento siguiente		
24	Después de enchufar la unidad a una toma de corriente, no presione el botón de disparo a menos que los cables conductores dentro de la cubierta estén conectados a una bomba. Si los terminales pelados de estos cables están en contacto entre sí o con un objeto metálico cuando el circuito está cerrado, el cortocircuito resultante puede causar daños graves al sistema de encendido.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Procedimiento siguiente		
25	Conecte la conexión de llenado de oxígeno.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Procedimiento siguiente		
26	Desenrosque la tapa protectora del tanque de oxígeno e inspeccione las roscas en la salida de la válvula para asegurarse de que estén limpias y en buenas condiciones	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Procedimiento siguiente		
27	Coloque el extremo esférico de la conexión de llenado de oxígeno 1825 en el zócalo de salida y extraiga la tuerca de unión con una llave, manteniendo los 0-55 atm en el medidor en posición vertical.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)

Procedimiento siguiente		
28	Coloque el extremo esférico de la conexión de llenado de oxígeno 1825 en el zócalo de salida y extraiga la tuerca de unión con una llave, manteniendo los 0-55 atm en el medidor en posición vertical.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Procedimiento siguiente		
29	Llene la cubeta del calorímetro primero tarando la cubeta sin agua; luego agregue 2000 (+/- 0.5) mililitros de agua. Se prefiere el agua destilada.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
30	Coloca la cubeta en el calorímetro.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
31	Fije la manija de elevación a los dos agujeros en el costado de la tapa del tornillo y baje parcialmente la bomba en el agua. Maneje la bomba con cuidado durante esta operación para que la muestra no se vea alterada.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
32	Empuje los dos cables conductores de encendido en las tomas de terminal en la cabeza de la bomba. Oriente los cables lejos del eje del agitador para que no se enreden en el mecanismo de agitación.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
33	Coloque la cubierta de la chaqueta.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		

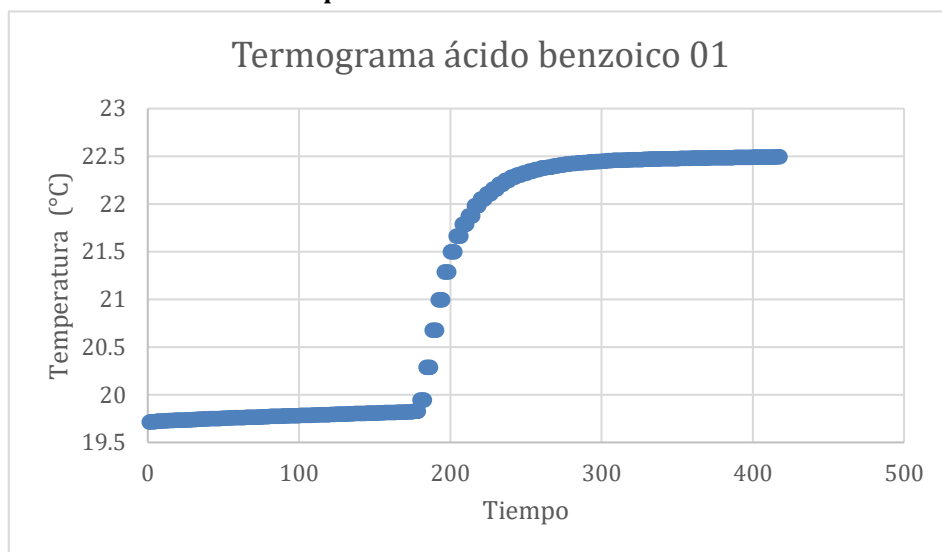
34	Gire el agitador a mano para asegurarse de que funcione libremente; luego deslice la correa de transmisión sobre las poleas y arranque el motor.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
35	Encienda el termómetro digital 6775.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
36	Deje que el agitador funcione durante 5 minutos para alcanzar el equilibrio antes de comenzar una carrera medida. Al final de este período, registre el tiempo en el temporizador del termómetro digital 6775 y lea la temperatura.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
37	Lea y registre temperaturas a intervalos de un minuto durante 5 minutos. Luego, al comienzo del sexto minuto.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
38	Apártese del calorímetro y encienda la bomba presionando el botón de encendido y manteniéndolo presionado hasta que se apague la luz indicadora. Normalmente, la luz brillará solo durante aproximadamente ½ segundo, pero suelte el botón en 5 segundos independientemente de la luz.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		

39	<p>La temperatura del balde comenzará a aumentar en 20 segundos después de disparar. Este aumento será rápido durante los primeros minutos; entonces será más lento a medida que la temperatura se acerque a un máximo estable como se muestra en la curva de aumento de temperatura típica. No es necesario trazar una curva similar para cada prueba, pero se deben registrar observaciones precisas de tiempo y temperatura para identificar ciertos puntos necesarios</p>  <p>para calcular el valor calorífico de la muestra.</p>	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
41	<p>Después del período de aumento rápido (aproximadamente 4 o 5 minutos después del encendido), registre las temperaturas a intervalos de un minuto hasta que la diferencia entre lecturas sucesivas haya sido constante durante cinco minutos.</p>	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
42	<p>Después de la última lectura de temperatura, pare el motor, retire la correa y levante la cubierta del calorímetro. Limpie el eje del termistor y el agitador con un paño limpio y coloque la cubierta en el soporte A37A.</p>	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
43	<p>Saca la bomba del cubo.</p>	Hugo Oliveros / (23/07/2020)

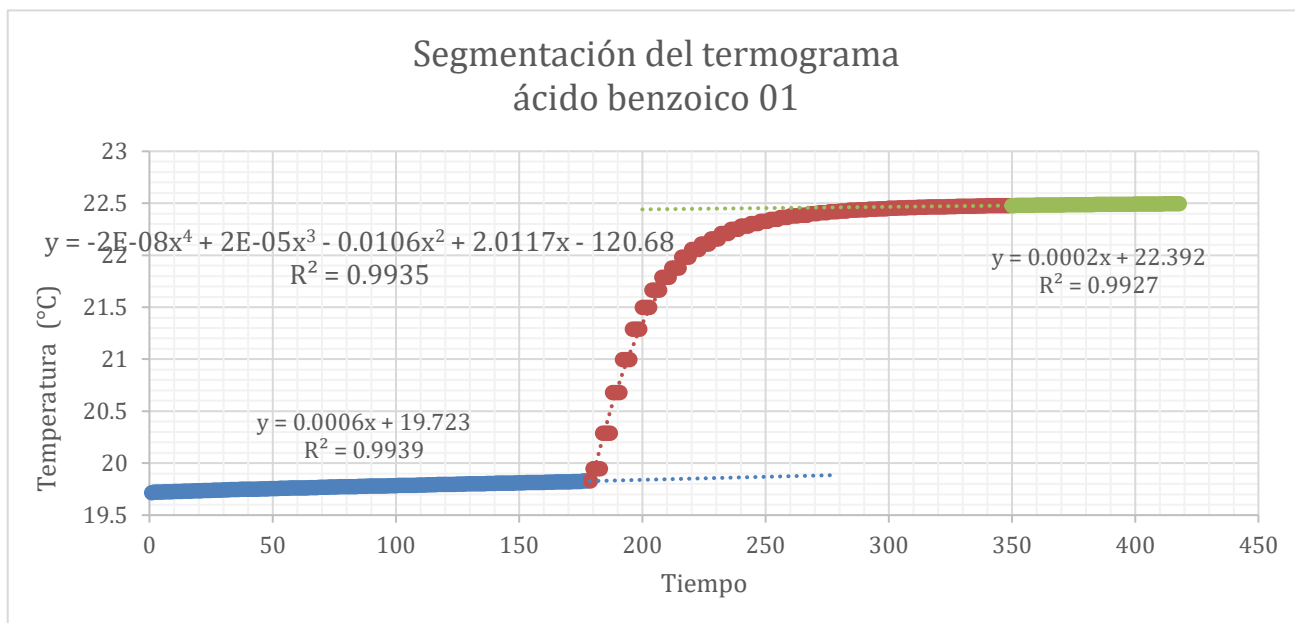
Desviaciones encontradas		
44	Retire los cables de encendido y limpie la bomba con una toalla limpia.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
45	Abra la perilla moleteada en la cabeza de la bomba para liberar la presión del gas antes de intentar quitar la tapa. Esta liberación debe realizarse lentamente durante un período de no menos de un minuto para evitar pérdidas de arrastre.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
46	Después de que se haya liberado toda la presión, desenrosque la tapa. Levante la cabeza del cilindro y colóquela en el soporte. Examine el interior de la bomba en busca de hollín u otra evidencia de combustión incompleta. Si se encuentra dicha evidencia, la prueba deberá descartarse.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
47	Lave todas las superficies interiores de la bomba con un chorro de agua destilada y recoja los lavados en un vaso de precipitados.	Hugo Oliveros / (23/07/2020)
Desviaciones encontradas		
48	Retire todos los pedazos de alambre fusible no quemados de los electrodos de la bomba; enderezarlos y medir su longitud combinada en centímetros. Reste esta longitud de la longitud inicial de 10 centímetros e ingrese esta cantidad en la hoja de datos como la cantidad neta de alambre quemado. Se prefiere pesar el cable del fusible antes y después de la prueba y usar la diferencia como la cantidad de cable quemado	Hugo Oliveros / (23/07/2020)

Luego de realizar las pruebas con el ácido benzoico se realizó el termograma de cada proceso de combustión (Gráfica 1). Para el correcto análisis de los resultados se utilizó el procedimiento del manual de experimentos de fisicoquímica de Shoemaker (2002). Para esto se debió de dividir cada termograma en tres segmentos, dos regresiones lineales y un polinomio de cuarto grado, cada división con su respectiva ecuación y coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el cual determina el grado en el que el comportamiento de los datos se ajusta al modelo planteado al ser más cercano su valor a 1. (Gráfica 2). A continuación, se encuentran las gráficas para la primera muestra de ácido benzoico, se siguió la misma metodología con todos los termogramas y pueden ser consultados en el anexo.

**Figura 10: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la primera muestra de ácido benzoico.**



**Figura 11: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la primera muestra de ácido benzoico.**



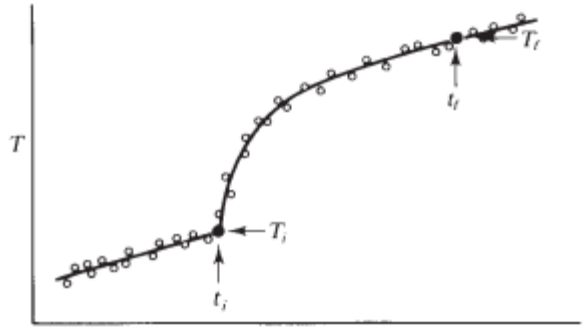
Posteriormente se utilizó el software Matlab para obtener coeficientes más exactos del polinomio y así tener una ecuación más acertada al comportamiento del polinomio. (Tabla 26).

**Tabla 26: Coeficientes del polinomio para cada muestra de ácido benzoico.**

Muestra de Ácido Benzoico	A ( $\times 10^{-08}$ )	B ( $\times 10^{-05}$ )	C	D	E
AB 01	-2.14039	2.46274	-0.01058	2.01168	-120.67568
AB 02	-6.05257	5.52999	-0.01897	2.89796	-141.43160
AB 03	-3.83114	2.41416	-0.00571	0.60284	2.59159

Después de haber seccionado la gráfica y haber obtenido los coeficientes se procedió a obtener el tiempo y temperatura antes y después de la combustión como se muestra en la Figura 1. Estas temperaturas servirán para poder determinar el cambio de temperatura en el sistema. Para obtener estas temperaturas se utilizó Solver en Excel para encontrar el tiempo en el que la regresión lineal y el polinomio se interceptaban (Tabla 27).

**Figura 12: Representación del termograma obtenido en el proceso de combustión.**



(Shoemaker, 2010).

**Tabla 27: Tiempos y temperaturas inicial y final para cada muestra de ácido benzoico.**

Muestra	ti (s)	Ti (°C)	tf (s)	Tf (°C)
AB 01	179.5	19.83	340.5	22.47
AB 02	151.5	22.69	241.3	25.28
AB 03	69.50	24.12	177.7	26.69

Debido a que no se podría asumir un proceso idealmente adiabático donde el cambio de temperatura asociado al proceso de combustión sería básicamente un proceso lineal, por lo cual la derivada de la temperatura respecto al tiempo es igual a cero, asumiendo que los productos de la combustión se encontraran en equilibrio térmico. Fue necesario aceptar que no existe un aislamiento perfecto por lo que se tendrá intercambio de calor entre los alrededores y el sistema, asimismo, un calorímetro implica el uso de agitación constante para asegurar el equilibrio térmico por lo que la energía mecánica relacionada al movimiento tendrá una repercusión en el cambio de la temperatura mostrado en el termograma. Teniendo en cuenta que el comportamiento de la temperatura respecto al tiempo no será lineal se debe modelar la variación de calor respecto al tiempo con la ley de enfriamiento de Newton (Ec. 9). De igual manera, a este modelo es necesario realizarle modificaciones para tomar en cuenta la energía mecánica del movimiento y expresar el calor en función de una capacidad calorífica y la derivada de la temperatura respecto al tiempo. De esta forma se podrá expresar el comportamiento diferencial de la temperatura respecto al tiempo con la ecuación 10.

$$\frac{dq}{dt} = -K(T - T_s)$$

(Ec. 9)

$$Cv * \frac{dT}{dt} = P - K (T - T_s)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{Cv} [P - K (T - T_s)]$$

(Ec. 10)

Donde P es la energía mecánica, Cv es la capacidad calorífica a volumen constante, Ts es la temperatura de los alrededores y T es la variable independiente.

Resolviendo para la ecuación diferencial, se integra desde el tiempo asociado a la temperatura ambiente hasta el tiempo asociado a la temperatura final de combustión como se expresa en la ecuación 11.

$$T_f - T_i = \Delta T \int_{t_i}^{t_f} \frac{dT}{dt} dt$$

(Ec. 11)

Resolviendo la integral, el cambio de temperatura puede ser expresado de la siguiente manera.

$$T_i - T_o = \Delta T = (T_f - T_i) - \frac{1}{Cv} \int_{t_i}^{t_f} [P - K (T - T_s)] dt$$

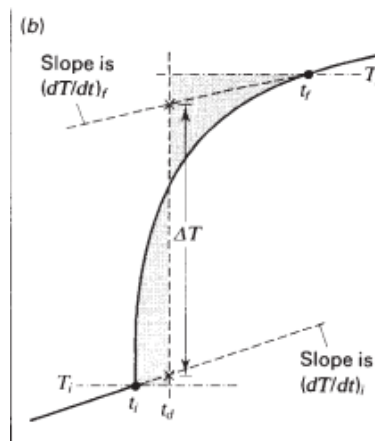
(Ec 12)

Para encontrar el cambio de temperatura se puede decir que la ley de enfriamiento de Newton  $k(T-T_s)$  posee un valor pequeño, pero no despreciable y la tasa de energía mecánica P es constante, en este caso el termograma tendrá el comportamiento mostrado en la Figura 13. Expresando el cambio de temperatura de la siguiente manera.

$$\Delta T = (T_f - T_i) - \left(\frac{dT}{dt}\right)_i * (T_d - T_i) - \left(\frac{dT}{dt}\right)_f * (T_f - T_d)$$

(Ec. 13)

**Figura 13: Cambio de temperatura para el termograma.**



(Shoemaker, 2002)

En la Figura 13 se elige arbitrariamente un valor de tiempo llamado  $t_d$  en el cual las áreas sombreadas serán iguales, como se expresa en la Tabla 28. Para obtener este valor tiempo se utilizó solver en Excel y así poder encontrar el valor del tiempo en que las áreas fueran iguales. Al tener el valor de  $t_d$  se sustituye en la ecuación 11 y se obtiene el cambio de temperatura.

**Tabla 28: Tiempo  $t_d$  y cambio de temperatura.**

Muestra	$t_d$ (s)	Incertidumbre	$\Delta T$ ( $\pm 0.07$ °C)
AB 01	261.3	0.15	2.477
AB 02	197.2	0.19	2.473
AB 03	124.5	0.21	2.546

Al tener el cambio de temperatura y la energía liberada por el alambre y el ácido benzoico se puede calcular con la ecuación 14, la capacidad calorífica del calorímetro (Tabla 29). Estos resultados deben someterse al análisis de la norma ASTM D5865, la cual establece que para su aceptación la desviación estándar debe ser 0.15% del promedio de las corridas con ácido benzoico (Tabla 30).

$$C_v = \frac{E_{alambre} + E_{ácido\ benzoico}}{\Delta T}$$

(Ec. 14)

**Tabla 29: Capacidad calorífica del calorímetro a volumen constante para cada muestra de ácido benzoico**

Muestra	$C_v$ ( $\pm 0.07$ cal/C°)
AB 01	2.567
AB 02	2.567
AB 03	2.573

**Tabla 30: Evaluación ácido benzoico bajo el estándar ASTM D5865.**

<b>Promedio (<math>C_v</math> calorímetro promedio)</b>	2.5688	cal / °C
<b>Varianza</b>	1.1925E-05	
<b>desviación estándar</b>	0.00345	
0.134%	≤	0.15%

Al cumplirse la norma ASTM D5865, se aceptó la estandarización del experimento y para obtener el poder calorífico de la cera de abeja se usa el promedio de la capacidad calorífica del calorímetro.

## E. Capacidad calorífica de la cera de abeja

Para obtener la capacidad calorífica de la cera de abeja se utilizaron 5 muestras de 4 diferentes ceras obtenidas por distintos proveedores (Tabla 31). Las muestras utilizadas fueron preparadas con una balanza analítica *Boeco* y cada una se preparó con una masa aproximada de 1 gramo (Tabla 32).

**Tabla 31. Proveedores de las muestras de cera.**

Muestra / Código	Proveedor	Ubicación	Tipo	Descripción
Cera A (CA)	Finca virgen del Socorro / AMCONO S.A.	Zona 14, Ciudad de Guatemala	Apis mellifera	Apariencia similar a la parafina.
Cera B (CB)	Apícola Méndez e hijos	Coatepeque, Quetzaltenango	Apis mellifera	Apariencia a cera laminada.
Cera C (CC)	Apícola Méndez e hijos	Coatepeque, Quetzaltenango	Apis mellifera	Apariencia a cera en bruto.
Cera D (CD)	Apiario Mercedes	Ixcán, Quiché	Apis Mellifera	Apariencia a cera en bruto.

**Tabla 32: Peso de las muestras de cera de abeja para cada proveedor**

Muestra	Peso ( $\pm 0.0001$ g)
CA 01	1.0081
CA 02	1.0065
CA 03	1.0039
CA 04	1.0042
CA 05	1.0036
CB 01	1.0041
CB 02	1.0068
CB 03	1.0045
CB 04	1.0066
CB 05	1.0046
CC 01	1.0002
CC 02	1.0011
CC 03	1.0053
CC 04	1.0018
CC 05	1.0048
CD 01	1.0005
CD 02	1.0002
CD 03	1.0072
CD 04	1.0015
CD 05	1.0018

Se pesó el alambre que reacciono para crear la chispa y la energía que liberó (Tabla 33). Para el análisis se utilizó el mismo procedimiento utilizado por Shoemaker por lo cual se dividió el termograma en dos regresiones lineales y un polinomio. Además, de obtener los coeficientes con Matlab para obtener resultados más exactos (Tabla 34). Se obtuvieron las temperaturas iniciales, finales, el tiempo  $d$  en el que la diferencia de las áreas bajo la curva es cero y finalmente el cambio de temperatura (Tabla 35).

**Tabla 33: Peso de alambre y energía liberada en cada prueba.**

Alambre	Peso inicial (g) $\pm$ 0.0001	Peso final (g) $\pm$ 0.0001	Energía liberada por el alambre (cal)
AA 01	0.0136	0.0036	0.0140 $\pm$ 0.00040
AA 02	0.0143	0.0044	0.0139 $\pm$ 0.00033
AA 03	0.0135	0.0071	0.0090 $\pm$ 0.00014
AA 04	0.0143	0.0084	0.0083 $\pm$ 0.00011
AA 05	0.0135	0.007	0.0091 $\pm$ 0.00015
AB 01	0.0139	0.0128	0.0015 $\pm$ 0.00002
AB 02	0.0169	0.0138	0.0043 $\pm$ 0.00004
AB 03	0.0134	0.0131	0.0004 $\pm$ 0.00004
AB 04	0.0163	0.0147	0.0022 $\pm$ 0.00002
AB 05	0.014	0.0103	0.0052 $\pm$ 0.00006
AC 01	0.0135	0.0105	0.0042 $\pm$ 0.00005
AC 02	0.0135	0.0123	0.0017 $\pm$ 0.00002
AC 03	0.014	0.0116	0.0034 $\pm$ 0.00004
AC 04	0.0155	0.0149	0.0008 $\pm$ 0.00001
AC 05	0.014	0.0051	0.0125 $\pm$ 0.00026
AD 01	0.0139	0.0128	0.0015 $\pm$ 0.00002
AD 02	0.0139	0.0128	0.0015 $\pm$ 0.00002
AD 03	0.0139	0.0128	0.0015 $\pm$ 0.00002
AD 04	0.0139	0.0128	0.0015 $\pm$ 0.00002
AD 05	0.0139	0.0128	0.0015 $\pm$ 0.00002

**Tabla 34: Coeficientes de los polinomios de cuarto grado para cada tipo de cera.**

Muestra de cera	A ( $\times 10^{-08}$ )	B( $\times 10^{-05}$ )	C	D	E
CA 01	-3.4809	3.6401	-0.01380128	2.27307923	-110.802181
CA 02	3.1596	-0.6874	-0.00221467	0.7315214	-25.6207878
CA 03	-5.7848	4.1006	-0.0107908	1.25407692	-25.6306234
CA 04	-9.1006	5.8348	-0.0139673	1.48412841	-31.0625417
CA 05	-4.2288	3.2905	-0.00935233	1.1604745	-25.3442577
CB 01	-5.928	4.6655	-0.01371271	1.78800292	-60.2323139
CB 02	-7.6934	5.5267	-0.01486286	1.77675104	-52.1548569
CB 03	-7.6503	4.613	-0.0103356	1.02455404	-8.78472597
CB 04	-7.6159	4.298	-0.0089885	0.83077301	0.82589042
CB 05	-8.2233	4.725	-0.010166	0.97429738	-8.6554207
CC 01	-8.0344	4.3384	-0.00879045	0.79652905	0.44861844
CC 02	-3.753	2.5379	-0.00590181	0.58185157	8.28541436
CC 03	-1.8849	1.9814	-0.0060255	0.73072362	-1.18006147
CC 04	-6.804	3.2681	-0.0058693	0.47041993	13.4319423
CC 05	11.092	-3.3375	0.00271049	0.0194397	22.620415
CD 01	0.8338	0.59642	-0.00368982	0.59406554	-1.81057317
CD 02	-1.3555	1.8693	-0.00720871	1.1002119	-29.9729121
CD 03	-7.6573	4.9896	-0.0121826	1.32448756	-23.8762096
CD 04	15.456	-6.439	0.00837865	-0.25099369	19.0006114
CD 05	1.4572	0.51412	-0.00346026	0.51251096	7.49443209

**Tabla 35. Tiempos y temperaturas inicial, final y tiempo d para cada muestra de cera de abeja.**

Muestra de cera	ti (s)	Ti (°C)	tf (s)	Tf (°C)	td (s)
CA 01	138.6	23.20	233.9	27.43	187.6
CA 02	108.6	23.29	192.6	27.48	151.9
CA 03	82.34	24.70	181.0	28.91	132.9
CA 04	78.06	24.06	177.5	28.28	129.0
CA 05	85.75	23.86	184.9	28.06	136.7
CB 01	104.7	23.08	203.3	27.26	155.4
CB 02	94.37	23.49	203.5	27.72	150.3
CB 03	63.45	25.16	154.4	29.33	110.1
CB 04	53.39	25.49	144.1	29.66	99.88
CB 05	60.36	22.41	160.6	26.63	111.8
CC 01	52.60	23.72	145.9	27.87	100.5
CC 02	47.56	25.15	139.2	29.28	94.60
CC 03	65.68	26.08	156.5	30.24	112.3
CC 04	32.58	23.58	140.7	27.79	88.03
CC 05	34.46	25.30	138.0	29.44	87.78
CD 01	73.76	24.57	165.6	28.73	121.0
CD 02	99.38	25.19	188.4	29.36	145.1
CD 03	78.33	26.22	177.7	30.42	129.2

Muestra de cera	ti (s)	Ti (°C)	tf (s)	Tf (°C)	td (s)
CD 04	85.53	26.81	162.7	30.94	125.2
CD 05	59.78	27.05	147.6	31.20	104.8

Al tener el cambio de temperatura en el sistema asociado a la reacción de combustión con el procedimiento descrito anteriormente, utilizando la ecuación 15, se relaciona con el poder calorífico promedio del calorímetro y se realizan las correcciones por la energía liberada del alambre. Finalmente se divide esa energía por la masa correspondiente de la muestra para poder obtener el poder calorífico de la cera de abeja (Tabla 36).

$$Cv_{Cera\ de\ abeja} = \frac{E_{Cera\ de\ abeja}}{m_{cera\ de\ abeja}} = Cv_{prom.calorimetro} * \Delta t - E_{alambre}$$

(Ec. 15)

**Tabla 36: Poder calorífico de cada muestra de cera de abeja.**

Muestra de cera	$\Delta T (\pm 0.07\ ^\circ C)$	Energía de la combustión de la cera ( $\pm 0.18\ cal$ )	Poder calorífico ( $\pm 0.0008\ kJ/kg$ )
CA 01	4.128	10.59	43.95
CA 02	4.079	10.47	43.51
CA 03	4.167	10.69	44.57
CA 04	4.170	10.70	44.60
CA 05	4.161	10.68	44.53
CB 01	4.133	10.616	44.24
CB 02	4.223	10.845	45.07
CB 03	4.154	10.671	44.45
CB 04	4.145	10.644	44.24
CB 05	4.161	10.684	44.50
CC 01	4.103	10.536	44.07
CC 02	4.101	10.533	44.02
CC 03	4.139	10.628	44.23
CC 04	4.166	10.700	44.69
CC 05	4.090	10.495	43.70
CD 01	4.106	10.547	43.77
CD 02	4.119	10.579	43.91
CD 03	4.169	10.709	44.45
CD 04	4.087	10.499	43.57
CD 05	4.108	10.552	43.79

Al tener el poder calorífico de la cera de abeja se puede obtener la entalpía de combustión (Ecuación 16) que se obtuvo para cada muestra de cera como se observa en la Tabla 37.

$$PC_{prom} = |hc| = H_{Productos} - H_{Reactivos}$$

(Ec. 16)

Donde PC es el poder calorífico promedio de la cera de abeja, la entalpía de combustión por la reacción es hc,  $H_{Productos}$  es la entalpía de los productos y  $H_{Reactivos}$  es la entalpía de los reactivos.

**Tabla 37: Entalpía de combustión obtenida en cada prueba con cera de abeja.**

Muestra de cera	Poder calorífico ( $\pm 0.0008$ kJ/kg)
CA 01	43.95
CA 02	43.51
CA 03	44.57
CA 04	44.6
CA 05	44.53
CB 01	44.24
CB 02	45.07
CB 03	44.45
CB 04	44.24
CB 05	44.5
CC 01	44.07
CC 02	44.02
CC 03	44.23
CC 04	44.69
CC 05	43.7
CD 01	43.77
CD 02	43.91
CD 03	44.45
CD 04	43.57
CD 05	43.79

Posteriormente se obtuvo la capacidad del calorímetro (Tabla 38) utilizando la ecuación 17. Con la capacidad se puede obtener la eficiencia que se obtuvo en la combustión del Calorímetro de bomba de oxígeno (Tabla 39) utilizando la ecuación 18.

$$Q_{Calorímetro} = m_{agua\ destilada} * C_{p_{calorímetro}} * (T_f - T_i)$$

(Ec. 17)

**Tabla 38: Capacidad del calorímetro para cada muestra de cera.**

Muestra de cera	Capacidad del calorímetro (kJ/kg °C)
CA 01	35.30
CA 02	34.99
CA 03	35.09
CA 04	35.25
CA 05	34.99
CB 01	34.93
CB 02	35.28
CB 03	34.85
CB 04	34.88
CB 05	35.21
CC 01	34.66
CC 02	34.52
CC 03	34.70
CC 04	34.66
CC 05	34.55
CD 01	34.75
CD 02	34.78
CD 03	35.03
CD 04	34.49
CD 05	34.65

$$\eta_{C_{\text{calorimetro}}} = \frac{Q_{\text{calorimetro}}}{Cv_{\text{Cera de abeja}}}$$

(Ec. 18)

**Tabla 39: Eficiencia de combustión para cada muestra de cera.**

Muestra de cera	Eficiencia de combustión
CA 01	79.67%
CA 02	79.90%
CA 03	78.41%
CA 04	78.70%
CA 05	79.90%
CB 01	78.63%
CB 02	77.76%
CB 03	78.05%
CB 04	78.32%
CB 05	78.77%
CC 01	78.63%

Muestra de cera	Eficiencia de combustión
CC 02	78.34%
CC 03	78.03%
CC 04	78.63%
CC 05	78.67%
CD 01	78.75%
CD 02	78.58%
CD 03	78.18%
CD 04	78.52%
CD 05	78.48%

## Análisis de varianza

En este estudio se tienen 4 muestras de ceras. Con este análisis lo que se quiere determinar es si hay una diferencia significativa entre las medias de las muestras.

La lógica nos dice que se debe de comparar sucesivamente las medias de cada muestra respecto a las otras, por ejemplo; Cera A vs. Cera B, Cera A vs. Cera C, Cera A vs. Cera D, Cera B vs. Cera C, Cera B vs. Cera D, Cera C vs. Cera D. Donde se tienen seis combinaciones posibles.

Sin embargo, esta comparación no es correcta ya que si se asumen un nivel de confianza del 95 % ( $p < 0.05$ ), se tienen una tasa de falsos positivos de al menos 5%. Por lo que, al realizar este tipo de comparaciones, existe la probabilidad que haya un aumento en esta tasa de hasta 30% ya que se tienen seis posibles combinaciones.

Teniendo en cuenta esto, se debe de realizar una comparación individual y un análisis global para determinar si existe alguna diferencia que pueda afectar los resultados. El análisis de varianza nos ayudara a determinar estas diferencias. Como primer paso se debe de obtener la varianza entre grupos (ecuación 19). Lo que se busca aquí es encontrar la dispersión de las medias de cada grupo respecto a la media global.

$$\frac{\sum n_j (X_j - X)^2}{j - 1}$$

(Ec. 19)

Donde  $n_j$  es el número pruebas de cada muestra,  $X_j$  es la media de cada muestra,  $X$  es la media global y  $j$  es el número de muestras.

En el numerador se está obteniendo la suma de los productos del número de observaciones por la diferencia entre la media del grupo y la media global al cuadrado lo que se conoce como *suma de cuadrados entre grupos* (SCG) y al dividir esto dentro del número de grupo menos uno obtenemos el *cuadrado de medias entre grupos* (CMG).

Ya con estos resultados se entiende que cada grupo tiene una media y una varianza. Donde hay valores de la media que están dispersos en la media grupal. Esta dispersión es la varianza intragrupo, esto se puede estimar con la ecuación 20.

$$\frac{\sum(n_j - 1) S_j^2}{N - j}$$

(Ec. 20)

Donde  $n_j$  es el número de pruebas de cada muestra,  $S_j^2$  es la varianza de cada muestra, N es el número total de pruebas y j el número de grupos.

Donde el numerador es la suma de los productos del número de observaciones menos uno por la varianza de cada grupo al cuadrado, esto recibe el nombre de *suma de cuadrados de error* (SCE). Al dividir este producto dentro del número de pruebas menos el número de grupos tenemos el *cuadrado del error de la media* (CEM).

Con esto se puede ver que la dispersión de las pruebas respecto a la media global se da por la dispersión de las medias de los grupos respecto a la media total y la dispersión en cada grupo de las muestras respecto a la media global.

El tener CMG y CEM definidos se busca encontrar cual es la fuente más importante de error en la varianza global, donde puede ser la varianza de las medias grupales en la media global o la varianza en cada grupo en la varianza global. Para determinarlo se debe de realizar la prueba F (Ecuación 21).

$$F = \frac{CMG}{CEM}$$

(Ec. 21)

Donde al obtener un valor F correspondiente a un valor  $P < 0.05$  indica que la varianza entre los grupos es fuente fundamental de la varianza total y hay que realizar más comparaciones. Sin embargo, al tener un F no significativo esto quiere decir que no hay una diferencia estadísticamente relevante entre los grupos que explique la varianza total y se tendrá un rango de confianza del 95%. Para obtener el valor F y su P correspondiente se utilizó la herramienta de análisis de datos de Excel llamada análisis de varianza de un factor (Tabla 40, Tabla 41, Tabla 42 y Tabla 43).

**Tabla 40: Análisis de varianza para el poder calorífico de la cera de abeja.**

<i>Análisis de varianza</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1.054	3	0.3512	2.529	0.0939	3.239
Dentro de los grupos	2.221	16	0.1388			
Total	3.275	19				

**Tabla 41: Análisis de varianza para la entalpia de combustión de la cera de abeja.**

<i>Análisis de varianza</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1.054	3	0.3512	2.529	0.0939	3.239
Dentro de los grupos	2.221	16	0.1388			
Total	3.275	19				

**Tabla 42: Análisis de varianza para la eficiencia de combustión en un calorímetro.**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.0003092	3	0.0001031	5.237	0.01040	3.2389
Dentro de los grupos	0.0003148	16	1.968E-05			
Total	0.0006240	19				

**Tabla 43: Análisis de varianza para la capacidad del calorímetro.**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.8430	3	0.2810	10.44	0.04775	3.239
Dentro de los grupos	0.4307	16	0.02692			
Total	1.274	19				

Al tener un valor F correspondiente a un valor P significativo se debe de evaluar nuevamente, pero ahora se debe dividir el 0.05 dentro del número de combinaciones posibles. Esta es una aproximación la cual nos ayuda a determinar si hay o no variaciones significativas en los grupos individuales. En este caso seis combinaciones para tener un nuevo valor de  $P < 0.0083$  y si no es significativo se concluye de igual forma que no hay una diferencia significativa entre los grupos que explique la varianza total y se tendrá un rango de confianza del 95%.

## VI. Resultados

Tabla 44: Evaluación bajo el estándar ASTM D5865

Promedio (Cv calorímetro promedio)	2.5688	cal / °C	
Varianza	1.19E-05		
desviación estándar	0.00345		
condición ASTM D8565	0.13%	≤	0.15%

Tabla 45: Propiedades termodinámicos Cera A.

Muestra de Cera A			
Poder calorífico (kJ/kg)	43.74	$\leq \bar{x} \leq$	44.72
Entalpía de combustión (kJ/kg)	43.74	$\leq \bar{x} \leq$	44.72
Eficiencia combustión (%)	78.61%	$\leq \bar{x} \leq$	80.02%
Energía de combustión (kJ)	34.98	$\leq \bar{x} \leq$	35.27

Tabla 46: Propiedades termodinámicos Cera B.

Muestra de Cera B			
Poder calorífico (kJ/kg)	44.16	$\leq \bar{x} \leq$	44.84
Entalpía de combustión (kJ/kg)	44.16	$\leq \bar{x} \leq$	44.84
Eficiencia combustión (%)	77.89%	$\leq \bar{x} \leq$	78.72%
Energía de combustión (kJ)	34.83	$\leq \bar{x} \leq$	35.23

Tabla 47: Propiedades termodinámicos Cera C.

Muestra de Cera C			
Poder calorífico (kJ/kg)	43.82	$\leq \bar{x} \leq$	44.22
Entalpía de combustión (kJ/kg)	43.82	$\leq \bar{x} \leq$	44.22
Eficiencia combustión (%)	78.19%	$\leq \bar{x} \leq$	78.73%
Energía de combustión (kJ)	34.54	$\leq \bar{x} \leq$	34.70

Tabla 48: Propiedades termodinámicos Cera D.

Muestra de Cera D			
Poder calorífico (kJ/kg)	43.57	$\leq \bar{x} \leq$	44.23
Entalpía de combustión (kJ/kg)	43.57	$\leq \bar{x} \leq$	44.23
Eficiencia combustión (%)	78.30%	$\leq \bar{x} \leq$	78.71%
Energía de combustión (kJ)	34.54	$\leq \bar{x} \leq$	34.94

**Tabla 49: Análisis de varianza del poder calorífico.**

Análisis de varianza estadístico p poder calorífico		
Estadístico p hipótesis	Condición	Estadístico p correspondiente a F
0.05	≤	0.0939

**Tabla 50: Análisis de varianza de la entalpía de combustión.**

Análisis de varianza estadístico p entalpía de combustión		
Estadístico p hipótesis	Condición	Estadístico p correspondiente a F
0.05	≤	0.0939

**Tabla 51: Análisis de varianza de la energía absorbida por el calorímetro.**

Análisis de varianza estadístico p		
Estadístico p hipótesis	Condición	Estadístico p correspondiente a F
0.05	≤	0.01040
0.0083	≤	0.01040

**Tabla 52: Análisis de varianza de la eficiencia de combustión en el calorímetro.**

Análisis de varianza estadístico p		
Estadístico p hipótesis	Condición	Estadístico p correspondiente a F
0.05	≤	0.0478
0.0083	≤	0.0478

**Tabla 53: Propiedades termodinámicos globales.**

Intervalos de confianza con un estadístico p < 0.05			
Poder calorífico (kJ/kg)	43.70	≤ x ≤	44.53
Entalpía de combustión (kJ/kg)	43.70	≤ x ≤	44.53
Eficiencia (%)	78.07%	≤ x ≤	79.22%
Energía (kJ)	34.62	≤ x ≤	35.14

## VII. Discusión de resultados

Para las pruebas en el calorímetro de bomba de oxígeno las muestras fueron cortadas con un bisturí de disección, pesadas en una balanza analítica y almacenadas de forma que no estuvieran expuestas al ambiente. Esto para que las condiciones ambientales no provocaran algún cambio o alteraran las propiedades de las muestras de cera. Por cuestiones de tiempo se realizaron las pruebas en diferentes días por lo que para evitar contaminaciones y mantener la humedad de las muestras se transportaron en bolsas ziplock el mismo día que se realizarían las pruebas al laboratorio de fisicoquímica, con el fin de asegurar que todas las muestras estuvieran expuestas al ambiente la misma cantidad de tiempo. Sin embargo, al realizarlas diferentes días no se puede asegurar que las condiciones ambientales a las que las muestras fueron expuestas sean las mismas.

Para la aceptación de la experimentación se utilizaron las normas ASTM D240 y D5865 que rigen el ensamblaje, manejo y estandarización del procedimiento para determinar el poder calorífico de sustancias utilizando un calorímetro de bomba de oxígeno. Para la aceptación de las pruebas se debe estandarizar el equipo antes de realizar las pruebas utilizando ácido benzoico, donde se busca que el 0.15 por ciento del promedio de la capacidad calorífica del calorímetro sea menor o igual a la desviación estándar, el fin de que esta condición sea tan rigurosa es para asegurarse que el equipo este calibrado correctamente, así como su buen funcionamiento y ensamblaje, ya que una alta variación podría indicar problemas con el equipo. Como se muestra en la Tabla 44 se logra cumplir esta condición. Sin embargo, se recomienda realizar diez pruebas con ácido benzoico, en esta investigación por cuestiones de tiempo y disponibilidad se realizaron únicamente tres pruebas lo cual puede afectar el parámetro de aceptación de la norma.

En cuanto al poder calorífico de la cera de abeja se obtuvo un valor promedio (Tabla 53) que al ser comparado con el valor de otros tipos de ceras de abeja (Figura 2), el valor promedio se encuentra en el rango de las ceras con un poder calorífico bajo. Sin embargo, es importante mencionar que estos valores fueron obtenidos con un calorímetro diferencial de escaneo el cual permite obtener este valor con mayor precisión respecto al calorímetro de bomba de oxígeno utilizado. Además, al comparar el poder calorífico de la cera de abeja obtenido con el valor teórico de la parafina (Tabla 1) esta posee un valor mucho menor al de este combustible convencional, por lo que es importante tener en

cuenta esto al momento de utilizarlo como sustituto o bien realizar alguna combinación de combustibles para un mejor rendimiento. Acerca de la eficiencia de combustión promedio obtenida en el calorímetro (Tabla 53) y compararla con el rango de eficiencia del manual del calorímetro Parr 1341 esta se encuentra en el rango aceptable para su utilización, por lo que a pesar de no ser tan preciso como un calorímetro diferencial de escaneo puede obtenerse resultados con poca dispersión.

El método estadístico de análisis de varianza fue utilizado para determinar si hay diferencia significativa entre la media de las muestras respecto a la media total o una dispersión de las mediciones de las muestras respecto a la media global que pueda afectar los resultados. Aquí se debe evaluar el estadístico  $p$  de cada muestra presentada, cuyo valor debe ser mayor a 0.05. El poder calorífico y entalpía de combustión cumplieron satisfactoriamente esta condición (Tablas 49 y 50), lo cual significa que no hay una variación significativa entre los grupos que explique la varianza total y se tendrá un rango de confianza del 95%. Sin embargo, para la energía absorbida por el agua y eficiencia de combustión del calorímetro (Tablas 51 y 52) se obtuvo un valor estadístico  $p$  menor a 0.05, en este caso se debe reevaluar el factor de probabilidad para determinar si hay o no variaciones significativas en los grupos individuales, dado que métodos más rigurosos como lo son el método de LSD (Least significant difference) o Tukey pueden afectar la aceptación estadística al identificar variaciones mínimas entre medias, se realizó una aproximación, donde la probabilidad es el 0.05 dividido seis el cual es el número de combinaciones posibles, esto significa que la contribución a la varianza global es equitativa para todos los grupos, entonces, para el nuevo parámetro de aceptación se encuentra que no hay una variación significativa entre los grupos que explique la varianza total para las propiedades de energía liberada y eficiencia de combustión del calorímetro.

Para el correcto análisis de los resultados obtenidos y termograma se realizó un formato electrónico en Excel siguiendo el manual de laboratorio de fisicoquímica de Shoemaker. Esta herramienta fue utilizada para obtener los termogramas y resultados de las propiedades termodinámicas como se muestra en la Tablas 45, 46, 47, 48 y 53. Dado que se necesitaba encontrar intersecciones entre gráficos polinomiales y lineales, Excel permite modelar este tipo de comportamientos con precisión por lo que facilita la obtención de los coeficientes polinomiales, asimismo, cuenta con herramientas de análisis de datos que permiten la obtención de incógnitas por métodos iterativos fáciles de utilizar como lo son Solver y buscar objetivo. Después de obtener los valores de las propiedades termodinámicas para cada muestra, se utilizó Excel ya que posee complementos estadísticos que permiten realizar el análisis de varianza de forma sencilla. Dado que se pudo validar los resultados por medio de las normas ASTM y análisis

estadístico, los formatos electrónicos desarrollados son aptos para ser utilizados en futuras experimentaciones.

## VIII. Conclusiones

- Se determinó que la metodología propuesta para el ensamblaje y calibración del calorímetro de bomba de oxígeno Parr 1341 es adecuada para su implementación en pruebas que requieran realizar termogramas, al presentar mediciones con una desviación estándar de 0.134% del valor promedio de la capacidad calorífica del calorímetro según las normas ASTM D240 y D5865.
- Siguiendo las metodologías basadas en las normas ASTM, manuales de los equipos, realizando cálculos a través de hojas electrónicas de Excel y un análisis estadístico de análisis de varianza se encontró que la cera de abeja de *Apis mellifera* en Guatemala presenta con un 95% de confianza un valor de poder calorífico promedio  $43.70 \text{ kJ/kg} \leq \bar{x} \leq 44.53 \text{ kJ/kg}$ .
- Se encontró que el poder calorífico de la cera de abeja *Apis mellifera* está en el rango de poder calorífico de 30 kJ/ kg a 50 kJ/kg lo cual significa que posee un poder calorífico bajo comparado con el de otras especies de Estados Unidos.
- Según el análisis de varianza de las propiedades termodinámicas: poder calorífico, entalpía de combustión, energía liberada y eficiencia de combustión del calorímetro; con valores de estadístico p de 0.0939, 0.0939, 0.01040 y 0.0478 respectivamente, no se encontró ninguna diferencia significativa entre las muestras de obtenidas de la Finca Virgen del Socorro, Apícola Méndez e hijos y Apiario Mercedes. Por lo que se puede decir que la metodología de preparación y manejo de las pruebas asegura la calidad y homogeneidad de las mismas.
- Se logró la sistematización dado que toda la metodología de la caracterización para la cera de abeja se encuentra descrito y ordenado en un solo documento, lo cual se pudo corroborar con el ejemplo de cálculo del poder calorífico de la cera de abeja con un valor entre 43.70 kJ/kg y 44.53 kJ/kg.

## **IX. Recomendaciones**

- Se recomienda realizar diez o más corridas con ácido benzoico para la estandarización ASTM D5865 para el calorímetro de bomba de oxígeno cuando se quiera obtener el poder calorífico de la cera de abeja.
- Es recomendable que cuando se realicen varias pruebas en diferentes días, se realice la estandarización ASTM D240 cada vez que las pruebas sean realizadas ya que no se puede asegurar que el equipo esté funcionando correctamente cada día que se realicen las pruebas.
- Es preferible realizar las pruebas el mismo día, si es posible utilizando varios calorímetros para disminuir el tiempo de trabajo, con el fin de asegurar que las condiciones ambientales sean las mismas cuando se realicen las pruebas.
- Se recomienda realizar más corridas para cada propiedad con cada cera ya que el análisis estadístico recomienda tener treinta datos para realizar el análisis de varianza y asegurar la normalidad de los datos utilizados.
- Se recomienda realizar pruebas con un calorímetro de escaneo diferencial (DSC por sus siglas en inglés), ya que presenta una mayor exactitud al momento de evaluar las propiedades termodinámicas y compararlas con las obtenidas con el calorímetro de bomba de oxígeno.

## X. Bibliografía

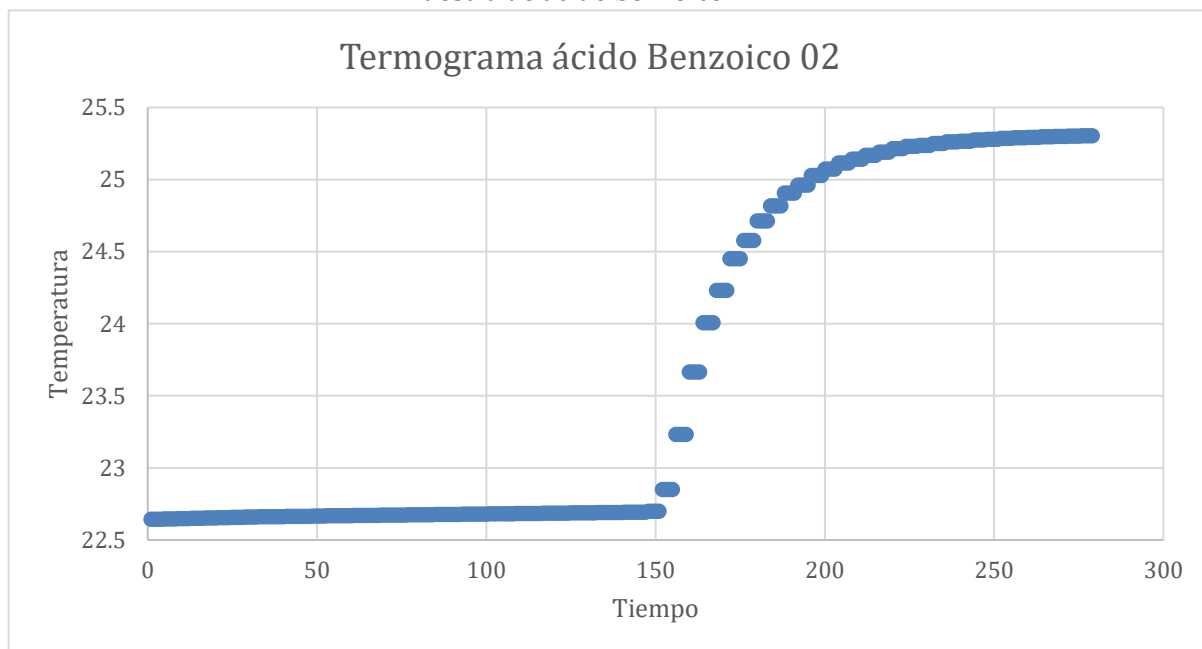
- Amin, M., Putra, N., Kosasih, E. A., Prawiro, E., Luanto, R. A., y Mahlia, T. M. I. (2017). *Thermal properties of beeswax/graphene phase change material as energy storage for building applications*. Applied Thermal Engineering, p 273-280.
- Buchwald, R., Breed, M. y Greenberg, A. (2007). *The thermal properties of beeswaxes*, The Journal of Experimental Biology, p 121-127.
- Cano, B., Schuster, J.C. (2012). *Biodiversidad de Guatemala Volumen 2*. Guatemala, Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala.
- Cantwell, B. J. (2019). *Aircraft and Rocket Propulsion. Chapter 11, Multistage Rockets*. California, Estados Unidos, Universidad de Stanford.
- Cengel, Y., Boles, M. (2015). *Termodinámica (8ª ed.)*. Ciudad de México, México: Mc Graw Hill.
- Dardón, M. (2007). *Caracterización de la Miel de Meliponinos de Distintas Regiones Biogeográficas de Guatemala*, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Evans, J. (2007). *Investigation of Non-Conventional Bio-Derived Fuels for Hybrid Rockets Motors*, Recuperado de <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a470435.pdf>
- Giuseppe, D. Mungiguerra, S. Carmicino, C. y Savino R. (2018). *Computational Fluid-dynamic Simulations of the Internal Ballistics of Hybrid Rocket Burning Paraffin-based fuel*, AIAA Propulsion and Energy Forum, Cincinnati, Ohio, July 09-11, 2018.
- Hall, N. (2015). *Solid Rocket Engine*, Recuperado de <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/srockth.html>

- Hossain, N. Rafidah, J. Mahlia, T y Zaini, J. (2017). *Calorific value analysis of Azadirachta excelsa and endospermum malaccense as potential solid fuels feedstock*, International Journal of Technology, Malaysia, 06 – 4, 2017.
- Jens, E.T., Karp, A.C., Nakazono, B., Vaughan, D. (2017). *Development Testing of Hybrid Rocket Motors Using Classical Fuels for Interplanetary CubeSats*, 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Atlanta, Georgia, July 10-12, 2017.
- Larson, B. Boyer, E. Wachs, T. y Kuo, K. (2011). *Characterization of the performance of Paraffin /LiAlH<sub>4</sub> Solid Fuels in a Hybrid Rocket System*, 47<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, California, San Diego, August 03-31, 2011.
- Mahottamananda, S. Nagaraja, P. y Pal, Y. (2020). *Regression Rate Characterization of HTPB-Paraffin Based Solid Fuels for Hybrid Rocket*, Propellants Explos Pyrotech, Malaysia, 01-10, 2020.
- Makled, A. Beeswax Material: *Non-conventional solid fuel for hybrid rocket Motors*, recuperado de [http://aimt.unob.cz/articles/19\\_01/1256.pdf](http://aimt.unob.cz/articles/19_01/1256.pdf)
- Manzoni, M. DeLuca, T. (2013). *Solid-Fuel Regression Rate Modeling for Hybrid Rockets*, Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/b51b/72c4943faf392878a0234bd293a80cecf00b.pdf>
- Martínez, M., González, D., Rodríguez, D., Birnie, J., Bagur, J.A., Paz, R., Miranda, E., Solórzano, F., Esquit, C., Gallegos, J., Álvarez, E., Ayerdi, V.H., Zea, L. (2018). *Guatemala's Remote Sensing CubeSat – Tools and Approaches to Increase the Probability of Mission Success*, 32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, Utah, August 4-10, 2018.
- Piscitelli, F., Saccone, G., Giavito, A., Cosentino, G. y Mazzola, L. (2018). *Characterization and manufacturing of a paraffin wax as fuel for hybrids rockets*. Propulsion and Power Research, p 218 -230.
- Roubik, D. (1992). *Ecology and natural history of tropical bees*. Cambridge tropical biology series. Cambridge University press. Estados Unidos. p 544.

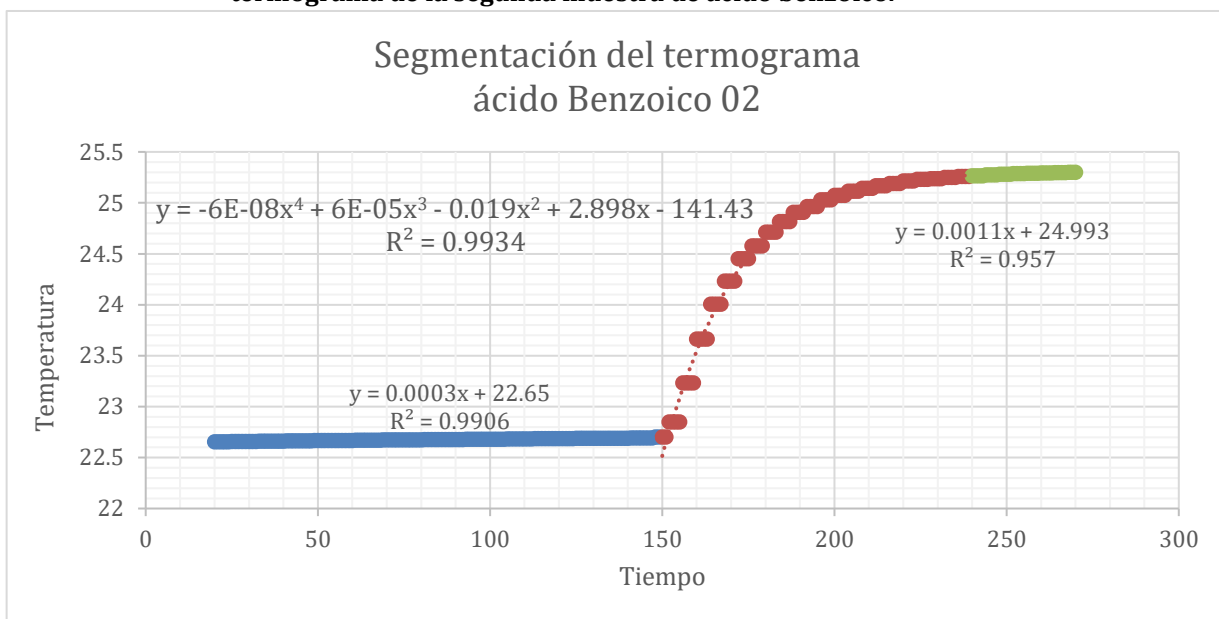
- Setyawan, D., Noorma, R. (2017). *Physical characterization of beeswax and glyceryl monostearat binary system to predict characteristics of solid lipid nanoparticle (SLN) loaded para methoxy cinnamic acid (PMCA)*, recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/260834716\\_Physical\\_characterization\\_of\\_beeswax\\_and\\_glyceryl\\_monostearat\\_binary\\_system\\_to\\_predict\\_characteristics\\_of\\_solid\\_lipid\\_nanoparticle\\_SLN\\_loaded\\_para\\_methoxy\\_cinnamic\\_acid\\_PMCA](https://www.researchgate.net/publication/260834716_Physical_characterization_of_beeswax_and_glyceryl_monostearat_binary_system_to_predict_characteristics_of_solid_lipid_nanoparticle_SLN_loaded_para_methoxy_cinnamic_acid_PMCA)
- M. Amin, N. Putra, E.A. Kosasih, E. Prawiro, R. Achmad Luanto, T.M.I. Mahlia, *Thermal properties of beeswax/graphene phase change material as energy storage for building applications, Applied Thermal Engineering* (2016), recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.085>

## XI. Anexos

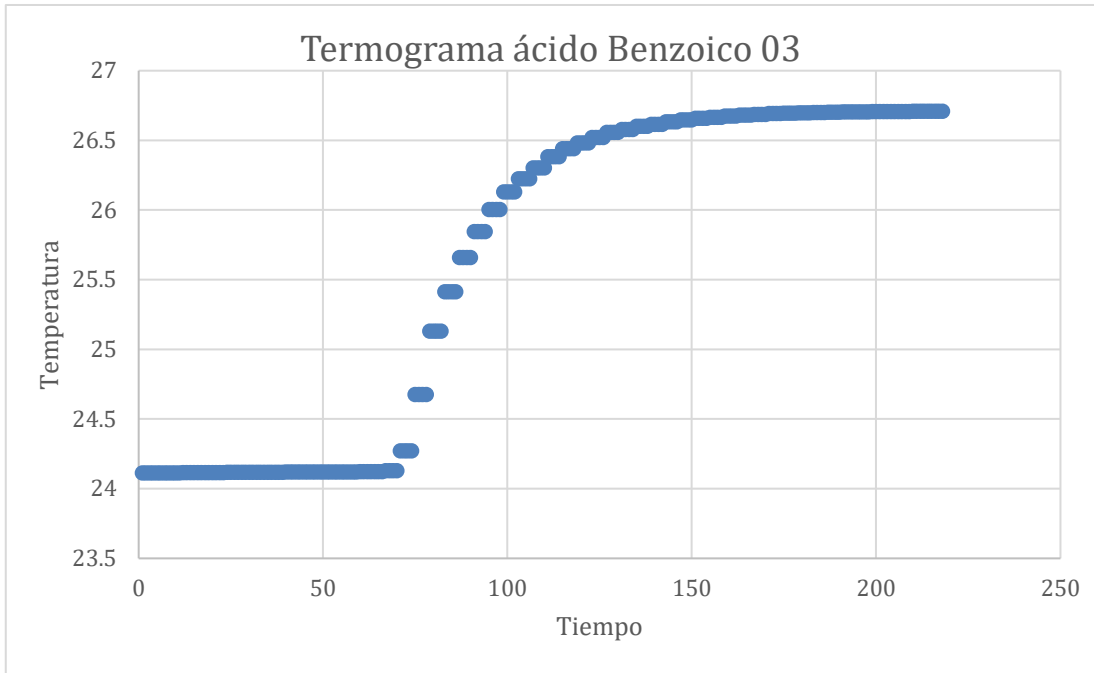
**Figura 14: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la segunda muestra de ácido benzoico.**



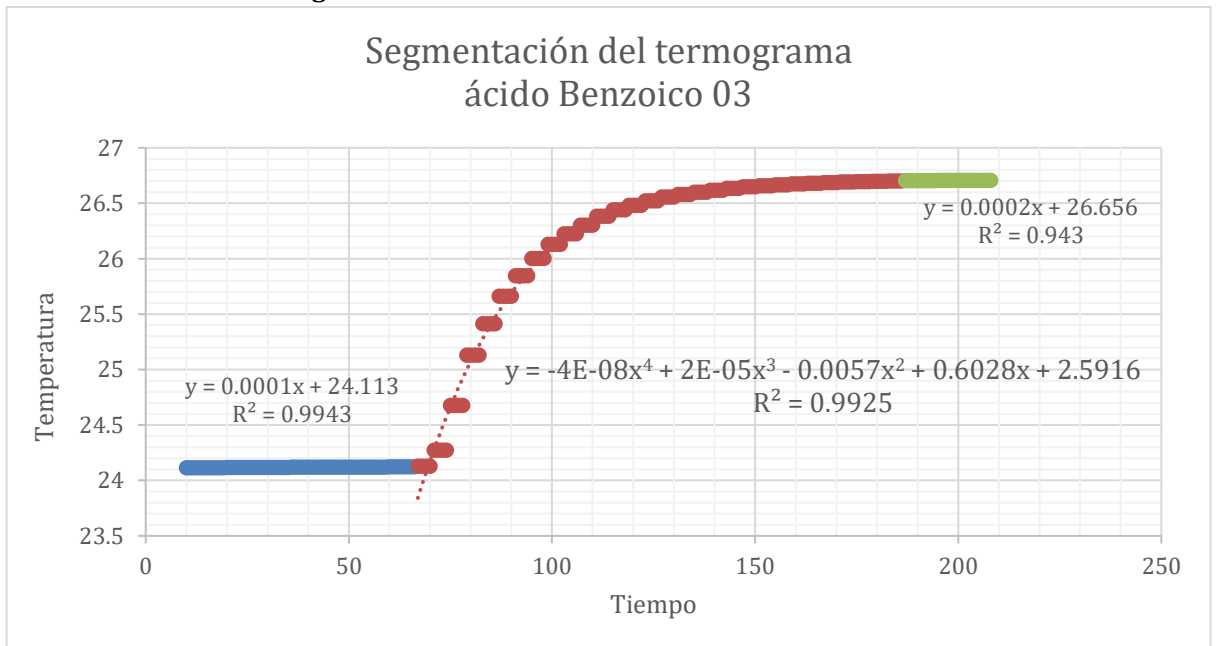
**Figura 15: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la segunda muestra de ácido benzoico.**



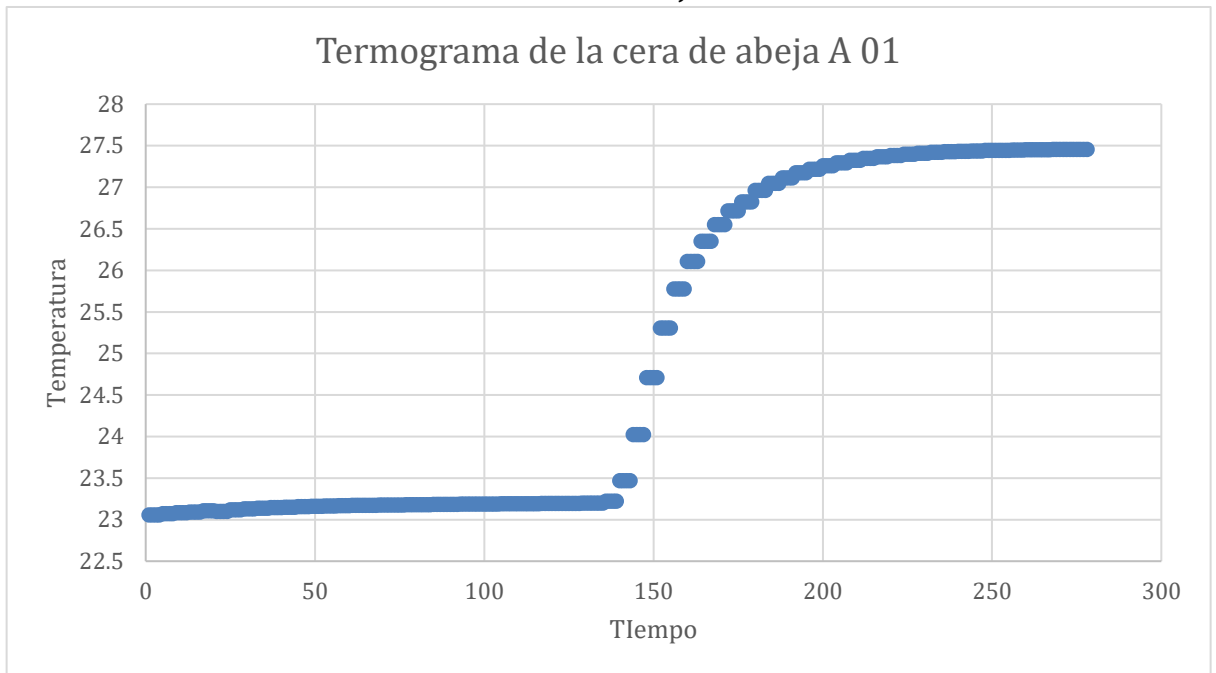
**Figura 16: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la tercera muestra de ácido benzoico.**



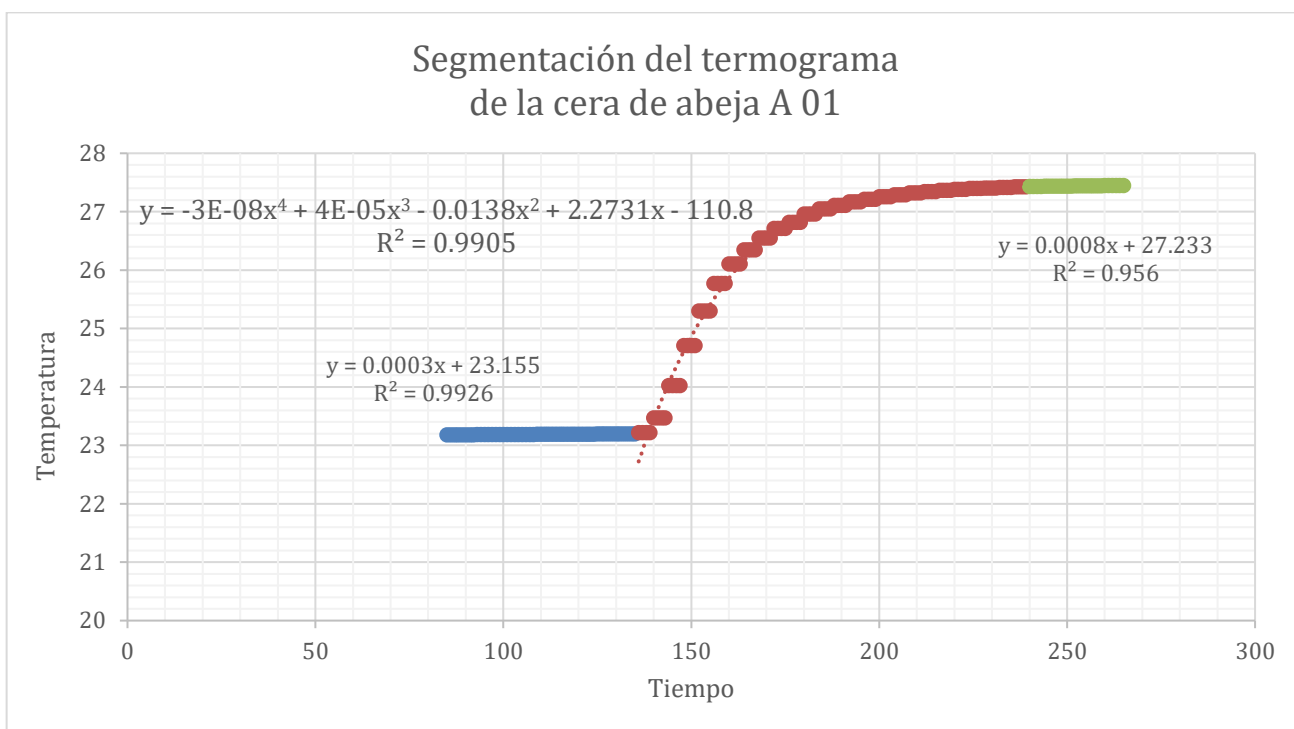
**Figura 17: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la tercera muestra de ácido benzoico.**



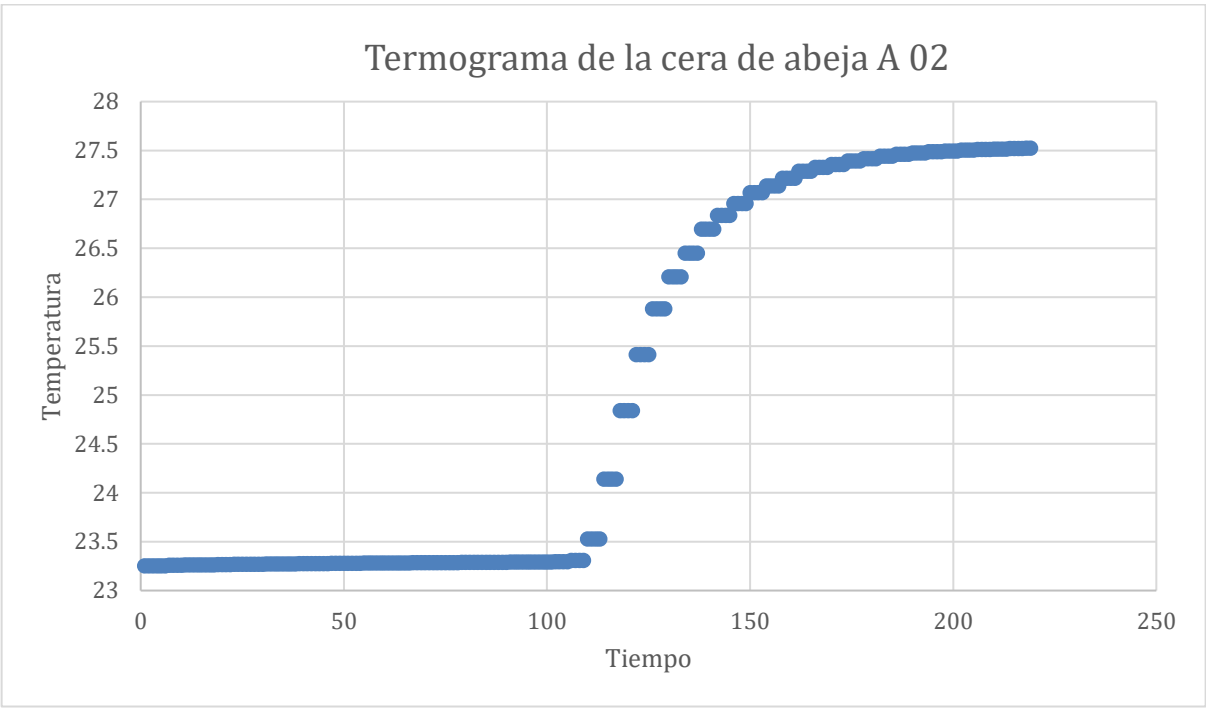
**Figura 18: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la primera muestra de cera de abeja A.**



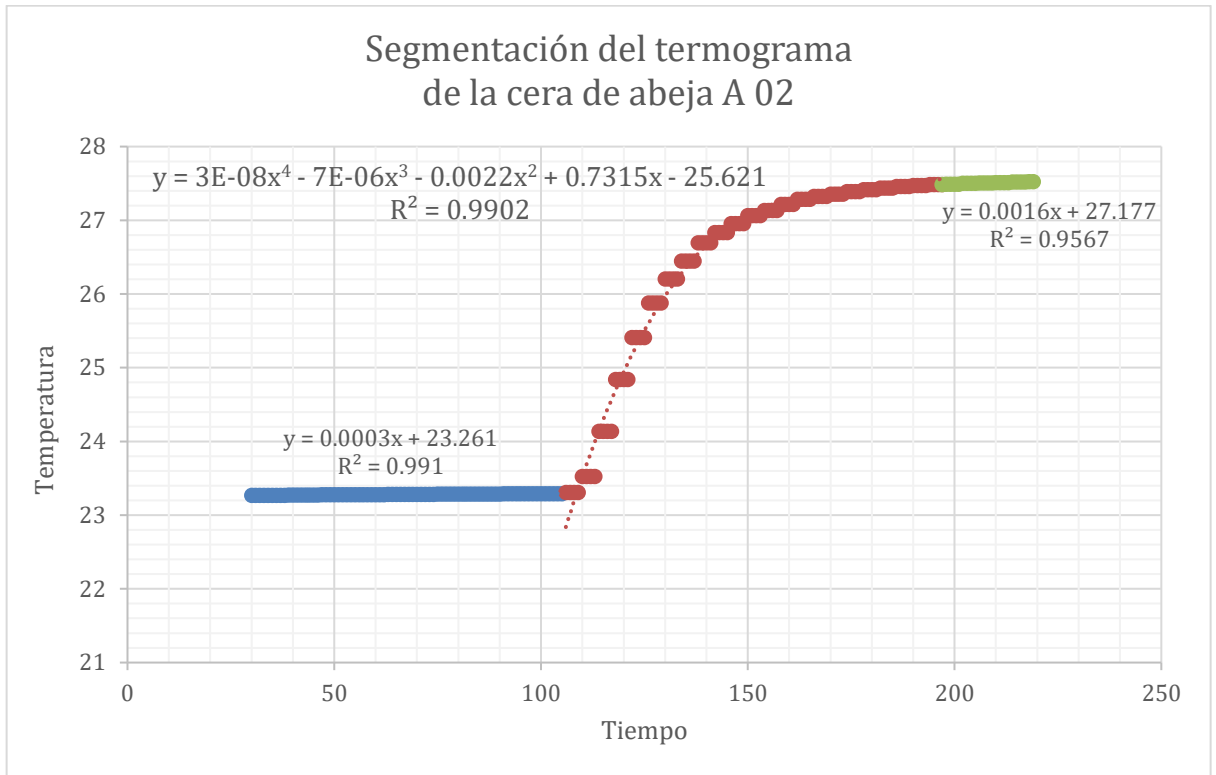
**Figura 19: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la primera muestra de la cera de abeja A.**



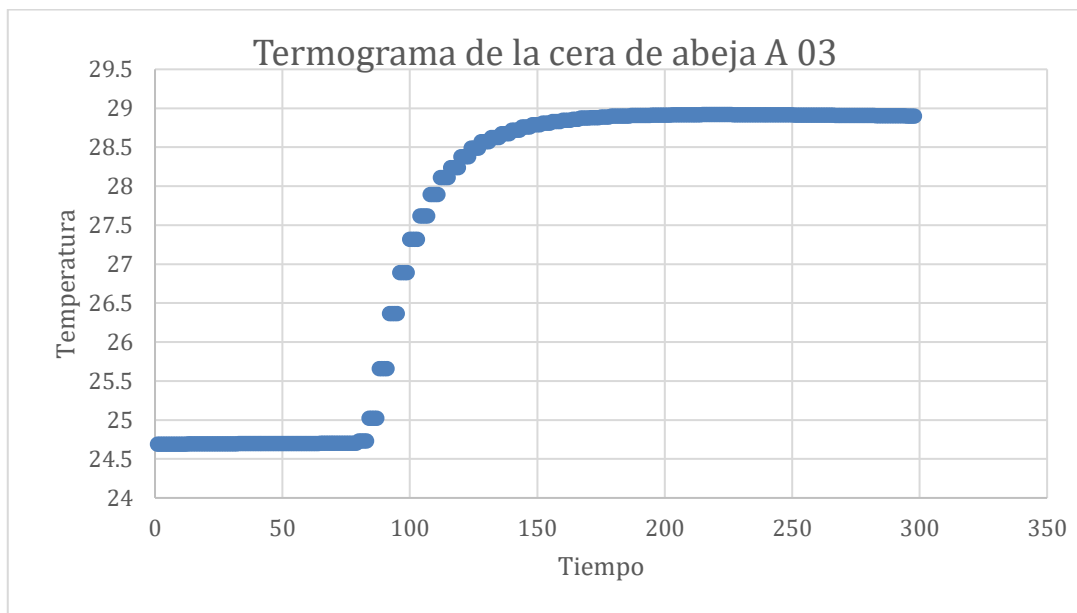
**Figura 20: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la segunda muestra de cera de abeja A.**



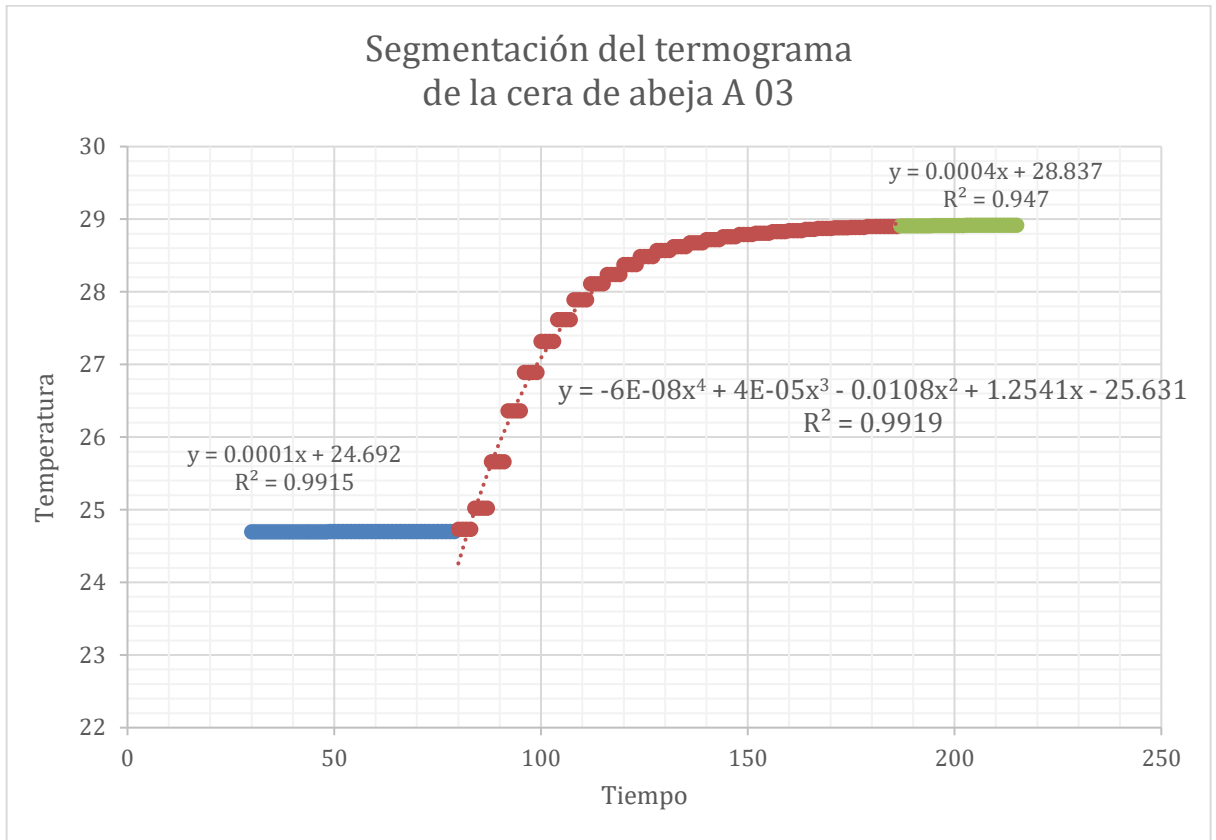
**Figura 21: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la segunda muestra de la cera de abeja A.**



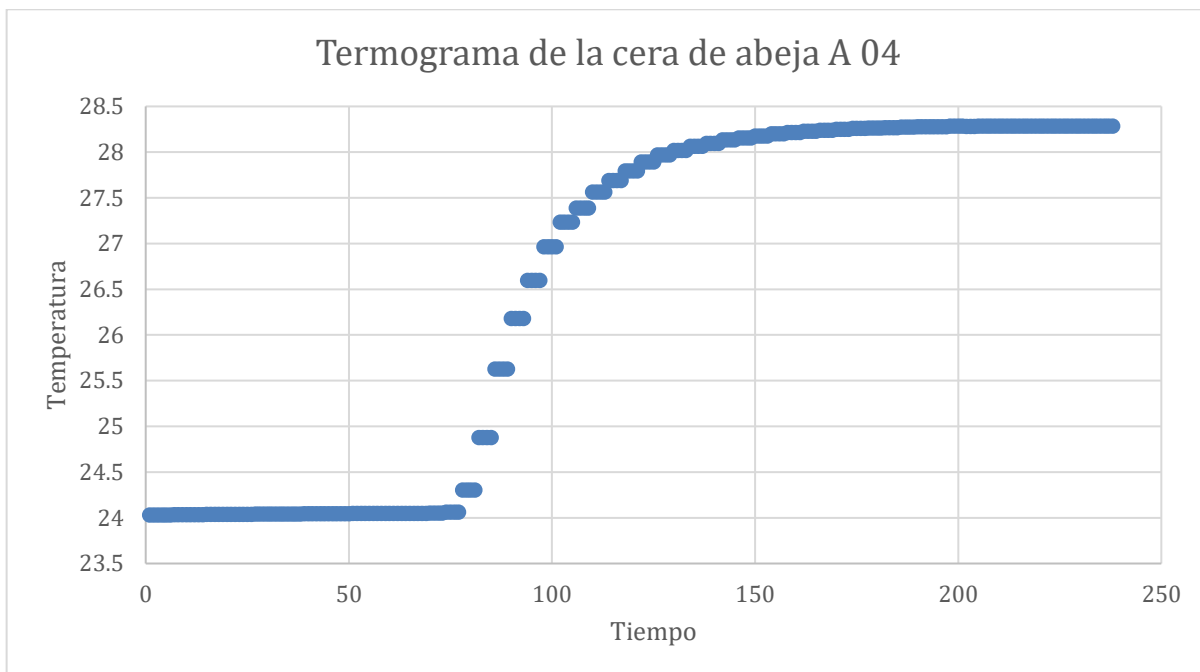
**Figura 22: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la tercera muestra de cera de abeja A.**



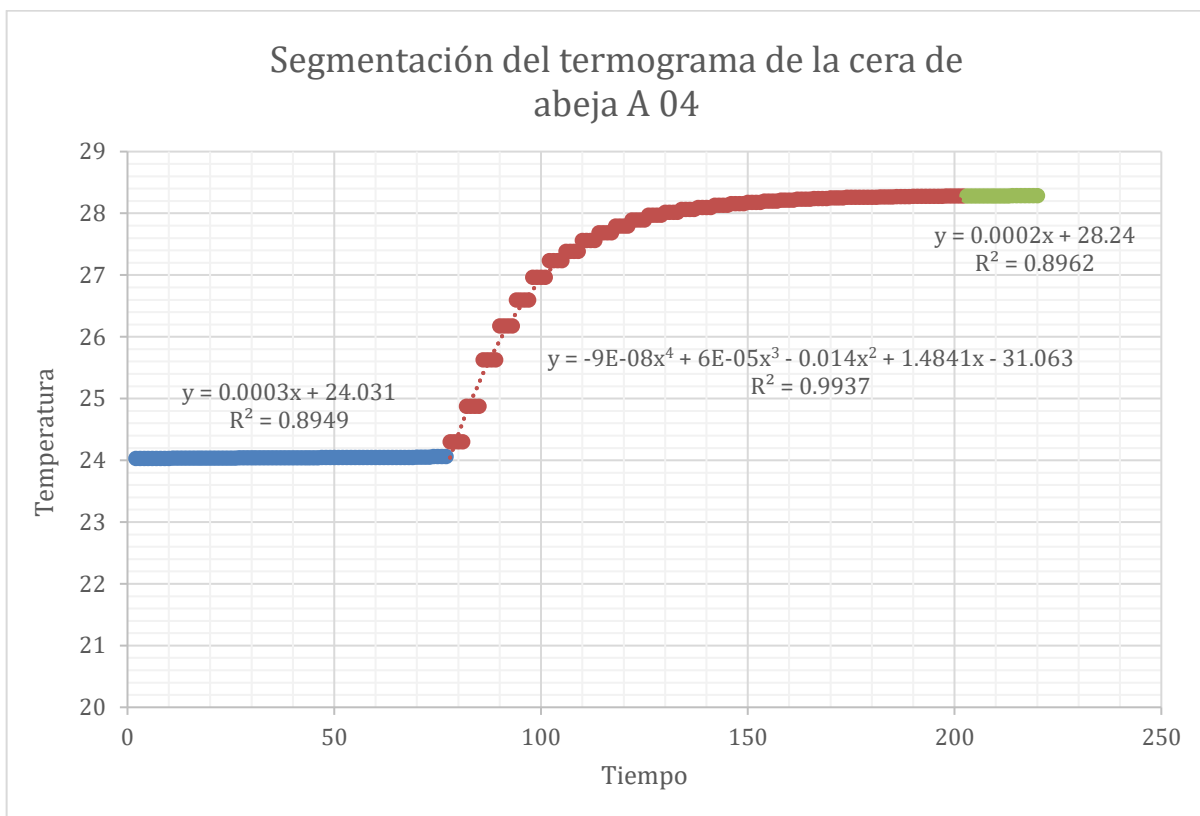
**Figura 23: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la tercera muestra de la cera de abeja A.**



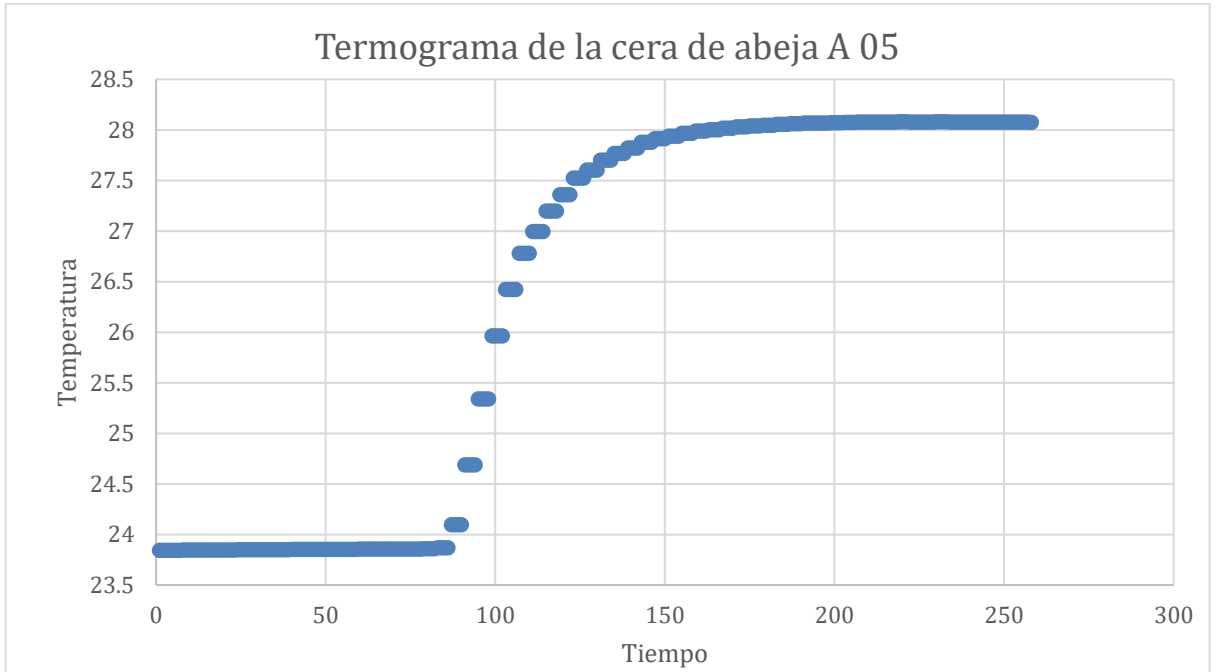
**Figura 24: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la cuarta muestra de cera de abeja A.**



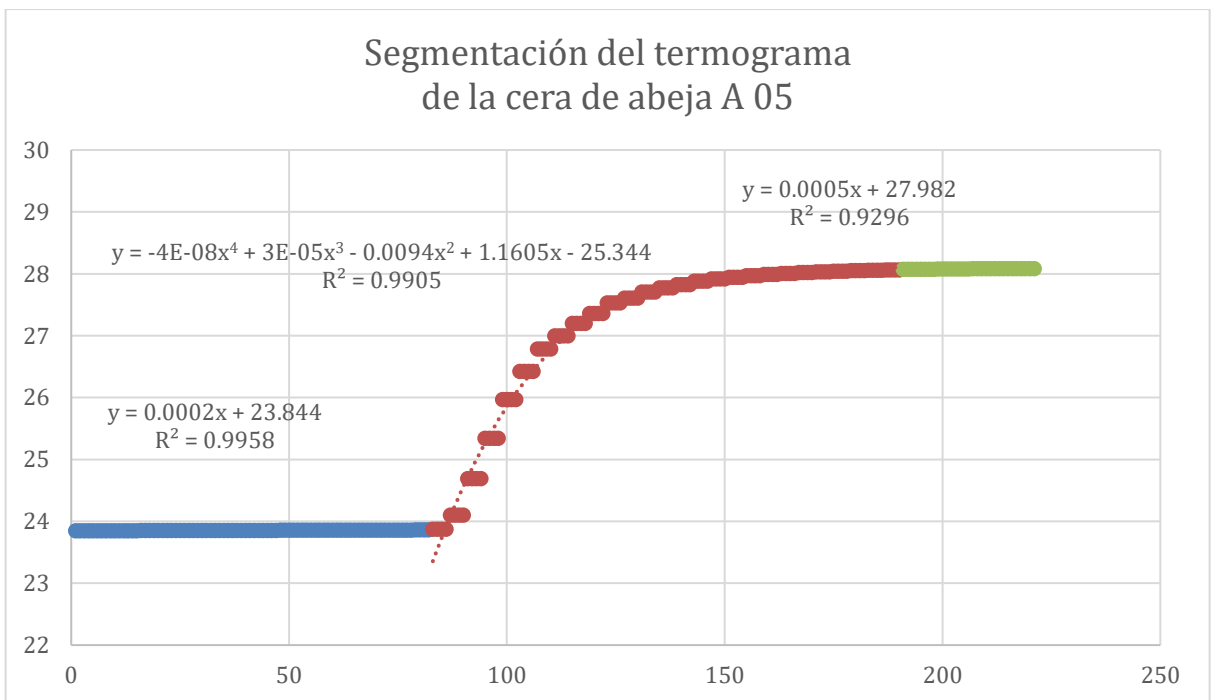
**Figura 25: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la cuarta muestra de la cera de abeja A.**



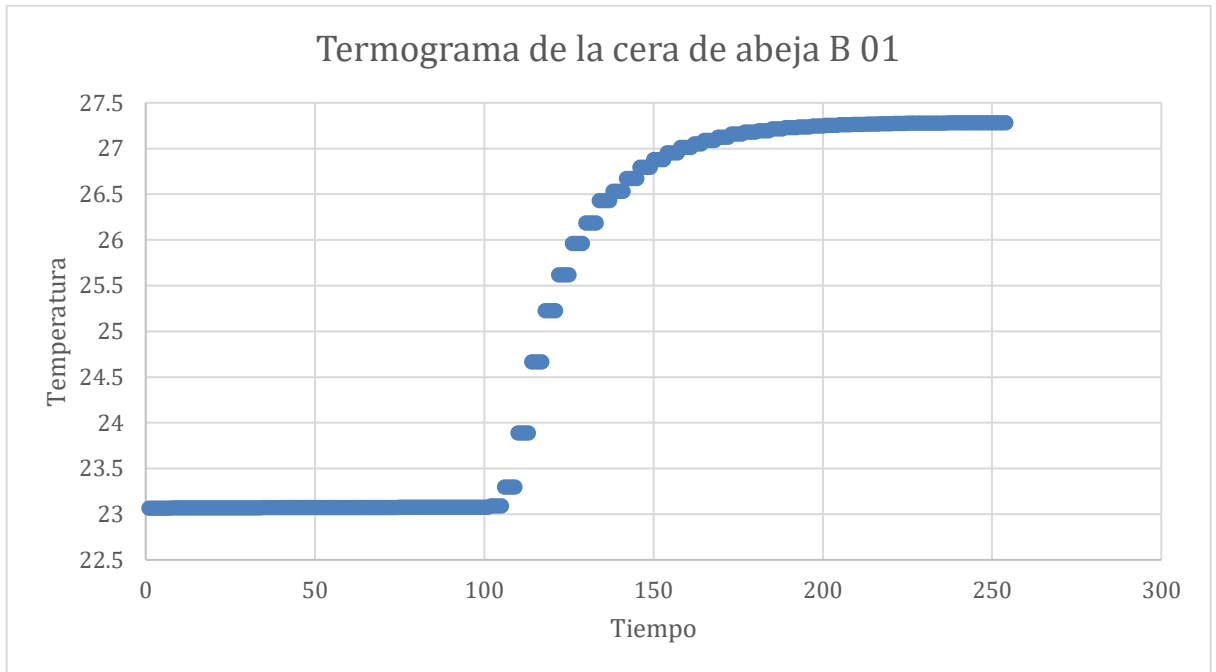
**Figura 26: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la quinta muestra de cera de abeja A.**



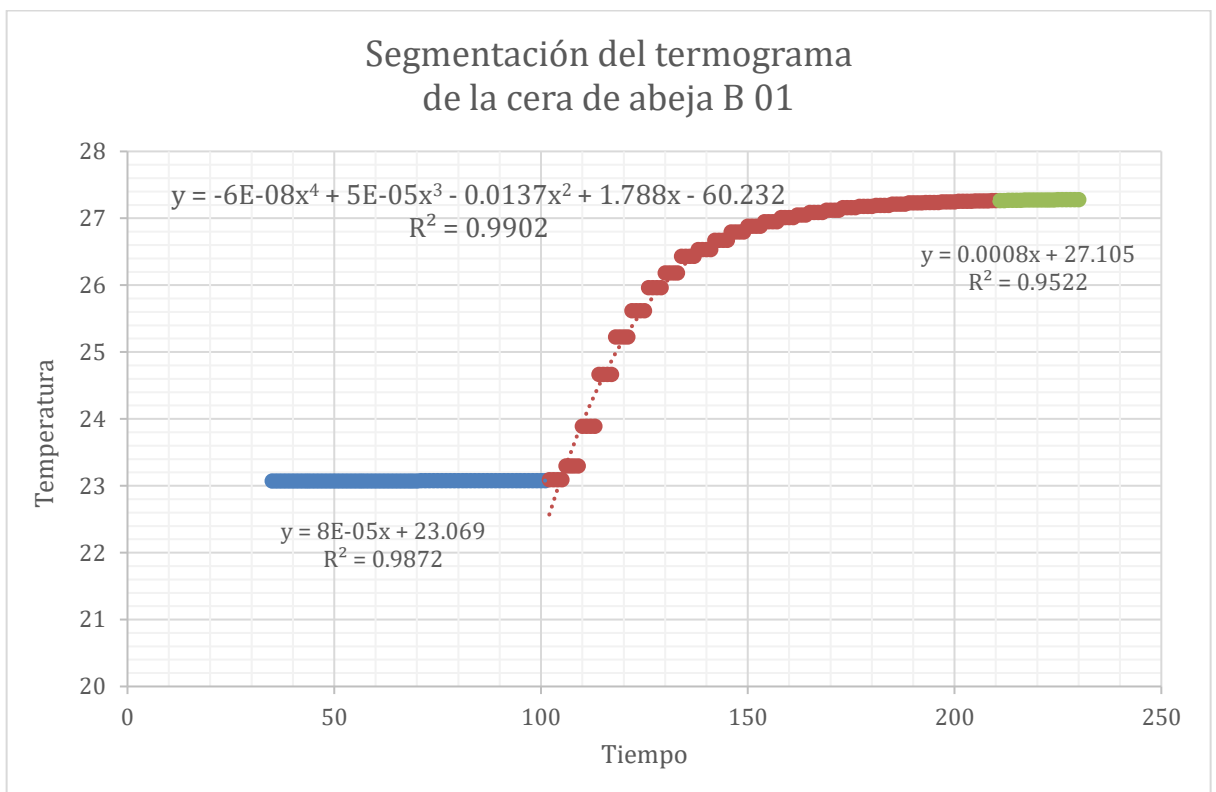
**Figura 27: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la quinta muestra de la cera de abeja A.**



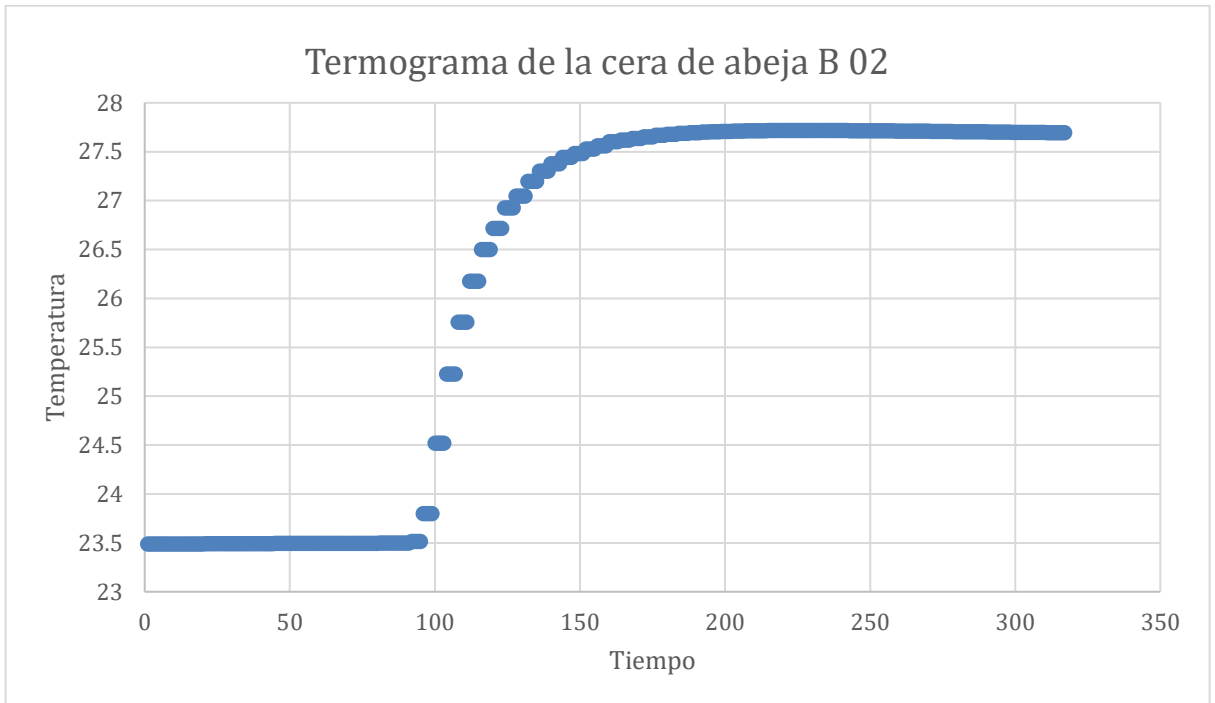
**Figura 28: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la primera muestra de cera de abeja B.**



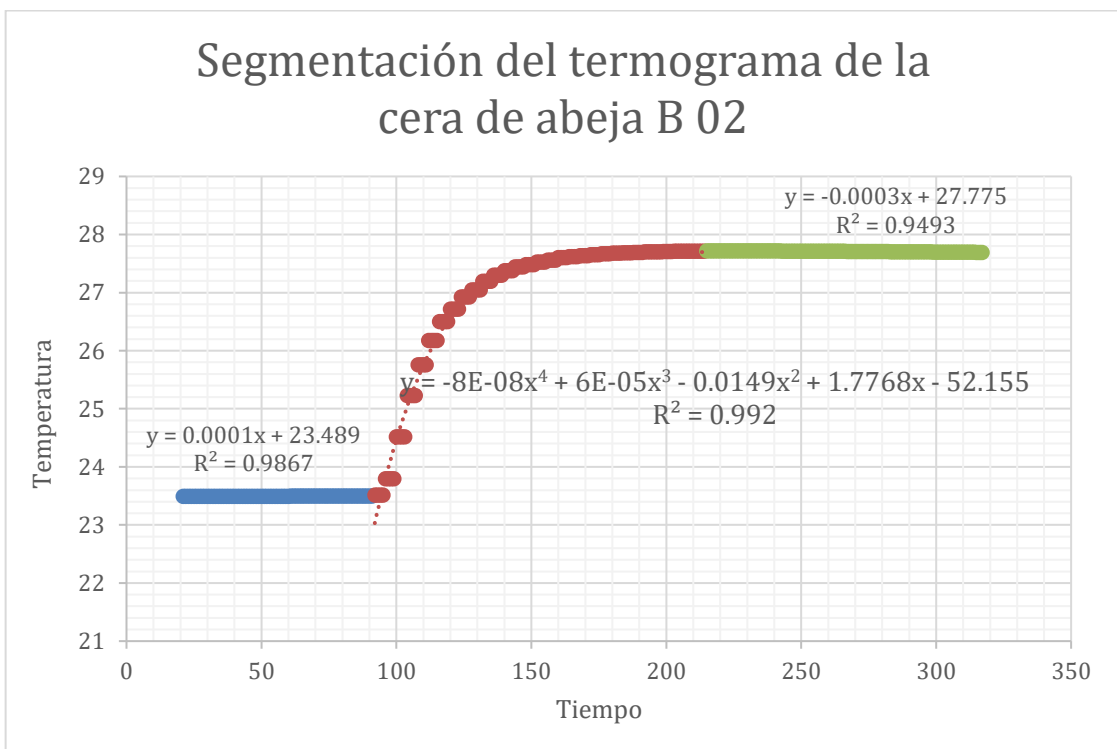
**Figura 29: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la primera muestra de la cera de abeja B.**



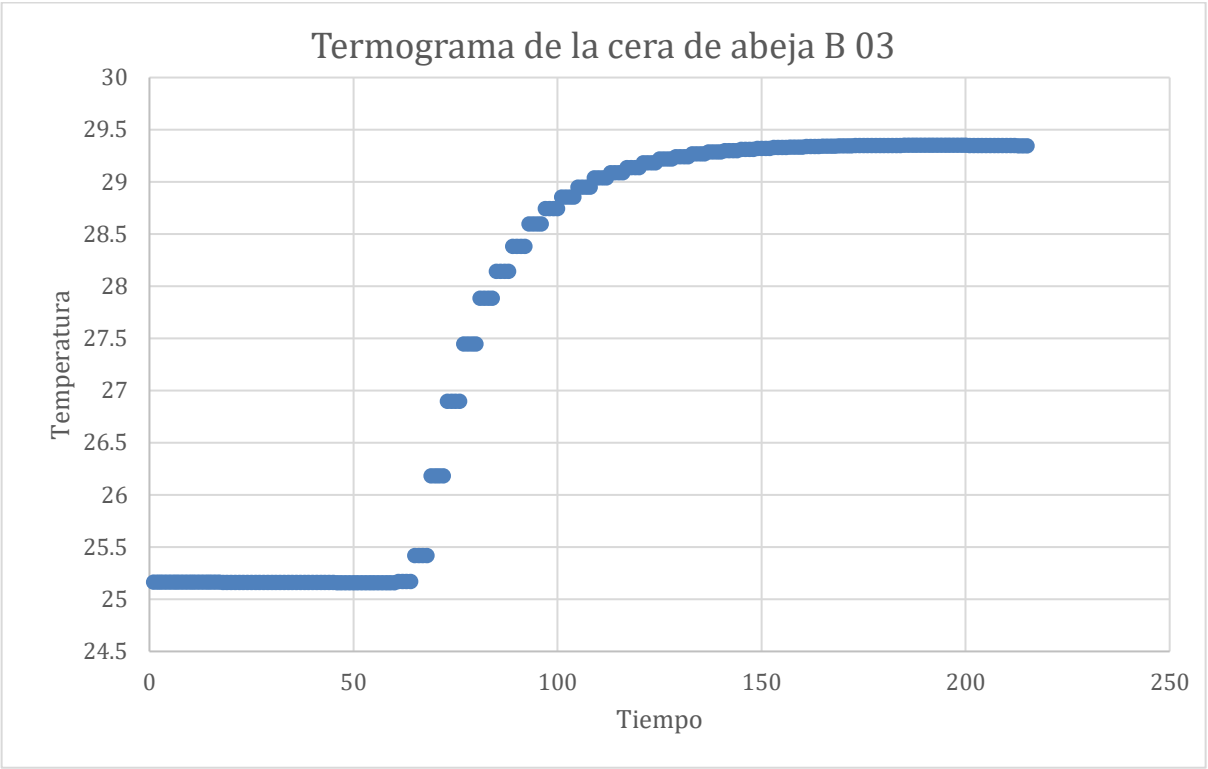
**Figura 30. Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la segunda muestra de cera de abeja B.**



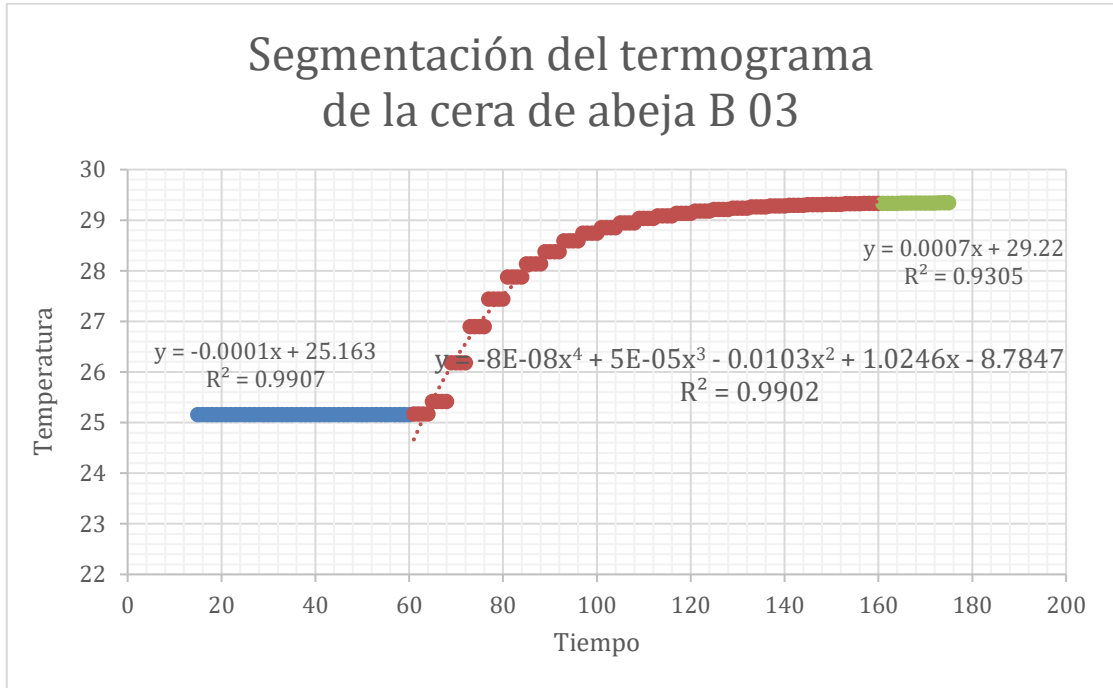
**Figura 31: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la segunda muestra de la cera de abeja B.**



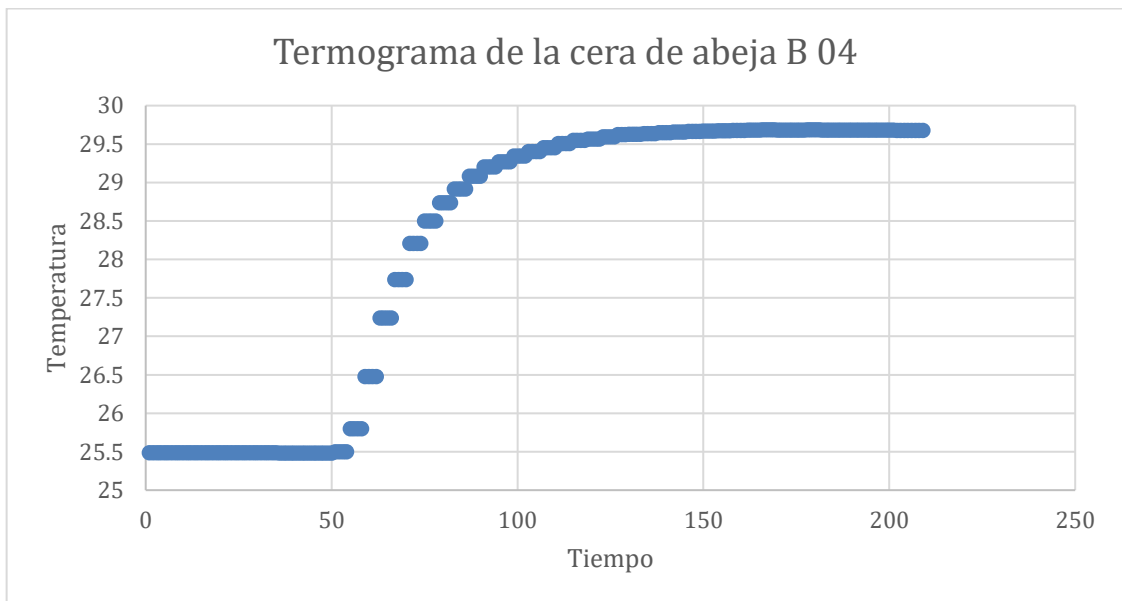
**Figura 32: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la tercera muestra de cera de abeja B.**



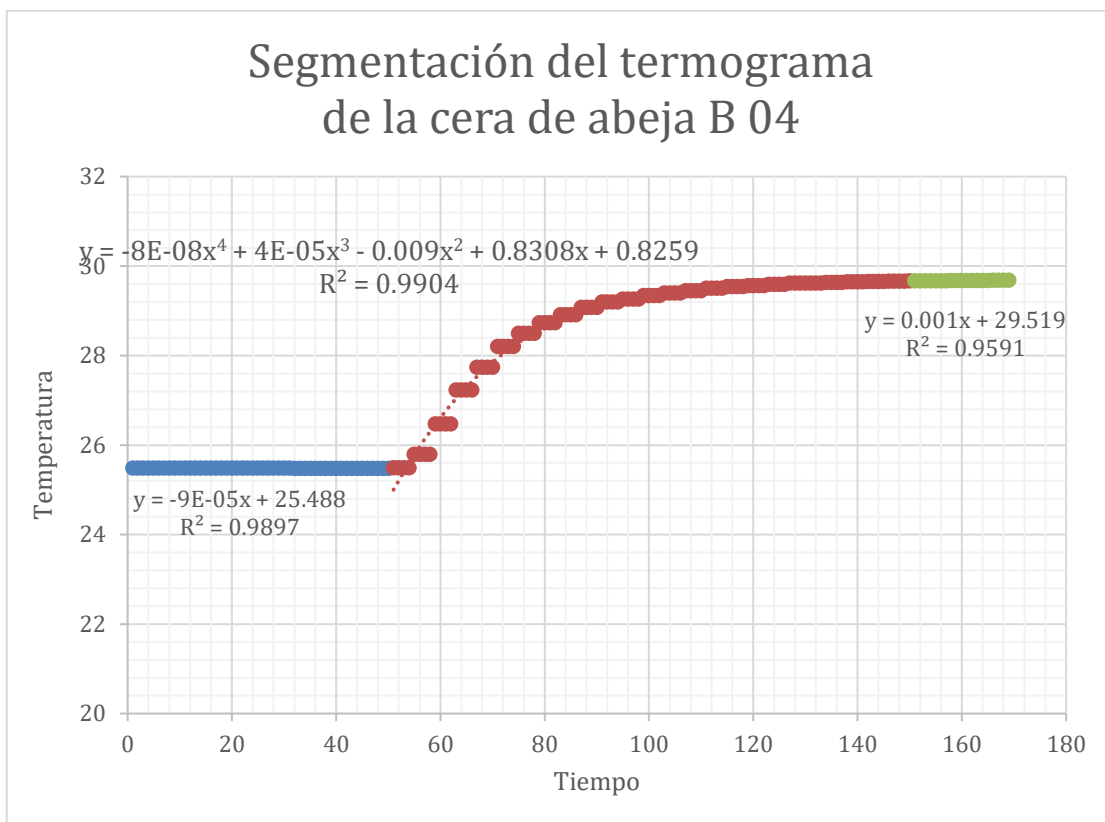
**Figura 33: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la tercera muestra de la cera de abeja B.**



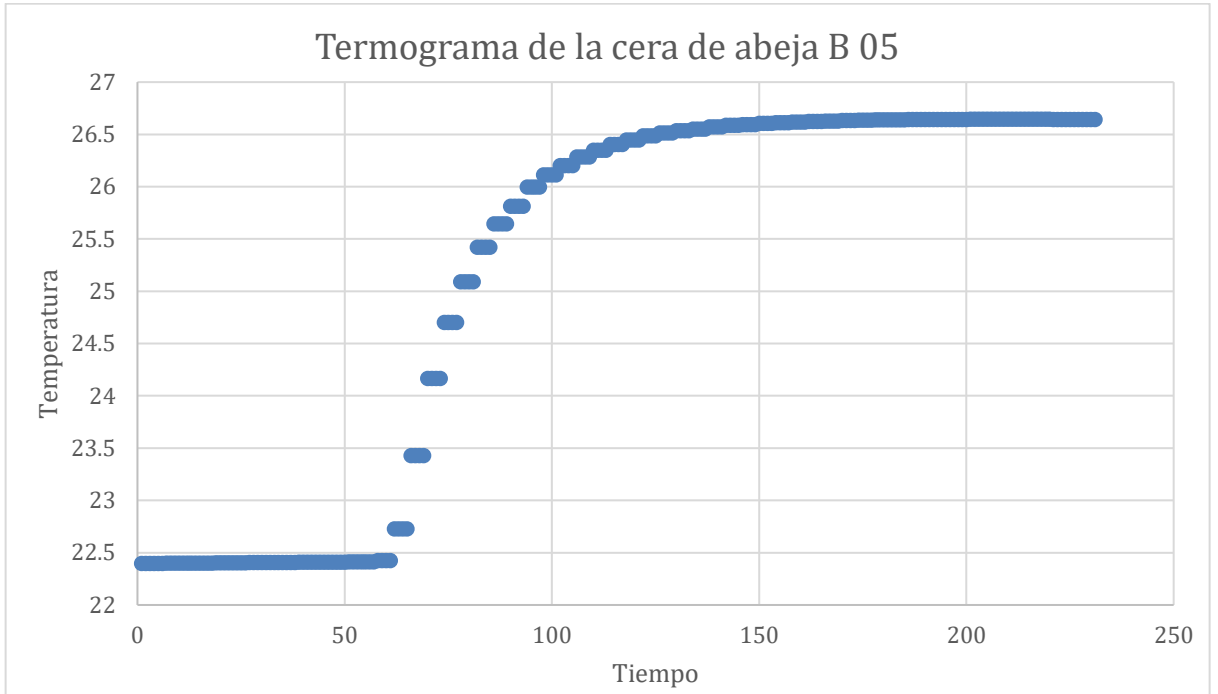
**Figura 34: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la cuarta muestra de cera de abeja B.**



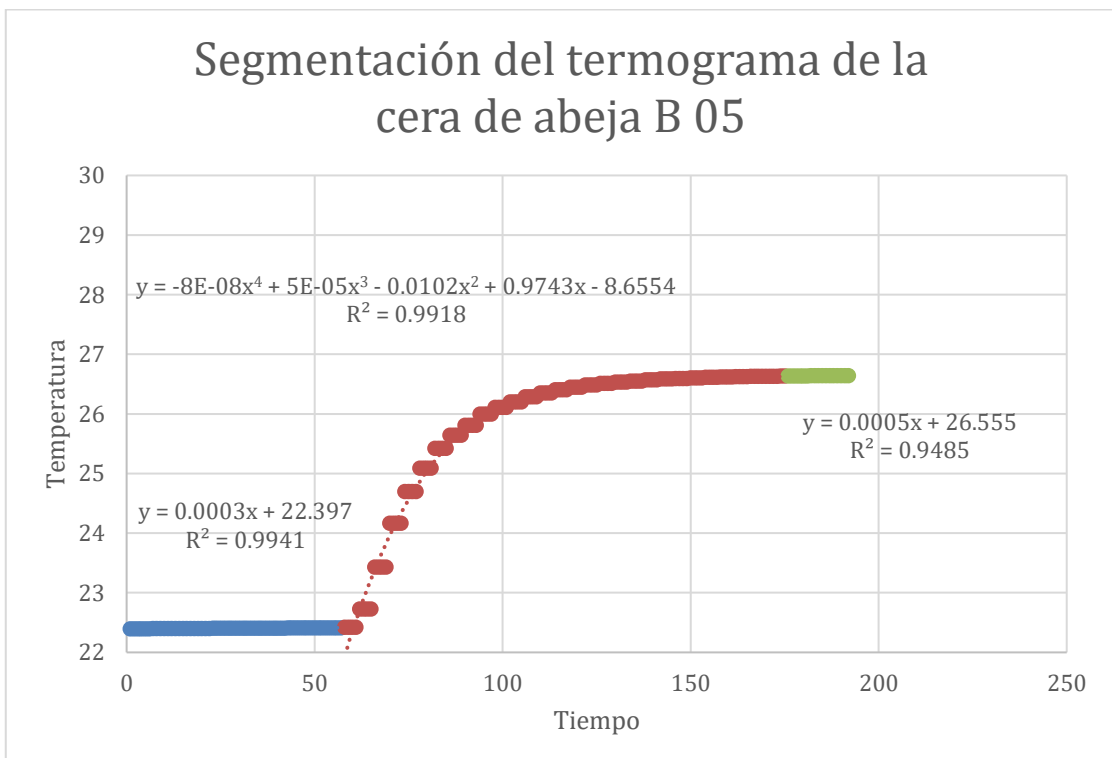
**Figura 35: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la cuarta muestra de la cera de abeja B.**



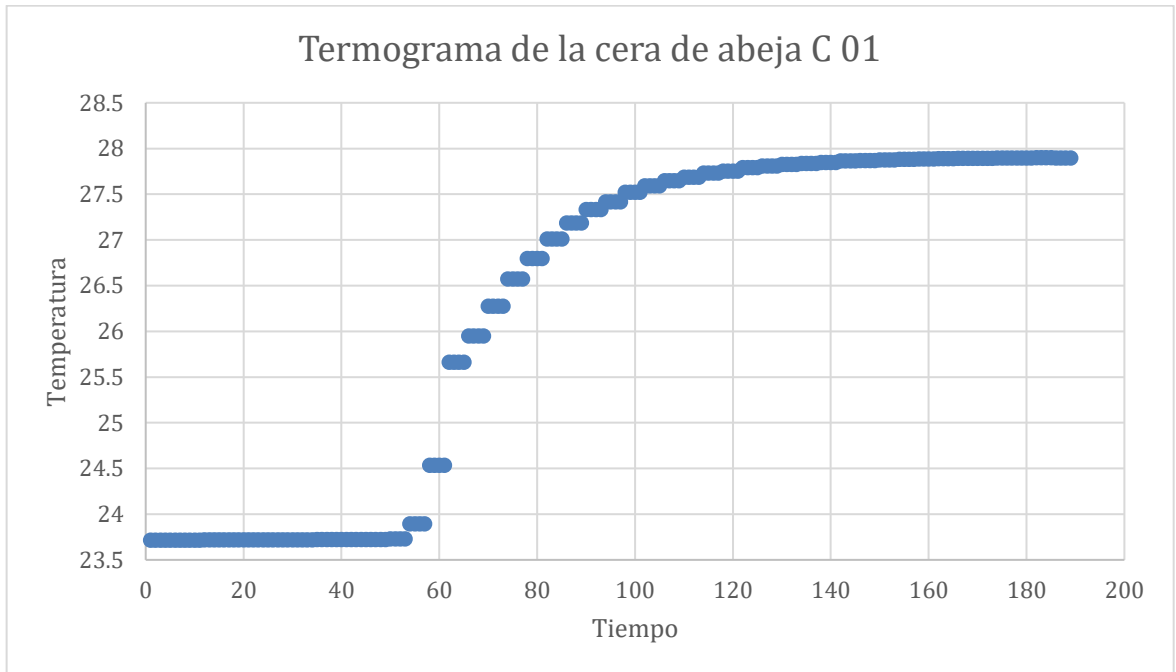
**Figura 36: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la quinta muestra de cera de abeja B.**



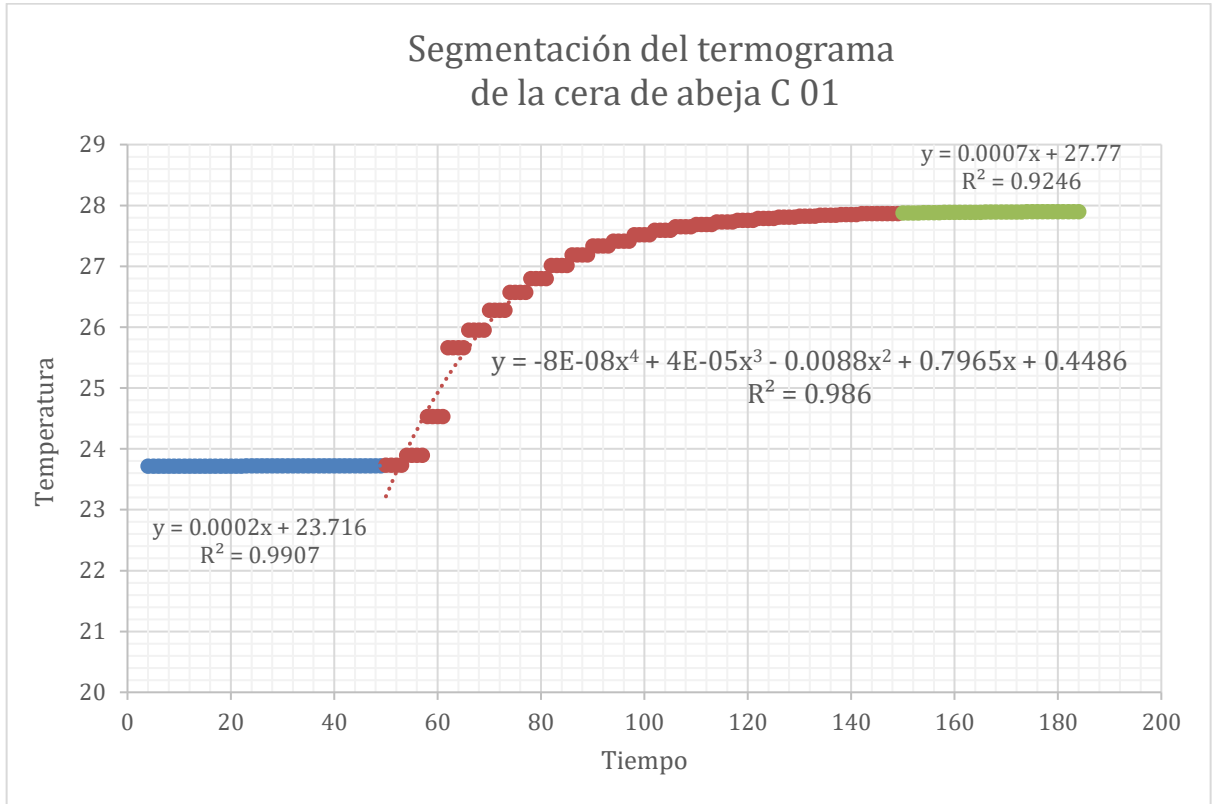
**Figura 37: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la quinta muestra de la cera de abeja B.**



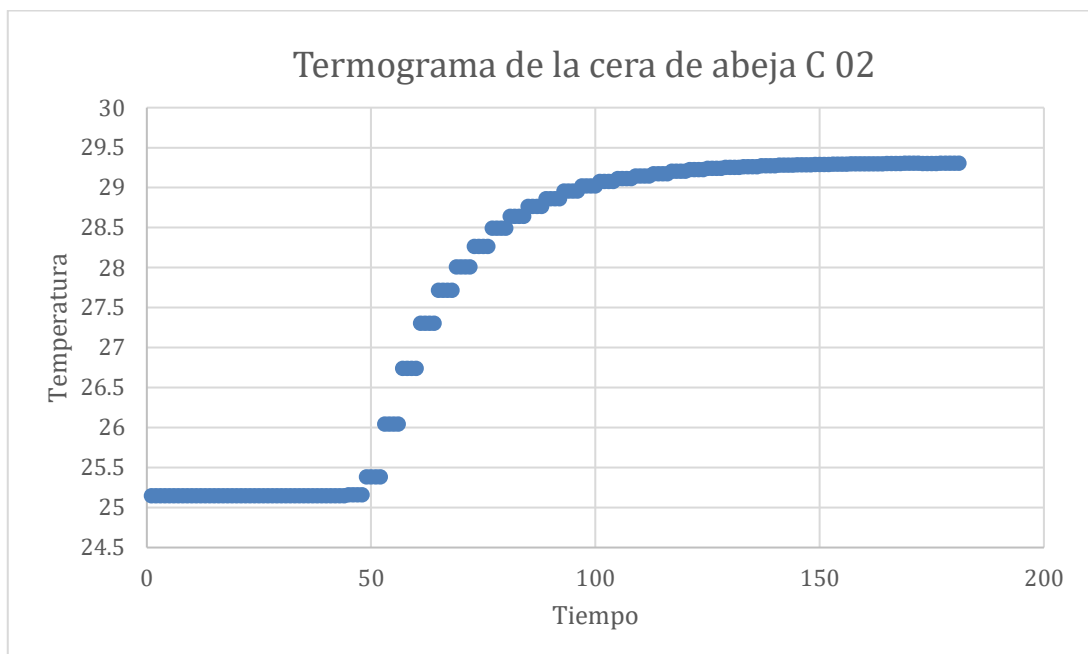
**Figura 38: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la primera muestra de cera de abeja C.**



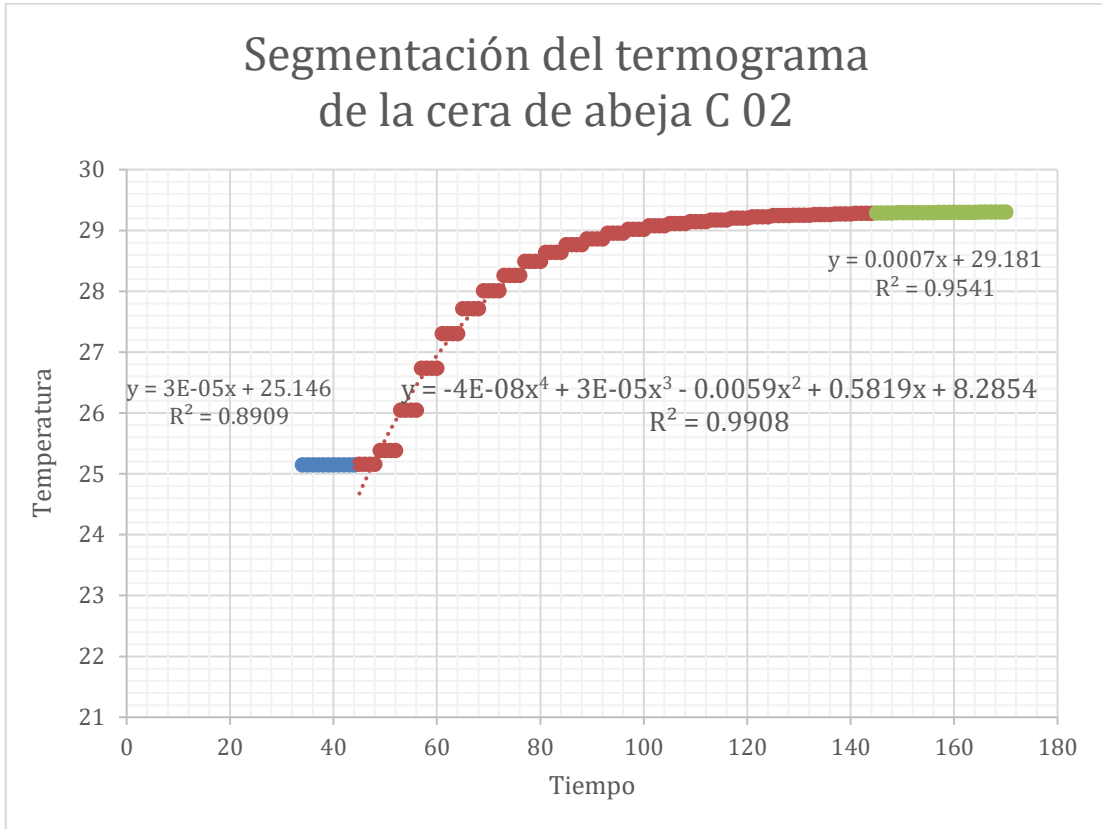
**Figura 39: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la primera muestra de la cera de abeja C.**



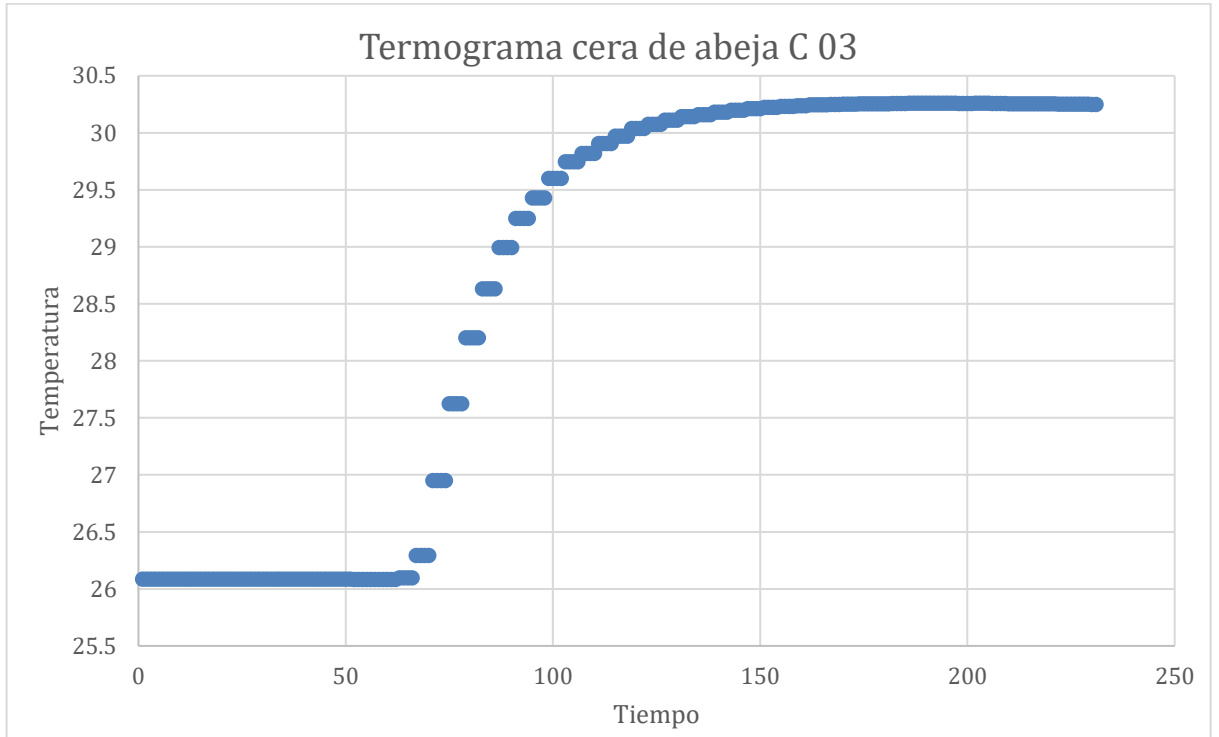
**Figura 40: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la segunda muestra de cera de abeja C.**



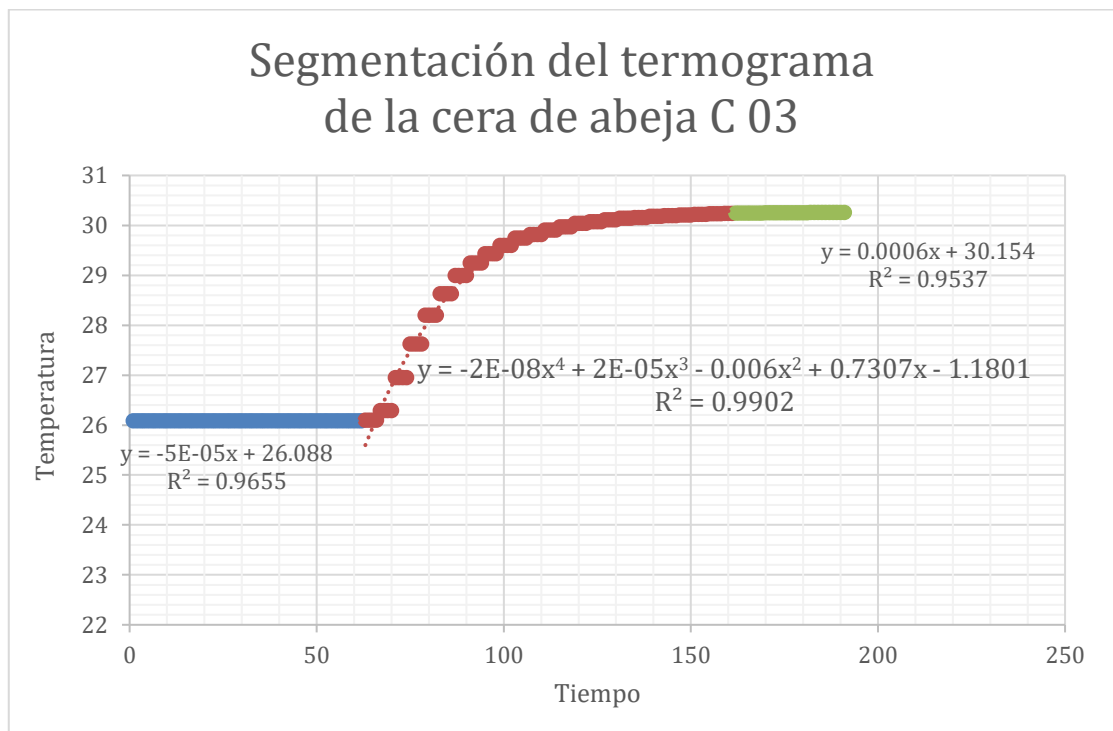
**Figura 41: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la segunda muestra de la cera de abeja C.**



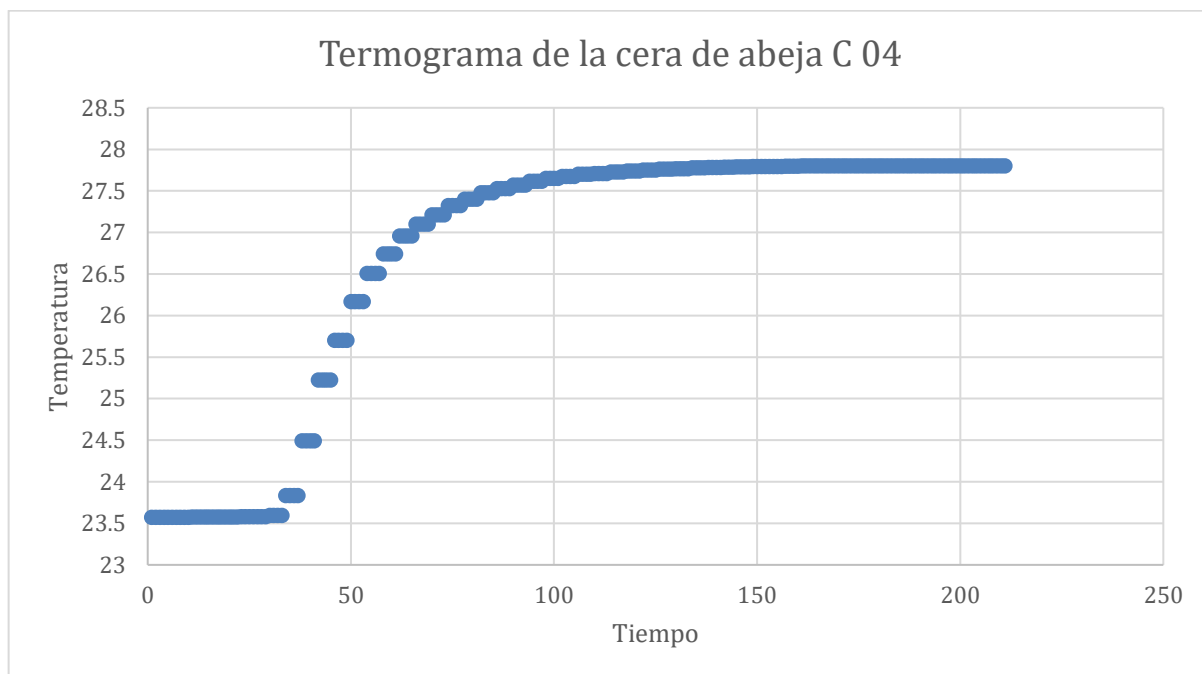
**Figura 42: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la tercera muestra de cera de abeja C.**



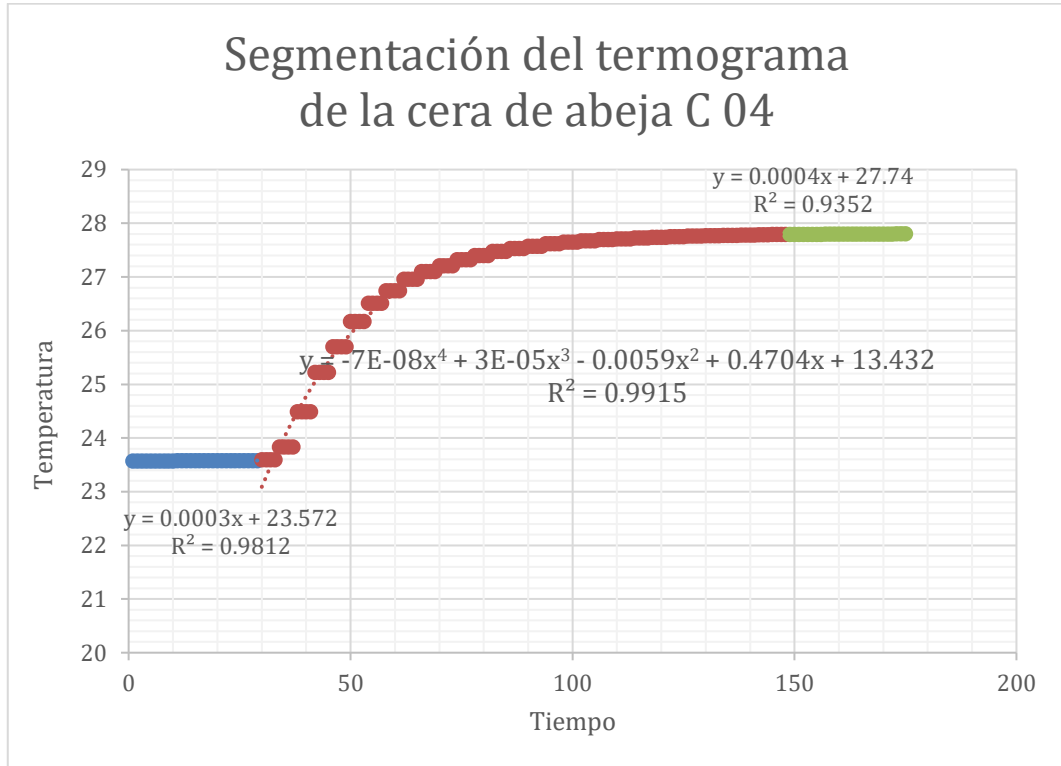
**Figura 43: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la tercera muestra de la cera de abeja C.**



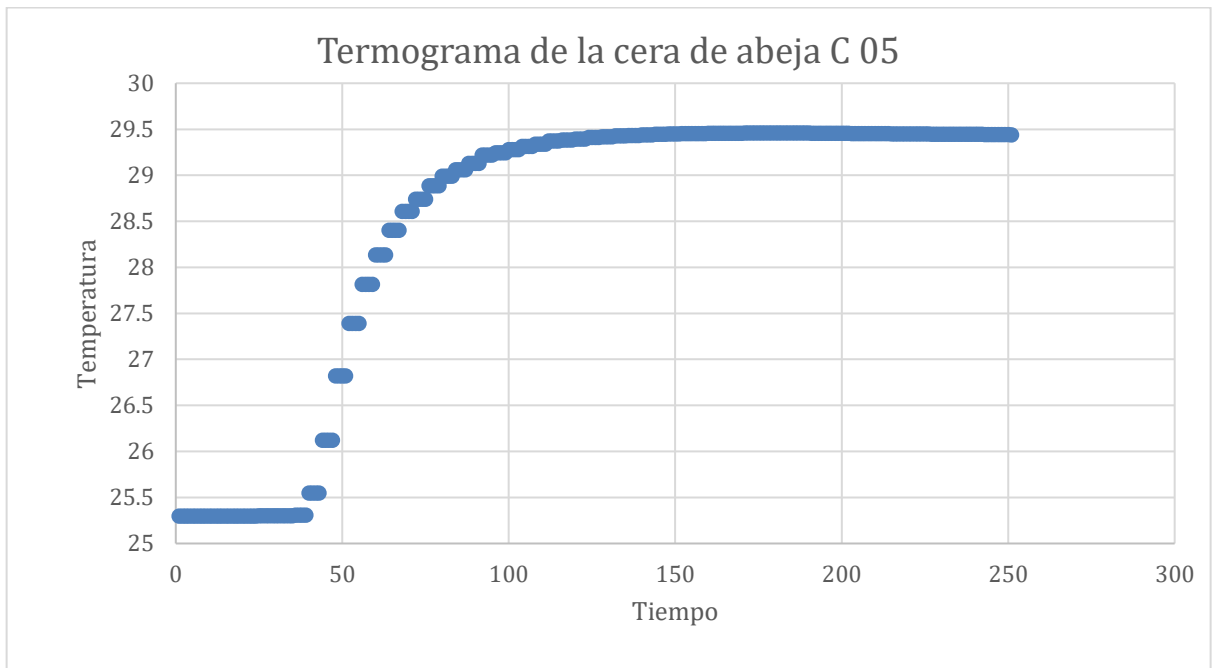
**Figura 44: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la cuarta muestra de cera de abeja C.**



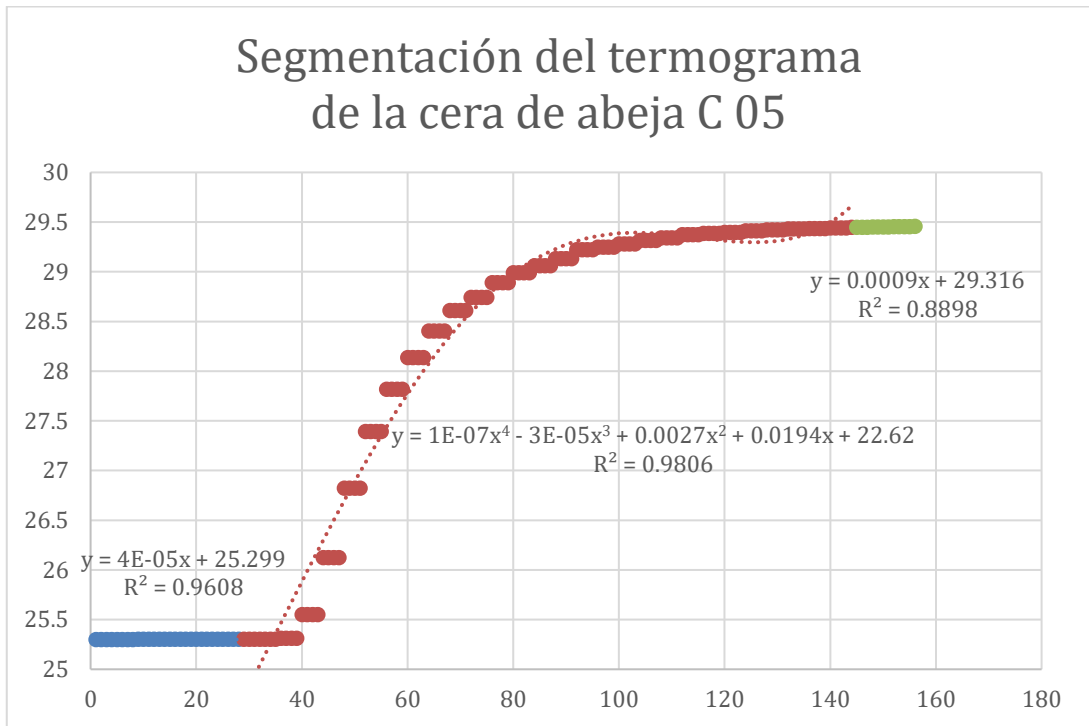
**Figura 45: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la cuarta muestra de la cera de abeja C.**



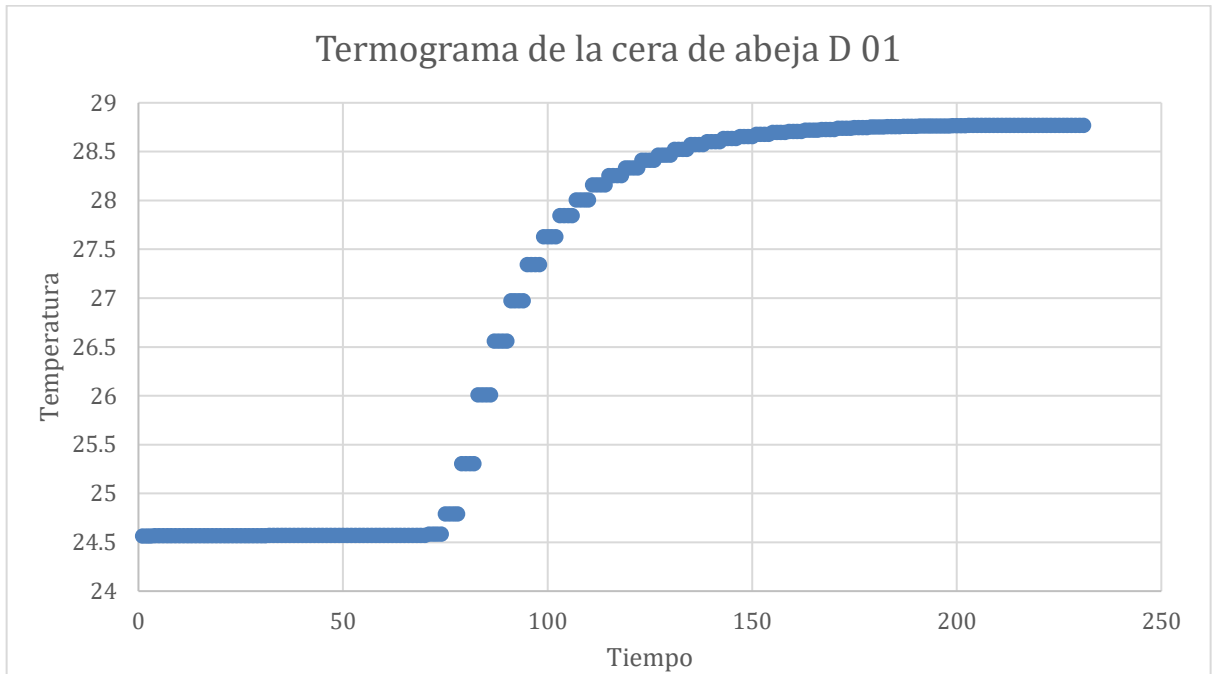
**Figura 46: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la quinta muestra de cera de abeja C.**



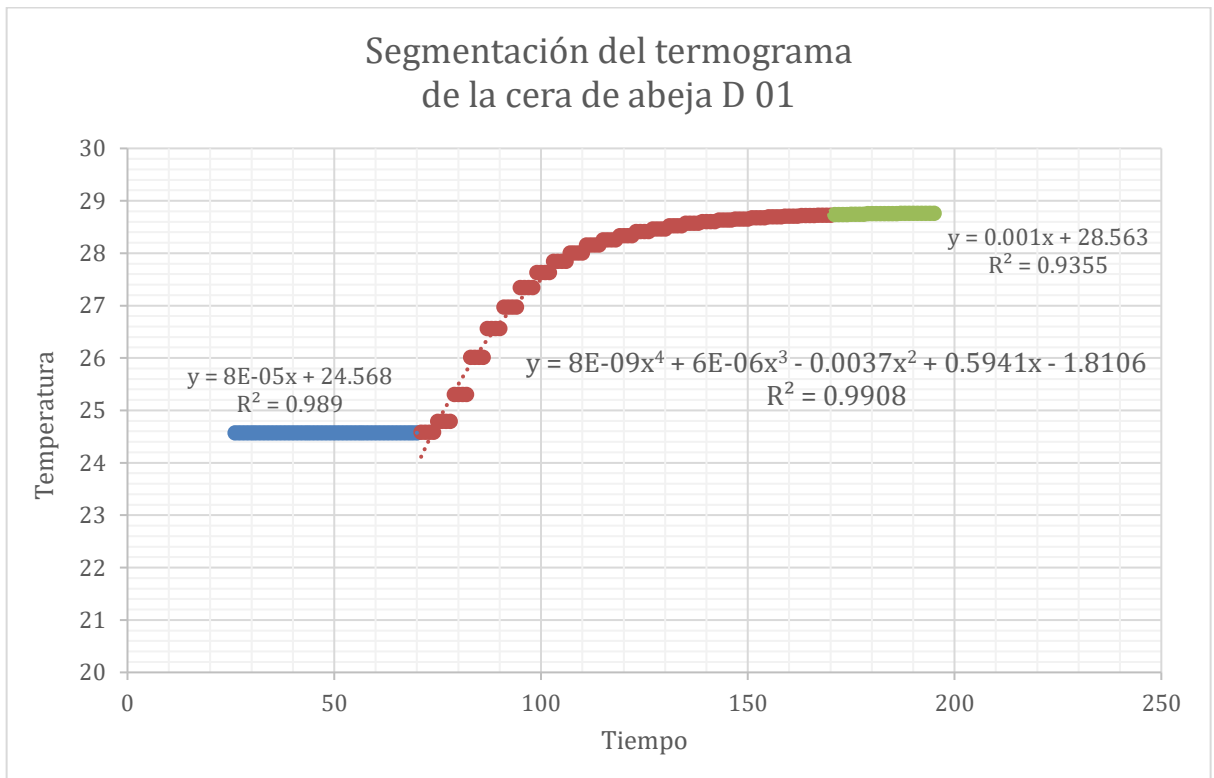
**Figura 47: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la quinta muestra de la cera de abeja C.**



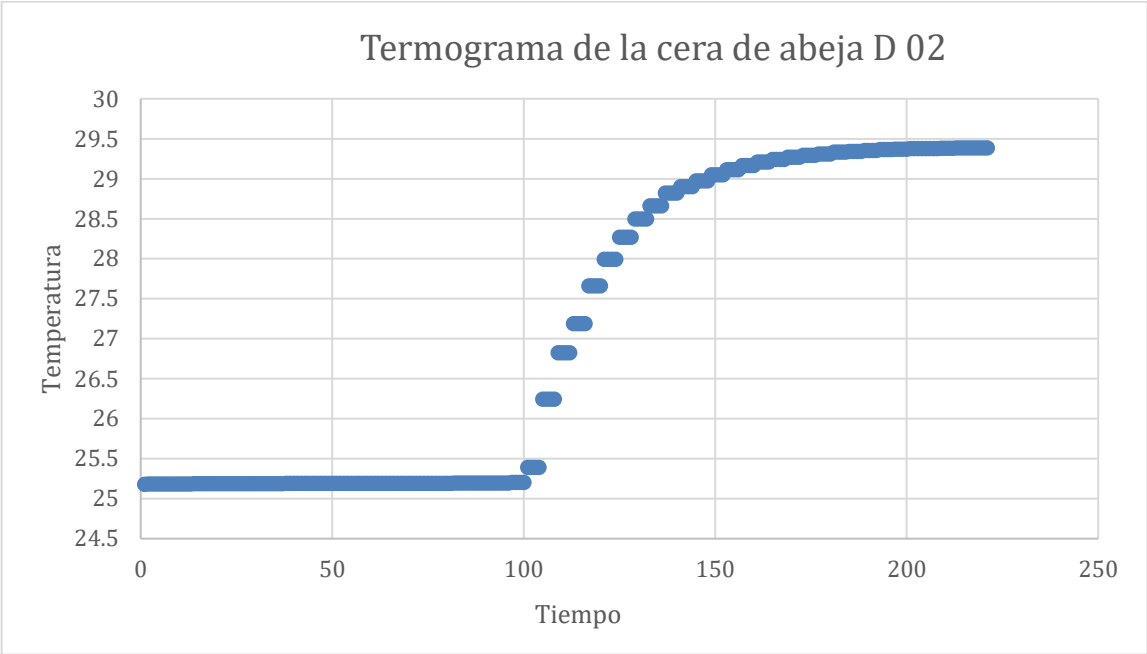
**Figura 48: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la primera muestra de cera de abeja D.**



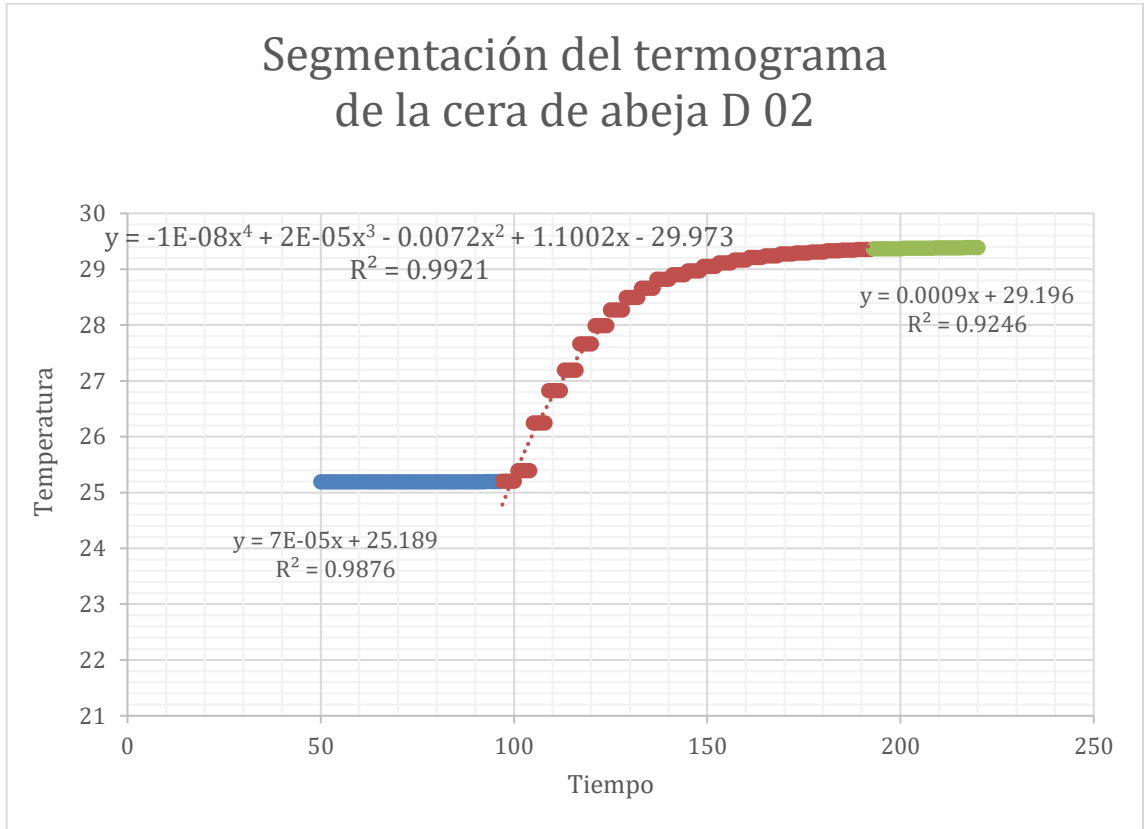
**Figura 49: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la primera muestra de la cera de abeja D.**



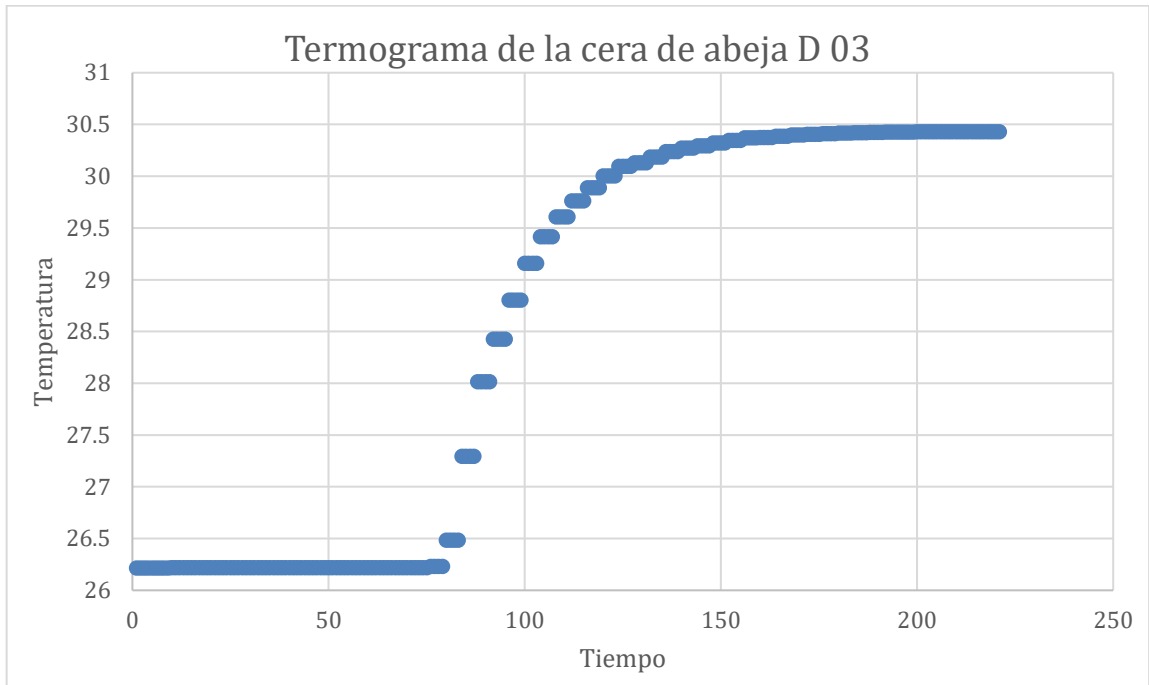
**Figura 50: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la segunda muestra de cera de abeja D.**



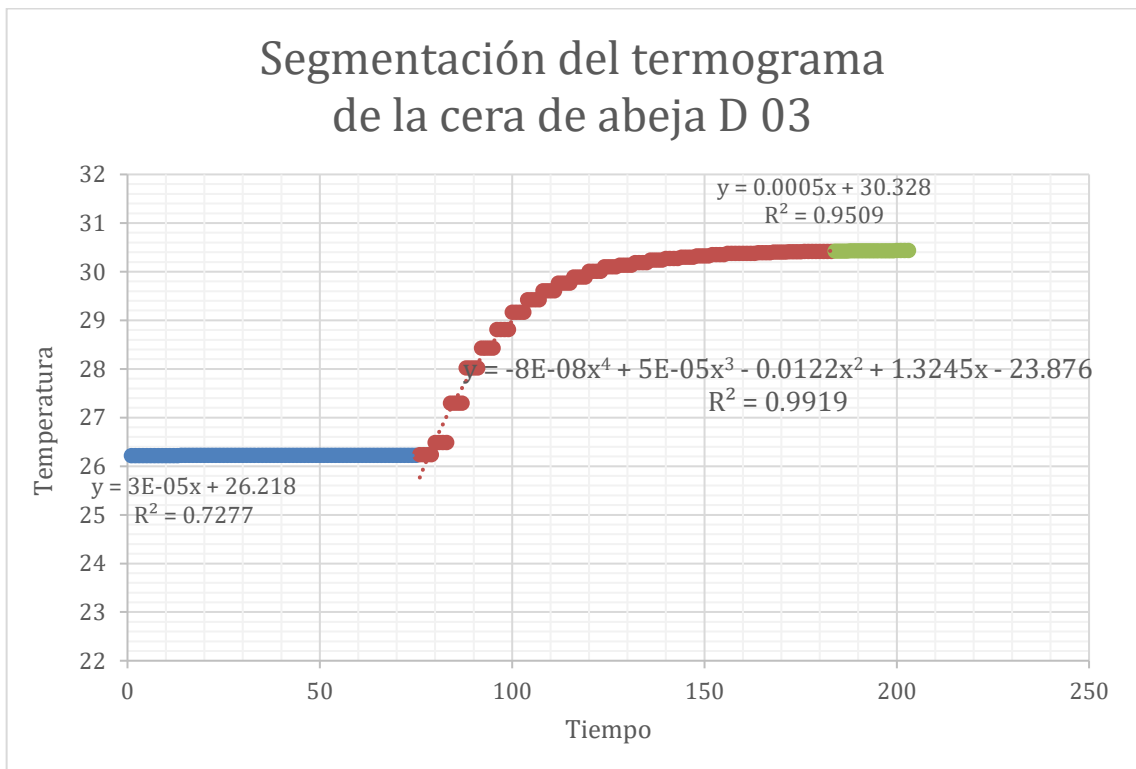
**Figura 51: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la segunda muestra de la cera de abeja D.**



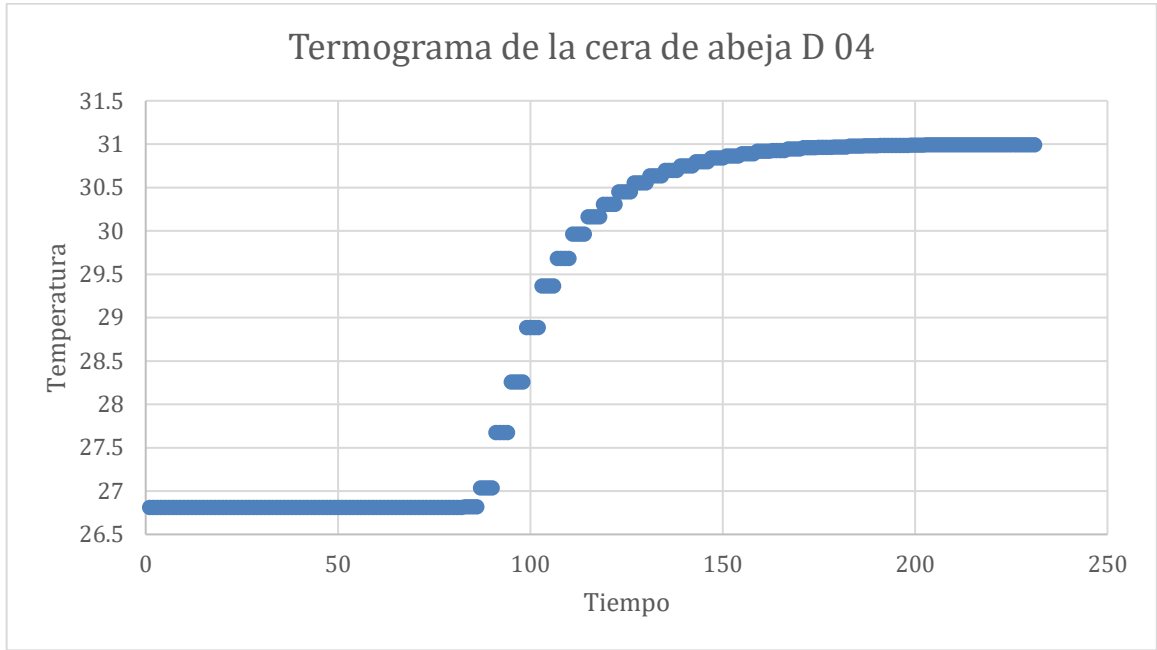
**Figura 52: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la tercera muestra de cera de abeja D.**



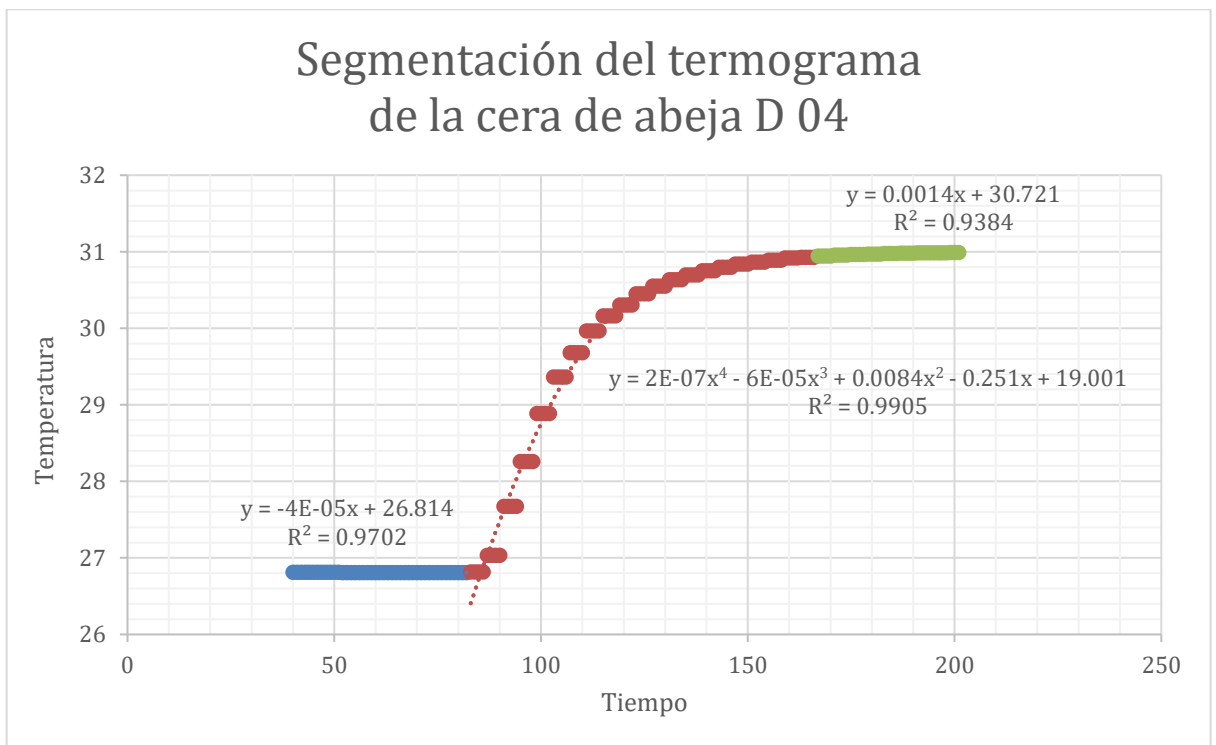
**Figura 53: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la tercera muestra de la cera de abeja D.**



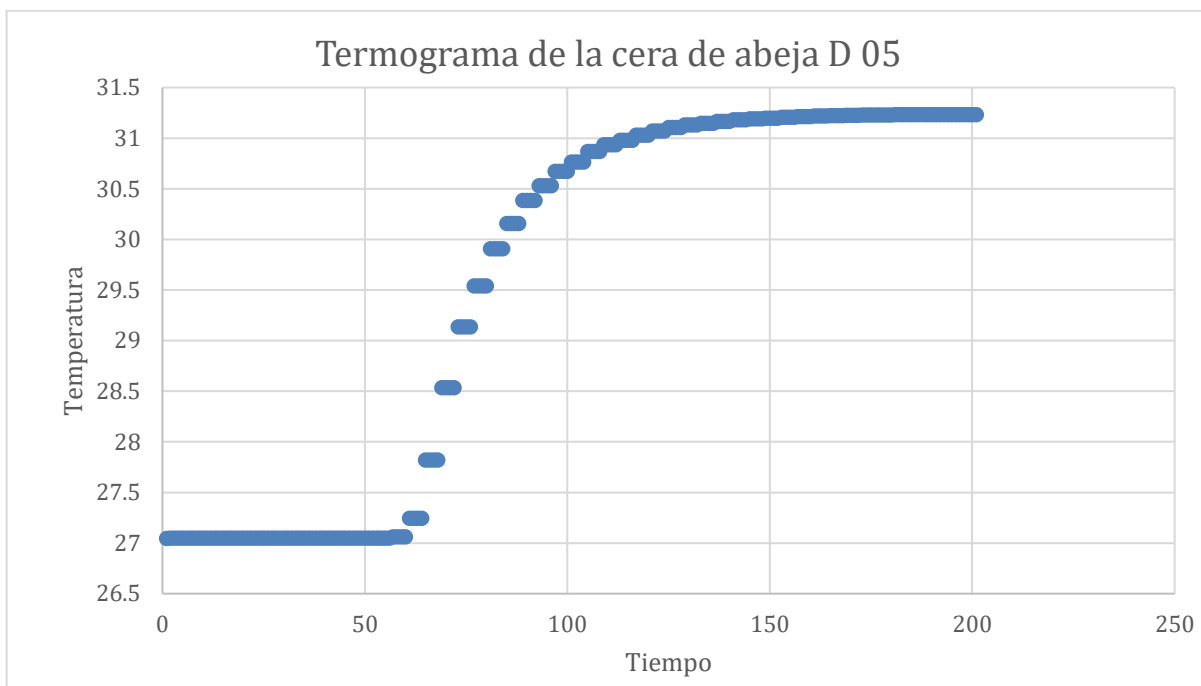
**Figura 54: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la cuarta muestra de cera de abeja D.**



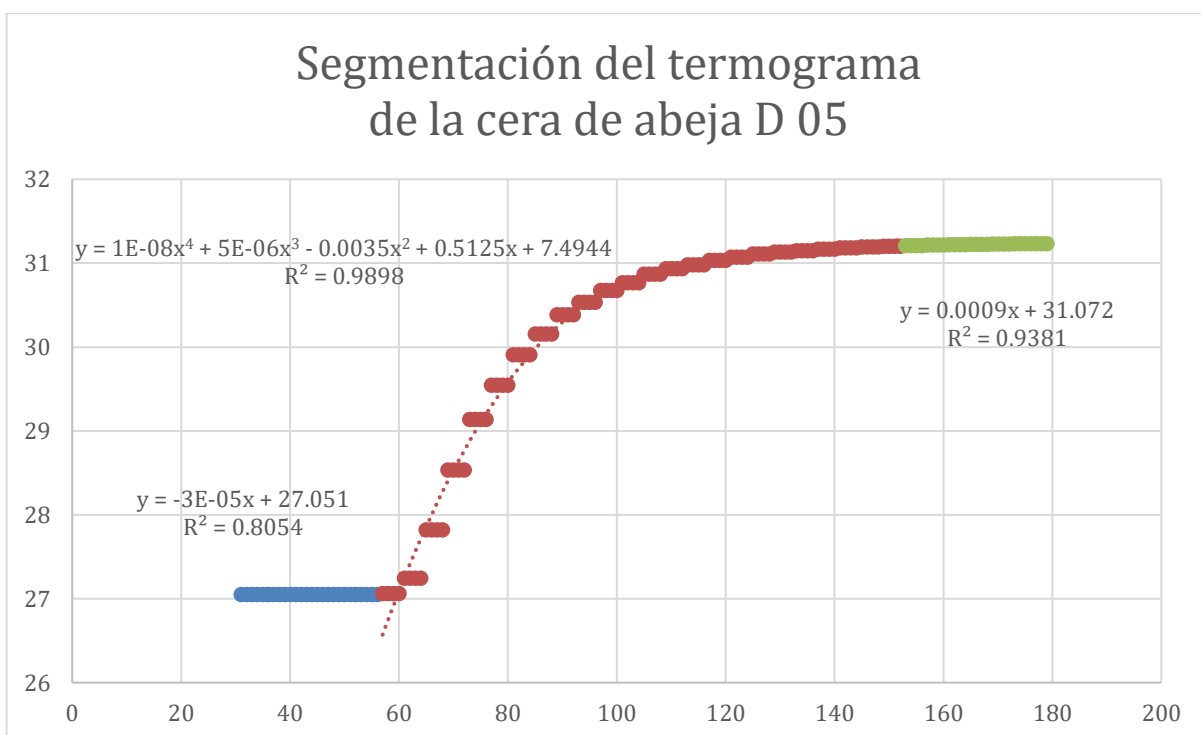
**Figura 55: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la cuarta muestra de la cera de abeja D.**



**Figura 56: Relación entre temperatura respecto al tiempo de la combustión de la quinta muestra de cera de abeja D.**



**Figura 57: Segmentación en regresiones lineales y polinomio de cuarto grado del termograma de la quinta muestra de la cera de abeja D.**



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Instrucciones para uso de hojas electrónicas de Excel

“Caracterización de propiedades físicas y termodinámicas de la cera de abeja *Apis mellifera* en Guatemala”

Presentado por:

EDGAR RODRIGO CASTELLANOS PADILLA

16722

Del programa de Licenciatura de Ingeniería Mecánica

Guatemala, noviembre de 2020

## **Hojas electrónicas PHY-EXL-001 y PHY-EXL-002 Densidad de la cera de abeja.**

En el documento PHY-EXL-001 se realiza la estandarización del equipo con las normas ASTM.

1. En la "Tabla de masas" se debe de introducir cinco veces la masa medida del picnómetro vacío utilizando una balanza analítica.
2. Al cumplir la condición de una desviación estándar menor a 0.02 se da por estandarizado el proceso.
3. En el documento PHY-EXL-002 se debe de seleccionar la pestaña llamada "masa de agua destilada".
4. En esta pestaña introducir la masa del picnómetro vacío (mp), masa del picnómetro lleno con el agua destilada (mp A) y la temperatura del agua destilada (TA).
5. Al ingresar todos estos datos se realizará el cálculo automático de la masa de agua que se encuentra en el volumen del picnómetro.
6. Luego se debe seleccionar la pestaña correspondiente a la cera a analizar.
7. En esta pestaña se debe de introducir la masa del picnómetro vacío, la masa del picnómetro lleno con la masa de la cera de abeja y la temperatura de la cera de abeja.
8. Posteriormente se debe de introducir la densidad del agua a la temperatura correspondiente con ayuda de la tabla que se encuentra en esa misma pestaña.
9. Al introducir todos estos valores se obtendrá la densidad de la cera correspondiente a los valores introducidos.

## **Hoja electrónica PHY-EXL-003 Viscosidad de la cera de abeja.**

1. Como primer paso se debe seleccionar la pestaña correspondiente a la cera a analizar.
2. Posteriormente se debe ingresar la viscosidad obtenida en centipoise para la prueba realizada.
3. Realizar esto para cada prueba a cada temperatura correspondiente.
4. Al tener todos los valores ingresados se realizará una gráfica automática de viscosidad versus tiempo de la muestra de cera de abeja.

## **Hojas electrónicas TER-EXL-001 y TER-EXL-002 Poder calorífico de la cera de abeja.**

1. Para la hoja electrónica TER-EXL-001 se debe seleccionar la pestaña correspondiente a la corrida con el ácido benzoico.

- Luego se debe de introducir en la columna B las lecturas de temperatura hechas por el calorímetro.
- Automáticamente se realizará un termograma.
- En el termograma se puede observar que se tienen dos regresiones lineales y un polinomio de grado cuatro por lo cual se debe de seccionar los datos obtenidos del termograma obtenido donde cada segmento de la gráfica tenga un coeficiente de determinación cercano a uno.
- Posteriormente se deben ingresar los coeficientes del polinomio de cuarto grado obtenido en la tabla de "Coeficientes", aquí se puede utilizar los valores dados por la ecuación de Excel o utilizar un software externo como Matlab.
- Luego en la tabla de "pendientes e intercepto" se debe colocar el punto inicial y final de las regresiones que correspondan al inicio y final del polinomio de grado 4.
- Posteriormente se debe utilizar solver para encontrar el tiempo en el que se interceptan la regresión lineal y el polinomio de grado 4 como se muestra en la Figura 58.

**Figura 58: Ejemplo para encontrar el tiempo inicial.**

ti	P1	R1	t
151.4904321	22.69563911	22.69564054	
	1.42236E-06		

Donde el objetivo es el tiempo inicial (ti), las celdas de variables es la diferencia entre el valor del polinomio y la regresión evaluados en el tiempo ti y las restricciones son que P1 sea igual a R1.

- Se realiza el mismo procedimiento para obtener el tiempo final (tf) como se muestra en la Figura 59.

**Figura 59: Ejemplo para encontrar el tiempo final.**

tf	P2	R2	t
241.2909512	25.2780642	25.27806422	
		1.69639E-08	

Donde el objetivo es el tiempo final (tf), las celdas de variables es la diferencia entre el valor del polinomio y la regresión evaluados en el tiempo ti y las restricciones son que P2 sea igual a R2.

- Posteriormente se debe encontrar con ayuda de solver el tiempo en que las áreas bajo la curva sean iguales como se muestra en la Figura 60.

**Figura 60: Ejemplo para encontrar el tiempo d.**

ti	P1	R1	tf	P2	R2	td
151.4904321	22.69563911	22.69564054	241.2909512	25.2780642	25.27806422	197.2341391
	1.42236E-06				1.69639E-08	
Ti	22.69564054		25.27806422			
A1	1109.496463	A2	1109.49647			
Resta	6.36644E-06					
$\Delta T$	2.4731					

Donde el objetivo es el tiempo donde las áreas son iguales (td), las celdas de variables es la resta de las dos áreas y las restricciones es que A1 sea igual a A2.

10. Finalmente se debe de introducir la masa del alambre usado en la combustión y la masa de la pastilla de ácido benzoico o cera utilizada según sea el caso en la tabla de "Resultados".
11. Al realizar y analizar todas las corridas con ácido benzoico se debe verificar la pestaña ASTM D8565 y si se cumple la condición se puede utilizar la hoja electrónica TER-EXL-002.
12. En la hoja electrónica TER-EXL-002 se debe realizar el mismo procedimiento hasta el inciso 10.