

Figura 28. Carbón San Fernando, $N_f = 6$, $d_p = 2$ mm, $T_b = 1073$ K,
 $T_{pi} = 769.97$ K, $t_i = 0.85$ s.

- (a) Perfil de temperatura.
- (b) Derivada de primer orden.
- (c) Derivada de segundo orden.

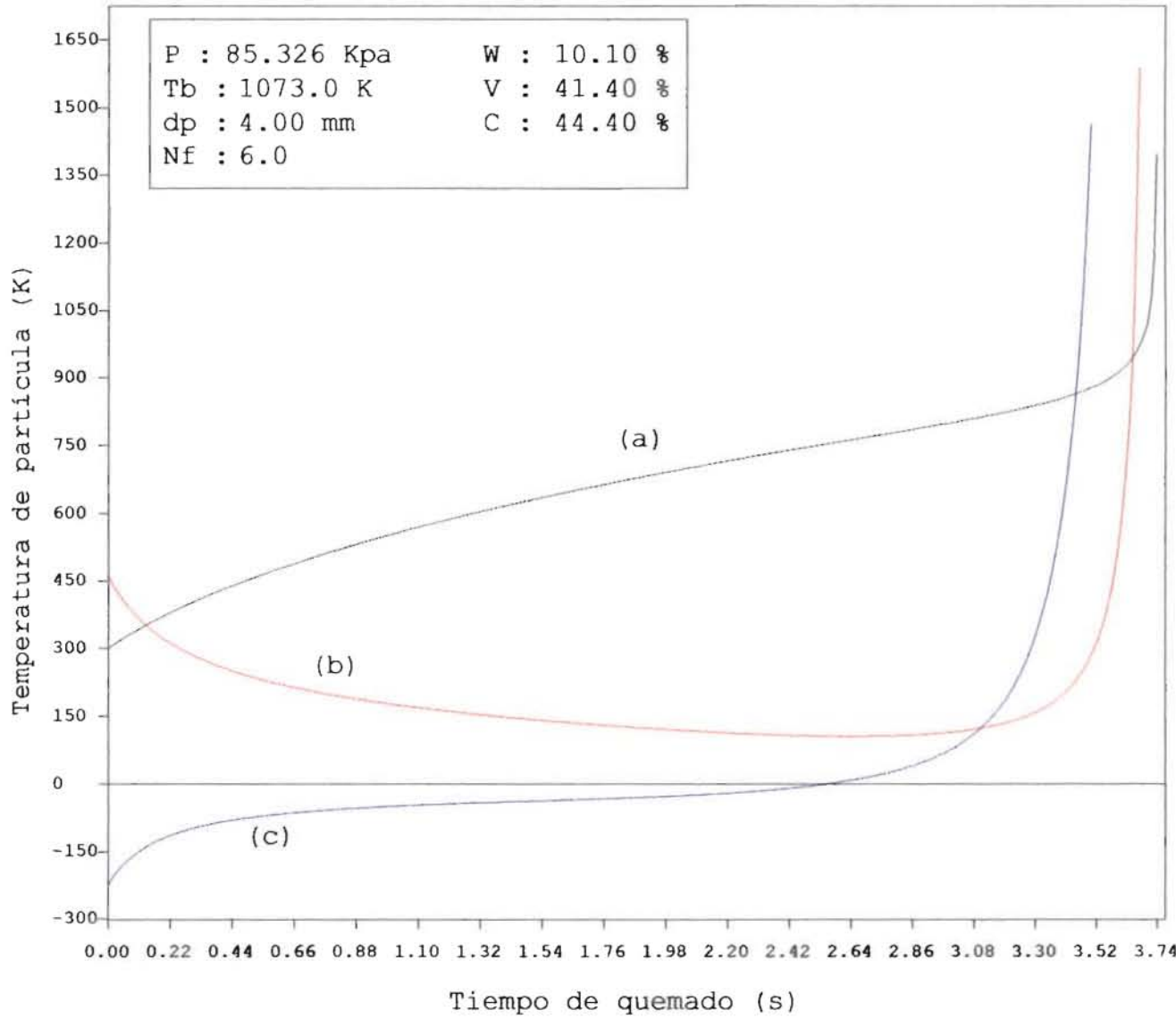


Figura 29. Carbón San Fernando, $N_f = 6$, $d_p = 4$ mm, $T_b = 1073$ K,
 $T_{pi} = 753.50$ K, $t_i = 2.47$ s.

- (a) Perfil de temperatura.
- (b) Derivada de primer orden.
- (c) Derivada de segundo orden.

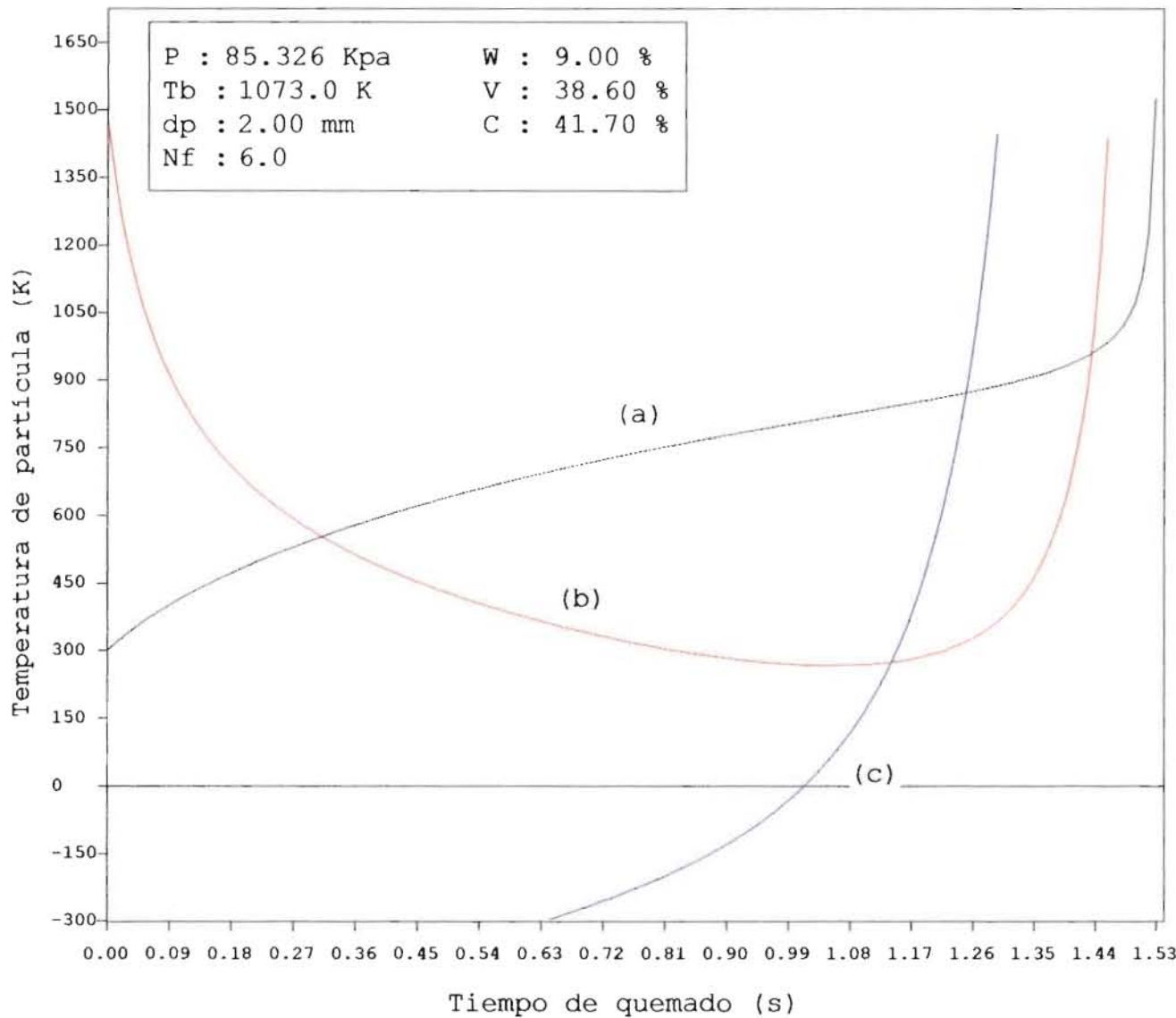


Figura 30. Carbón La Nechí, $N_f = 6$, $d_p = 2$ mm, $T_b = 1073$ K, $T_{pi} = 808.44$ K,
 $t_i = 0.99$ s.

- (a) Perfil de temperatura.
- (b) Derivada de primer orden.
- (c) Derivada de segundo orden.

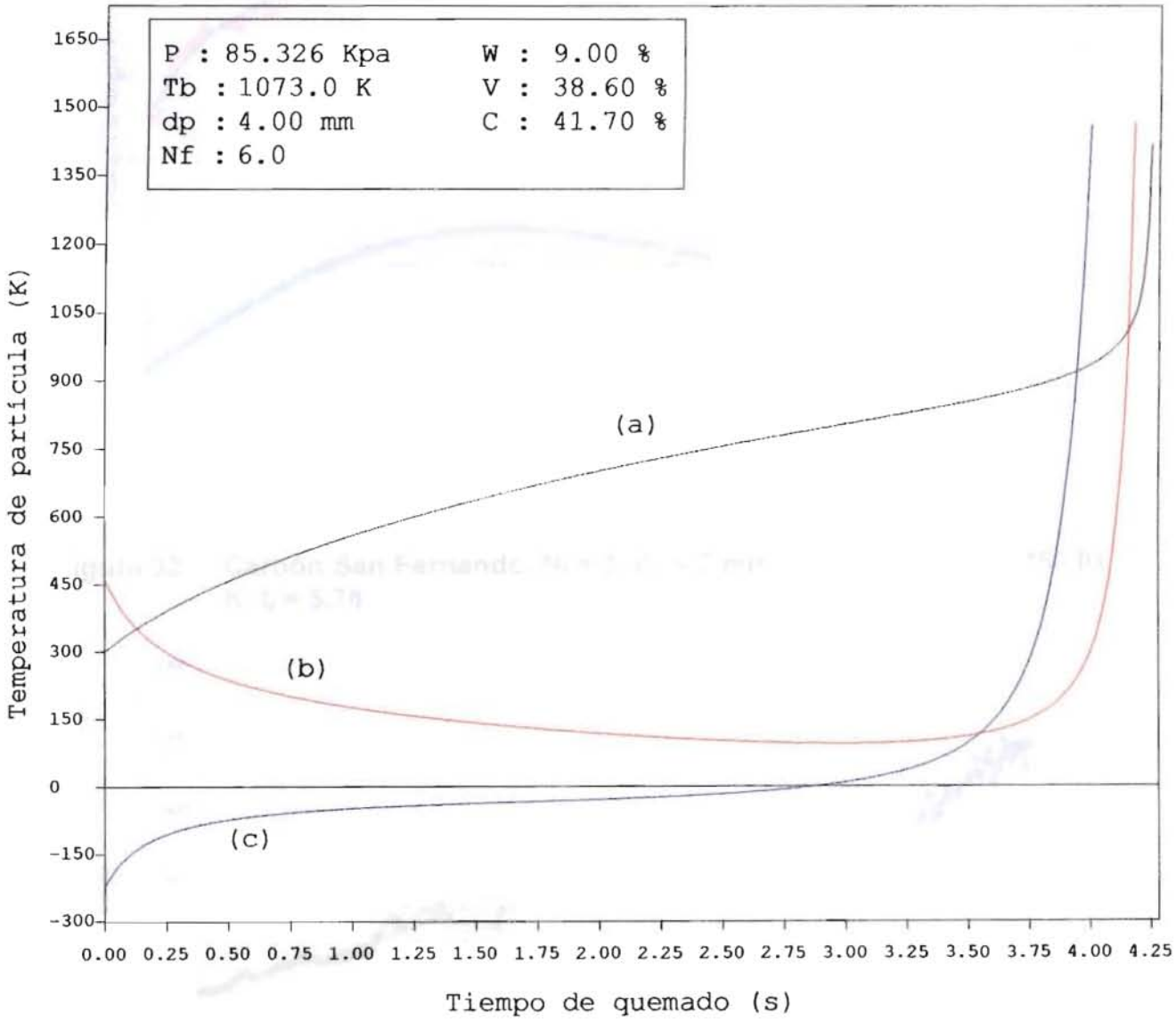


Figura 31. Carbón La Nechí, $N_f = 6$, $d_p = 4$ mm, $T_b = 1073$ K, $T_{pi} = 790.63$ K,
 $t_i = 2.86$ s.

- (a) Perfil de temperatura.
- (b) Derivada de primer orden.
- (c) Derivada de segundo orden.

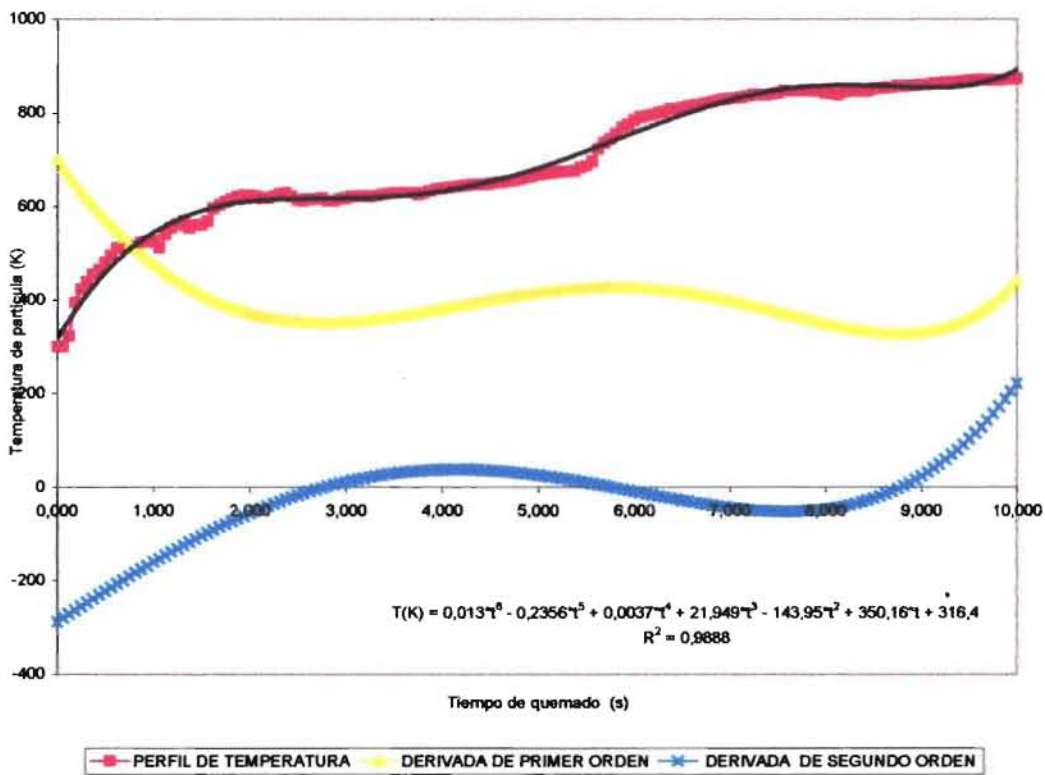


Figura 32. Carbón San Fernando, $N_f = 3$, $d_p = 2$ mm, $T_b = 873$ K, $T_{pi} = 750,01$ K, $t_i = 5,78$ s.

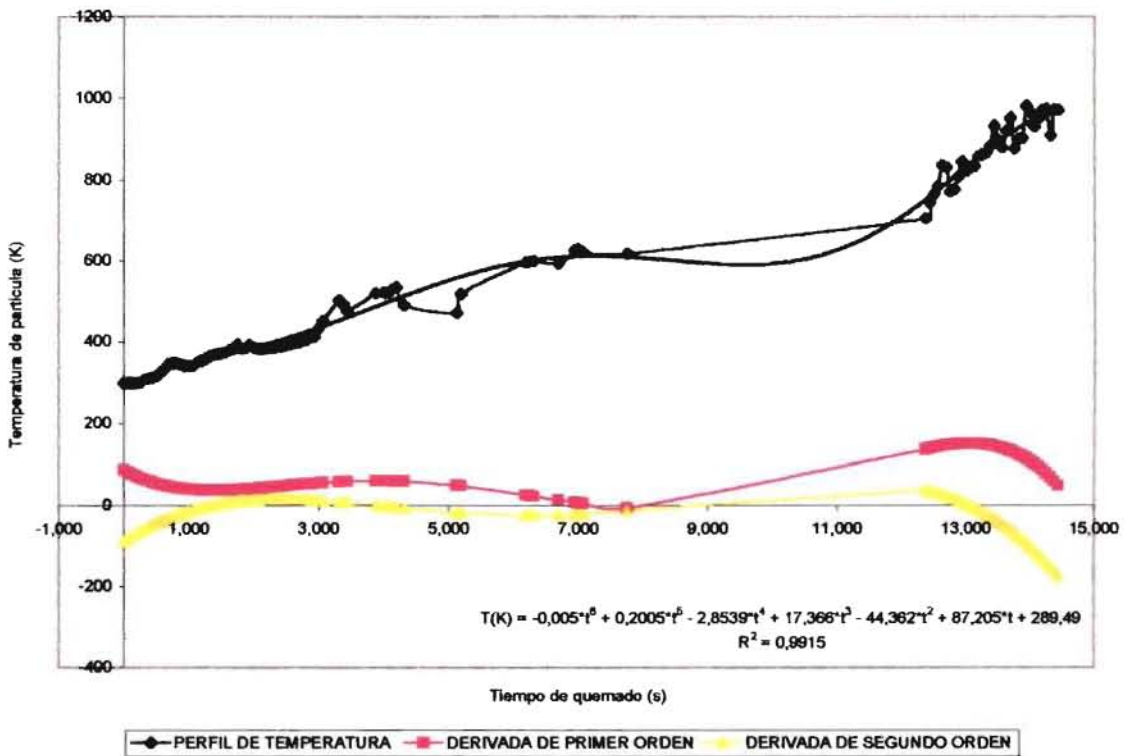


Figura 33. Carbón San Fernando, $N_f = 3$, $d_p = 4$ mm, $T_b = 873$ K, $T_{pi} = (661,66 - 827,36)$ K, $t_i = 13$ s.



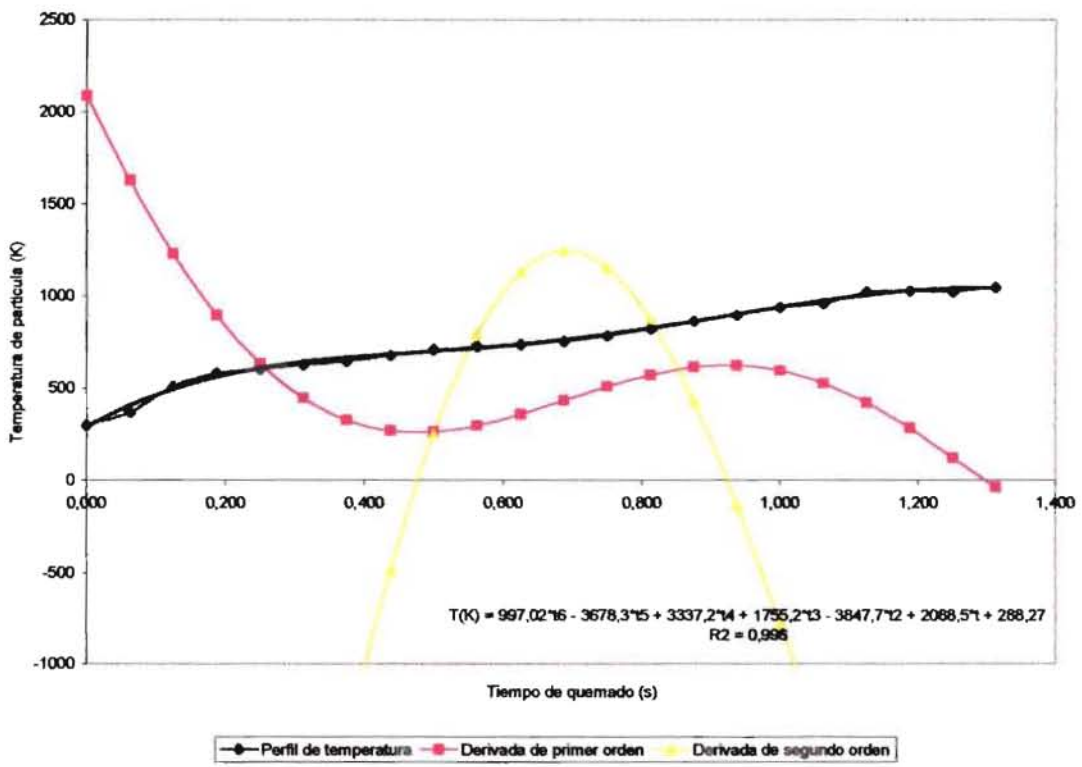


Figura 34. Carbón La Nechí, $N_f = 3$, $d_p = 2$ mm, $T_b = 873$ K, $T_{pi} = (694.01,66 - 881.91)$ K, $t_i = 0.750$ s.

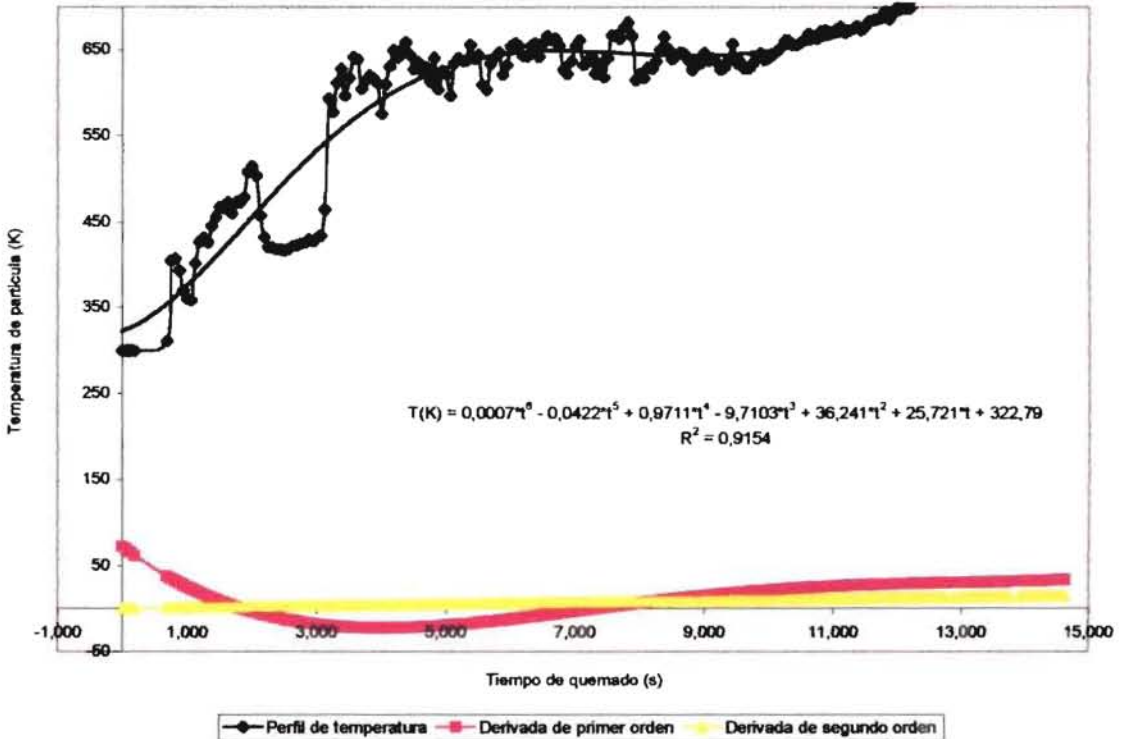


Figura 35. Carbón La Nechí, $N_f = 3$, $d_p = 4$ mm, $T_b = 873$ K, $T_{pi} = (627.91 - 878.56)$ K, $t_i = 12$ s.

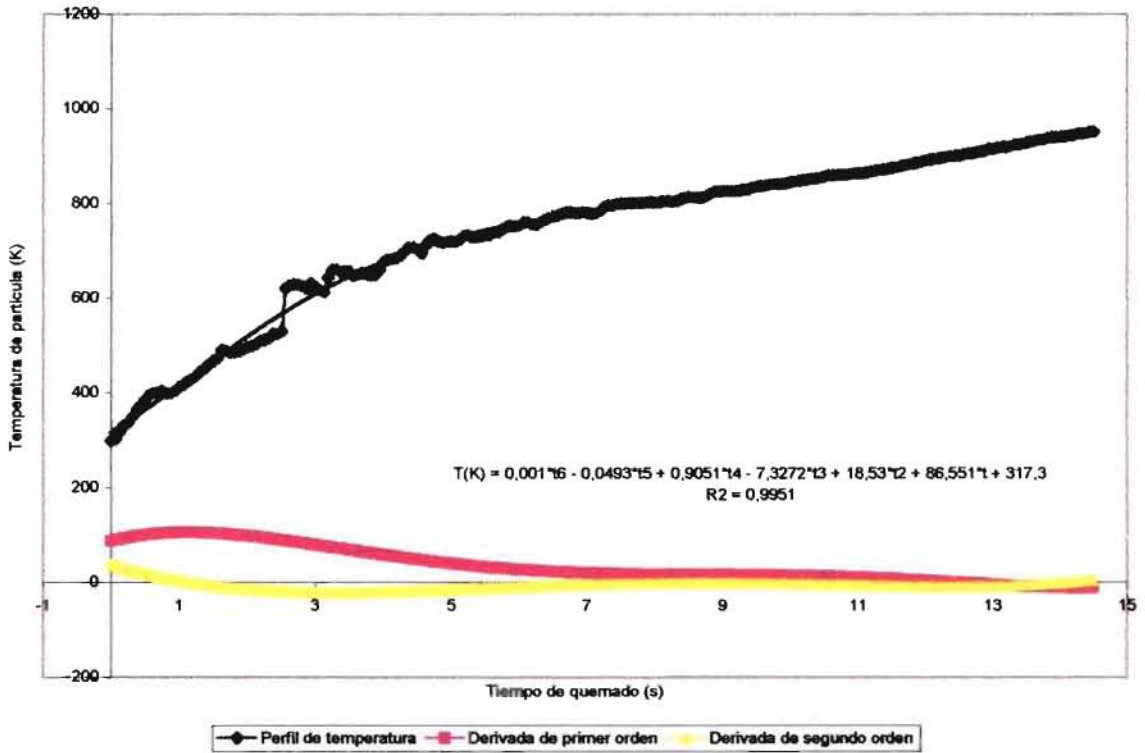


Figura 36. Carbón San Fernando, $N_f = 6$, $d_p = 2$ mm, $T_b = 873$ K, $T_{pi} = 805.66$ K, $t_i = 8.32$ s.

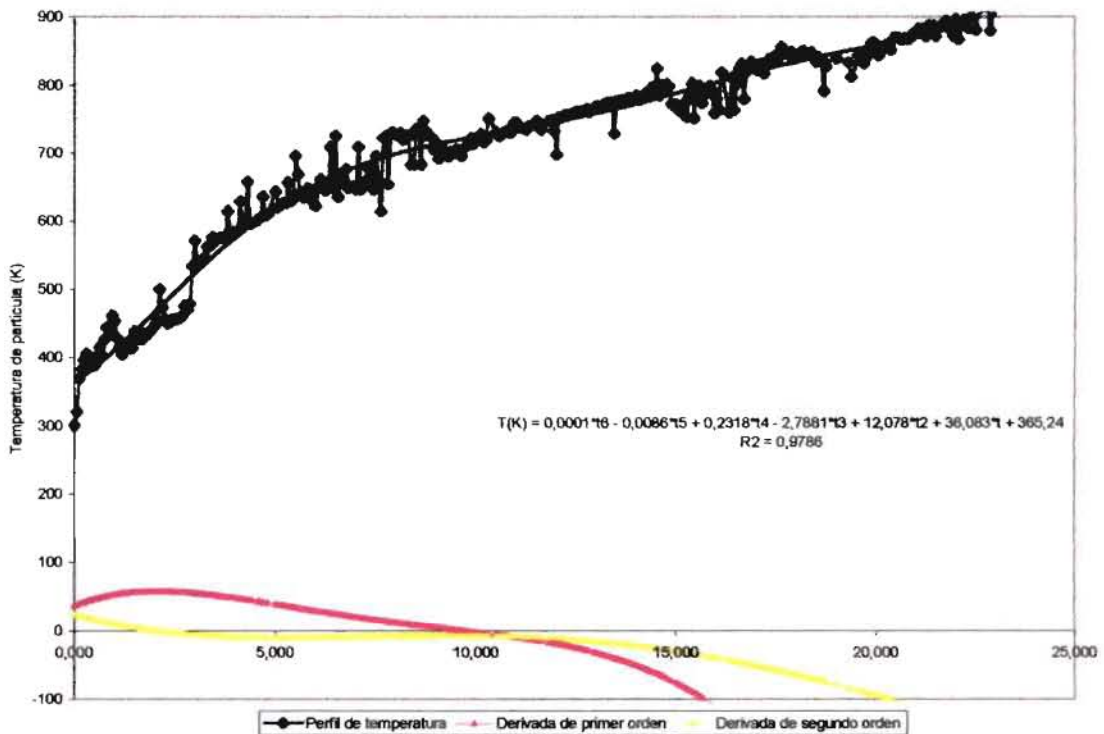


Figura 37. Carbón San Fernando, $N_f = 6$, $d_p = 4$ mm, $T_b = 873$ K, $T_{pi} = 745.66$ K, $t_i = 11$ s.

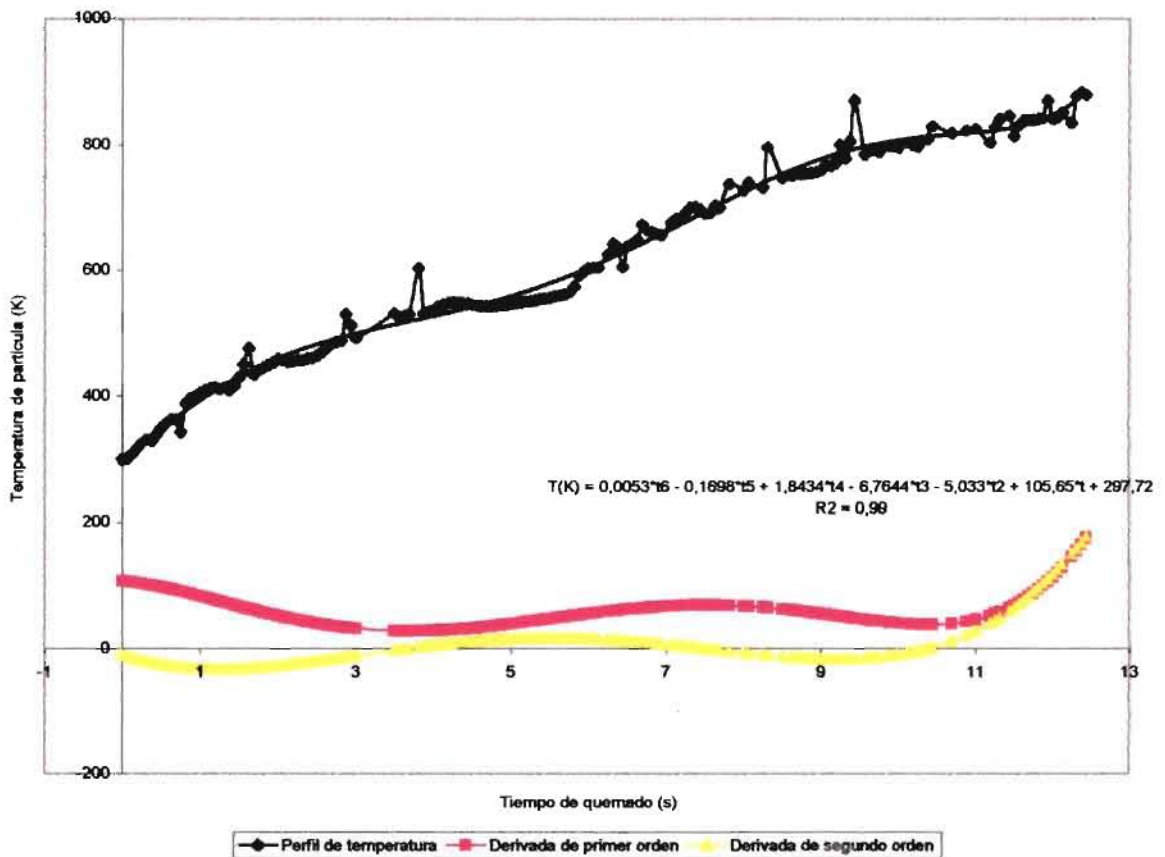


Figura 38. Carbón La Nechí, $N_f = 6$, $d_p = 2$ mm, $T_b = 873$ K, $T_{pi} = 818.66$ K, $t_i = 10.4$ s.

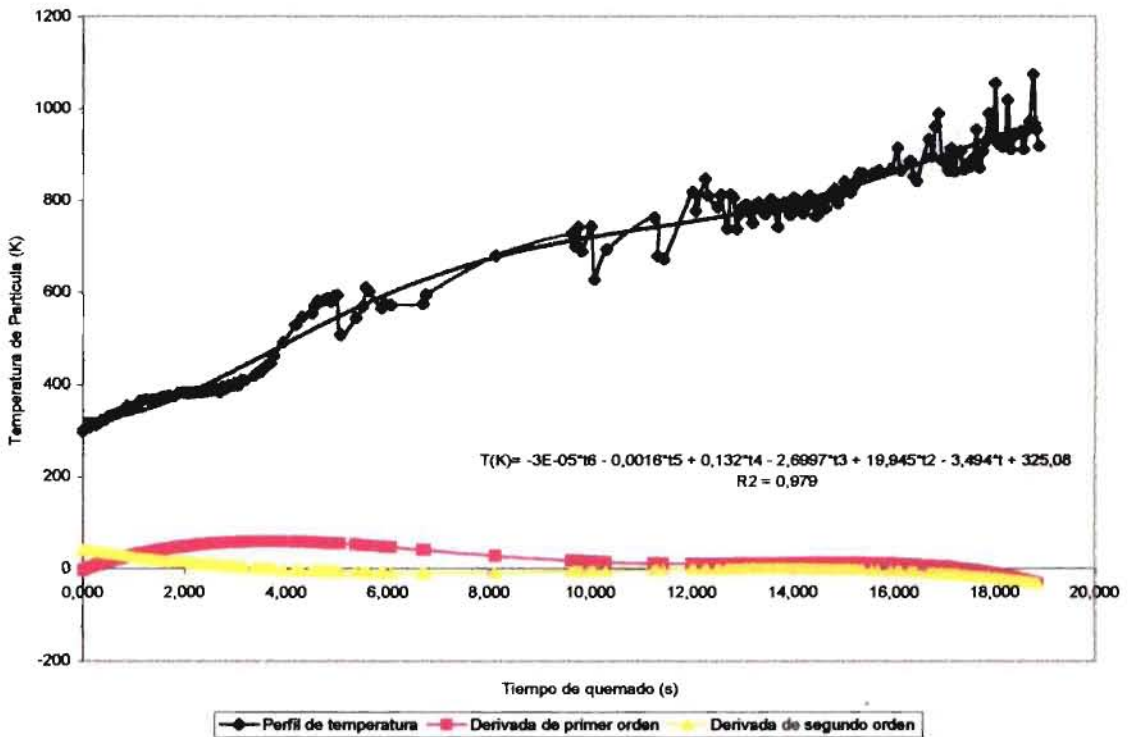


Figura 39. Carbón La Nechí, $N_f = 6$, $d_p = 4$ mm, $T_b = 873$ K, $T_{pi} = 812.56$ K, $t_i = 14.9$ s.

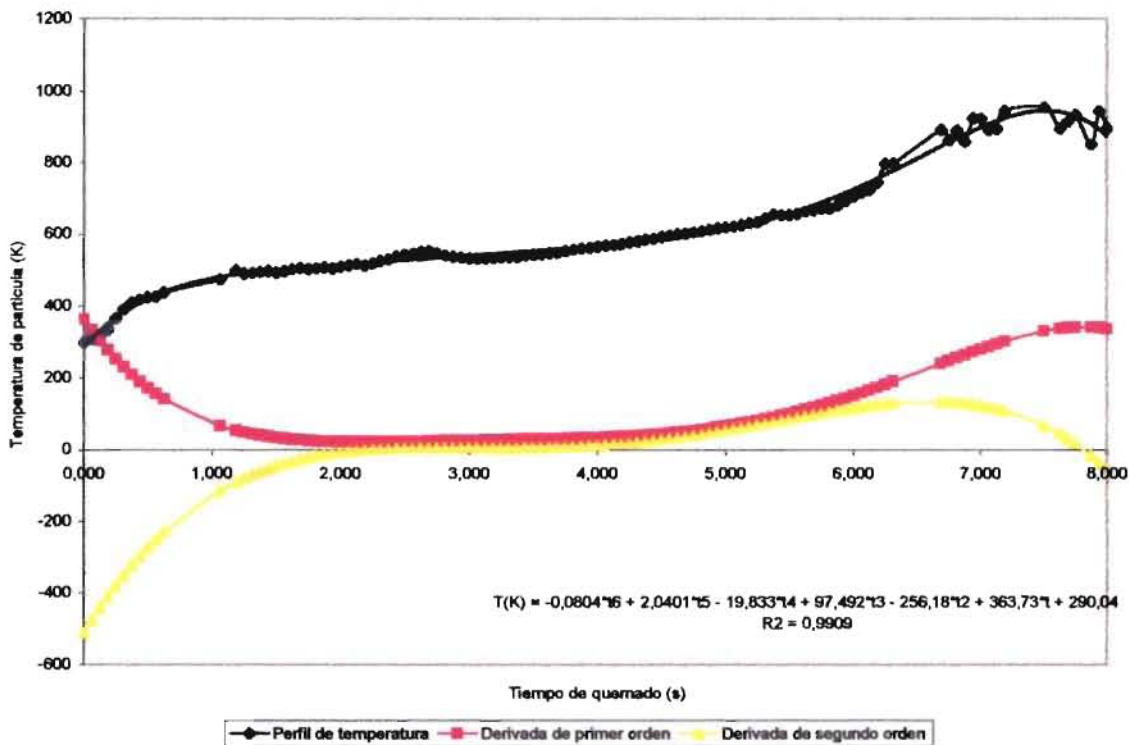


Figura 40. Carbón San Fernando, $N_f = 3$, $d_p = 2$ mm, $T_b = 1073$ K, $T_{pi} = 800$ K, $t_i = 7$ s.

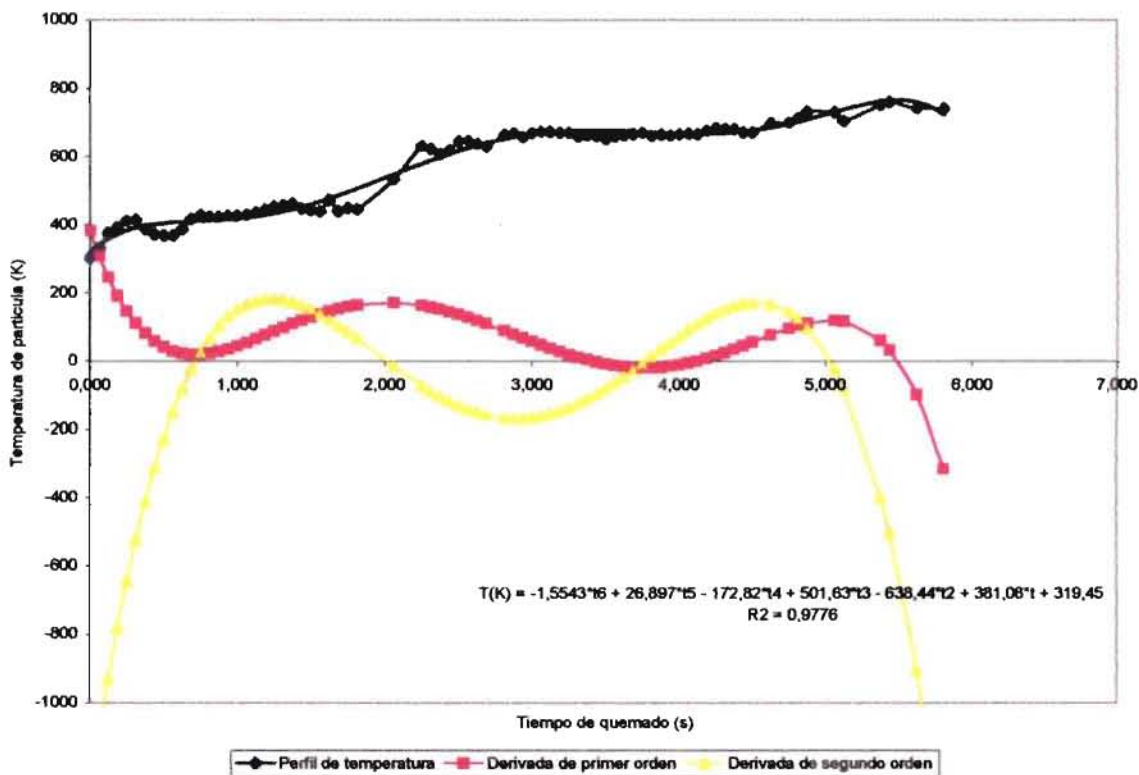


Figura 41. Carbón San Fernando, $N_f = 3$, $d_p = 4$ mm, $T_b = 1073$ K, $T_{pi} = 731.76$ K, $t_i = 4.97$ s.

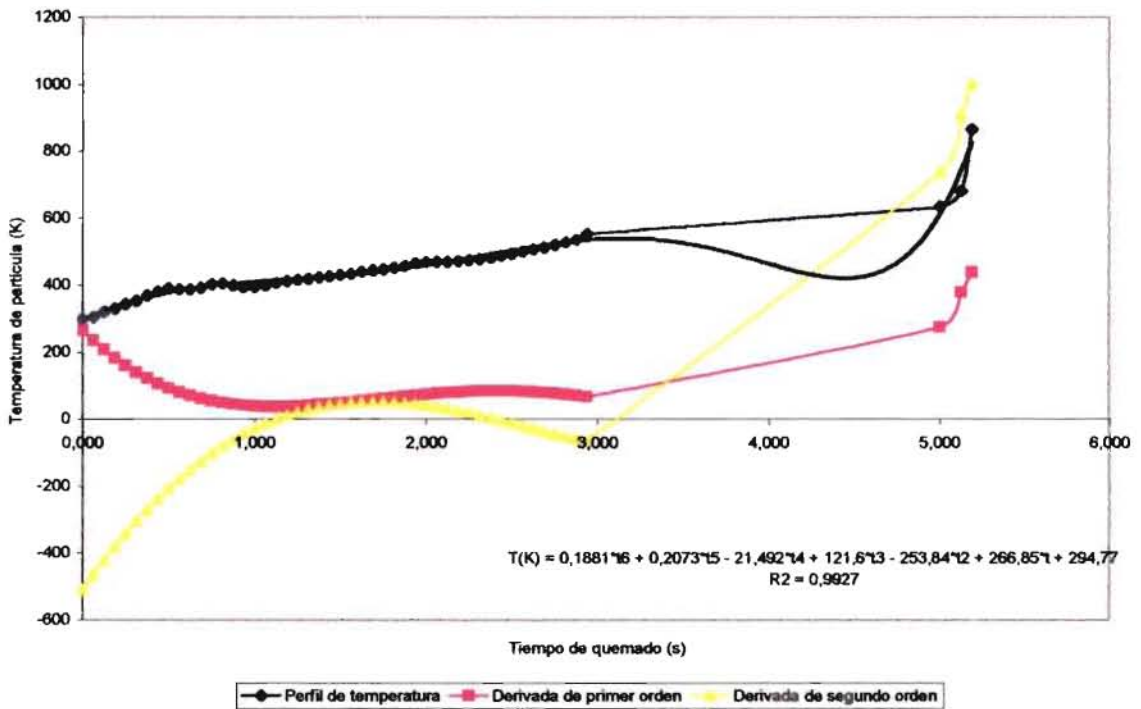


Figura 42. Carbón La Nechí, $N_f = 3$, $d_p = 2$ mm, $T_b = 1073$ K, $T_{pi} = (764.16 - 865.56)$ K, $t_i = 5.2$ s.

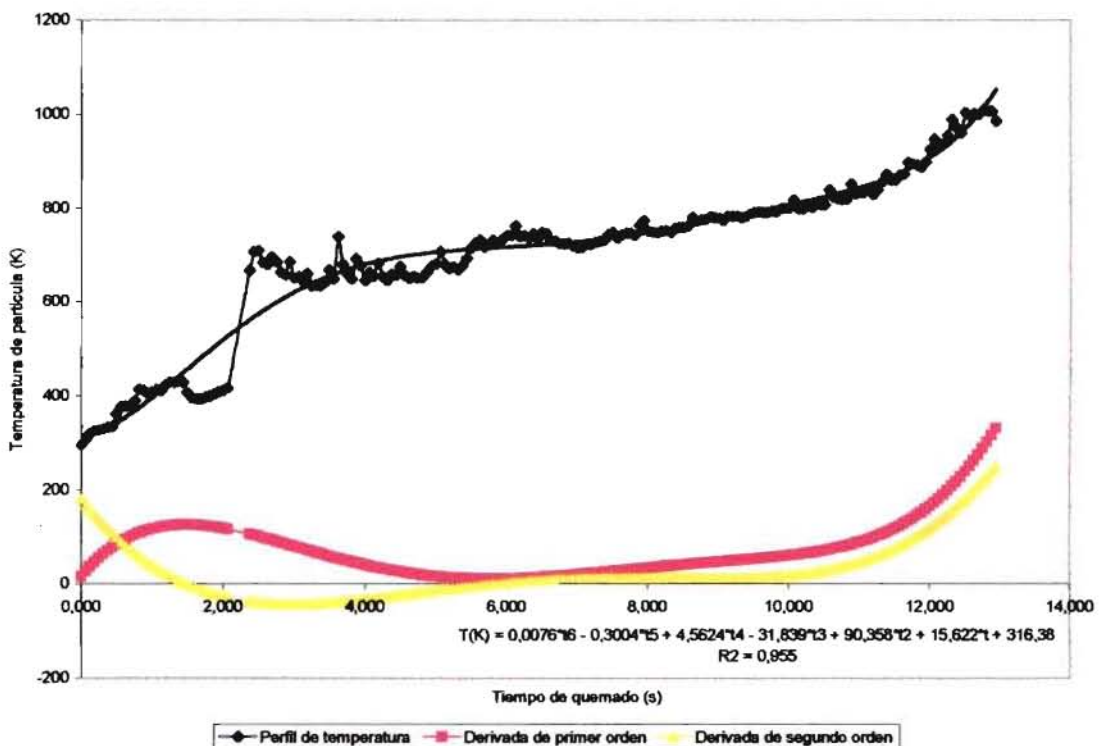


Figura 43. Carbón La Nechí, $N_f = 3$, $d_p = 4$ mm, $T_b = 1073$ K, $T_{pi} = 726.26$ K, $t_i = 5.78$ s.

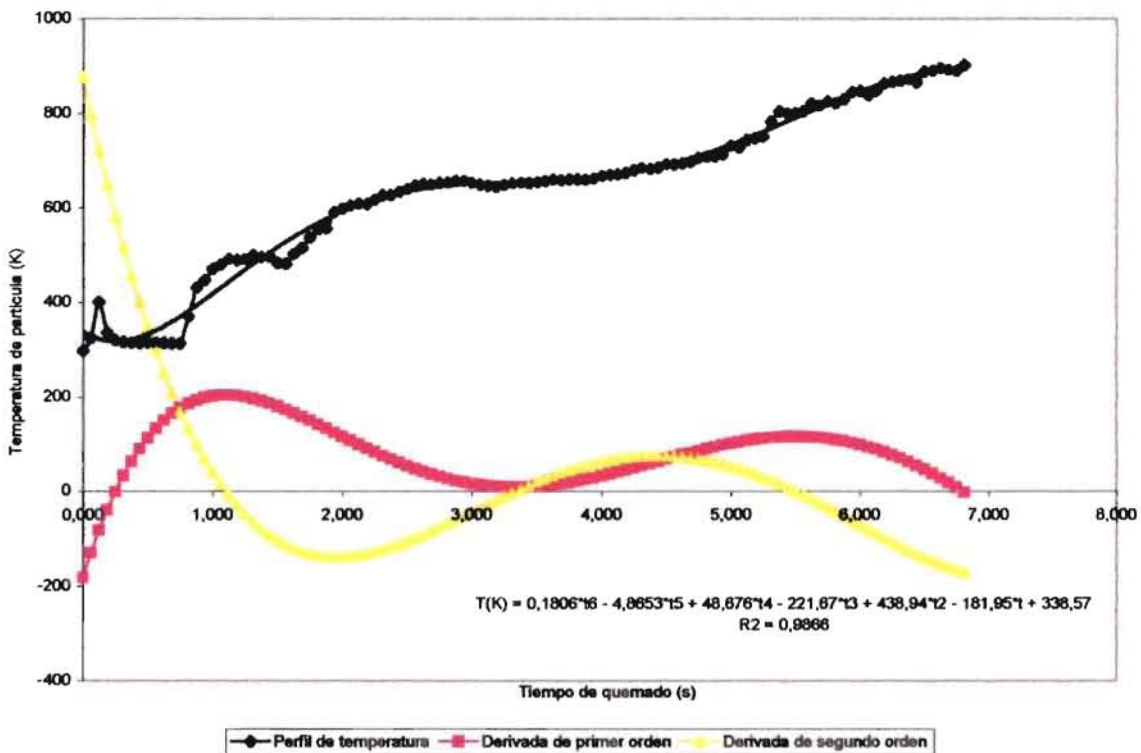


Figura 44. Carbón San Fernando, $N_f = 6$, $d_p = 2$ mm, $T_b = 1073$ K, $T_{pi} = 803.26$ K, $t_i = 5.59$ s.

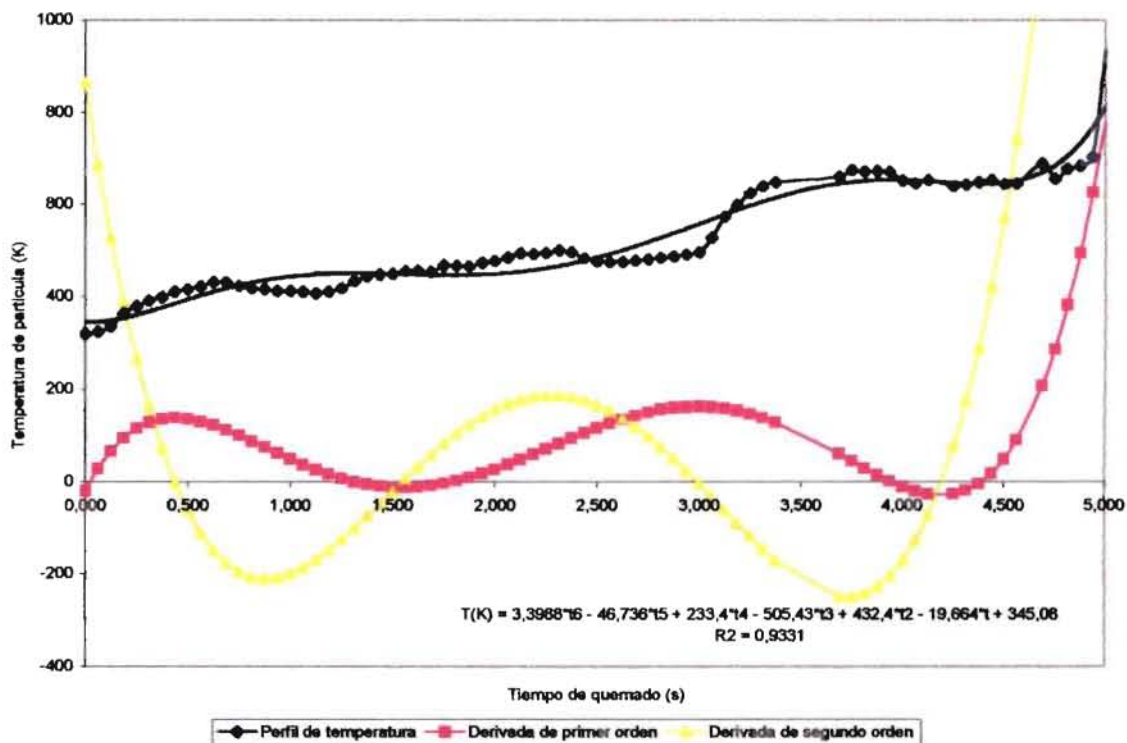


Figura 45. Carbón San Fernando, $N_f = 6$, $d_p = 4$ mm, $T_b = 1073$ K, $T_{pi} = (689.96 - 933.06)$ K, $t_i = 4.94$ s.

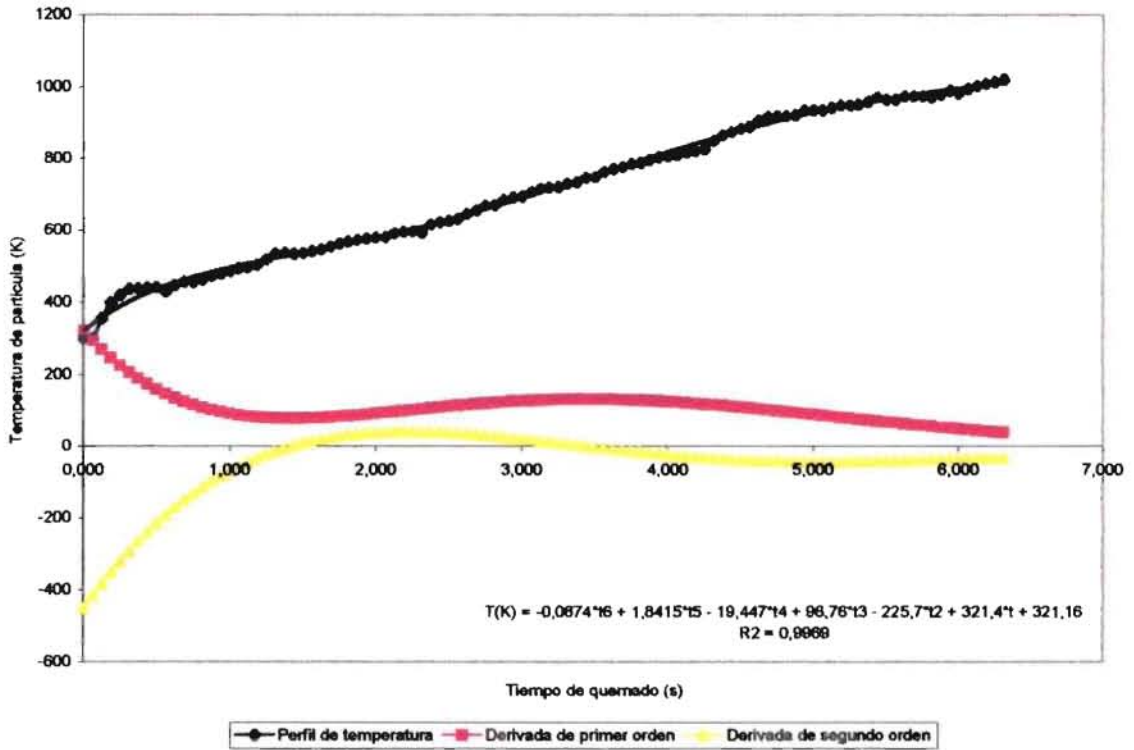


Figura 46. Carbón La Nechí, $N_f = 6$, $d_p = 2$ mm, $T_b = 1073$ K, $T_{pi} = 747.86$ K, $t_i = 3.47$ s.

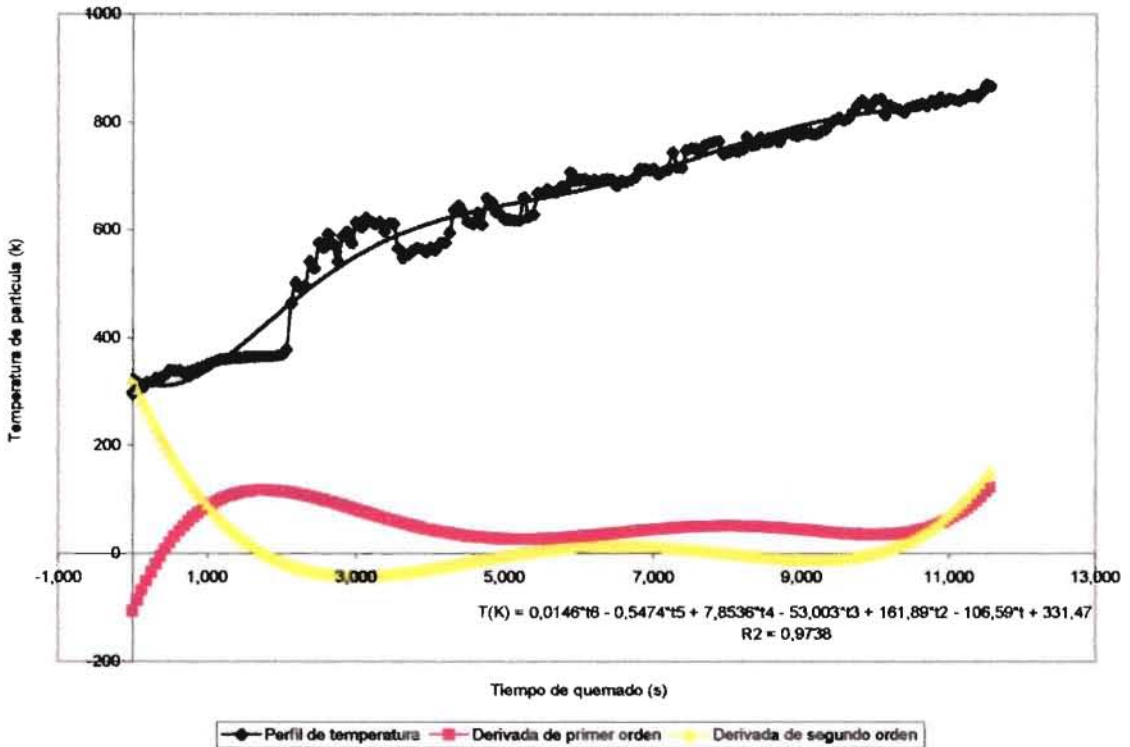


Figura 47. Carbón La Nechí, $N_f = 6$, $d_p = 4$ mm, $T_b = 1073$ K, $T_{pi} = 790.69$ K, $t_i = 9$ s.

5.2 COMPARACIÓN DE LAS PREDICCIONES DEL MODELO CON LOS DATOS EXPERIMENTALES

Para evaluar las diferencias entre los resultados experimentales y los teóricos, se escoge el método de la suma de los cuadrados de las desviaciones, para las temperaturas y los tiempos de ignición, de acuerdo con las diferentes condiciones de operación.

La suma de los cuadrados de las desviaciones (o errores) para la condición i , se define:

$$\dot{i} = \sum_{j=1}^{N_p} \left(\frac{T_{pi,e} - T_{pi,t}}{T_{pi,e}} \right)^2, \text{ para la temperatura de ignición de la partícula, y}$$

$$\dot{i} = \sum_{j=1}^{N_p} \left(\frac{t_{i,e} - t_{i,t}}{t_{i,e}} \right)^2, \text{ para el tiempo de ignición.}$$

Donde:

$T_{pi,e}$: Temperatura de ignición experimental en el j -ésimo experimento (K)

$T_{pi,t}$: Temperatura de ignición predicha por el modelo teórico en el j -ésimo experimento (K)

$t_{i,e}$: Tiempo de ignición experimental para el j -ésimo experimento (s)

$t_{i,t}$: Tiempo de ignición predicho por el modelo para el j -ésimo experimento (s)

N_p : Número total de datos.

Tabla 10. Resultados de las desviaciones por el método de la suma de los cuadrados de los errores.

T_b (K)	N_r	d_p , carbón San Fernando (mm)		d_p , carbón La Nechí (mm)		i
		2	4	2	4	
873.16 (600°C)	3	$0.396 \cdot 10^{-3}$	$0.034 \cdot 10^{-3}$	$0.363 \cdot 10^{-3}$	$0.363 \cdot 10^{-3}$	$2.643 \cdot 10^{-3}$
		0.458	0.338	4.666	0.192	5.654
	6	$2.108 \cdot 10^{-3}$	$0.09 \cdot 10^{-3}$	$0.205 \cdot 10^{-3}$	$0.778 \cdot 10^{-3}$	$3.183 \cdot 10^{-3}$
		0.629	0.303	0.622	0.343	1.897
1073.16 (800°C)	3	$1.717 \cdot 10^{-3}$	$0.624 \cdot 10^{-3}$	$2.863 \cdot 10^{-3}$	$6.976 \cdot 10^{-3}$	$12.180 \cdot 10^{-3}$
		0.757	0.214	0.634	0.217	1.822
	6	$1.718 \cdot 10^{-3}$	$0.022 \cdot 10^{-3}$	$6.562 \cdot 10^{-3}$	0.000	$8.302 \cdot 10^{-3}$
		0.719	0.25	0.511	0.465	1.945
i	T	$5.939 \cdot 10^{-3}$	$0.772 \cdot 10^{-3}$	$9.993 \cdot 10^{-3}$	$9.604 \cdot 10^{-3}$	$26.308 \cdot 10^{-3}$
	t	2.563	1.105	6.433	1.217	11.318

Los términos exponenciales que aparecen en cada rectángulo corresponden a condiciones de temperatura de ignición y los otros a tiempo de ignición.

5.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS CINÉTICOS EN LA IGNICIÓN DE PARTÍCULAS DE CARBÓN (E y $k_{o, ch}$).

- Se hace el ensayo de acuerdo con el modo operatorio de la sección 4.3.
- Se toman los datos reales de T_{pi} , t_i y $(dT/dt)_i$ para la condición de $d^2T/dt^2=0$.

- Se calcula el valor de C_{pc} del carbón con la ecuación (42) reemplazando el valor de T_{pi} hallado.
- Se calcula el valor de \bar{h} de la ecuación (60), utilizando las correlaciones empíricas propuestas en el modelo teórico, o bien, utilizando propiedades reales.
- Se obtiene el valor de ϵ_r de la ecuación (82), o se utiliza un valor deducido de las condiciones reales del estado físico, para esto existen recomendaciones y tablas.
- Se va a la ecuación (40), la cual se encuentra desarrollada en la ecuación central del Anexo 2, y se reemplaza T_p por T_i en las expresiones para calor por conducción y radiación.
- Se reemplaza en la ecuación central los valores restantes obtenidos de las condiciones iniciales y parámetros.
- La ecuación central, al cancelar A_p queda:

$$\begin{aligned} & (C_{pc})_i * \left(\frac{\dot{d}_p}{6}\right) * \rho_c * \left(\frac{dT_p}{dt}\right)_i - (C_{pc})_i * (T_{pi}) * g_c \\ & = q_c * g_c - \bar{h}(T_{pi} - T_b) - \sigma * \epsilon_r * (T_{pi}^4 - T_b^4) \end{aligned}$$

- De la ecuación anterior se despeja g_c y se reemplaza por la expresión:

$$g_c = k_{0,chl} * P_{O_2} * \exp\left(-\frac{E}{R.T_{pi}}\right)$$

- Sacando ln:

$$\ln g_c = \ln(k_{0, \text{ch}} * P_{\text{O}_2}) - \left(\frac{E}{R}\right) * \left(\frac{1}{T_{\text{pi}}}\right)$$

- Al graficar $\ln(g_c)$ contra $(1/T_{\text{pi}})$ se obtiene una recta con pendiente negativa, de la cual se despeja el valor de E, y un intercepto que, para un valor de P_{O_2} obtenido con la ecuación (48), sirve para despejar $k_{0, \text{ch}}$.
- El paso anterior se hace para muchos ensayos con un mismo tipo o rango de carbón, obteniéndose con esto valores promediados de E y $k_{0, \text{ch}}$. Repetir con otros tipos de carbón.

6. CONCLUSIONES Y ANALISIS DE RESULTADOS

- El modelo teórico predice con exactitud los resultados de temperatura de ignición en el lecho fluidizado de arena, a pesar de que experimentalmente no se utilizaron partículas esféricas como lo supone el modelo, sino partículas amorfas.
- No predice con exactitud el tiempo de ignición. Puede haber un retraso debido quizás a la limitación con que la partícula cae en el lecho, pues no es una caída libre real, dependiendo de la habilidad para desplazar la termocupla que sujeta a la partícula.
- Las mayores discrepancias obtenidas en la determinación de los puntos de ignición puede deberse a las ligeras variaciones que se pueden encontrar entre los componentes y tamaños de las partículas para un mismo tipo de carbón.
- Los perfiles reales $T(t)$ para partículas de mayor diámetro presentan más rizados que las de menor diámetro.
- De una forma global se observa que al aumentar el tamaño de la partícula disminuye la temperatura de ignición y aumenta el tiempo de encendido.
- El número de fluidización no tiene un efecto muy notorio en el valor de la temperatura de ignición, si este aumenta la temperatura aumenta levemente. Para el tiempo de ignición, al aumentar el número de fluidización, este no varía mucho (en la parte real) y tiende a disminuir muy levemente (en el modelo).

- El mismo efecto anterior se observa para la temperatura del lecho, en cuanto a las condiciones de temperatura y tiempo de ignición.
- Para condiciones similares de temperatura de lecho, número de fluidización y diámetro de partícula, el carbón de "La Nechí" presenta condiciones de temperatura y tiempo de ignición mayores que el carbón de "San Fernando". El de la Nechí tiene menos porcentaje en humedad, materia volátil y carbono fijo que el de San Fernando. Este último se prenderá más fácilmente, pues posee mayor poder calorífico y menor contenido de cenizas.
- Si se observan detenidamente las curvas $T(t)$ de las Figuras 32 - 47 se nota que presentan una zona de mayor rizado (o cambios más bruscos) entre valores de 400 - 600 K de temperatura, esto por el fenómeno de desprendimiento de volátiles característicos en esa zona.
- Se aprendió una técnica que puede utilizarse para determinar condiciones de ignición, información muy valiosa, para el control eficiente de procesos que involucran el uso del carbón.
- De la Tabla 10 se observa que hubo más errores en la detección del tiempo de ignición que en la de sus temperaturas.
- El procedimiento que menos errores presentó fue el que se utiliza para medir los efectos del aumento del número de fluidización y de temperatura del lecho para un diámetro de partícula de 4 mm, con el objeto de medir las condiciones del punto de ignición para el carbón de "San Fernando".

- El procedimiento que más errores presentó, siguiendo el orden del punto anterior, fue el utilizado en carbón de la "Nechí" para un diámetro de partícula de 2 mm.
- Hay mayor exactitud en los resultados cuando se utilizan partículas de diámetro mayor, ya que el valor de la sumatoria de las desviaciones al cuadrado de sus errores (i), en la Tabla 10, es menor para ambas condiciones de ignición en los casos de diámetro de partícula de 4 mm comparados con las de 2 mm.
- Al analizar los resultados obtenidos por Fu y Zeng [22], resumidos en las Figuras 8 y 9, hay discrepancias que van desde 25 a 80 K, entre valores reales y experimentales en el cálculo de las temperaturas de ignición. Los valores de las desviaciones (i) van desde $0.772 \cdot 10^{-3}$ a $6.14 \cdot 10^{-3}$. Lo que demuestra que los resultados obtenidos en la presente investigación son confiables si se comparan con los de otros investigadores.

7. RECOMENDACIONES

- El procedimiento utilizado para el modelamiento de la presente investigación puede servir como guía para el modelamiento de procesos similares en otros ambientes reactivos de partículas de carbón.
- Para futuros estudios se ha de modelizar el fenómeno de ignición para más de una partícula de carbón y ver el efecto con la adición de más partículas.
- Tratar de simular la caída libre de la partícula de carbón a quemar, sujeta a la termocupla, más acorde con la realidad, para no tener problemas de retrasos que alteren el tiempo de ignición.
- Extender los ensayos a otros tipos de carbón, siempre y cuando las partículas a quemar sean representativas, estén bien frescas, y se dispongan de los resultados de sus análisis sin mayores inconvenientes.
- Esta técnica se puede ofrecer como un servicio más, por parte de la universidad a entidades interesadas y que involucren en sus procesos el quemado de carbones.
- Insistir en la consecución de brocas o fresas más diminutas, que permitan involucrar tamaños de partículas más pequeños, lo mismo que microprocesador que permita aumentar la rapidez de toma de datos (ya que el equipo utilizado lo permite), para hacer extensivo el estudio de ignición.

- Conseguir un medidor de oxígeno para ampliar el estudio a diferentes concentraciones.
- Con la técnica empleada se puede profundizar en el seguimiento de la combustión de partículas de carbón hasta el consumo total de las mismas.
- Entre mas replicas o repeticiones se realicen se obtiene una mayor exactitud en los resultados.
- Pensar en el diseño, construcción, o consecución de termocuplas tipo K y tipo J que sirva para hacer varios ensayos y así agilizar el trabajo implementado.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ANNAMALAI, K.; RYAN, W.; DHANAPALON, S. Progress in Energy and Combustion Science, 1994, Vol. 20, No6, pp 487-618.
2. AVEDESIAN, M. M. and DAVIDSON J. F.. Combustion of Carbon Particles in a Fluidised Bed. Trans. Instn. Chem. Engrs., Vol. 51, 1973, pp 121-131.
3. BASU, P. And SUBBARAO D. An Experimental Investigation of Burning Rate and Mass Transfer in a Turbulent Fluidized Bed. Combustion Flame, 66, 1986, pp 261-269.
4. BASU, P. Burning Rate of Carbón in Fluidized Bed. Fuel 20, 1977, pp 390-392.
5. BASU, P., BROUGHTON J. And ELLIT, D. E. Combustion of Single Coal Particles in Fluidized Beds. Fluidized Combustion, inst. Fuel Sympo. Ser., Vol. I, No. 1, A3-1 to A3-10, 1975.
6. BIRD, R. B., STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Transport Phenomena. A Wiley International Edition. Japan, 1960, 780 p.
7. DE LA CRUZ M., JAVIER F. " Manual de un sistema de adquisición de datos 21x Cambell Sientific". Primera versión, Depto de Procesos Químicos, Universidad Nacional, Sede Medellín, 1999, 60 p.

8. GELDART D. Gas Fluidization Technology. Jhons Wiley & Sons, U. K., 1986, 468 p.
9. HOUGEN, O. A., WATSON, K. M., and RAGATZ, R. A. "Principios de los Procesos Químicos", parte I, Balances de Materia y Energía, Editorial reverté, S. A.; 1974, 556 p.
10. KATALAMBULA, H., HAYASAI, J. CHIBA, T. IKEDA, K. And KITANO, K. "Mechanism of Single Coal Particle Ignition Under Microgravity Condition". Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 30, No. 1, 1977, pp 146-153.
11. KUNI J, D. And LEVENSPIEL O. "Fluidization Engineering". 2th Ed., Butter Worth-Heinemann, 1991, 491 p.
12. LABORDETA L. Y IRANZO C. Combustión de Carbón en Lecho Fluidizado. Consideraciones Fluidodinámicas parte II. Ingeniería Química, Septiembre, 1986, pp171-176.
13. LINJEWILE, T. M. and AGARWAL, P. K. "Heat Transfer Behavior and Temperatures of Freely Moving Burning Carbonaceous Particles in Fluidized Bed". 23th, Simposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, 1990, pp 917-925.
14. PELL, M. "Gas Fluidization". Elsevier, U.S.A., 1990, 125 p.
15. PERRY, H. R., GREEN, W. D., MALONEY, O. J. " Manual del Ingeniero Químico". Sexta edición, 1991.
16. REID, R. C., PRAUSNITZ, J. M., and POLING, B. E. "The Properties of Gases and Liquids". 4th Ed., Mc Graw-Hill, Inc. México, 1987, 742 p.

17. Ross, I. B., PATEL, M. S. and DAVISON, J. F. The Temperature of Burning Carbon Particles in Fluidized Bed. Trans. Ichem, Vol. 59, 1981, pp 83-88.
18. TOGNOTTI, I, LONGWELL, J. P., and SAROFIN, a. F. "The Products of the High Temperature Oxidation of a Single Char Particle in a Electrodynamic Balance". Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1990, pp 1207-1213.
19. TOMECKZEK, J. "Coal Combustion". Krieger Publishing Company. Malabar, Florida, 1994, 167 p.
20. TOMECKZEK, J. And WOJEIK, J. "A Method of Direct Measurement of solid Fuel Particle Ignition Temperature". Twenty-third Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, 1990, pp 1163-1167.
21. URHAN R., MAGDALENA, PhD. Ignición de Partículas de Carbón. Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Programa Especialización en Ciencias Térmicas, Julio de 1995, 69 p.
22. WEI BIAD FU and TAO FANG ZENG. "A General Method for Determining Chemical Kinetic Parameters During Ignition of Coal Char Particles". Combustion on Flame, 88, 1992, pp 413-424.
23. WEN, C. and YU, Y. H. "A Generalized Method for Predicting the Minimum Fluidization Velocity". Aiche J., 12(3), 610, 1966.
24. WHEATLEY, M. "Thermal Ignition Tutorial". Ignition Temperature. Fuel and Energy Department. w.w.w.leeds.ac.uk.

ANEXO 1.

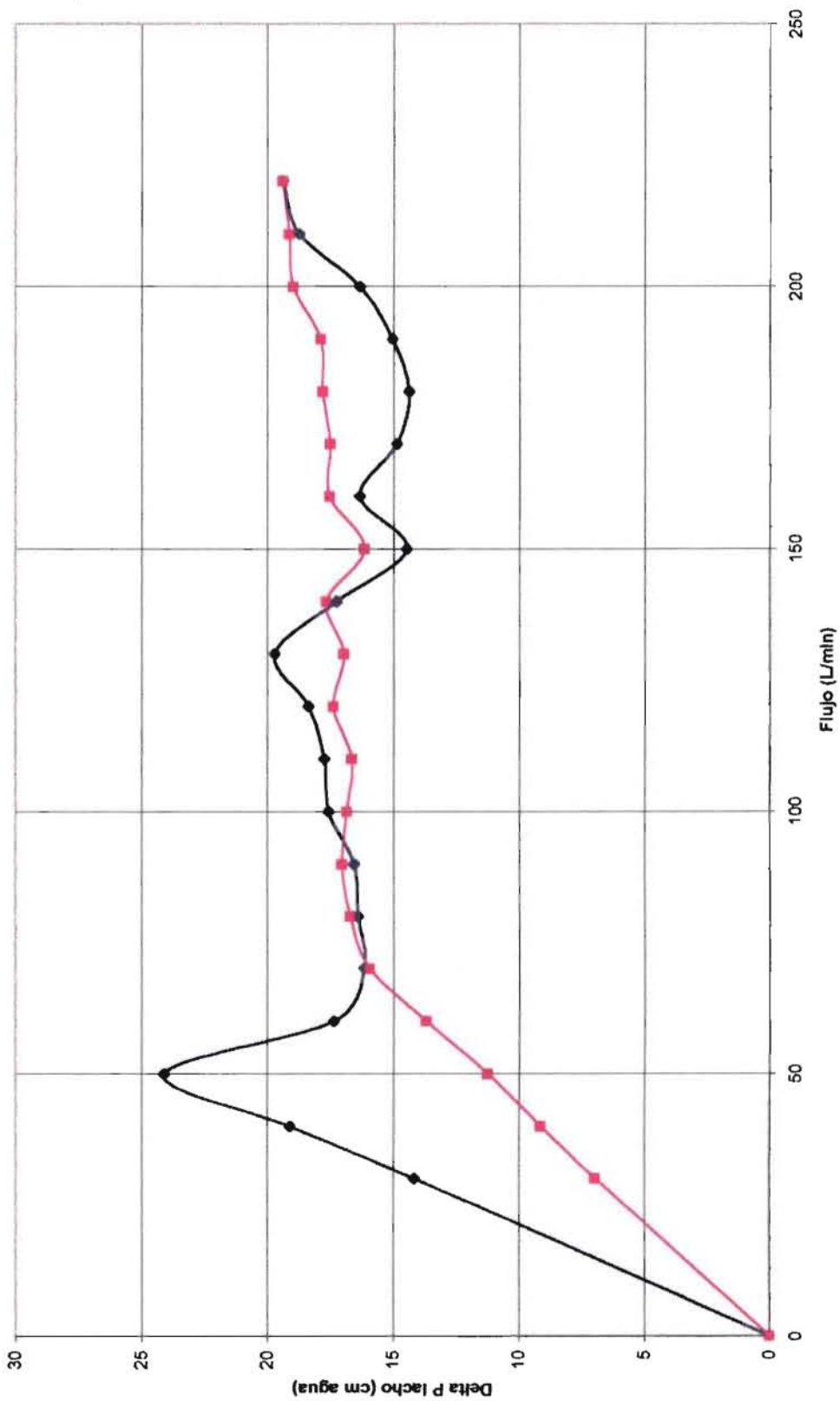
CÁLCULO PARA LA VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN DE LA ARENA ($\bar{d}_p = 0.5 \text{ mm}$)

DATOS:

El ensayo de velocidad mínima de fluidización para la arena se realizó en el reactor de la planta piloto de gasificación (Figura 12 y 14). El área de flujo del reactor es de 47.77 cm^2 . Se utilizó una arena entre mallas -30 +40, diámetro promedio de partícula de 0.5 mm.

Flujo del rotámetro (l/mín. a 15 °C, 1 atm)	Caída de presión en el lecho sentido creciente. (cm de H₂O)	Caída de presión en el lecho, sentido decreciente. (cm de H₂O)
0	0	0
30	14,17	6,98
40	19,13	9,14
50	24,1	11,26
60	17,37	13,7
70	16,16	15,95
80	16,41	16,72
90	16,57	17,06
100	17,58	16,86
110	17,75	16,66
120	18,38	17,39
130	19,72	16,97
140	17,26	17,67
150	14,48	16,16
160	16,34	17,55
170	14,87	17,52
180	14,38	17,81
190	15,04	17,9
200	16,34	18,99
210	18,74	19,14
220	19,4	19,4

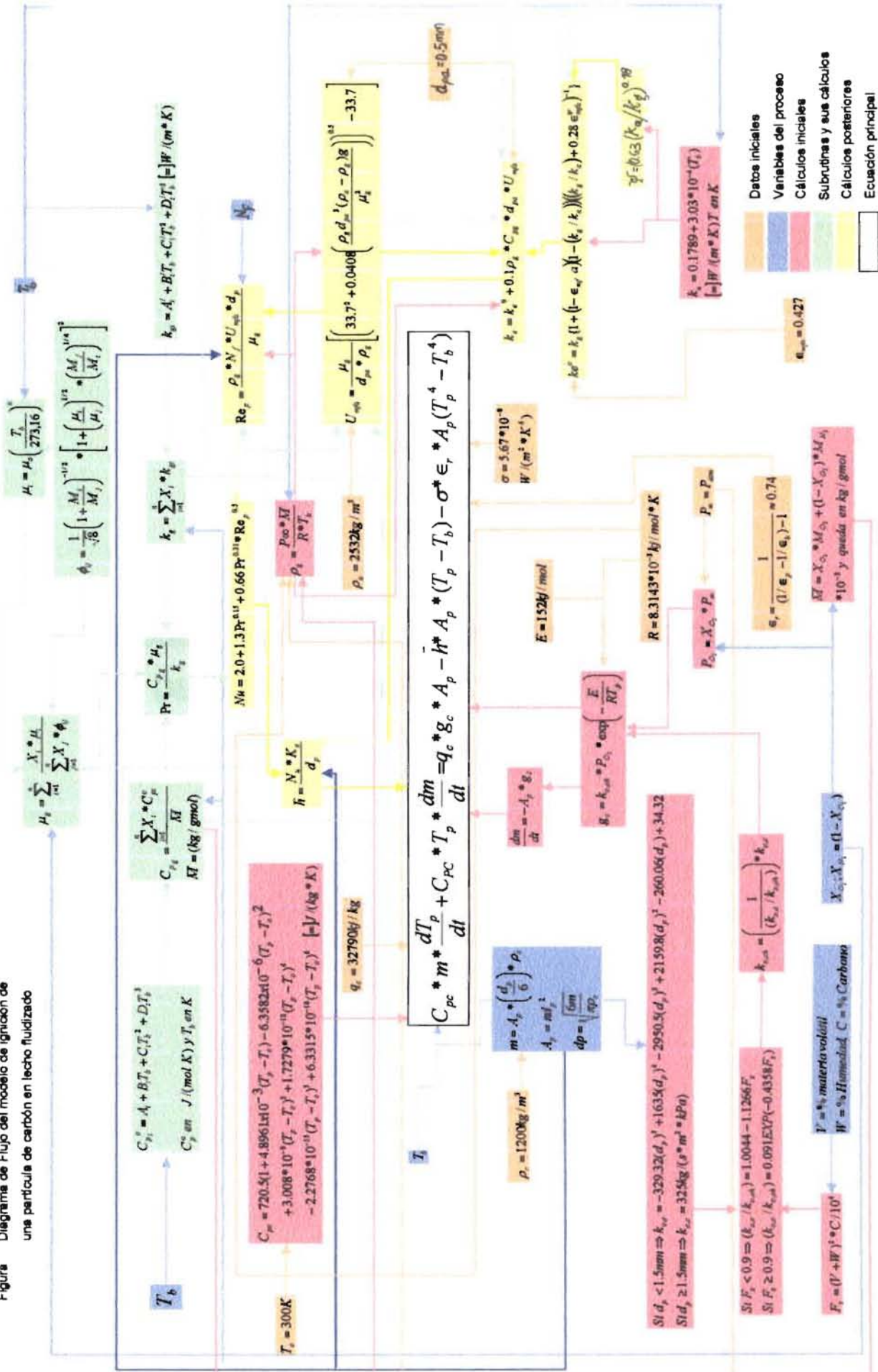
Velocidad mínima de fluidización (Arena)



ANEXO 2.

DIAGRAMA DE FLUJO DEL MODELO DE IGNICIÓN DE UNA PARTÍCULA DE CARBÓN EN LECHO FLUIDIZADO

Figura Diagrama de Flujo del modelo de ignición de una partícula de carbón en lecho fluidizado



ANEXO 3.

PROGRAMA USADO EN EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS CON EL SOTWARE PC208E



:{21X}

;
*Table 1 Program
01: 0.0125 Execution Interval (seconds)

1: Beginning of Loop (P87)

1: 10 Delay
2: 0 Loop Count

2: Do (P86)

1: 1 Call Subroutine 1

3: IF (X<=>F) (P89)

1: 1 X Loc [Tempart]
2: 3 >=
3: 300 F
4: 31 Exit Loop if True

4: End (P95)

5: Beginning of Loop (P87)

1: 1 Delay
2: 0 Loop Count

6: Do (P86)

1: 1 Call Subroutine 1

7: IF (X<=>F) (P89)

1: 1 X Loc [Tempart]
2: 3 >=
3: 1200 F
4: 31 Exit Loop if True

8: End (P95)

9: Beginning of Loop (P87)

1: 1000 Delay
2: 0 Loop Count

10: Do (P86)

1: 1 Call Subroutine 1

11: End (P95)

*Table 2 Program
02: 0.0 Execution Interval (seconds)

*Table 3 Subroutines

1: Beginning of Subroutine (P85)

1: 1 Subroutine 1

2: Internal Temperature (P17)

1: 2 Loc [Temref]

3: Thermocouple Temp (DIFF) (P14)

1: 1 Reps

2: 13 ñ 50 mV Fast Range

3: 2 DIFF Channel

4: 3 Type K (Chromel-Alumel)

5: 2 Ref Temp Loc [Temref]

6: 1 Loc [Tempart]

7: 1.0 Mult

8: 0.0 Offset

4: Thermocouple Temp (DIFF) (P14)

1: 1 Reps

2: 13 ñ 50 mV Fast Range

3: 3 DIFF Channel

4: 3 Type K (Chromel-Alumel)

5: 2 Ref Temp Loc [Temref]

6: 3 Loc [Tempreact]

7: 1.0 Mult

8: 0.0 Offset

5: Do (P86)

1: 10 Set Output Flag High

6: Sample (P70)

1: 1 Reps

2: 1 Loc [Tempart]

7: Sample (P70)

1: 1 Reps

2: 3 Loc [Tempreact]

8: Real Time (P77)

1: 0001 Seconds

9: End (P95)

End Program

ANEXO 4.

**CODIFICACIÓN DEL PROGRAMA DEL MODELO DE
IGNICIÓN DE UNA PARTÍCULA DE CARBÓN EN LECHO
FLUIDIZADO, EN EL LENGUAJE VISUAL C++.**

```

void CIgnicionDoc::Modelo()
{
    float Pp[2], Mpro, Umfa, Ara;
    float Fz, ka, Koc, Koch, ff;
    float visG, kgG, denG, cpG;
    float Rep, Nu, Pr, Ke, fi[2][2];
    float MCp[2][4], MKg[2][4];
    float Kg[2], Cp[2], vis[2];
    float M[2], n[2], uo[2];

    float t, temp, dCpc, dgc;
    int i, j;

    M[O2] = 32;
    M[N2] = 28;

    MKg[N2][0] = 3.919e-4;
    MKg[N2][1] = 9.816e-5;
    MKg[N2][2] = -5.067e-8;
    MKg[N2][3] = 1.504e-11;
    MKg[O2][0] = -3.273e-4;
    MKg[O2][1] = 9.966e-5;
    MKg[O2][2] = -3.743e-8;
    MKg[O2][3] = 9.732e-12;

    MCp[N2][0] = 28.882;
    MCp[N2][1] = -0.15703e-2;
    MCp[N2][2] = 0.8075e-5;
    MCp[N2][3] = -2.8706e-9;
    MCp[O2][0] = 25.46;
    MCp[O2][1] = 1.5192e-2;
    MCp[O2][2] = -0.715e-5;
    MCp[O2][3] = 1.3108e-9;

    uo[O2] = 1.87e-5;
    uo[N2] = 1.66e-5;
    n[O2] = 0.814;
    n[N2] = 0.756;

    Pp[O2] = x[O2]*P;

    Mpro = (M[O2]*x[O2] + M[N2]*x[N2]) / 1000;

```

```

denG = (P*Mpro)/(R*Tb);

ka = 0.1789 + 3.03e-4*Tb;

if(dp < 0.0015)
    Koc = -329.32*pow(dp,5) + 1635*pow(dp,4) -
        2950.5*dp*dp*dp + 2159.8*dp*dp - 260.06*dp + 34.32;
else Koc = 325;

Fz = (V+W)*(V+W)*C/1.0e4;

if(Fz < 0.9) Koch = 1.0044 - 1.1266*Fz;
else Koch = 0.091*exp(-0.4358*Fz);
Koch = 1/Koch*Koc;

for(i = 0; i < 2; i++)
{
    Cp[i] = Kg[i] = 0;
    for(j = 0; j <= 3; j++)
    {
        Kg[i] += MKg[i][j]*pow(Tb,j);
        Cp[i] += MCp[i][j]*pow(Tb,j);
    }
}

for(i = 0; i < 2; i++)
    vis[i] = uo[i]*pow(Tb/273.16, n[i]);

for(i=0; i < 2; i++)
{
    for(j = 0; j < 2; j++)
    {
        fi[i][j] = 0.3535533906*(1/sqrt(1+M[i]/M[j]));
        fi[i][j] *= pow(1+sqrt(vis[i]/vis[j])*sqrt(sqrt(M[j]/M[i]), 2),
    }
}

for(i=0, visG=0; i < 2; i++)
{
    for(j = 0, temp=0; j < 2; j++)
        temp += x[j]*fi[i][j];

    visG += (x[i]*vis[i])/temp;
}

```



```

cpG = kgG = 0;
for(j = 0; j < 2; j++)
{
    cpG += x[j]*Cp[j];
    kgG += x[j]*Kg[j];
}
cpG = cpG/Mpro;

Pr = cpG*visG/kgG;

Ara = denG*pow(1.13*dpa,3)*(denA - denG)*g / (visG*visG);
Umfa = visG/(1.13*dpa*denG)*(sqrt(1135.69 + 0.0408*Ara)-33.7);

ff = 0.63*pow(ka/kgG, 0.18);

Ke = kgG*(1 + (1-epsmfa)*(1-kgG/ka)*(1/(kgG/ka + 0.28*pow(epsmfa,ff))));
Ke = Ke + 0.1*denG*cpG*dpa*Umfa;

Rep = denG*Nf*Umfa*dp/visG;
Nu = 2.0 + 1.3*pow(Pr,0.15) + 0.66*pow(Pr,0.31)*pow(Rep,0.5);

hpro = Nu*Ke/dp;

Tp[0] = To;
for(i = 0, t = 0; Tp[i] < 1600; t += dt, i++)
{
    gc = Koch*Pp[O2]*exp(-E/(R*Tp[i]));
    for(j = 0, Cpc = 0; j < 7; j++)
    {
        Cpc += coef[j]*pow(Tp[i]-To,j);
    }
    Cpc *= 720.5;

    derivs(t, Tp+i, dTp+i);
    rk4(Tp+i, dTp+i, 1, t, dt, Tp+i+1);

    for(j = 1, dCpc = 0; j <= 6; j++)
    {
        dCpc += coef[j]*j*pow(Tp[i]-To, j-1);
    }
    dCpc *= 720.5;

    dgc = Koch*Pp[O2]*(E*R/pow(R*Tp[i], 2))*exp(-E/(R*Tp[i]))*dTp[i];
    d2Tp[i] = 6/dp/denC/Cpc*(gc*(Cpc*dTp[i] + dCpc*Tp[i]) + Cpc*Tp[i]*dgc

```

```

+ Qc*dgc - hpro*dTp[i] - 4*sigma*epsr*pow(Tp[i],3)*dTp[i] -
dp*denC*dCpc*dTp[i]/6);

```

```

}

```

```

}

```

```

void ClignicionDoc::rk4(float *y,float *dydx,int n,float x,
                        float h,float *yout)

```

```

{

```

```

    int i;
    float xh, hh, h6, *dym, *dym, *yt;

```

```

    dym = new float[n];
    dym = new float[n];
    yt = new float[n];

```

```

    hh = h*0.5;
    h6 = h/6.0;
    xh = x + hh;

```

```

    for(i=0; i<n; i++)
        yt[i] = y[i] + hh*dydx[i]; //en dydx estan los k1

```

```

    derivs(xh,yt,dym); //calcula los k2 y los guarda en dym

```

```

    for(i=0; i<n; i++)
        yt[i] = y[i]+hh*dym[i];

```

```

    derivs(xh,yt,dym); //calcula los k3 y los guarda en dym

```

```

    for(i=0; i<n; i++)
    {
        yt[i] = y[i]+h*dym[i];
        dym[i] += dym[i]; //suma k2 y k3 en dym
    }

```

```

    derivs(x+h,yt,dym); // calcula k4 y lo guarda en dym

```

```

    for(i=0; i<n; i++)
    {
        yout[i] = y[i]+h6*(dydx[i]+dym[i]+2.0*dym[i]);
    }

```

```

delete[] yt;
delete[] dyt;
delete[] dym;
}

void CIgnicionDoc::derivs(float t, float *T, float *dT)
{
    float Tp = *T;

    *dT = 6/dp/denC*(gc*Tp + Qc*gc/Cpc - hpro*(Tp-Tb)/Cpc -
        sigma*epsr*(pow(Tp,4)-pow(Tb,4))/Cpc);
}

```

