



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Mecánica

**“Modelo predictivo del proceso de combustión
de la cascarilla de arroz”**

Proyecto de Grado

**Previo a la obtención del Título de:
INGENIERO MECANICO**

Presentado por:

Xavier Fernández Díaz Chang

Año Lectivo 1990 - 1991

Guayaquil

Ecuador

AGRADECIMIENTO

Al Dr. Alfredo Barriga, Director del Proyecto de Grado, por su ayuda y supervisión para la realización de este trabajo.

A los Ing. Jorge Duque y Mario Patino por su colaboración.

Al personal del Centro de Investigación Científica y Tecnológica, por las facilidades brindadas.

DEDICATORIA

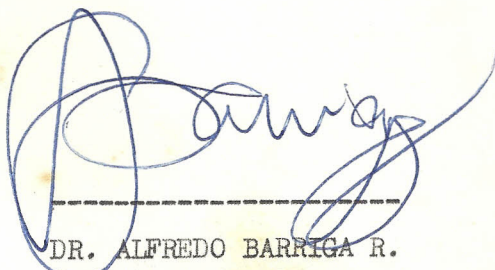
A mis padres, en cuya fe y
sacrificio estuvo mi motivación.

A mis hermanos.

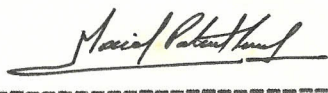
A la memoria de mi abuelo.



ING. NELSON CEVALLOS B.
DECANO DE LA FACULTAD
DE INGENIERIA MECANICA



DR. ALFREDO BARRIGA R.
DIRECTOR DE PROYECTO



ING. MARIO PATIÑO A.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



ING. FRANCISCO SANTELLI P.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrina
expuestos en este Proyecto de Grado, me corresponde
exclusivamente; y, el patrimonio intelectual del mismo a la
ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Tópico de Graduación).

XAVIER DIAZ CHANG

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla un modelo físico-matemático aplicado a la combustión de la cascarilla de arroz en lecho fijo, para simular su comportamiento, incluyendo su respectivo método de solución para las ecuaciones planteadas.

En el modelaje, fundamentalmente se consideran los procesos de transferencia de calor, transferencia de masa y procesos químicos que se dan simultáneamente durante la combustión, así como también las propiedades y características del combustible.

En consecuencia, el resultado de esta serie de aspectos teóricos, es la elaboración de un programa capaz de predecir el comportamiento de dicho proceso.

Cabe indicar que por la complejidad del modelaje es necesario considerar limitaciones, las cuales simplifican el planteamiento técnico del problema y conducen a resultados satisfactorios para su posterior comparación con resultados obtenidos en forma experimental y establecer conclusiones y recomendaciones.

I N D I C E G E N E R A L

PAGS.

RESUMEN.....	VI
INDICE GENERAL.....	VII
INDICE DE FIGURAS.....	X
INDICE DE TABLAS.....	XI
NOMENCLATURA.....	XII
INTRODUCCION.....	XV

CAPITULO I

1.1 OBJETIVOS.....	17
1.2 JUSTIFICACION.....	17
1.3 ALCANCE.....	18

CAPITULO II

PROPIEDADES Y CARACTERISTICAS DE LA CASCARILLA

2.1 ANALISIS APROXIMADO.....	21
2.2 ANALISIS ULTIMO.....	24
2.3 CARACTERISTICAS FISICAS.....	24

CAPÍTULO III

FACTIBILIDAD DEL USO DE LA CASCAJILLA Y SU APROVECHAMIENTO
ENERGETICO

3.1 PRODUCCION ANUAL DE ARROZ Y DISPONIBILIDAD POTENCIAL DE LA CASCAJILLA.....	27
3.2 PROCESO DE COMPUSTION	28

CAPÍTULO IV

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MODELO

4.1 DESCRIPCION TECNICA DEL PROBLEMA.....	32
4.2 PROCESOS INVOLUCRADOS	35
4.3 METODO DE SOLUCION	39

CAPÍTULO V

DESARROLLO DEL MODELO

5.1 CONSIDERACIONES REALIZADAS.....	46
5.2 LIMITACIONES.....	53
5.3 SECUENCIA DEL PROGRAMA.....	55

CAPÍTULO VI

6.1 PROGRAMA.....	59
-------------------	----

6.2 PRUEBAS Y RESULTADOS.....	
-------------------------------	--

CAPITULO VII

ANALISIS DE RESULTADOS.....	
-----------------------------	--

CONCLUSIONES.....	
-------------------	--

RECOMENDACIONES.....	
----------------------	--

BIBLIOGRAFIA.....	
-------------------	--

I N D I C E D E F I G U R A S

No.	PAGS.
4.1 HORNO - SECADOR EXPERIMENTAL.....	33
4.2 MODELO DE LA CAMADA COMPLETA.....	34
4.3 ESQUEMA DEL MODELO EN LA CAMADA CON LOS PROCESOS FISICOS INVOLUCRADOS.....	36
4.4 ETAPAS DE DIFUSION.....	37
4.5 REPRESENTACION DE LAS ETAPAS DE COMBUSTION.....	39
4.6 ESQUEMA DEL MODELO EN EL AIRE CON LOS PROCESOS FISICOS INVOLUCRADOS.....	44
5.1 ESQUEMA CON LAS DIMENSIONES CALCULADAS.....	48
5.2 REGIONES CONSIDERADAS EN EL MODELAJE.....	50
6.1 DIAGRAMA DE FLUJO.....	60

INDICE DE TABLAS

TABLA No.	PAGS.
I ANALISIS APROXIMADO DE LA CASCARILLA.....	23
II ANALISIS ULTIMO DE LA CASCARILLA.....	24
III DENSIDADES DE LA CASCARILLA.....	26
IV PRODUCCION ANUAL DE CASCARILLA.....	28

N O M E N C L A T U R A

A	Constante de Arrhenius
a	Fracción de Energía Liberada
A_f	Area de Flujo
A_n	Area Lateral Total de un Nodo
A_t	Area de Transferencia de Calor
b	Ancho del Canal
Bi	Número de Biot para la Cascarilla
Bia	Número de Biot para el aire
C_{pc}	Calor Específico de la Cascarilla
C_{pa}	Calor Específico del Aire
D_n	Diámetro Hidráulico
ρ_c	Densidad de la Cascarilla
ρ_a	Densidad del Aire
E	Energía de Activación
ϵ	Porosidad
ϕ	Factor de Forma
$ Fo$	Número de Fourier para la Cascarilla
Foa	Número de Fourier para el Aire
h_c	Coefficiente de Convección
h_r	Coefficiente de Radiación
Go	Rapidez de Flujo de Masa

ΔO_x	Gradiente de Concentración de Oxígeno
K	Conductividad Térmica Combinada
K_c	Conductividad Térmica de Cenizas
K_a	Conductividad Térmica del Aire
K_D	Rapidez de Difusión del O_2
K_s	Rapidez de Reacción de la Cascarilla
K_T	Rapidez de Reacción Total
L	Longitud de la Camada
m_a	Flujo Másico de Aire
$m_{a/c}$	Relación Aire-Combustible para la Cascarilla
m_{CO_2}	Masa de Dióxido de Carbono
m_d	Masa Disponible
m_q	Masa Quemada
N_c	Número de Canales
N_s	Número de Subvolúmenes
ν	Viscosidad Cinemática del Aire
P	Profundidad de la Camada
Pr	Número de Prandtl
Q_{cd}	Calor por Conducción
Q_{cv}	Calor por Convección
Q_g	Calor Generado
Q_r	Calor por Radiación
q	Calor de Reacción en los Nodos Laterales
R	Constante Universal de los Gases
Re	Número de Reynolds
Sc	Número de Schmidt
T_o	Temperatura Nodal

XIV

Δt	Intervalo de tiempo
T_1, T_2, T_3	Temperaturas Adyacentes a un Nodo
T	Temperatura del Aire
V	Velocidad del Aire
W	Espesor de la Camada
Δx	Espacio entre Nodos

I N T R O D U C C I O N

La elaboración del modelo predictivo se basa principalmente en lo siguiente:

- Condiciones Geométricas
- Condiciones Energéticas de Operación
- Propiedades de la Cascarilla

Las condiciones geométricas están definidas por las dimensiones de la camada (largo, ancho y espesor) formada en las pruebas experimentales del horno-secador.

Las condiciones energéticas de operación analiza tanto los procesos inherentes a la combustión como los efectos producidos por las posibles variaciones en el medio (paredes interiores de la cámara de combustión) y en el aire, sobre el comportamiento del proceso global.

Las propiedades de la cascarilla se han determinado por medio de muestras analizadas en los laboratorios de la ESPOL.

Con esta información es posible modelar físicamente el proceso de combustión de la cascarilla en lecho fijo a fin

de dar una secuencia lógica y definida de los fenómenos que ocurren, tomando en forma simultánea la fase sólida (Cascarilla) y la fase gaseosa (Aire) de manera bidimensional con el respectivo método de solución numérico.

Los resultados obtenidos para diferentes condiciones de operación constituyen los perfiles de temperatura tanto para la cascarilla como para el aire, siendo mostrados a través de esquemas y de gráficos, los cuales son reportados para sus análisis respectivos.

CAPITULO I

1.1 OBJETIVOS.

Los objetivos del trabajo desarrollado son:

- Analizar teóricamente los fenómenos que ocurren durante el proceso de combustión de la cascarilla de arroz en lecho fijo, considerando las limitaciones realizadas y su justificación, estableciendo además los parámetros más influyentes en el comportamiento del proceso.
- En base al análisis anterior, elaborar un modelo predictivo para la simulación de la combustión de la cascarilla.
- Obtención de resultados para diferentes condiciones de operación y establecer comparaciones entre los resultados predictivos y los resultados experimentales para su interpretación.

1.2 JUSTIFICACION.

Mediante la operación del Horno-Secador experimental construido en la Espol y que utilizó como combustible cascarilla de arroz, se desarrollaron proyectos co

resultados satisfactorios pero con inconvenientes imprevistos durante su operación como danos en el interior de la cámara de combustión y en la parrilla debido a las altas temperaturas generadas, elevadas perdidas termicas, etc., los cuales fueron reportados para su consideración en futuros disenos.

Trabajos de tipo predictivo, como el presente, contribuyen a evaluar con más detenimiento los efectos de la combustión y preveer posteriores inconvenientes, permitiendo una selección más adecuada de los materiales empleados en la construcción de equipos, mejorar disenos, etc.

Además, el análisis presentado puede aplicarse al estudio de otros combustibles biomásicos, inferir información de tipo empírica por comparación con trabajos experimentales o extenderse a estudios complementarios como por ejemplo gasificación.

1.3 ALCANCE.

- Plantear y describir de manera sencilla los fenómenos y los fundamentos que rigen el proceso.
- Puntualizar las limitaciones que por motivo de complejidad se realicen en el desarrollo del modelo.
- Elaborar un Programa de Computadora que simule el comportamiento de la combustión de acuerdo al modelo

predictivo definido.

- Recomendar la continuación del presente trabajo para el desarrollo de modelos más elaborados.

CAPITULO II

PROPIEDADES Y CARACTERISTICAS DE LA CASCARILLA

Para la elaboración del modelo físico-matemático, necesario determinar las propiedades y características de este residuo biomásico, las cuales influyen directamente en la combustión.

2.1 ANALISIS APROXIMADO.

Por el análisis aproximado o inmediato obtenemos la siguiente información:

- Contenido de Humedad.
- Porcentaje de Cenizas.
- Porcentaje de Materias Volátiles.
- Porcentaje de Carbón Fijo.
- Poder Calorífico.

- CONTENIDO DE HUMEDAD.

El contenido de humedad de la cascarilla de arroz puede ser un combustible biomásico y debido a su espesor y tamaño, la adquiere de acuerdo a la humedad relativa de

ambiente.

La presencia de humedad no es deseable por cuanto su presencia tiene un doble efecto negativo:

- Disminuye el poder calorífico.
- Reduce la cantidad de combustible efectivo.

- PORCENTAJE DE CENIZAS.

Corresponde a los residuos minerales que se obtienen luego de la combustión y que en su mayoría está constituido por sílice.

Tiene un valor aproximado entre 16% - 17% del peso total de la muestra.

- PORCENTAJE DE MATERIAS VOLATILES.

Es la cantidad de masa que desaloja la muestra cuando se somete a una elevación de temperatura comprendida entre 200° - 400° C, para posteriormente combustionarse a temperatura más altas (400° - 600° C).

La masa perdida está formada principalmente por vapor de agua, hidrocarburos condensables, gases no condensables, etc., que constituyen el 60% - 62% del peso de la muestra.

- PORCENTAJÉ DE CARBON FIJO

Es la cantidad de masa efectiva que puede ser quemada como combustible despues que ha ocurrido la salida de los volátiles.

Para el caso de la cascarilla el porcentaje de carbón fijo se estima entre 20% - 21% del peso de la muestra.

TABLA I
ANALISIS APROXIMADO DE LA CASCARILLA

	Material Volátil (%)	Ceniza (%)	Carbón Fijo (%)
Cascarilla de Arroz	60,2-62,1	16,9-17,2	20,7-21,8

- PODER CALORIFICO

Tambien denominado Valor Calorifico, constituye la cantidad de calor que se desprende al combustionarse completamente una cantidad de masa unitaria de combustible.

El valor determinado fue de: 6105 BTU/Lbm o 3391,45 Cal/gr., para el poder calorífico superior.

2.2 ANALISIS ULTIMO

Por el análisis último es posible determinar los porcentajes de los elementos químicos que forman el combustible.

Los resultados del análisis último se encuentran en la tabla siguiente.

TABLA II

ANALISIS ULTIMO DE LA CASCARILLA DE ARROZ

Elementos	Fracción de Masa en base seca (%)
Carbono (C)	41.44
Oxígeno (O)	37.32
Silicio (Si)	14.66
Hidrógeno (H)	4.94
Potasio (K)	0.59
Nitrógeno (N)	0.57
Azufre (S)	0.30
Fósforo (P)	0.07
Cálcio (Ca)	0.06
Sodio (Na)	0.035
Hierro (Fe)	0.006
Magnesio (Mg)	0.003
Zinc (Zn)	0.006

Además de las propiedades mencionadas y que fueron obtenidas por los análisis anotados, existen otras propiedades y características que deben ser enunciadas para la elaboración del procedimiento a seguir en el desarrollo del modelo.

- DENSIDAD

Para el caso de la cascarilla de arroz existen tres tipos de densidades, dependiendo del análisis que se realice a una misma muestra, de esa manera tenemos:

- DENSIDAD A GRANEL

Es el valor que se tiene si se relaciona una cantidad de masa con un volumen determinado, el cual incluye la cascarilla, el espacio comprendido entre ellas y los poros internos y externos de la misma.

- DENSIDAD APARENTE

Se obtiene si el volumen antes mencionados se le restan los espacios libres presentes en la camada.

- DENSIDAD VERDADERA

Es la cantidad que resulta si el volumen anterior le extraemos los poros internos y externos en la cascarilla de arroz.

DENSIDAD DE LA CASCARILLA DE ARROZ

	(gr/cm ³)
Densidad Verdadera	1.42
Densidad Aparente	0.65
Densidad a Granel	0.10

- POROSIDAD

Los combustibles biomásicos son medios porosos constituidos por:

- El combustible propiamente dicho o sea la fase sólida.
- El aire contenido en sus poros interiores y en los espacios intergranulares que se forman en el lecho.

Esta cantidad de aire se conoce como porosidad (ϵ) y se considera del orden del 30% - 40% de la masa total o volumen total del lecho.

CAPITULO III

FACTIBILIDAD DEL USO DE LA CASCARILLA Y SU APROVECHAMIENTO ENERGETICO.

3.1 PRODUCCION ANUAL DE ARROZ Y DISPONIBILIDAD POTENCIAL DE LA CASCARILLA.

Al realizar un estudio de factibilidad de utilización de la cascarilla como combustible debe evaluarse su capacidad de aprovechamiento energetico y analizarse algunos aspectos, como:

- Producción anual de arroz.
- Calendario de disponibilidad o periodicidad.
- Facilidad de recolección y almacenamiento.
- Areas de producción.
- Transporte, etc.

El arroz en cáscara al ser pilado se obtiene:

Arroz entero.....	60%
Polvillo.....	8%
Cascarilla.....	25%
Arrocillo.....	4.13%
Perdidas.....	2.80% (Transp. y Manipuleo)

En la tabla siguiente se indica la producción anual de arroz y de cascarilla desde 1986 hasta 1989.

TABLA IV

PRODUCCION ANUAL DE CASCARILLA DE ARROZ		
AÑO	PRODUCCION ANUAL DE ARROZ (T.M.)	PRODUCCION ANUAL DE CASCARILLA (T.M.)
1986	567.059,82	141.767,46
1987	455.388,75	113.847,18
1988	445.623,40	111.405,85
1989	505.971,89	126.492,98

- DISPONIBILIDAD ENERGETICA

Como la cascarilla se estima en un 25% del arroz en cáscara que se procesa, entonces la producción nacional de cascarilla para el año 1989 fue de 126.492,98 T.M. (según la tabla IV), que de aprovecharse completamente por combustión directa generaría una cantidad de energía disponible de $1,70 \times 10^{12}$ BTU ($4,98 \times 10^9$ Kw-hr), dando lugar a un ahorro de 310.032 barriles de petróleo equivalente a ese valor energético.

- PROCESO DE COMBUSTION

El proceso de oxidación de la cascarilla ocasiona una

descomposición físico-química de la misma, la cual se realiza en tres etapas que ocurren simultáneamente y en su orden respectivo son: desecación, pirólisis y combustión propiamente dicha.

La desecación o extracción de la humedad, consiste en la eliminación del agua contenida en la cascarilla, la misma que ha sido absorbida del ambiente y no constituye aquella que se forma durante la combustión.

La pirólisis es la fase en que se produce la descomposición química interna de la cascarilla cuando se alcanza temperaturas entre 250°C y 500°C , produciéndose la emanación del material volátil formado principalmente por alquitranes, acetona, metano, monóxido de carbono, agua y pequeñas porciones ácidas.

La fase final es la combustión tanto del material volátil como de la cascarilla y tiene lugar cuando la pirólisis ocurre bajo la acción de una atmósfera oxidante a temperaturas superiores a los 500°C . Durante esta etapa se dan algunas reacciones de combustión intermedias, pero se considera sólo la reacción final en la cual tanto el carbono como el hidrógeno se combinan rápidamente con el oxígeno en forma completa, generándose dióxido de carbono, agua y calor (reacción exotérmica).

Parte de la energía liberada por la reacción se transmite hacia zonas de cascarilla más frescas provocando los procesos o etapas antes mencionadas.

- COMBUSTION ESTEQUIOMETRICA

Cuando la combustión de la cascarilla se realiza empleando la mínima cantidad de aire capaz de oxidar completamente el combustible (carbono), entonces se tiene combustión estequiométrica, generándose solamente dióxido de carbono.

Si la cantidad de aire es insuficiente entonces la combustión es incompleta y los gases contienen compuestos parcialmente quemados como monóxido de carbono y restos de combustible sin quemar como hidrógeno, partículas de carbón, etc., y además se produce una menor cantidad de energía liberada.

En la práctica debido a la disposición de los granos de cascarilla en la camada no se produce combustión estequiométrica, por lo que es necesario suministrar aire adicional, denominada exceso de aire y sirve para asegurar una combustión completa y a la vez disminuir la temperatura de los gases generados.

El exceso de aire se determina por medio de la relación aire-combustible estequiométrico, cuyo valor para la

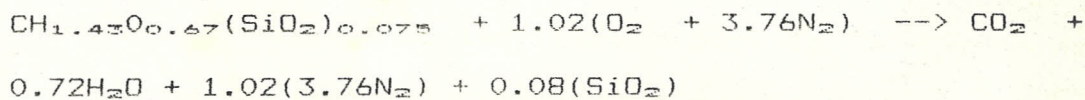
cascarilla es:

$$m_{a/c} = 4.83 \text{ Kg aire / Kg comb.}$$

Del análisis gravimétrico para la cascarilla en base seca se obtiene la fórmula química de la misma:



Donde la ecuación para la combustión es:



CAPITULO IV

FUNDAMENTOS TEORICOS DEL MODELO

4.1 DESCRIPCION TECNICA DEL PROBLEMA

El modelo predictivo para la combustión de la cascarilla se hará considerando las condiciones de operación del horno-secador en el cual se efectuaron las pruebas experimentales. (Fig. 4.1)

El proceso de combustión es dependiente del tiempo en el cual se desarrolla, por lo tanto para su estudio debe aplicarse un análisis transciente, aunque el medio que lo rodea, como las paredes del horno, se considera en regimen estable.

El combustible fresco (cascarilla) se deposita sobre la parrilla (Fig. 4.2) adoptando la camada las dimensiones de la misma mientras que las paredes interiores se encuentran a mayor temperatura (300°C - 800°C), produciendo el calentamiento del combustible ingresado y del aire que atraviesa el lecho.

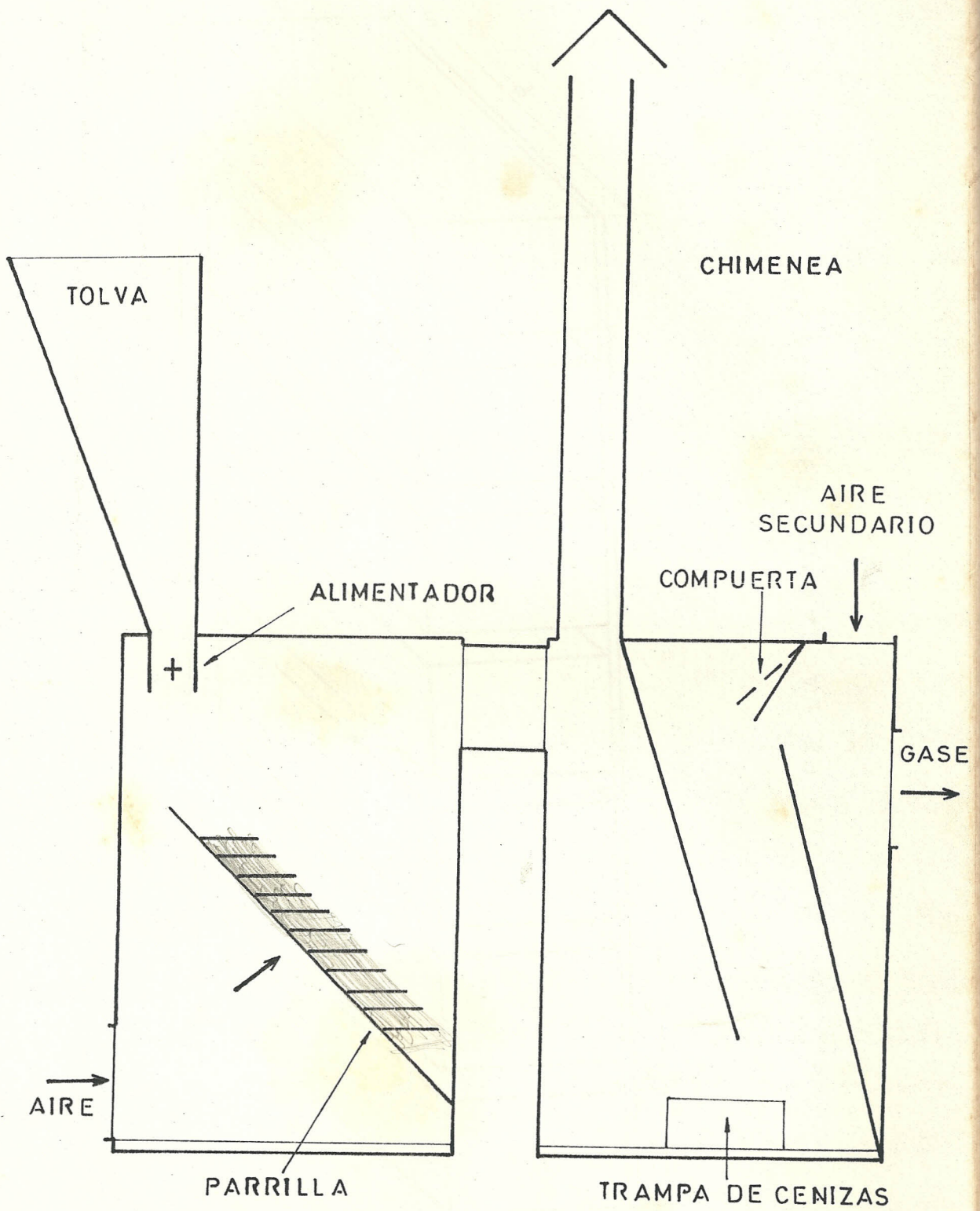


Fig. 4.1 HORNO - SECADOR EXPERIMENTAL

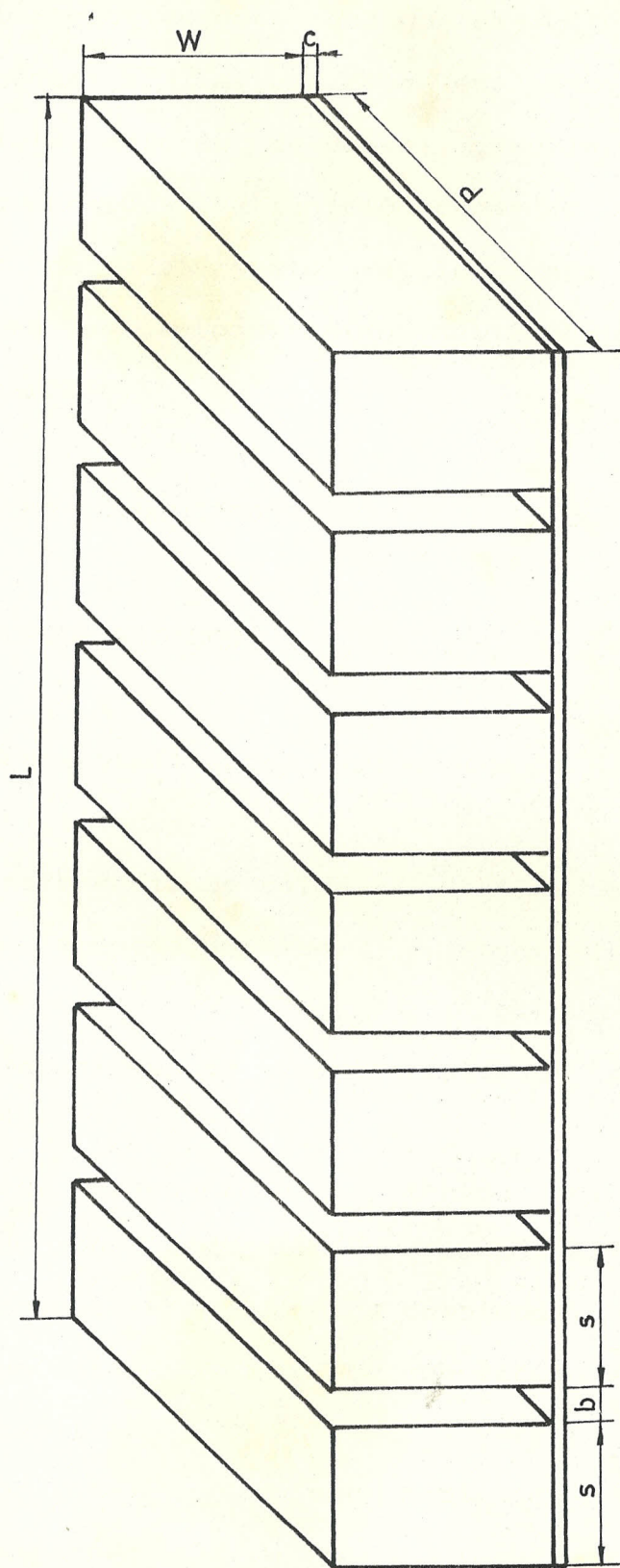


Fig. 4.2 MODELO DE LA CAMADA COMPLETA

El proceso arranca cuando el nivel de la camada adyacente a la parrilla es excitado externamente (soplete, adición de diesel, gasolina), hasta alcanzar la temperatura de ignición capaz de generar suficiente calor hacia el resto de la camada y lograr que el proceso sea autosostenido hasta el consumo total del combustible.

4.2 PROCESOS INVOLUCRADOS

- PROCESOS FISICOS

Los procesos físicos involucrados en la combustión de la cascarilla son:

- Transferencia de calor.
- Transferencia de masa.

Los mecanismos de transferencia de calor considerados son:

- Calor transportado a través del combustible por conducción-radiación, que se cuantifica por medio de la conductividad térmica combinada.
- Calor intercambiado por convección entre el gas y la cascarilla.
- Calor intercambiado por radiación entre la cascarilla y la pared.
- Fracción del calor generado por la combustión que es transmitida a través de la cascarilla y se distribuye

en los diferentes niveles (fig. 4.3) y la fracción residual transmitida al aire.

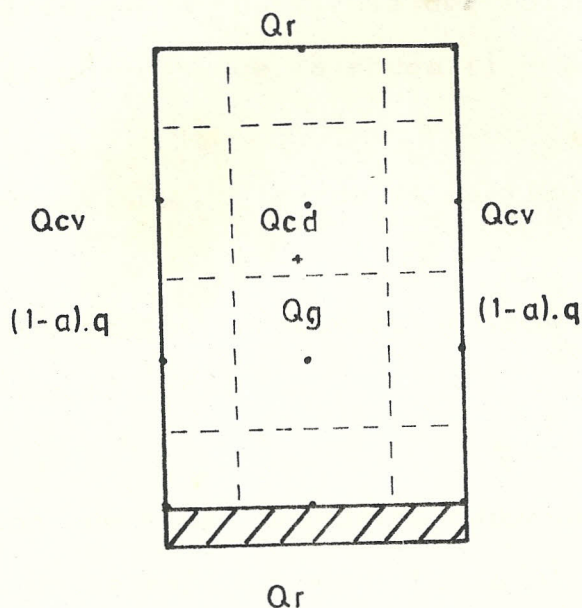
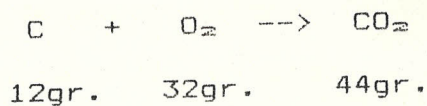


Fig. 4.3 ESQUEMA DEL MODELO UTILIZADO EN LA CAMADA CON LOS PROCESOS FISICOS INVOLUCRADOS

En la combustión completa sólo se genera dióxido de carbono, que se determina por la ecuación:



donde:

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = \dot{m}_{\text{CO}_2} / t \implies m_{\text{CO}_2} \text{ generada en cada nodo / intervalo de tiempo}$$

El mecanismo de difusión establece el comportamiento de la transferencia de masa en las reacciones.

En forma general la difusión se realiza en algunas etapas y son:

- Difusión del reactante gaseoso (O_2) hasta la superficie de la partícula del sólido a través de la película gaseosa que la rodea. (1 - 2).
- Difusión del O_2 dentro de la partícula. (2 - 3).
- Difusión de los productos gaseosos a través de la partícula. (3 - 4).
- Difusión de los productos gaseosos de reacción a través de la capa gaseosa hacia el seno del fluido. (4 - 5).

En las reacciones heterogéneas, o sea combustión de un reactante sólido en presencia de otro gaseoso, se considera que las etapas de difusión están en serie y predomina la de menor valor, es decir la que presenta mayor resistencia a la reacción.

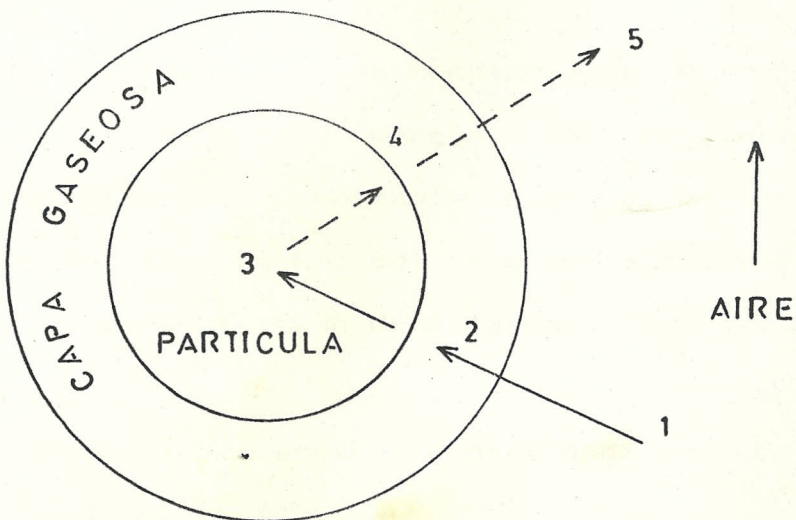


Fig. 4.4 ETAPAS DE DIFUSION

- PROCESOS QUIMICOS

El proceso de combustión es un conjunto de reacciones químicas de tipo exotérmicas o sea con liberación de calor, y puede considerarse que se realiza en dos etapas:

1^{era} La rapidez de difusión del oxígeno hacia la superficie de la partícula y poros para que la reacción ocurra, y se la cuantifica a través de la expresión:

$$K_D = \ln(1 + \Delta O_x / 2.67) * 1.82 * G_o * (Re)^{-0.51} * (Sc)^{-0.66}$$

2^{da} La reactividad del combustible que es altamente dependiente de la temperatura y está dada por la siguiente expresión exponencial, denominada Ley de Arrhenius:

$$K_S = (\Delta O_x) * A * e^{(-E/R*T)}$$

donde A (gr/cm²-seg), es la constante de Arrhenius, E (Cal/gr-mol), es la energía de activación, R (Cal/gr-mol-°K), es la constante universal de los gases, T (°K) es la temperatura del combustible y ΔO_x es el gradiente de concentración de oxígeno.

La masa consumida de cascarilla está dada por:

$$mq = K_T * A_n * \Delta t$$

donde:

K_T = Rapidez de reacción química total. ($\text{gr}/\text{cm}^2\text{-seg}$)

A_n = Area lateral total del nodo que está reaccionando.
(cm^2)

Δt = tiempo de combustión del nodo correspondiente.
(seg)

Se ha demostrado experimentalmente en proyectos de combustión que $K_D \ll K_S$, lo cual indica que el proceso es de difusión controlada.

Considerando ambos efectos, obtenemos la rapidez total de reacción (K_T).

$$K_T = 1/[(1/K_D) + (1/K_S)]$$

donde K_T ($\text{gr}/\text{cm}^2\text{-seg}$).

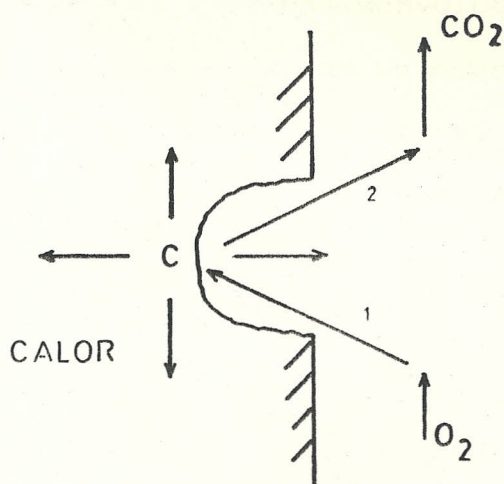


Fig. 4.5 REPRESENTACION DE LAS ETAPAS DE COMBUSTION.

4.3 METODO DE SOLUCION

Una vez descrito técnicamente el problema (Sección 4.1)

y analizados los procesos involucrados (Sección 4.2), debemos escoger el método más adecuado que nos permita alcanzar los objetivos propuestos.

Tanto para la fase sólida (cascarilla) como para la fase gaseosa (aire), aplicaremos el método explícito.

- METODO EXPLICITO

- Fase Sólida

La sección de la camada analizada es discretizada subdividiéndola primero en un cierto número de niveles tanto horizontal como verticalmente formando una red cuadrangular ($X = Y$) con subvolúmenes y en el centro de cada uno de ellos se sitúa un nodo ficticio (Fig. 4.3), donde las propiedades y temperaturas evaluadas en esos puntos se asume son representativas del subvolumen respectivo.

Se plantea la ecuación general:

$$Q_{entra} - Q_{sale} = Q_{almacenado \text{ en el tiempo}}$$

Para cada uno de ellos, donde los términos de la ecuación general varían de acuerdo a la posición del nodo y a los procesos que ocurran en ellos.

De esta manera se obtienen las ecuaciones explícitas

para cada nodo donde la única incógnita es la temperatura futura del mismo, y en las cuales debe cumplirse un criterio de estabilidad, de lo contrario las soluciones obtenidas correspondientes a las temperaturas serán inestables.

La aplicación correcta del método depende de la selección adecuada de los valores de Fourier y Biot.

$$Fo = (K * \Delta t) / [C_{pe} * \rho_c * (\Delta X)^2]$$

$$Bi = (h_c * \Delta X) / K$$

Donde:

K = Conductividad termica combinada del combustible.
(BTU/hr-p²-°F)

Δt = Intervalo de tiempo seleccionado. (seg)

C_{pe} = Calor específico del combustible. (BTU/lbm-°F)

ρ_c = Densidad del combustible. (Lbm/p³)

ΔX = Espacio entre nodos. (pie)

h_c = Coeficiente de convección. (BTU/hr-p²-°F)

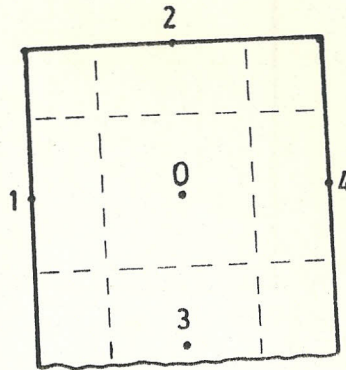
Las ecuaciones para cada nodo con su respectiva condición de estabilidad son las siguientes, donde:

a = Fracción de energía liberada.

q = $K_T * PC * \Delta X / K$ = Calor de reacción.

T_o = Temperatura de la cascarilla.

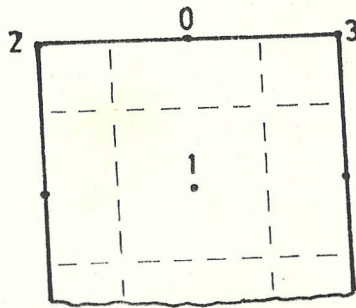
- NODO INTERIOR



$$T_0(t + \Delta t) = Fo * (T_1^t + T_2^t + T_3^t + T_4^t + [(A_n/A_t) * q * \Delta x] / K) + T_0^t * [1 - 4 * Fo]$$

- Condición de estabilidad: $1/4 \geq Fo$

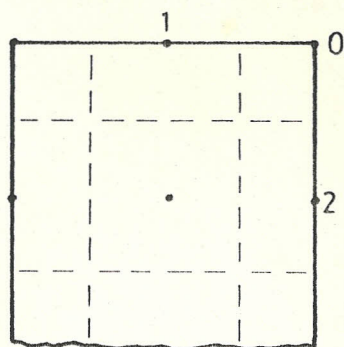
- NODO INTERMEDIO SUPERIOR E INFERIOR



$$T_0(t + \Delta t) = 2 * Fo * (T_1^t + T_2^t / 2 + T_3^t / 2 + Bi * T_\infty + [a * (A_n/A_t) * q * \Delta x] / K) + T_0^t * [1 - 4 * Fo - 2 * Bi * Fo]$$

- Condición de estabilidad: $1/2 \geq Fo * (2 + Bi)$

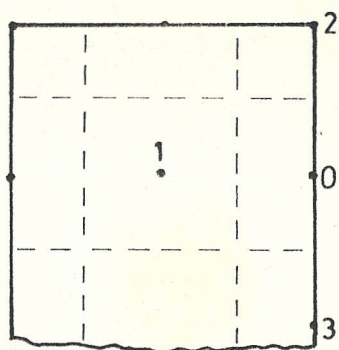
- NODO ESQUÍNERO SUPERIOR E INFERIOR



$$T_o(t + \Delta t) = 2*Fo*[T1^t + T2^t + 2*Bi*T_\infty + a*(A_n/A_t)*q*\Delta X/K] + T_o^t*[1 - 4*Fo - 2*Bi*Fo]$$

- Condición de estabilidad: $1/2 \geq Fo*(2+Bi)$

- NODO LATERAL



$$T_o(t + \Delta t) = 2*Fo*[T1^t + T2^t/2 + T3^t/2 + Bi*T_\infty + a*(A_n/A_t)*q*\Delta X/K] + T_o^t*[1 - 4*Fo - 2*Bi*Fo]$$

- Condición de estabilidad: $1/2 \geq Fo*(2+Bi)$

Donde:

Fo = Número de Fourier

Bi = Número de Biot

T_∞ = Temperatura del aire

A_n = Area lateral total del nodo

A_t = Area de transferencia de calor

- Fase Gaseosa

El canal de paso de flujo de aire idealizado, que se forma entre dos secciones consecutivas es también discretizado en forma horizontal y como existe simetría, analizamos la mitad del canal en sus niveles respectivos.

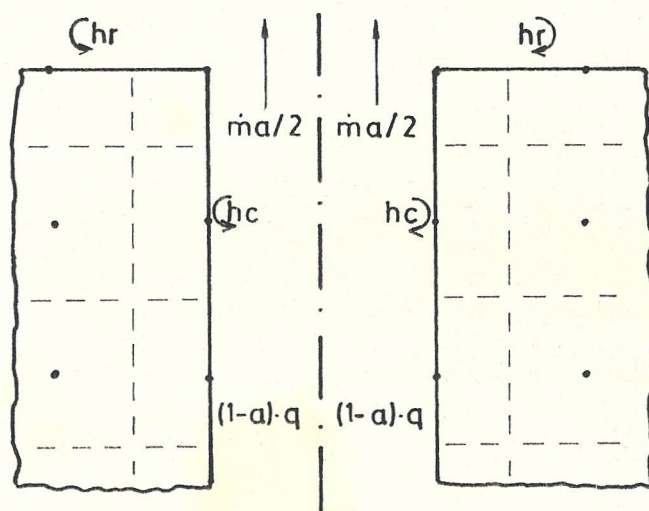


Fig. 4.6 ESQUEMA DEL MODELO EN EL AIRE Y LOS PROCESOS FISICOS INVOLUCRADOS.

Los procesos que ocurren en cada nodo una vez iniciada la combustión se indica en la figura 4.6.

La ecuación aplicada a cada nodo en el aire es:

$$T_o^{(t+\Delta t)} = Foa[(1-a) \cdot K_T \cdot (A_n/A_t) \cdot PC \cdot (\Delta X/K) + Bia \cdot T_c + T1 + T2] + T_o^t \cdot (1 - Bia \cdot Foa - 2 \cdot Foa)$$

- Condición de estabilidad: $1 > Foa*(2 + Bia)$

Donde:

Foa : Número de Fourier para el aire.

Bia : Número de Biot para el aire.

$$Foa = K_a * \Delta t / [C_{pa} * \rho_a * (\Delta X)^2]$$

$$Bia = h_c * \Delta X / K_a$$

y:

To : Temperatura del aire.

Tc : Temperatura de la cascarilla.

Para evaluar tanto Foa como Bia, debe utilizarse las propiedades del aire como conductividad termica K_a , densidad ρ_a y calor específico C_{pa} .

La ecuación planteada se aplica considerando las condiciones geométricas y energéticas en cada nodo.

CAPITULO V

DESARROLLO DEL MODELO

1 CONSIDERACIONES REALIZADAS

- CONSIDERACIONES FISICAS

El dimensionamiento del lecho en el cual se basa el modelo predictivo es de acuerdo a las medidas de uno de los escalones de la parrilla utilizada en el horno-secador experimental, y son las siguientes:

Longitud (L) = 30cm

Profundidad (P) = 7cm

Espesor (W) = 4-10cm

Para la simulación de la convección dentro de la camada, asumiremos que el flujo de aire suministrado fluye a través de canales en su interior. (Fig. 4.2).

El dimensionamiento de los canales se lo realizan en función de la porosidad de la cascarilla (ϵ), de valor aproximado entre 30-40%.

Esto significa que existe entre 30-40% del área total de la camada ($P*L$), disponible para el paso del aire, la cual sería:

$$A_{\text{flujos}} = A_r = \epsilon * (P*L)$$

Entonces la diferencia $(1-\epsilon)*(P*L)$, es el área que debe repartirse para formar los subvolúmenes sólidos, cuando escogemos el valor de s , donde el número de subvolúmenes sería:

$$N_s = [(1-\epsilon)*(P*L*W)]/(a*P*W) = [(1-\epsilon)*L]/s$$

El número de canales (N_c) será igual:

$$N_c = N_s - 1$$

El ancho de cada canal (b) será:

$$b = (\epsilon * L)/N_c$$

Por ejemplo, para nuestro caso $(\epsilon) = 0.30$ y siguiendo el procedimiento descrito, obtenemos:

$$A_r = 0.30*(30*7) = 63 \text{ cm}^2$$

$$N_s = [(1-0.30)*30]/1 = 21 \text{ subvolúmenes}$$

$$N_c = 21 - 1 = 20 \text{ canales}$$

$$b = (0.3*30)/20 = 0.45 \text{ cm}$$

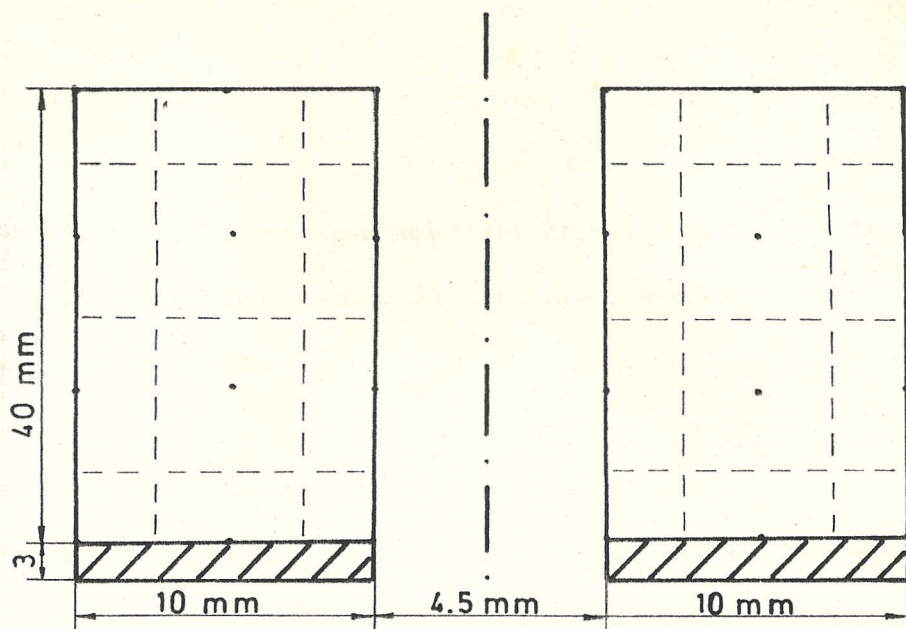


Fig. 5.1 ESQUEMA CON LAS DIMENSIONES CALCULADAS.

- CONSIDERACIONES ENERGETICAS

El cálculo del coeficiente convectivo (h_c) dentro del lecho, depende también del dimensionamiento establecido, por lo tanto su evaluación debe realizarse siguiendo la secuencia que se da a continuación:

1^{er} Flujo de aire en cada canal

$$\dot{m}_{\text{canal}} = \dot{m}_{\text{total}} / N_c$$

2^{do} Area de flujo en cada canal

$$A_{rc} = b * P$$

3^{er} Diámetro hidráulico

$$D_h = 4 * (\text{Area trans.} / \text{Perímetro húmedo}) ==>$$

$$D_h = 2 * (b * P) / (b + P)$$

4^{to} Número de Reynolds

$$Re = (V * D_h) / \nu ==> V = \dot{m}_{\text{total}} / (N_c * \rho * b * P)$$

Entonces aplicamos la ecuación para $Re \leq 250$:

$$h_c = 0.91 * (Re)^{-0.51} * C_p * \rho * (\sum \dot{m} * V) * (Pr)^{-0.66}$$

Como la cascarilla está constituida en un 20% por carbón, y debido a la escasa información técnica es necesario utilizar parámetros analizados en trabajos experimentales aplicados al carbón como la conductividad térmica combinada.

Estos parámetros se encuentran evaluados en tablas o gráficos y son función principalmente de su temperatura, obteniendo resultados muy satisfactorios considerando que el comportamiento energético de los combustibles biomásicos es similar.

Otros parámetros se encuentran evaluados a una temperatura promedio como es el caso de la densidad de la cascarilla, calor específico del carbón y la conductividad térmica de las cenizas.

Para las propiedades del aire existe suficiente información requerida para el desarrollo del modelo.

- PROCESO DE COMBUSTION

La consideración más importante es la de establecer que el proceso es autosostenido y dicho estado se alcanza cuando el sistema es excitado a una temperatura capaz de producir suficiente energía y permitir que la combustión se desarrolle en forma completa, donde el avance del frente de llama ocurre en forma uniforme.

En el modelaje se considera que el medio (combustible) consiste de tres regiones:

- 1.- Región sin combustión: La temperatura no es lo suficientemente elevada como para producir una reacción significativa, consistiendo solamente de cascarilla.
- 2.- Región de combustión: Es donde las reacciones de combustión tiene lugar. Aquí el medio consiste de una mezcla de combustible y ceniza, pero en el análisis se considera que instantáneamente solo hay cascarilla la cual se quema.
- 3.- Región de cenizas: Comprende los residuos cuando todo el combustible ha sido consumido por la reacción.

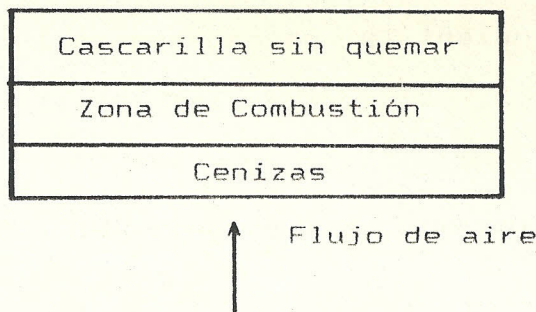


Fig. 5.2 REGIONES CONSIDERADAS EN EL MODELAJE

En la combustión ocurren los procesos de difusión del oxígeno hacia el carbono (K_D) y la rapidez de reacción (K_R), influenciados por la tasa de consumo de O_2 , y se determina la rapidez de reacción total (K_T), la cual controla la liberación de energía y el consumo de masa.

En la etapa de difusión se considera, para los cálculos correspondientes, la de menor valor o sea la difusión $\text{CO}_2 - \text{O}_2$, porque es la que presenta mayor resistencia y por lo tanto controla dicha etapa.

La masa disponible para quemar corresponde solo al carbón, que equivale a un 20% de la masa de cascarilla presente en cada celda de un nodo respectivo como se indicó en la sección 2.1.

Aunque el proceso global es transiente, se asume que las paredes de la cámara de combustión permanecen a temperatura uniforme, es decir, la combustión se desarrolla en condiciones de operación estables, sin embargo en la realidad se produce una pequeña caída de temperatura en las paredes en el instante en que se deposita cascarilla fresca.

De esta manera las condiciones energéticas para el modelo son:

- Nodos Superiores: Conducción - Radiación + Radiación (Pared-Cascarilla) + generación.
- Nodos Intermedios: Conducción - Radiación + generación.
- Nodos Laterales e inferiores: Conducción - Radiación + Convección (Aire-Casc.) + radiación + generación.

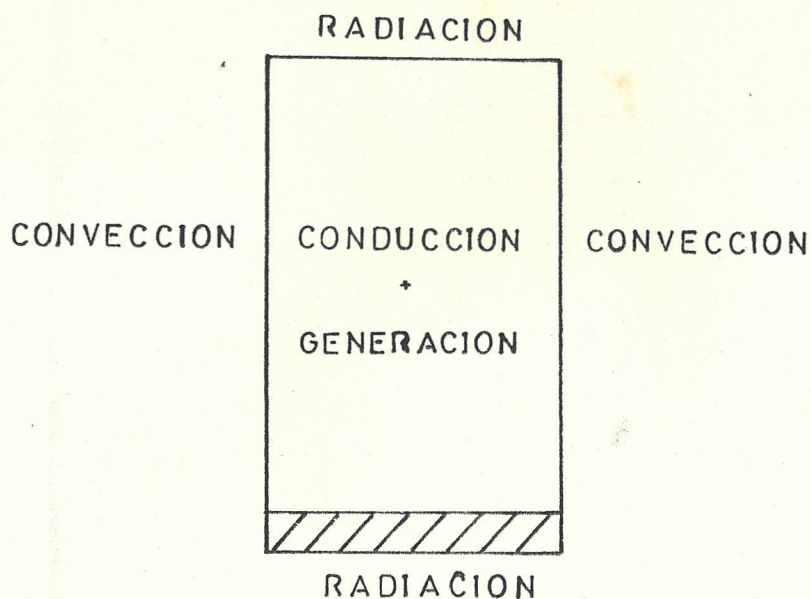


Fig. 5.3 CONDICIONES ENERGETICAS DEL MODELO

Se considera que los procesos de calor dominantes en la cascarilla son la generación por la reacción química, calor almacenado, radiación y conducción.

La radiación ocurre en la zona de combustión debido al levantamiento rápido de la temperatura en dicha zona, fuera de ella la radiación no es significativa y la transmisión de calor a través del lecho es por conducción. Por lo tanto al considerar ambos procesos se utiliza la conductividad térmica combinada.

En el aire, debido a su baja capacidad para almacenar calor, radiación y conducción son despreciables y los procesos dominantes son convección y la fracción de calor de reacción entregada, como se indicó en la sección 4.2.

La caída de presión dentro del lecho es muy pequeña con respecto a la presión atmosférica, debido a que la porosidad del medio ofrece muy poca resistencia al flujo de aire suministrado.

2. LIMITACIONES

La elaboración de modelos matemáticos son una característica esencial de todos los análisis efectuados en ingeniería, pero merecen mucha atención cuando están presentes numerosos procesos constitutivos, como es el caso de la combustión, debiendo extremarse el cuidado en la selección de aquellos procesos que influyan marcadamente en el proceso global y en las limitaciones consideradas con los fundamentos que las justifiquen.

A continuación se puntualizan las limitaciones realizadas en el desarrollo del modelo:

1.- Durante la combustión no se consideran los procesos de desecación, pirólisis y volatilización.

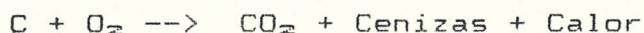
2.- Debe usarse las dimensiones totales de la cámara experimental para modelar el proceso, permitiendo la variación de las condiciones de operación (Flujo de Aire, Temperatura del Aire, Intervalos de tiempo y espacios, características del combustible, etc.), para simular la realización de pruebas y comparar

los resultados predictivos con resultados experimentales.

3^{era} Las dimensiones del modelo no se alteran durante y después del proceso, debido a la estructura misma de la cascarilla la cual sufre poco cambio de volumen al ser quemada porque no se considera volatización.

4^{ta} La combustión de la cascarilla es completa, generándose solamente dióxido de carbono como único producto de oxidación ya que su formación libera mayor cantidad de energía.

5^{ta} La liberación de energía solo se debe a la reacción del combustible, dada por la ecuación siguiente:



6^{ta} Las propiedades de la cascarilla como densidad, conductividad térmica, calor específico, etc., son tomadas a temperatura promedio, sin embargo las propiedades del aire son consideradas en función de las temperaturas del mismo.

7^{ma} Para las cenizas formadas, la conductividad térmica se considera del orden:

$$K_c = 0.02 - 0.04 \text{ BTU/Hr-P-}^\circ\text{F.}$$

8ª Para iniciar la simulación del proceso de la combustión, la temperatura de los nodos inferiores deben asignarse un valor adecuado (llamado temperatura de excitación del sistema = 750°F) y considerar temperatura ambiente en los nodos restantes.

9ª Por el método de cálculo para la distribución de temperatura en la cascarilla y en el aire es necesario cumplir condiciones de estabilidad, lo cual exige seleccionar intervalos de tiempo y espacio entre nodos muy pequeños.

5.3 SECUENCIA DEL PROGRAMA

El programa representa el modelo matemático que reúne todas las consideraciones, limitaciones, fundamentos físicos, químicos y métodos de solución establecidos en las secciones respectivas.

Permite la selección de las dimensiones del modelo, espaciamiento entre nodos, número de nodos, intervalos de tiempo y la variación de parámetros como flujo de aire, distribución inicial de temperatura tanto en la cascarilla como en el aire, etc., muy influyentes en el comportamiento del proceso global.

La secuencia incluye cálculos, interpolaciones de propiedades e iteraciones para los ajustes finales de la distribución de temperaturas tanto en la cascarilla como en el aire para cada intervalo de tiempo, hasta alcanzar el consumo total del combustible contenidas en el modelo.

Los resultados son mostrados en forma de esquemas o gráficos para su posterior análisis e interpretación.

A continuación se detalla su secuencia:

- Ingreso de dimensiones totales de la camada y del modelo.
- Ingreso de propiedades y parámetros energéticos de la cascarilla como poder calorífico, constante de Arrhenius, energía de activación, conductividad térmica, porosidad, temperaturas iniciales, intervalos de tiempo y espacio etc.
- Cálculo del número de nodos, número de bloques y de canales, flujo en cada canal, etc., para definir el modelo a utilizarse.
- Evaluación de propiedades del aire a la temperatura respectiva para luego calcular número de Reynolds, Coeficiente de convección, etc.

- Aplicación de las ecuaciones tanto para la cascarilla como para el aire respectivamente.
- Cálculo de F_o y Bi para aplicación del método explícito tanto en la cascarilla como en el aire.
- Comprobación de las condiciones de estabilidad para cada nodo.
- Evaluación de las temperaturas en cada nodo considerando sus condiciones y la de los nodos adyacentes, empezando por los ubicados sobre la parrilla. De esta manera se obtienen las distribuciones de temperaturas en la cascarilla y en el aire.
- Cálculo del nuevo perfil de temperaturas para el aire, evaluación de sus propiedades y se vuelven a calcular Re , h_c y por lo tanto Bi , el cual es dependiente de la temperatura del aire.
- Iteración hasta que los perfiles de temperatura tanto para la cascarilla como el aire se aproximen a un valor aceptable en dos iteraciones consecutivas.
- Estos valores constituyen los perfiles de temperatura para un determinado intervalo de tiempo.

- La cantidad de masa consumida se calcula con los valores ajustados de temperatura en cada nodo.
- Para el intervalo de tiempo siguiente se repite el procedimiento anterior.
- La masa consumida en cada nodo y en cada tiempo es acumulada y comparada con la masa disponible hasta un valor permisible, a partir del cual el término de generación es cero y la conductividad termica considerada es la de la ceniza.(nodo apagado).
- La secuencia se aplica a cada nodo hasta alcanzar el consumo final del combustible.
- Se procede a la impresión de una serie de parámetros tanto en cada intervalo como al final del proceso global.

Es recomendable seleccionar valores para las dimensiones del modelo de tal forma que el número de subvolúmenes sólidos sean enteros y de igual manera el número de nodos.

La velocidad del aire calculada dentro de la camada , no debe exceder el valor permisible de 1 m/seg, o sea 3.3 pie/seg.

CAPITULO VI

6.1 PROGRAMA

El programa que se presenta a continuación, permite el cálculo de la distribución de temperaturas para el modelo definido en la sección 4.2 (Fig. 4.3 y 4.6), la tasa de consumo de O_2 y de generación de CO_2 .

Se incluye el diagrama de flujo del programa, para su mejor interpretación.

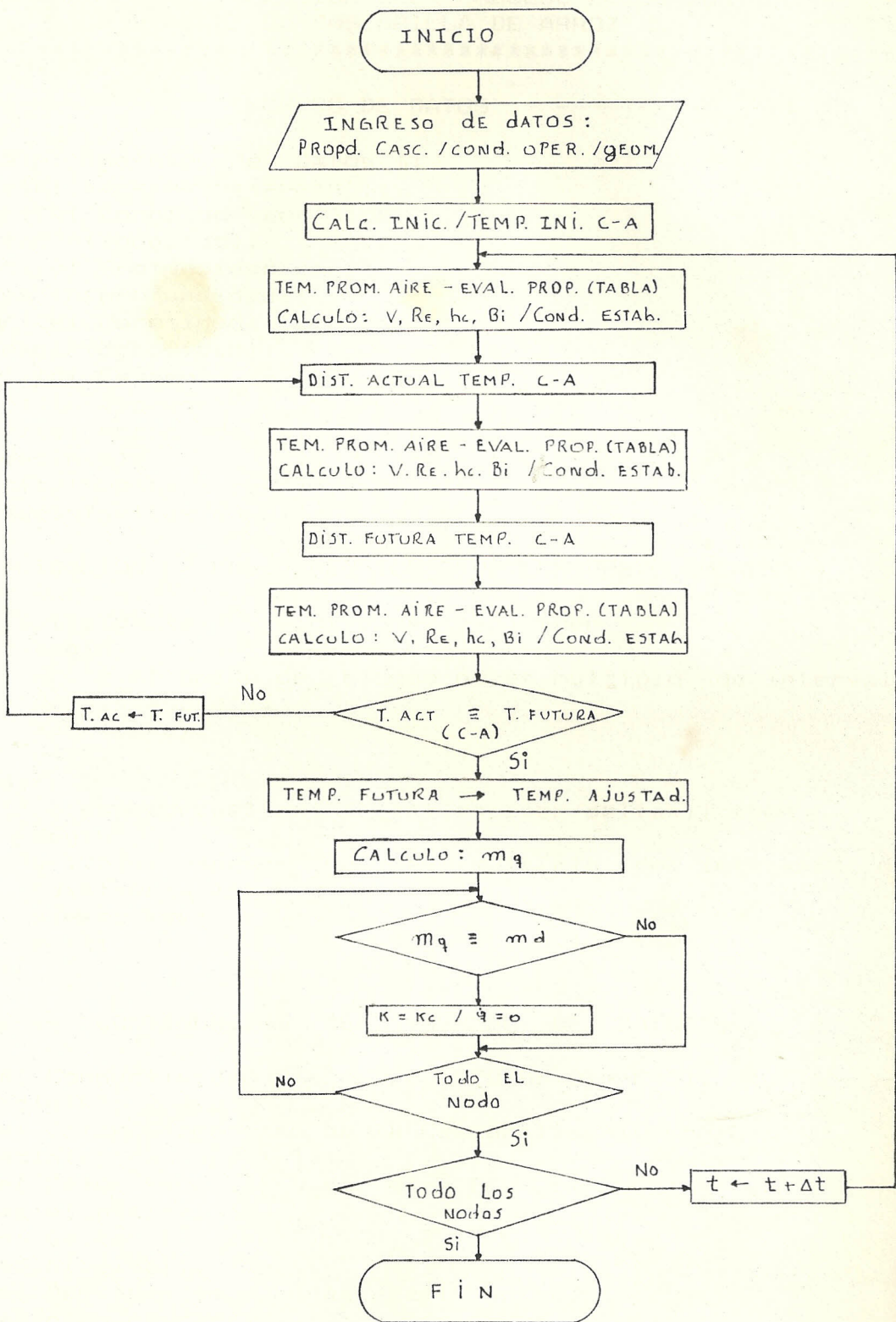


Fig. 6.1 DIAGRAMA DE FLUJO


```

*****
PROGRAMA DE SIMULACION DEL PROCESO DE COMBUSTION
DE LA CASCARILLA DE ARROZ
*****

```

```

----- "INGRESO DE DATOS" -----}

```

```

writeln('Ingreso de Datos');
writeln('=====');
write('Longitud cm=');
readln(longitud);
write('Profundidad cm=');
readln(profundidad);
write('Porosidad =');
readln(porosidad);
write('Espesor cm=');
readln(espesor);
write('Ancho de Bloque cm=');
readln(s);
write('Delta x cm=');
readln(deltax);

```

```

"VALIDACION DE LAS DIMENSIONES DE LOS SUBVOLUMENES" }

```

```

if ((s/deltax) <> int(s/deltax)) then
begin
writeln('ancho de bloque no es multiplo de intervalo
de distancia');
x:=readkey;
exit;
end;
if ((espesor/deltax) <> int(espesor/deltax)) then
begin
writeln('espesor no es multiplo de intervalo de
distancia');
x:=readkey;
exit;
end;

```

```

{----- "CONTINUACION DEL INGRESO DE DATOS" -----}

```

```

write('Conductividad Termica BTU/hr-pie-F=');
readln(k);
write('Calor Especifico de la Cascarilla BTU/Lbm-F=');
readln(cp_cascarilla);
write('Calor Especifico del Aire BTU-Lbm-F=');
readln(cp_aire);
write('Delta t seg=');
readln(deltat);
write('Densidad de la Cascarilla gr/cm3=');
readln(ro_cascarilla);
write('Difusividad pie2/seg=');
readln(dv);

```



```

write('Temperatura Inicial de la cascarilla F=');
readln(tc_ini);
write('Temperatura Inferior Inicial de la cascarilla F=');
readln(tc_inf);
write('Temperatura Inicial del aire F=');
readln(ta_ini);
write('Temperatura Pared F=');
readln(tp);
write('Flujo Masico del Aire Lbm/hr=');
readln(fma);
write('Factor de Forma =');
readln(fi);
write('Constante de Arrhenius gr/cm2-seg=');
readln(a);
write('Energia de Activacion Cal/gr-mol=');
readln(ea);
write('Poder calorifico de la cascarilla BTU/Lbm=');
readln(pc_cascarilla);
write('Constante Universal de los gases Cal/gr-mol-K=');
readln(r);
write('Fraccion de Energia Liberada=');
readln(fel);
write('Diferencia de ajuste entre Temperaturas F=');
readln(epsilon);
write('Constante de Boltzman BTU/hr-pie2-K4=');
readln(sigma);
write('Emisividad Pared =');
readln(ep);
write('Minimo % Masa Quemada =');
readln(epsilonmasa);
write('Relacion Aire Combustible =');
readln(mac);

```

```

{----- "ASIGNACION DE VALORES" -----}

```

```

longitud:    = ;
profundidad: = ;
porosidad:   = ;
espesor:     = ;
s:           = ;
deltax:      = ;

```

```

{ "VALIDACION DE LAS DIMENSIONES DE LOS SUBVOLUMENES" }
if ((s/deltax) <> int(s/deltax)) then
begin
writeln('ancho de bloque no es multiplo de intervalo de
distancia');
x:=readkey;
exit;
end;
if ( (espesor/deltax) <> int(espesor/deltax)) then
begin
writeln('espesor no es multiplo de intervalo de

```

```

        distancia');
x:=readkey;
        exit;
end;

```

```

{--- "CONTINUACION DE LA ASIGNACION DE DATOS" ---}

```

```

k:=;
cp_cascarilla:=;
cp_aire:=;
deltat:=;
ro_cascarilla:=
dv:=;
tc_ini:=;
tc_inf:=;
ta_ini:=;
tp:=;
fma:=;
fi:=;
a:=;
ea:=;
pc_cascarilla:=;
r:=;
fel:=;
epsilon:=;
sigma:=;
ep:=;
epsilonmasa:=;

```

```

{--- "Abre Archivo para guardar Temperaturas Ajustadas" ---}

```

```

assign(datafile,'DATOS');
rewrite(datafile);

```

```

{-- "Valores Calculados que no Cambian en el Programa" --}

```

```

numdivx:=trunc(s/deltax);      { numero divisiones en x }
numdivy:=trunc(espesor/deltax); { numero divisiones en y }
numnodosx:=numdivx+1;         { numero nodos en x }
numnodosy:=numdivy+1;         { numero nodos en y }

```

```

{ ----- "TEMPERATURAS INICIALES" ----- }

```

```

for j:=1 to numnodosy do
  for i:=1 to numnodosx do
    if j=1 then
      tci[i,j]:=tc_inf
    else
      tci[i,j]:=tc_ini;
  for j:=1 to numnodosy do
    tai[j]:=ta_ini;

```



```
{----- "Muestra la Temperatura Inicial" -----}
```

```
    tiempo:=1;
writeln('(Inicial) Tiempo [seg]---> ', tiempo*deltat:8:2);
    for j:=numnodosy downto 1 do
        begin
            for i:=1 to numnodosx do
                write(i:3,j:3,tci[i,j]:8);
                writeln(tai[j]:8);
            end;
        mensaje;
```

```
{----- "MASA DISPONIBLE" -----}
```

```
    volumen:=sqr(deltax)*profundidad;
    for j:=1 to numnodosy do
        for i:=1 to numnodosx do
            if ((i=1) or (i=numnodosx)) and
                ((j=1) or (j=numnodosy)) then
                md[i,j]:=ro_cascarilla*volumen/4
            else
                if (((i<>1) and (i<>numnodosx)) and ((j=1) or
                    (j=numnodosy))) or (((i=1) or (i=numnodosx))
                    and ((j<>1) and (j<>numnodosy))) then
                    md[i,j]:=ro_cascarilla*volumen/2
                else
                    md[i,j]:=ro_cascarilla*volumen;
```

```
{ ----- "INDICADOR MASA QUEMADA" ----- }
```

```
    for j:=1 to numnodosy do
        for i:=1 to numnodosx do
            indqc[i,j]:=false;
```

```
{ ----- "MASA QUEMADA TOTAL" ----- }
```

```
    for j:=1 to numnodosy do
        for i:=1 to numnodosx do
            mqt[i,j]:=0.00;
```

```
{ ----- "AREA NODAL" ----- }
```

```
    for j:=1 to numnodosy do
        for i:=1 to numnodosx do
            if ((i=1) or (i=numnodosx)) and
                ((j=1) or (j=numnodosy)) then
                an[i,j]:=sqr(deltax)/2 + 2*deltax*profundidad
            else
                if (((i<>1) and (i<>numnodosx)) and
                    ((j=1) or (j=numnodosy))) or
                    (((i=1) or (i=numnodosx)) and
                    ((j<>1) and (j<>numnodosy))) then
                    an[i,j]:=sqr(deltax) + 3*deltax*profundidad
                else
```



```

an[i,j]:=2*sqr(deltax) + 4*deltax*profundidad;

{ ----- "AREA DE TRANSFERENCIA" ----- }

at:=deltax*profundidad;

{ ----- "NUMERO DE FOURIER" ----- }

for j:=1 to numnodosy do
  for i:=1 to numnodosx do
    fo[i,j]:=0.00413*k*deltat/
      (cp_cascarilla
       *ro_cascarilla
       *sqr(deltax));
    writeln('fo ',fo[1,1]);

{ ----- "DIAMETRO HIDRAULICO" ----- }

ns:=trunc(((1-porosidad)*longitud)/s);
nc:=ns-1;
b:=(porosidad*longitud)/nc;
af:=b*profundidad/sqr(30.48);
dh:=2*b*profundidad/(30.48*(b+profundidad));
writeln('ns ',ns);
writeln('nc ',nc);
writeln('b ',b);
writeln('af ',af);
writeln('dh ',dh);
tpromedio:=ta_ini;

{ -- TEMPERATURAS AJUSTADAS <=== TEMPERATURAS INICIALES -- }

for j:=1 to numnodosy do
  for i:=1 to numnodosx do
    tca[i,j]:=tci[i,j];
    for j:=1 to numnodosy do taa[j]:=tai[j];

{ ----- "MUESTRA TEMPERATURA AJUSTADA" ----- }

writeln('(Ajustada) Tiempo [seg]---> ',tiempo*deltat:8:2);
for j:=numnodosy downto 1 do
  begin
    write(j:4);
    for i:=1 to numnodosx do
      write(tca[i,j]:8);
      writeln(taa[j]:8);
    end;
  mensaje;

{ ----- "INGRESO A ITERACIONES" ----- }

repeat

```

```

{ ----- "ITERACION ACTUAL" ----- }

{ ----- "ARCHIVO DE TEMPERATURAS AJUSTADAS" ----- }

  for j:=numnodosy downto 1 do
    begin
      for i:=1 to numnodosx do
        write(datafile,tca[i,j]:4);
        writeln(datafile,taa[j]:4);
      end;
    end;

{ ----- "INTERPOLACIONES DE LA TABLA" ----- }

  buscartabla(tpromedio,datotabla);
  with datotabla do
    begin
      writeln('temperatura      ',temperatura);
      writeln('ro_aire      ',ro_aire);
      writeln('viscosidad      ',viscosidad);
      writeln('pr_aire      ',pr_aire);
    end;

  { ----- "VELOCIDAD DEL AIRE" ----- }

  velocidad:=fma/(datotabla.ro_aire*af*3600*nc);
  writeln('velocidad ',velocidad);

  { ----- "NUMERO DE REYNOLDS" ----- }

re:=velocidad*dh/datotabla.viscosidad; writeln('re ',re);

{ ----- "COEFICIENTE DE CONVECCION" ----- }
hc:=0.91*exp((-0.51)*ln(re))*fi*cp_aire*
exp((-0.66)*ln(datotabla.pr_aire))*datotabla.ro_aire
*velocidad*3600; writeln('hc ',hc);

  { ----- "NUMERO DE BIOT" ----- }
  bi:=hc*deltax/(30.48*k);
  writeln('bi ',bi);
  mensaje;

{ ----- "CALOR GENERADO CASCARILLA" ----- }
  for j:=1 to numnodosy do
    for i:=1 to numnodosx do
      if (not indqc[i,j]) then
        begin
          if (ea/(r*((5/9)*(tca[i,j]-32)+273)) > maxexpks then
            ks:=0.00
          else
            ks:=(0.23-7.28e-3*mqttotal)*
              *a*exp(-ea/(r*((5/9)*(tca[i,j]-32.0)+273)));
          kd:= ln(1+ Dx/2.67)*1.82*datotabla.ro_aire*velocidad*0.448*
            exp(-0.51*ln(re))*exp((-2/3)*ln(datotabla.viscosidad/dv));

```



```

        kt:=ks*kd/(ks+kd);
q_cascarilla[i,j]:=241.9*kt*pc_cascarilla*deltax/k; end;

{ ----- "MUESTRA CALOR GENERADO CASCARILLA" ----- }

writeln('----- calor generado en la cascarilla --');
for j:=numnodosy downto 1 do
begin
for i:=1 to numnodosx do
write(q_cascarilla[i,j]:8:2); writeln;
end;

{ ----- "TEMPERATURA DE LOS NODOS" ----- }

for j:=1 to numnodosy do
for i:=1 to numnodosx do

{ ----- Nodos Esquineros ----- }
if ((i=1) or (i=numnodosx)) and ((j=1) or (j=numnodosy))
then
begin
if (i=1) and (j=1) then
begin
t1:=tca[i+1,j];
t2:=tca[i,j+1];
end;

if (i=numnodosx) and (j=1) then
begin
t1:=tca[i-1,j];
t2:=tca[i,j+1];
end;

if (i=1) and (j=numnodosy) then
begin
t1:=tca[i+1,j];
t2:=tca[i,j-1];
end;

if (i=numnodosx) and (j=numnodosy)
then
begin
t1:=tca[i-1,j];
t2:=tca[i,j-1];
end;

tcia[i,j]:=trunc(2*fo[i,j]*(t1+t2+2*bi*taa[j]
+fel*an[i,j]/at*q_cascarilla[i,j])
+tca[i,j]*(1-4*fo[i,j]-4*bi*fo[i,j]));
end
else

{ ----- "NODOS LATERALES E INTERMEDIOS" ----- }
if (((i>1) and (i<>numnodosx)) and ((j=1) or
(j=numnodosy))) or (((i=1) or (i=numnodosx)) and
((j>1) and (j<>numnodosy))) then
begin
if (i=1) then

```



```

begin
    t1:=tca[i+1,j];
    t2:=tca[i,j+1];
    t3:=tca[i,j-1];
    tinfinito:=taa[j];
    feltemp:=fel;
    bi_temp:=bi;
end;
if (i=numnodox) then
begin
    t1:=tca[i-1,j];
    t2:=tca[i,j+1];
    t3:=tca[i,j-1];
    tinfinito:=taa[j];
    feltemp:=fel;
    bi_temp:=bi;
end;
if (j=1) then
begin
    t1:=tca[i,j+1];
    t2:=tca[i-1,j];
    t3:=tca[i+1,j];
    tinfinito:=0;
    feltemp:=1;
    bi_temp:=0;
end;
if (j=numnodoy) then
begin
    t1:=tca[i,j-1];
    t2:=tca[i-1,j];
    t3:=tca[i+1,j];
    tinfinito:=taa[j];
    feltemp:=fel;
end;
hr:=sigma*ep* (exp(4*ln(tp+460))-exp(4*ln(tca[i,j]+460)))/
(tp-tca[i,j]); bir:=hr*deltax/k;
bi_temp:=bir;
end;
tcia[i,j]:=trunc(2*fo[i,j]*(t1+t2/2+t3/2+bi_temp*tinfinito
+feltemp*an[i,j]/at*q_cascarilla[i,j])
+tca[i,j]*(1-4*fo[i,j]-2*bi_temp*fo[i,j]));
end
else
{ ----- "NODOS INTERMEDIOS" ----- }

tcia[i,j]:=trunc(fo[i,j]*(tca[i-1,j]+tca[i,j-1]
+tca[i+1,j]+tca[i,j+1] +an[i,j]/at*q_cascarilla[i,j])
+tca[i,j]*(1-4*fo[i,j]));

{ ----- "TEMPERATURA DE SALIDA (Aire)" ----- }
for j:=1 to numnodoy do
begin
    foa:=0.00413*datotabla.ka*deltat/
(cp_aire*datotabla.ro_aire*sqr(deltax));

```

```

        bia:=hc*deltax/(30.48*datotabla.ka);
if (ea/(r* ((5/9)*(tca[numnodox,j]-32)+273))) > maxexpks
then
    kd:=0.00
    else
    ks:=a*exp(-ea/(r* ((5/9)*(tca[numnodox,j]-32)+273) ));
    kt:=ks*kd/(ks+kd);
    if (indqc[numnodox,j]) then
        kt:=0;
        if (j=1) then
            begin
                t1:=taa[j+1]; t2:=ta_ini;
            end
        else
            if (j=numnodox) then
                begin
                    t1:=ta_ini; t2:=taa[j-1];
                end
            else
                begin
                    t1:=taa[j+1]; t2:=taa[j-1];
                end;
            end;
    taia[j]:=trunc(foa*((1-fel)*kt*(an[numnodox,j]/at)*pc_casc.
    *deltax*241.9/datotabla.ka+t1+t2+bia*tca[numnodox,j])+
    taa[j]*(1-bia*foa-2*foa));
    end;

{ - "CONDICIONES DE ESTABILIDAD PARA CASACARILLA Y AIRE" - }

    flag_estabilidad:=true;
    if (fo[1,1]<=1/4) then
        writeln('Estabilidad de nodos interiores se cumple')
    else
        begin
            writeln('ERROR estabilidad de nodos interiores NO se
            cumple');
            flag_estabilidad:=false;
        end;
    if (fo[1,1]*(2+bi)<=(1/2)) then
        writeln('Estabilidad de nodos laterales se cumple')
    else
        begin
            writeln('ERROR estabilidad de nodos laterales NO se
            cumple');
            flag_estabilidad:=false;
        end;
    if (fo[1,1]*(1+bi)<=(1/4)) then
        writeln('Estabilidad de nodos esquineros se cumple')
    else
        begin
            writeln('ERROR estabilidad de nodos esquineros NO se
            cumple');
            flag_estabilidad:=false;
        end;

```



```

        if (foa*(2+bia)<=(1/2)) then
writeln('Estabilidad de nodos en el aire se cumple')
        else
            begin
writeln('ERROR estabilidad de nodos en aire NO se
cumple');
        flag_estabilidad:=false;
            end;
            if (not flag_estabilidad) then
                begin
                    mensaje;
                    halt;
                end;

{ ----- "TEMPERATURA PROMEDIO" ----- }

tpromedio:=ta_ini;
for j:=1 to numnodosy do
    tpromedio:=tpromedio+taia[j];
tpromedio:=trunc(tpromedio/(numnodosy+1));
repeat

    {----- "ITERACION FUTURA" ----- }

    { ----- "INTERPOLACION DE TABLAS" ----- }

buscartabla(tpromedio,datotabla);

    { ----- "VELOCIDAD DEL AIRE" ----- }

velocidad:=fma/(datotabla.ro_aire*af*3600*nc);
writeln('velocidad ',velocidad);

    { ----- "NUMERO DE REYNOLDS" ----- }

re:=velocidad*dh/datotabla.viscosidad;
writeln('re ',re);

    { ----- "COEFICIENTE DE CONVECCIÓN" ----- }
    hc:=0.91* exp((-0.51)*ln(re)) * fi * cp_aire *
exp((-0.66)*ln(datotabla.pr_aire)) * datotabla.ro_aire *
velocidad*3600;
writeln('hc ',hc);

    { ----- "NUMERO DE BIOT" ----- }
    bi:=hc*deltax/(30.48*k);
    writeln('bi ',bi);

{ ----- "CALOR GENERADO CASCARILLA" ----- }

for j:=1 to numnodosy do
    for i:=1 to numnodosx do
        if (not indqc[i,j]) then
            begin

```



```

if (ea/(r* ((5/9)*(tca[i,j]-32)+273) ))>maxexpks then
    ks:=0.00
    else
        ks:=(0.23-7.28e-3*mqttotal)*
            a*exp(-ea/(r*((5/9)*(tca[i,j]-32.0)+273)));
kd:= ln(1+ 0x/267)*1.82*datotabla.ro_aire*velocidad*0.448*
exp(-0.51*ln(re))*exp( (-2/3)*ln(datotabla.viscosidad/dv));
kt:=ks*kd/(ks+kd);
q_cascarilla[i,j]:=241.9*kt*pc_cascarilla*deltax/k;
end;

{ ----- "MUESTRA CALOR GENERADO CASCARILLA" ----- }

writeln('---- calor generado en la cascarilla ---');
for j:=numnodoty downto 1 do
    begin
        for i:=1 to numnodox do
            writeln(q_aire[j]:8:2);
        end;

{ ----- "TEMPERATURA DE LOS NODOS" ----- }
for j:=1 to numnodoty do
    for i:=1 to numnodox do

        { ----- "NODOS ESQUINEROS" ----- }

        if ((i=1) or (i=numnodox)) and ((j=1) or (j=numnodoty))
        then
            begin
                if (i=1) and (j=1) then
                    begin
                        t1:=tca[i+1,j]; t2:=tca[i,j+1];
                    end;
                if (i=numnodox) and (j=1) then
                    begin
                        t1:=tca[i-1,j]; t2:=tca[i,j+1];
                    end;
                if (i=1) and (j=numnodoty) then
                    begin
                        t1:=tca[i+1,j]; t2:=tca[i,j-1];
                    end;
                if (i=numnodox) and (j=numnodoty) then
                    begin
                        t1:=tca[i-1,j]; t2:=tca[i,j-1];
                    end;
                tcif[i,j]:=trunc(2*fo[i,j]*(t1+t2+2*bi*taa[j]
+fel*an[i,j]/at*q_cascarilla[i,j])
+tca[i,j]*(1-4*fo[i,j]-4*bi*fo[i,j]));
                end
            else

{ ----- "NODOS LATERALES E INTERMEDIOS" ----- }

if (((i>1) and (i<>numnodox)) and ((j=1) or

```

```

(j=numnodosy))) or (((i=1) or (i=numnodosx)) and ((j<>1) and
(j<>numnodosy))) then
    begin
        if (i=1) then
            begin
                t1:=tca[i+1,j];      t2:=tca[i,j+1];      t3:=tca[i,j-1];
                tinfinito:=taa[j];
                feltemp:=fel; bi_temp:=bi;
            end;
            if (i=numnodosx) then
                begin
                    t1:=tca[i-1,j];      t2:=tca[i,j+1];      t3:=tca[i,j-1];
                    tinfinito:=taa[j];
                    feltemp:=fel; bi_temp:=bi;
                end;
            if (j=1) then
                begin
                    t1:=tca[i,j+1];      t2:=tca[i-1,j];      t3:=tca[i+1,j];
                    tinfinito:=0;
                    feltemp:=1; bi_temp:=bi;
                end;
            if (j=numnodosy) then
                begin
                    t1:=tca[i,j-1];      t2:=tca[i-1,j];      t3:=tca[i+1,j];
                    tinfinito:=taa[j];
                    feltemp:=fel;
                    hr:=sigma*ep* (exp(4*ln(tp+460))-exp(4*ln(tca[i,j]+460)))/
                    (tp-tca[i,j]); bir:=hr*deltax/k;
                    bi_temp:=bir;
                end;
            tcif[i,j]:=trunc(2*fo[i,j]*(t1+t2/2+t3/2+bi_temp*tinfinito
            +feltemp*an[i,j]/at*q_cascarilla[i,j])
            +tca[i,j]*(1-4*fo[i,j]-2*bi_temp*fo[i,j]));
            else
                { ----- "NODOS INTERIORES" ----- }

            tcif[i,j]:=trunc(fo[i,j]*(tca[i-1,j]+tca[i,j-1]+tca[i+1,j]
            +tca[i,j+1]+an[i,j]/at*q_cascarilla[i,j])
            +tca[i,j]*(1-4*fo[i,j]));

            { ----- "TEMPERATURA DE SALIDA" (Aire) ----- }

            for j:=1 to numnodosy do
                begin
                    foa:=0.00413*datotabla.ka*deltat/
                    (cp_aire*datotabla.ro_aire*sqr(deltax));
                    bia:=hc*deltax/(30.48*datotabla.ka);
                    if (ea/(r*((5/9)*(tca[numnodosx,j]-32)+273))) >
                    maxexpks then
                        kd:=0.00
                    else
                        ks:=a*exp(-ea/(r*((5/9)*(tca[numnodosx,j]-32)+273)));
                        kt:=ks*kd/(ks+kd); if (indqc[numnodosx,j]) then

```



```

kt:=0;
  if (j=1) then
    begin
      t1:=taa[j+1]; t2:=ta_ini;
    end
    else
      if (j=numnodox) then
        begin
          t1:=ta_ini; t2:=taa[j-1];
        end
        else
          begin
            t1:=taa[j+1]; t2:=taa[j-1];
          end;
      end;
  taif[j]:=trunc(foa*((1-fel)*kt*(an[numnodox,j]/at)*pc_casc.
    *deltax*241.9/datotabla.ka+t1+t2+bia*tca[numnodox,j])+
    taa[j]*(1-bia*foa-2*foa));
end;

{-- "CONDICIONES DE ESTABILIDAD PARA CASCARILLA Y AIRE" --}

flag_estabilidad:=true;
  if (fo[1,1]<=1/4) then
    writeln('Estabilidad de nodos interiores se cumple')
  else
begin
  writeln('ERROR estabilidad de nodos interiores NO se
    cumple');
  flag_estabilidad:=false;
end;
  if (fo[1,1]*(2+bi)<=(1/2)) then
    writeln('Estabilidad de nodos laterales se cumple')
  else
    begin
      writeln('ERROR estabilidad de nodos laterales NO se
        cumple');
      flag_estabilidad:=false;
    end;
    if (fo[1,1]*(1+bi)<=(1/4)) then
      writeln('Estabilidad de nodos esquineros se cumple')
    else
      begin
        writeln('ERROR estabilidad de nodos esquineros NO se
          cumple');
        flag_estabilidad:=false;
      end;
      if (foa*(2+bia)<=(1/2)) then
        writeln('Estabilidad de nodos en el aire se cumple')
      else
        begin
          writeln('ERROR estabilidad de nodos en aire NO se
            cumple');
          flag_estabilidad:=false;
        end;
      end;

```



```
if (not flag_estabilidad) then
  begin
```

```
    mensaje;
    halt;
```

```
  end;
```

```
{ ----- "TEMPERATURA PROMEDIO" ----- }
```

```
    tpromedio:=ta_ini;
```

```
    for j:=1 to numnodosy do
```

```
      tpromedio:=tpromedio+taif[j];
```

```
    tpromedio:=trunc(tpromedio/(numnodosy+1));
```

```
{ ----- "AJUSTE DE TEMPERATURAS" ----- }
```

```
    flag:=true;
```

```
{ --- Inicialmente se asume que si estan Ajustadas --- }
```

```
    for j:=1 to numnodosy do
```

```
      for i:=1 to numnodosx do
```

```
        if abs(tcia[i,j]-tcif[i,j])>epsilon then
```

```
          flag:=false;
```

```
          for j:=1 to numnodosy do
```

```
            if abs(taia[j]-taif[j])>epsilon then
```

```
              flag:=false;
```

```
{ ---- " Muestra Temperatura Itera.Actual y Futura" ---- }
```

```
    writeln('(Actual y Futura) Tiempo [seg]--->
```

```
      ',tiempo*deltat:8:2);
```

```
    for j:=numnodosy downto 1 do
```

```
      begin
```

```
        for i:=1 to numnodosx do
```

```
          write(tcia[i,j]:5);
```

```
          write(' | ');
```

```
          write(taia[j]:5); write(' || ');
```

```
        for i:=1 to numnodosx do
```

```
          write(tcif[i,j]:5); write(' | ');
```

```
          writeln(taif[j]:5);
```

```
      end;
```

```
      mensaje;
```

```
{ --- Temperaturas Actuales <=== Temperaturas Futuras --- }
```

```
    if (not flag) then
```

```
      begin
```

```
        for j:=1 to numnodosy do
```

```
          for i:=1 to numnodosx do
```

```
            tcia[i,j]:=tcif[i,j];
```

```
          for j:=1 to numnodosy do
```

```
            taia[j]:=taif[j];
```

```
          end;
```

```
until (flag);
```

```

{ ----- Temperatura Ajustada <== Temperatura Futura ----- }

  for j:=1 to numnodosy do
    for i:=1 to numnodosx do
      tca[i,j]:=tcif[i,j];
      for j:=1 to numnodosy do
        taa[j]:=taif[j];

{ " Muestra la Temperatura Ajustada y los Nodos Quemados" }

writeln('(Ajustada)           Tiempo           [seg]--->
',tiempo*deltat:8:2);
  for j:=numnodosy downto 1 do
    begin
      for i:=1 to numnodosx do
        write(tca[i,j]:8);
        write(taa[j]:8);
      for i:=1 to numnodosx do
        write(indqc[i,j]:8); writeln;
    end;
  mensaje;

  { ----- "MASA QUEMADA" ----- }

    for j:=1 to numnodosy do
      for i:=1 to numnodosx do
        begin
if (ea/(r* ((5/9)*(tca[i,j]-32)+273) ))>maxexpks then
          ks:=0.00
        else
          ks:=(0.23-7.28e-3*mqttotal)*
            a*exp(-ea/(r* (5/9)*(tca[i,j]-32)+273) ));
          kt:=ks*kd/(ks+kd);
          mq[i,j]:=kt*an[i,j]*deltat;
        end;

  { ----- "CONVERGENCIA DE MASAS" ----- }

    for j:=1 to numnodosy do
      for i:=1 to numnodosx do
        begin
          mqt[i,j]:=mqt[i,j]+mq[i,j];
if (mqt[i,j]>=epsilonmasa/100*(0.20*md[i,j]))
          then
            begin
              indqc[i,j]:=true;
              q_cascarilla[i,j]:=0.00;
              fo[i,j]:=fo[i,j]*0.013/k;
if (i=1) or (i=numnodosx) then
              q_aire[j]:=0.00;
            end;
        end;

```



```

{ ---- "NODOS QUEMADOS" ---- }

    flag:=true;

{--- Se Asume que todos estan Quemados ---}

    for j:=1 to numnodosy do
        for i:=1 to numnodosx do
            if (indqc[i,j]=false) then
                flag:=false;
            if (not flag) then tiempo:=tiempo+1;
                until (flag) ;

{ ---- "ARCHIVO DE TEMPERATURAS AJUSTADAS" ---- }

    for j:=numnodosy downto 1 do
        begin
            for i:=1 to numnodosx do
                write(datafile,tca[i,j]:4); writeln(datafile,taa[j]:4);
            end;

        { ----- "CIERRE ARCHIVO DE DATOS" ----- }

            close(datafile);

{ " Muestra Temperatura Ajustada y los Nodos Quemados " }

    writeln('(Ajustada)      tiempo      [seg]--->
            ,tiempo*deltat:8:2);
        for j:=numnodosy downto 1 do
            begin
                for i:=1 to numnodosx do
                    write(tca[i,j]:8); write(taa[j]:8);
                for i:=1 to numnodosx do
                    write(indqc[i,j]:8); writeln;
                end;

            { ----- "EXCESO DE AIRE" ----- }

exceso_aire:=((fma/nc)/(mac*ro_cascarilla*s*profundidad*espesor
* 7.936/tiempo*deltat)-1)*100;
    writeln;
    writeln('**** EXCESO DE AIRE ****');
    writeln(exceso_aire);
    WRITELN;

    mensaje;

    E N D

```


6.2 PRUEBAS Y RESULTADOS

El programa es aplicado a dos tipos de modelos básicos, (Fig. 4.3), siendo sus respectivas dimensiones e intervalos de tiempo para la marcha del programa:

- 1º Modelo:

$$s = 1 \text{ cm.}$$

$$P = 7 \text{ cm.}$$

$$W = 4 \text{ cm.}$$

$$X = 0.5 \text{ cm.}$$

$$t = 1 \text{ s.}$$

- 2º Modelo:

$$s = 2 \text{ cm.}$$

$$P = 7 \text{ cm.}$$

$$W = 10 \text{ cm.}$$

$$X = 1 \text{ cm.}$$

$$t = 2 \text{ s.}$$

En cada modelo se consideran variaciones en los parámetros como A, E, m_m y K, con sus posibles combinaciones.

El nodo # 1 (o inferior), corresponde aquel que está situado sobre la parrilla, siguiendo la numeración en orden ascendente hasta el final de la camada.

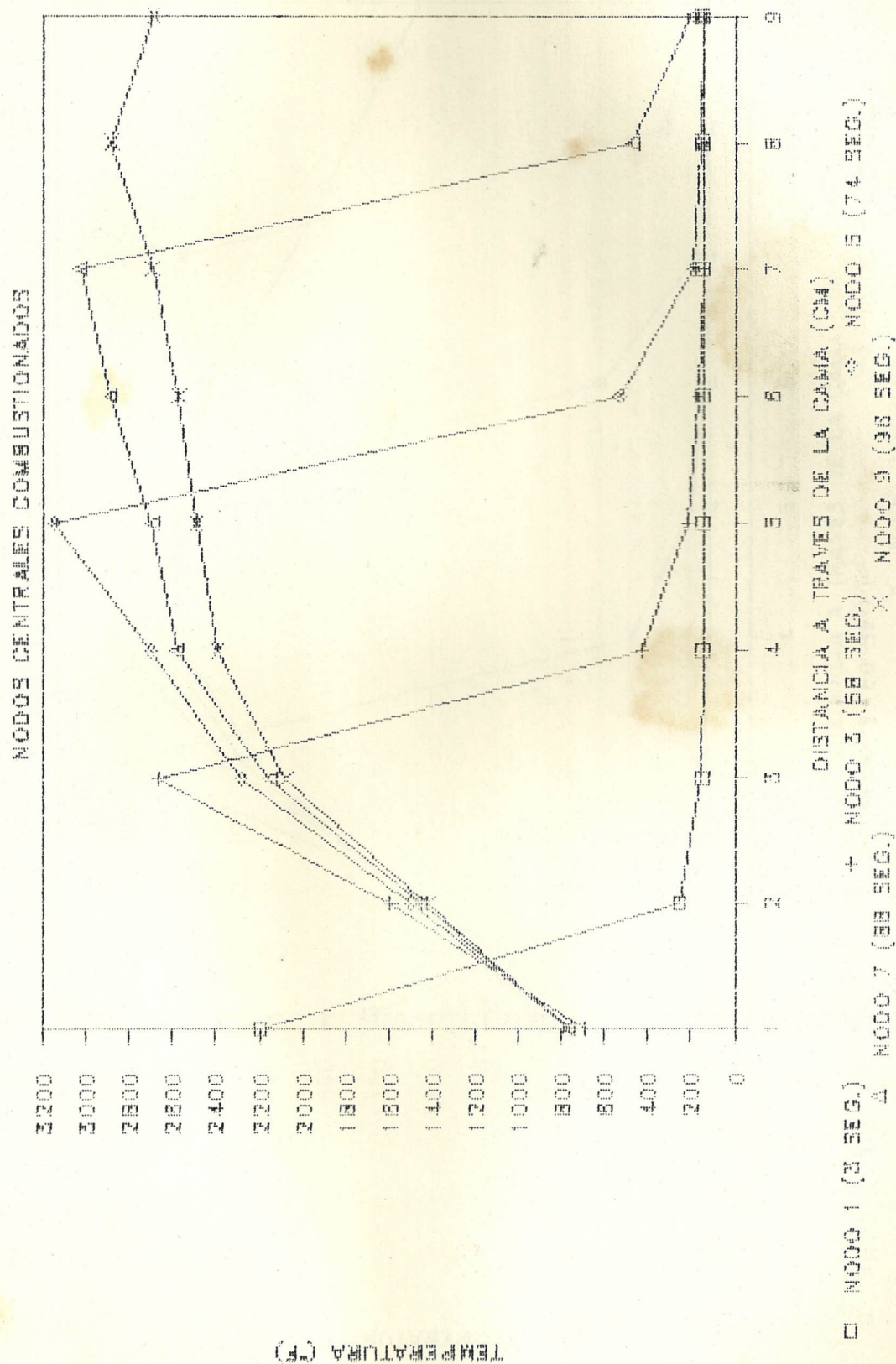
Los resultados son mostrados en esquemas y gráficos, juntos con los datos de entrada para cada prueba.

Los gráficos muestran los perfiles instantáneos de máxima temperatura correspondiente a la secciones central, lateral (de la camada) y para el aire, cuando los nodos se han quemado completamente. Adicionalmente se presentan las curvas de consumo de oxígeno y de generación de dióxido de carbono.

DATOS						
PRUEBA # 1				MODELO # 1		
A	E	m	K	Kc	Temp. inicial	
(gr/cm ² -seg)	(Cal/gr-mol)	(Lbm/hr)	(BTU/hr-P-°F)	(BTU/hr-P-°F)	(°F)	
65000	25500	10	0.1	0.02	750-150-150-700	

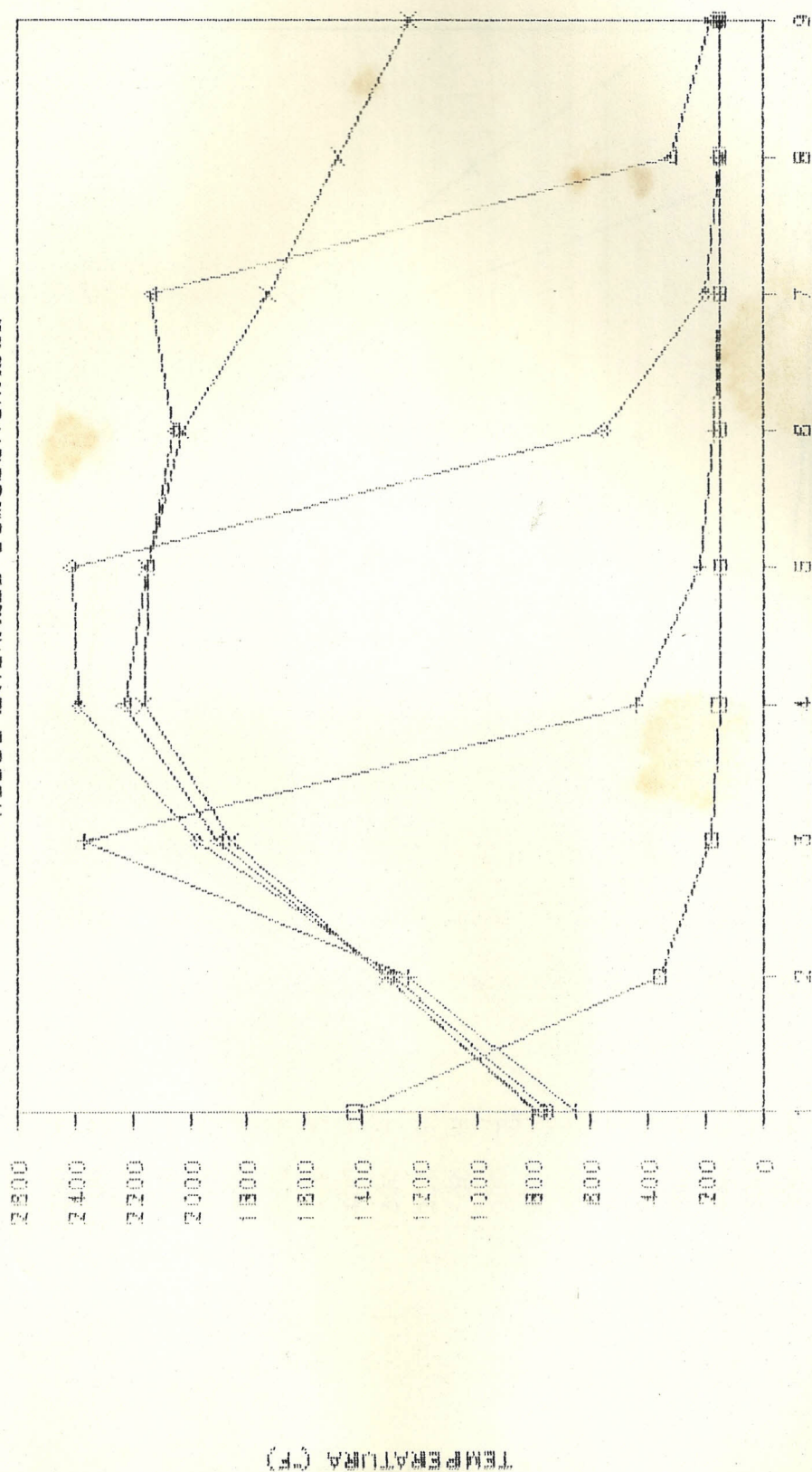
RESULTADOS						
TEMPERATURAS MAXIMAS (°F)						
CASCARILLA			t	AIRE	t	
NODO #	NODO C	NODO L	(Seg)		(Seg)	
1	2194	1423	3	960	8	
2	1887	1451	49	1117	51	
3	1662	2365	58	1979	60	
4	2933	2662	66	2637	67	
5	3150	2213	74	2096	75	
6	3020	2189	81	1978	80	
7	3034	2139	88	1267	88	
8	3073	1911	93	829	94	
9	2690	1233	96	485	98	

TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA

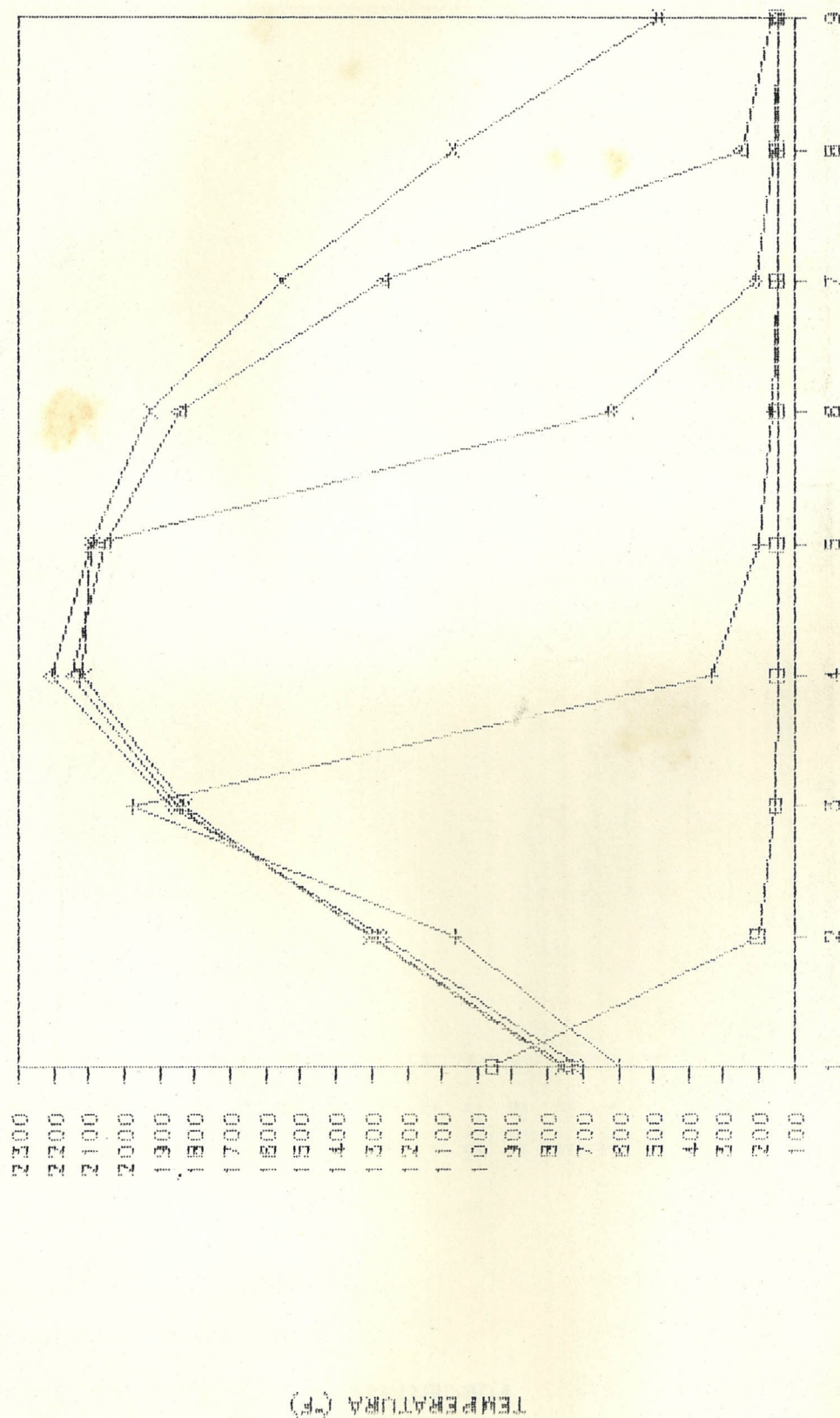


TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA

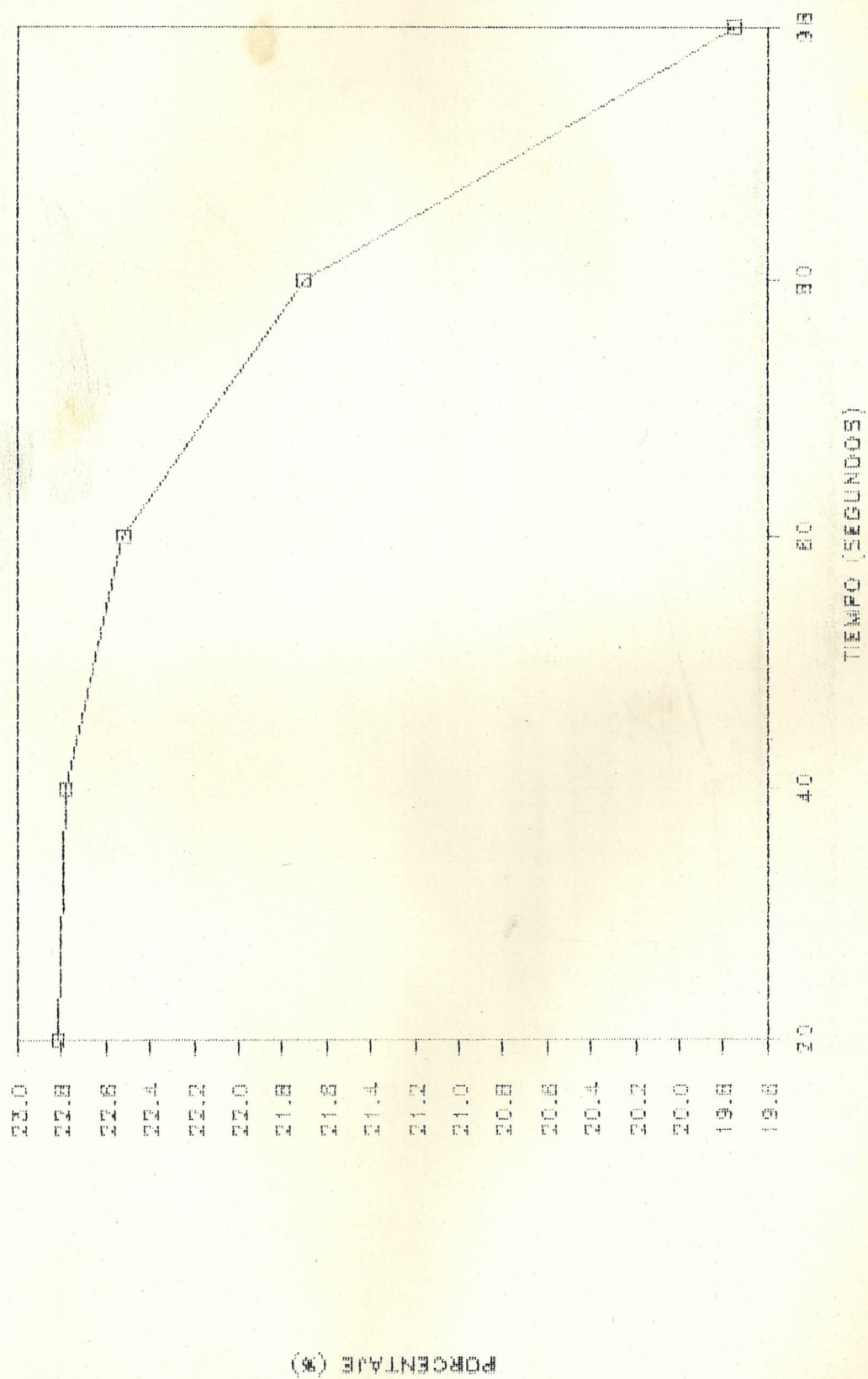
NODOS LATERALES COMBUSTIONADOS



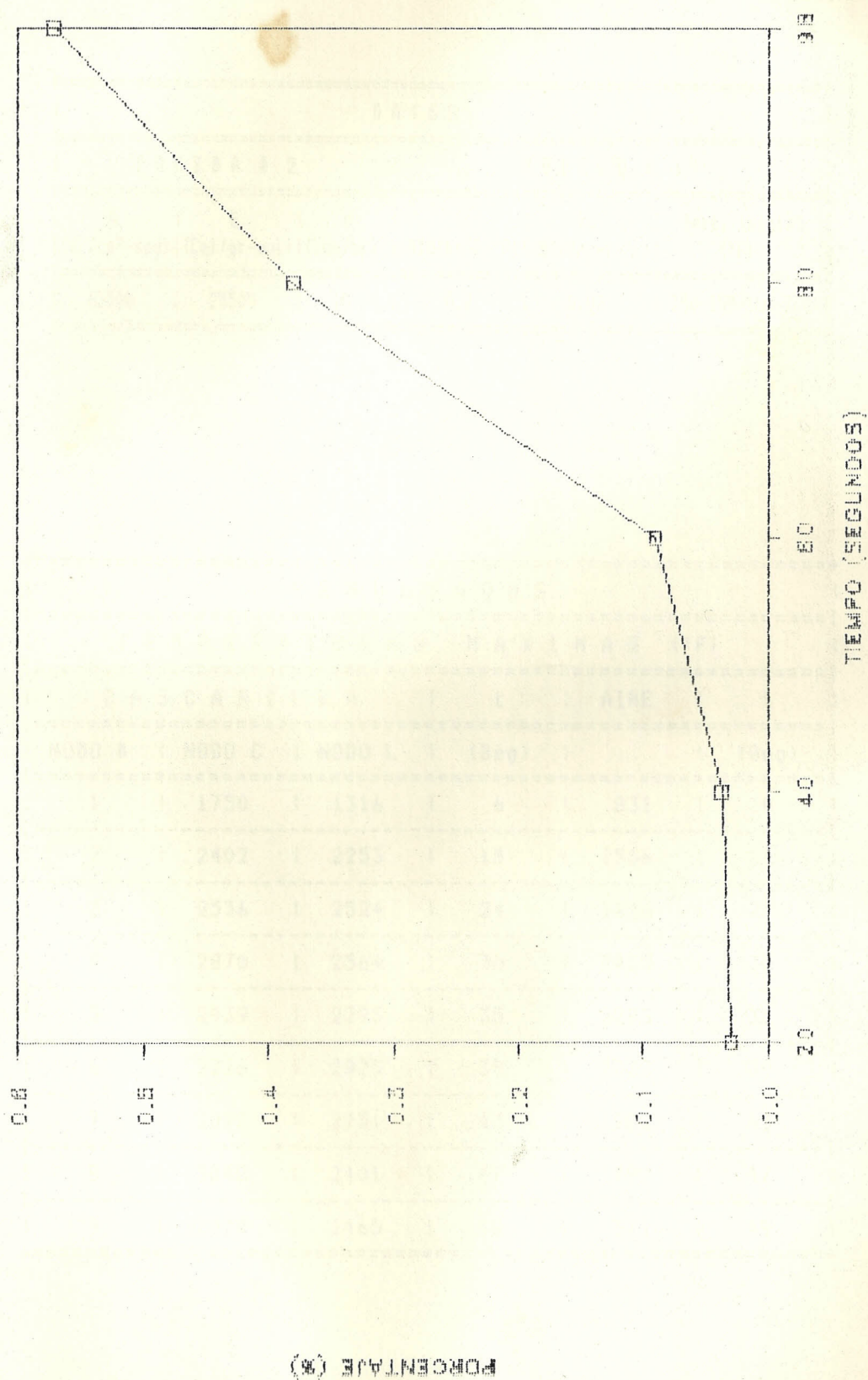
TEMPERATURAS MAXIMAS EN EL AIRE



TASA DE CONSUMO DE OXIGENO



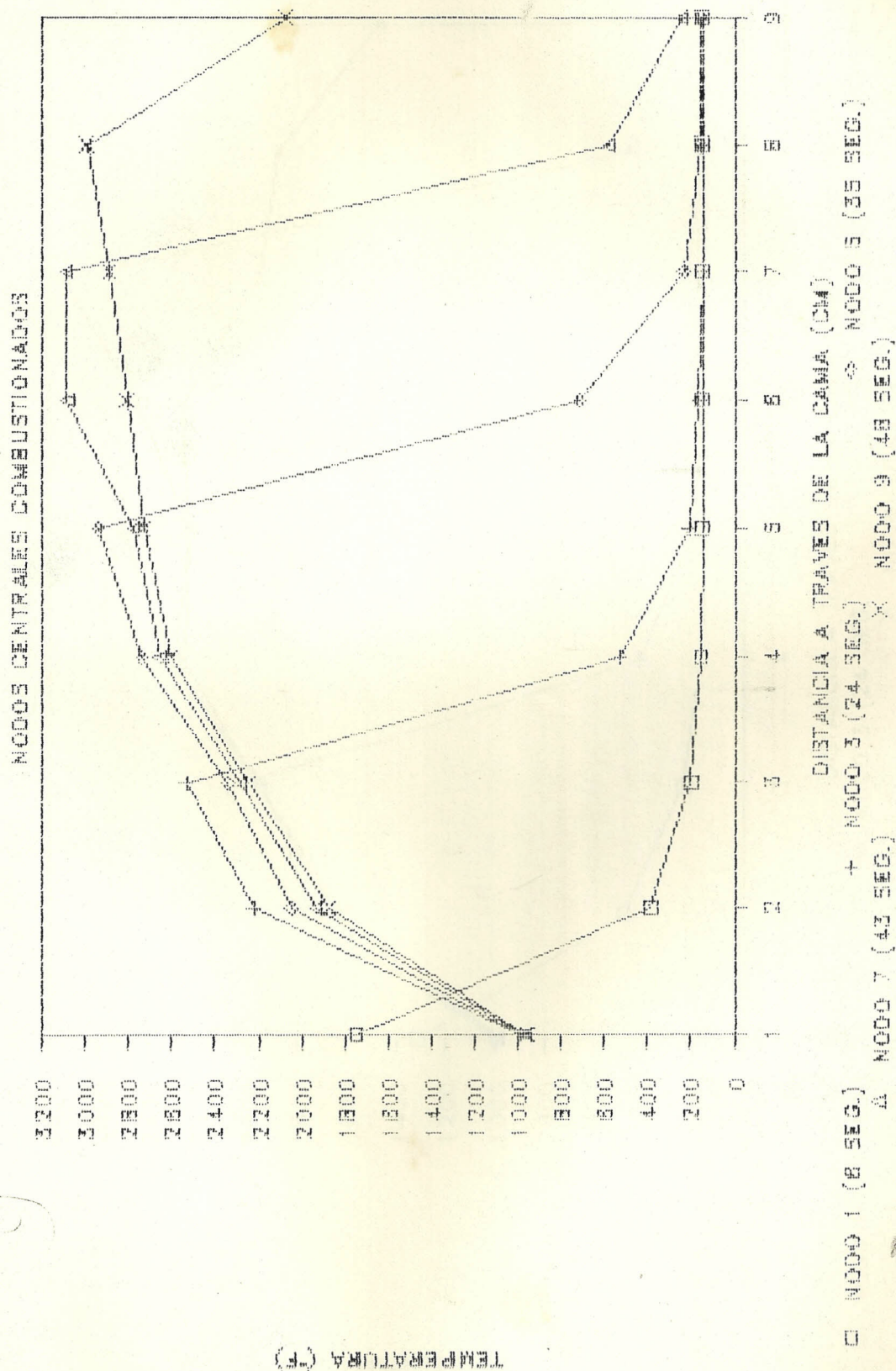
TASA DE GENERACION DE CO2



D A T O S						
P R U E B A # 2				M O D E L O # 1		
A	E	m	K	Kc	Temp. inicial	
(gr/cm ² -seg)	(Cal/gr-mol)	(Lbm/hr)	(BTU/hr-P-°F)	(BTU/hr-P-°F)	(°F)	
65000	25500	10	0.2	0.02	750-150-150-700	

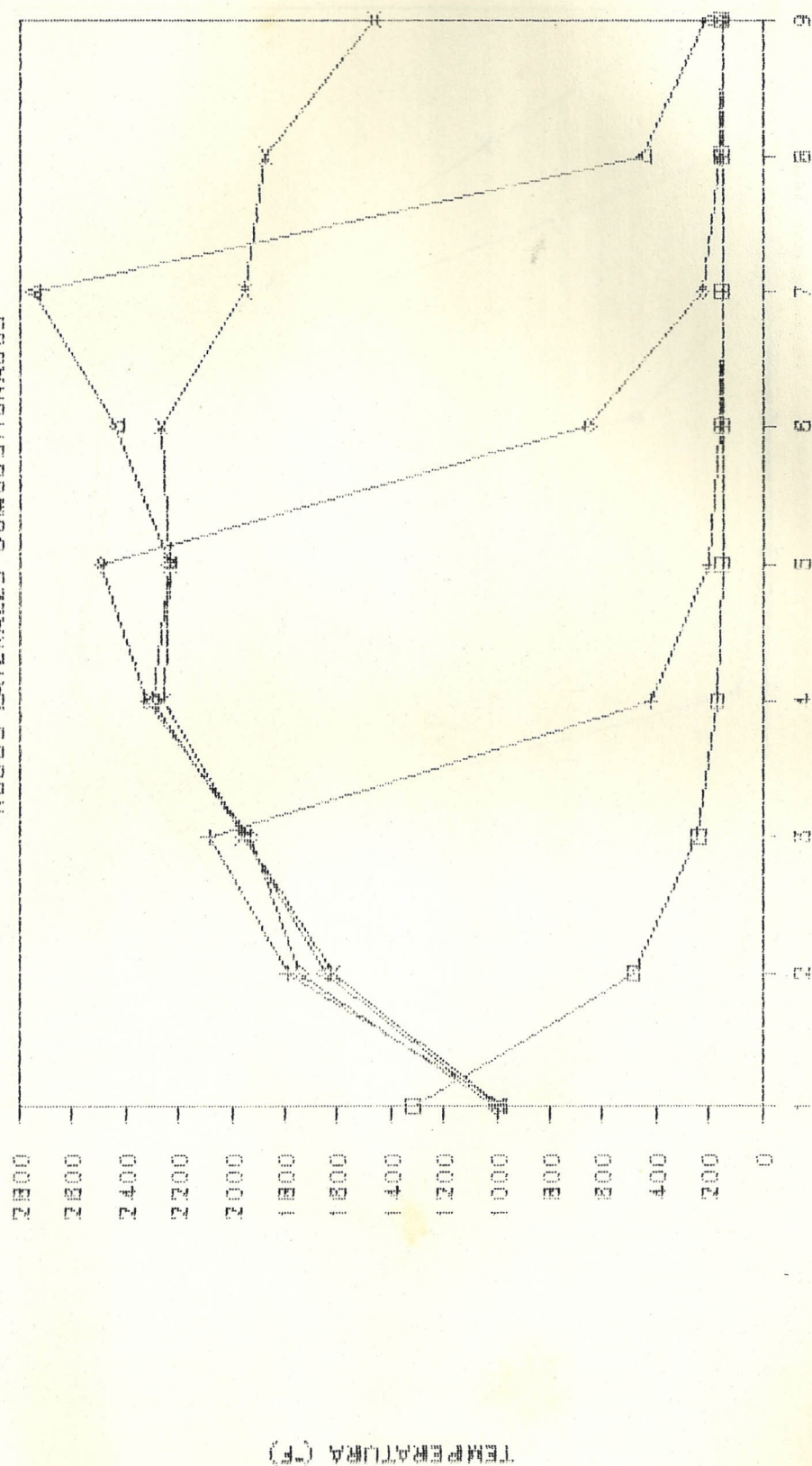
R E S U L T A D O S						
T E M P E R A T U R A S M A X I M A S (°F)						
C A S C A R I L L A			t	A I R E		
NODO #	NODO C	NODO L	(Seg)			(Seg)
1	1750	1316	6	831		10
2	2402	2253	18	1556		19
3	2536	2524	24	1676		24
4	2870	2564	30	2433		30
5	2939	2295	35	2283		35
6	3226	2825	39	2032		39
7	3092	2751	43	1282		43
8	3048	2401	47	792		47
9	2074	1465	48	371		49

TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA



TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA

NODOS LATERALES COMBUSTIONADOS



DISTANCIA A TRAVES DE LA CANA (CM)

□ NODO 1 (10 SEG.)

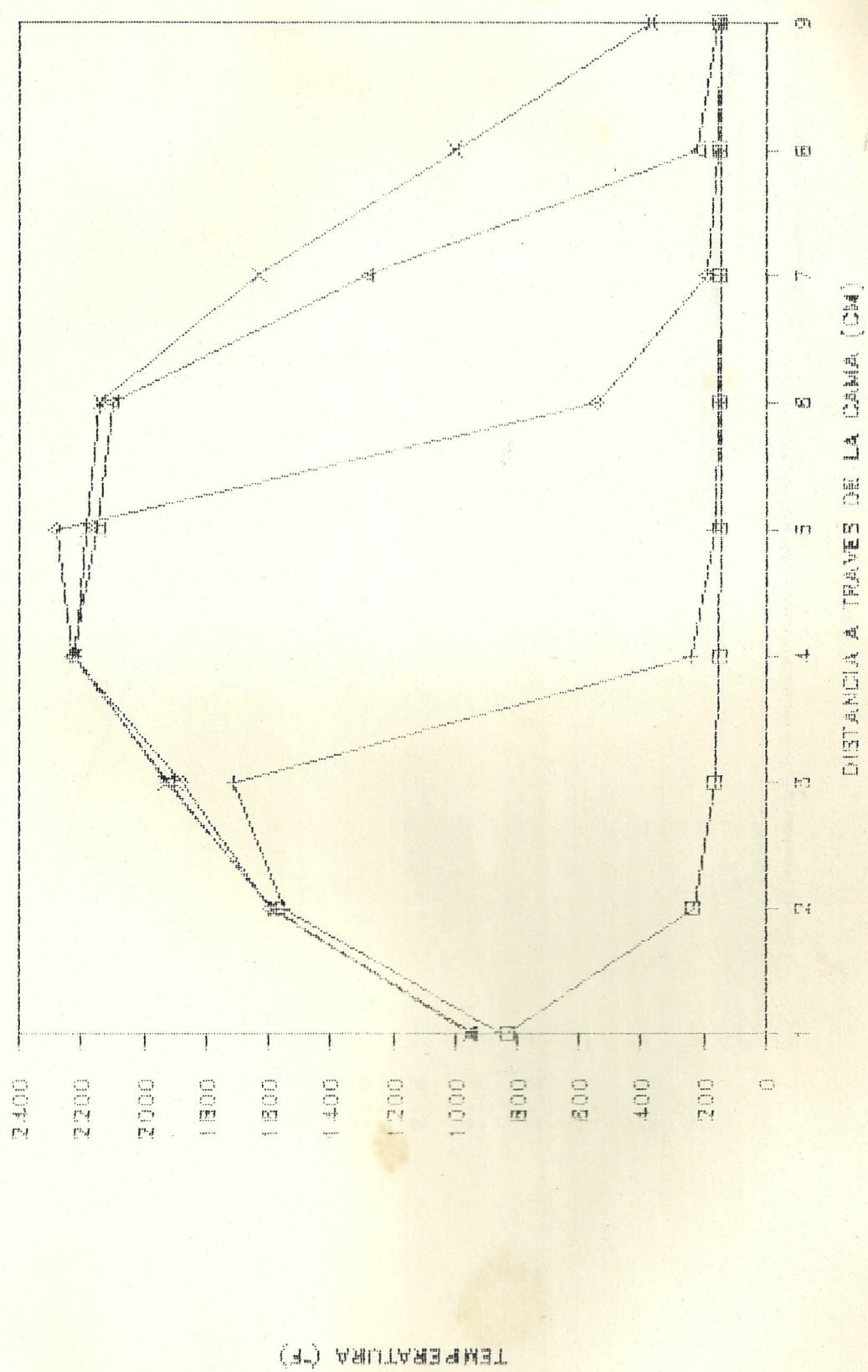
+ NODO 3 (24 SEG.)

◇ NODO 5 (38 SEG.)

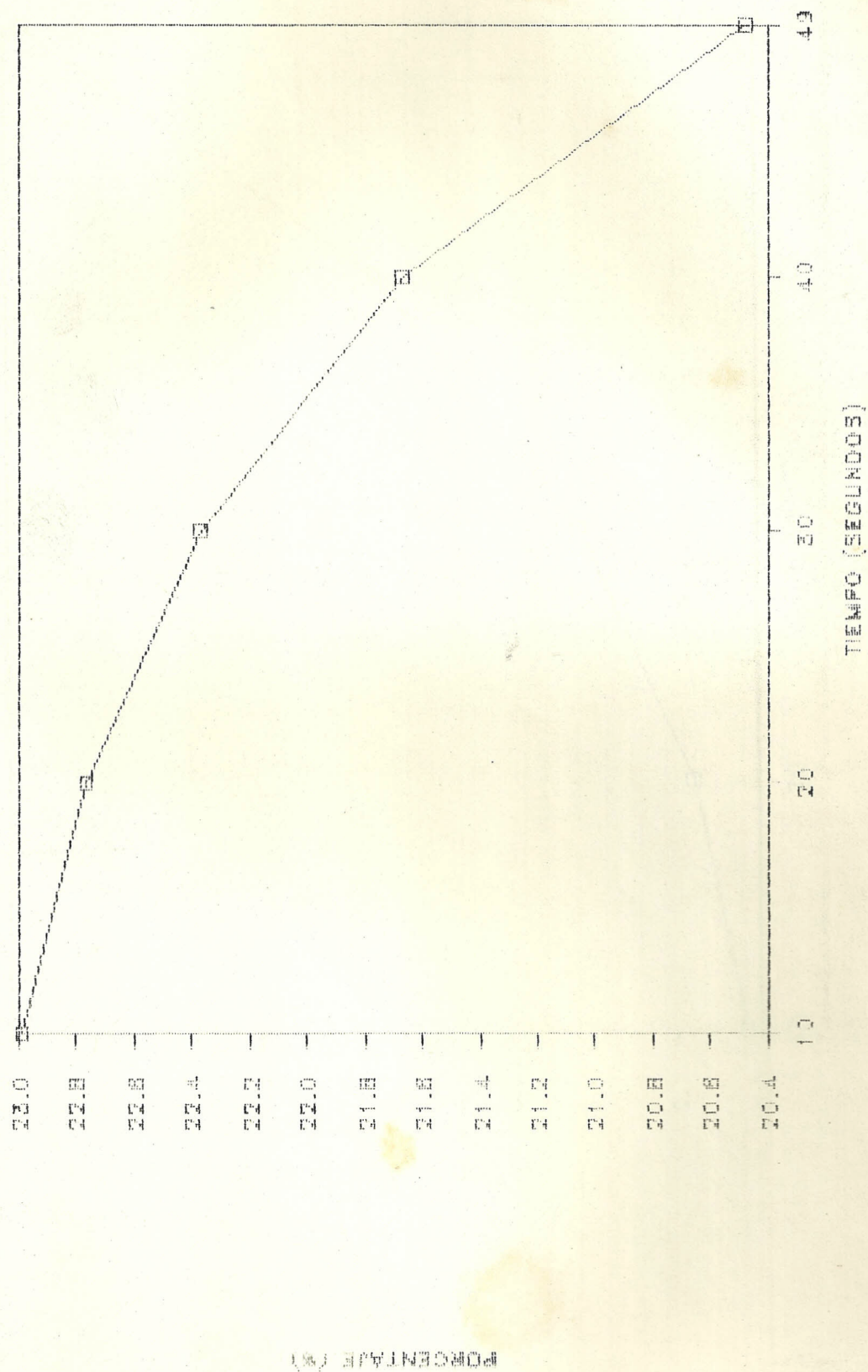
△ NODO 7 (49 SEG.)

X NODO 9 (49 SEG.)

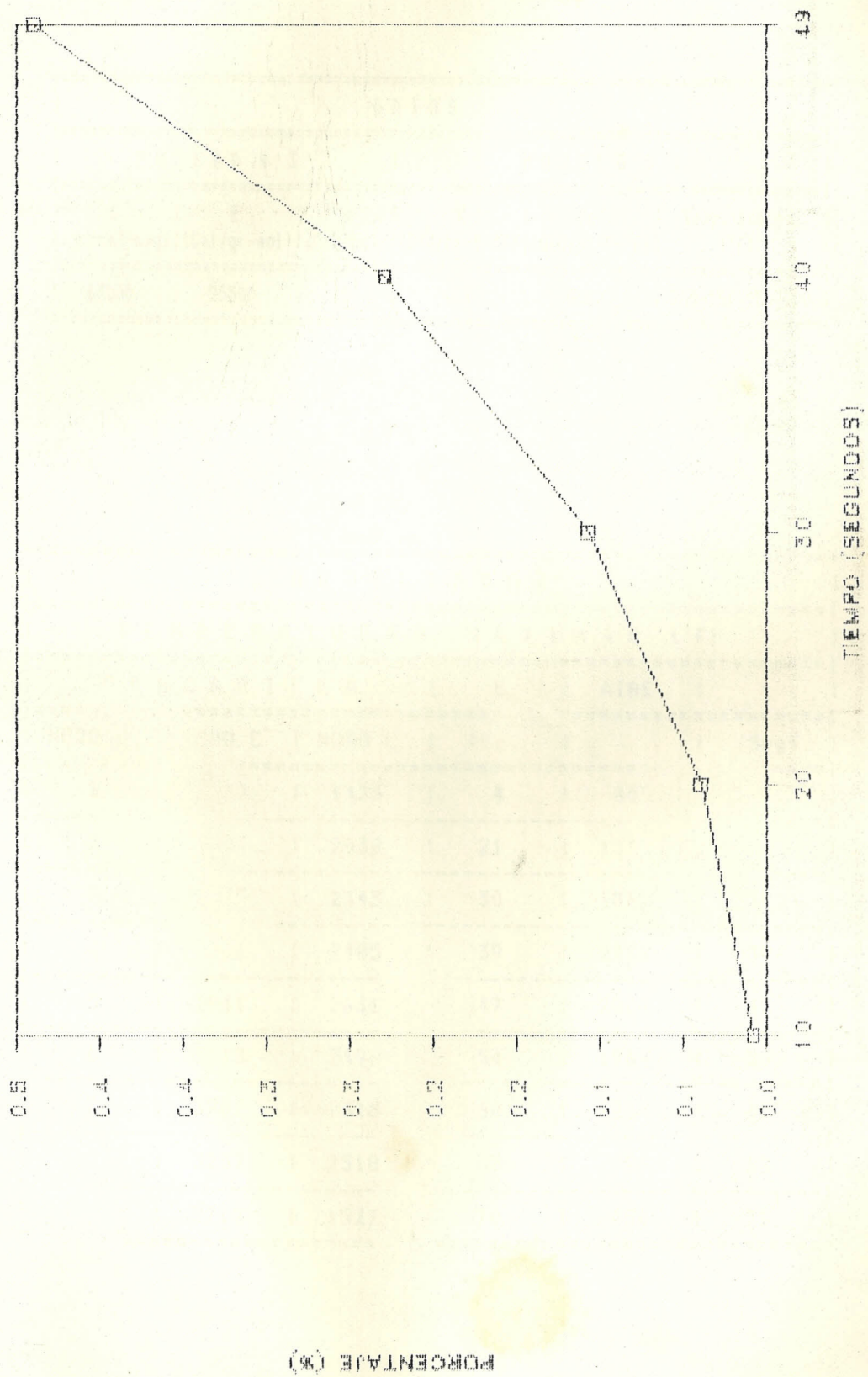
TEMPERATURAS MAXIMAS EN EL AIRE



TASA DE CONSUMO DE OXIGENO



TASA DE GENERACION DE CO2

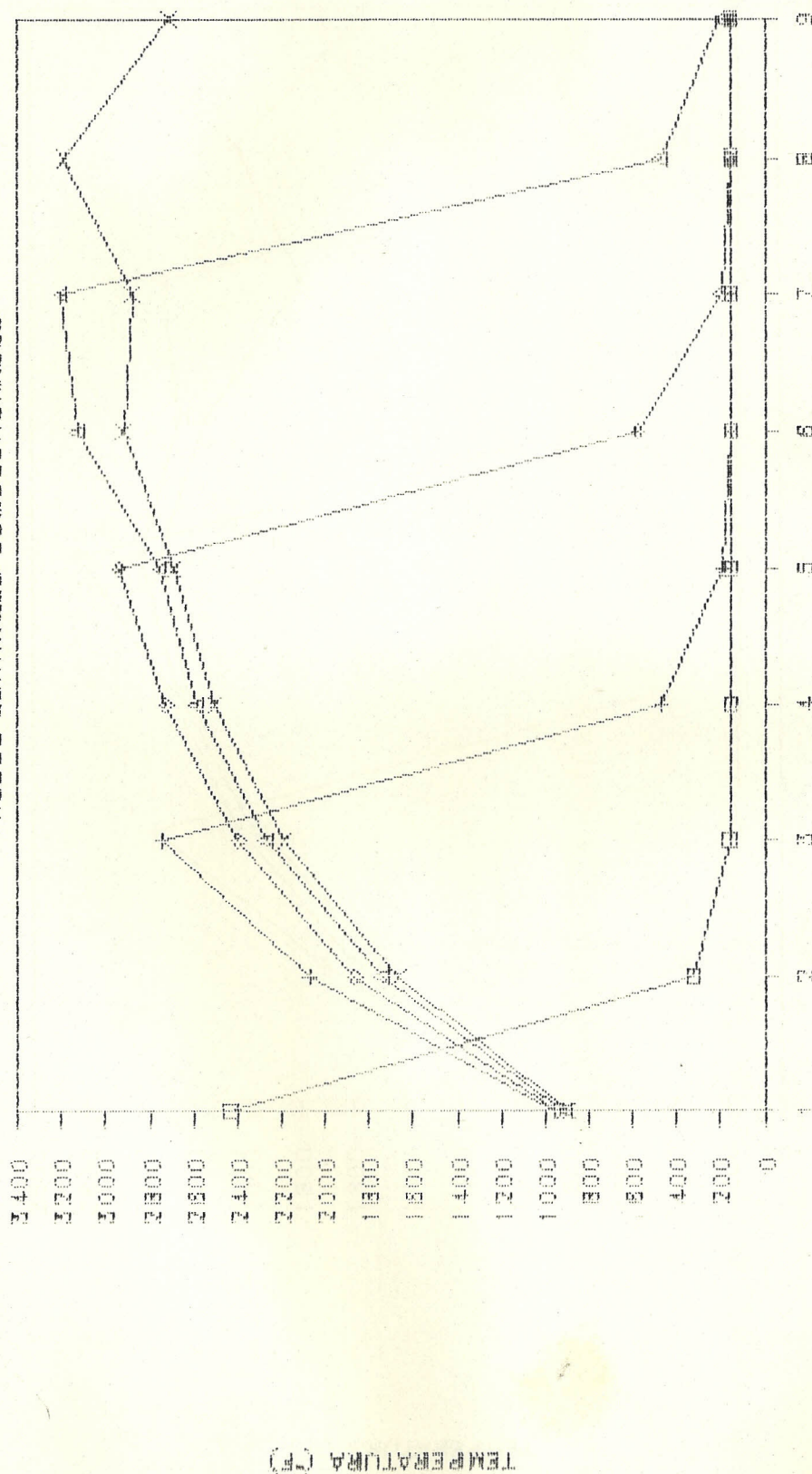


DATOS						
PRUEBA # 3				MODELO # 1		
A	E	m	K	Kc	Temp. inicial	
(gr/cm ² -seg)	(Cal/gr-mol)	(Lbm/hr)	(BTU/hr-P-°F)	(BTU/hr-P-°F)	(°F)	
65000	25500	15	0.1	0.02	750-150-150-700	

RESULTADOS						
TEMPERATURAS MAXIMAS (°F)						
CASCARILLA			t	AIRE		
NODO	NODO C	NODO L	(S)			(Seg)
1	132	1435	4	805		7
2	197	2038	21	135		3
3	225	2345	30	1862		31
4	261	2485	39	2432		39
5	2941	2631	47	2809		47
6	3013	2496	54	1964		53
7	3202	2316	60	1234		60
8	3232	2518	67	986		68
9	2712	1527	70	450		71

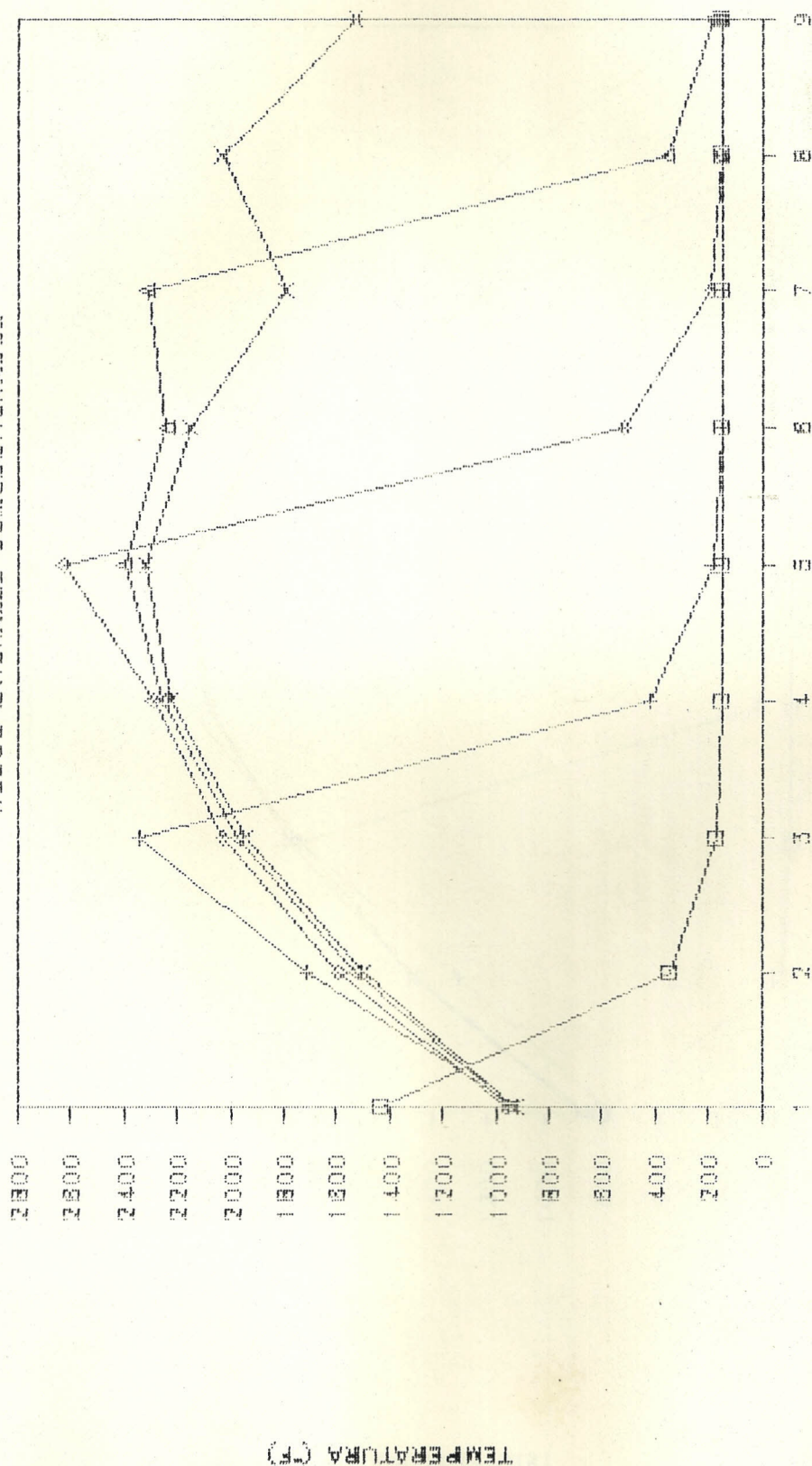
TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA

NODOS CENTRALES COMBUSTIONADOS

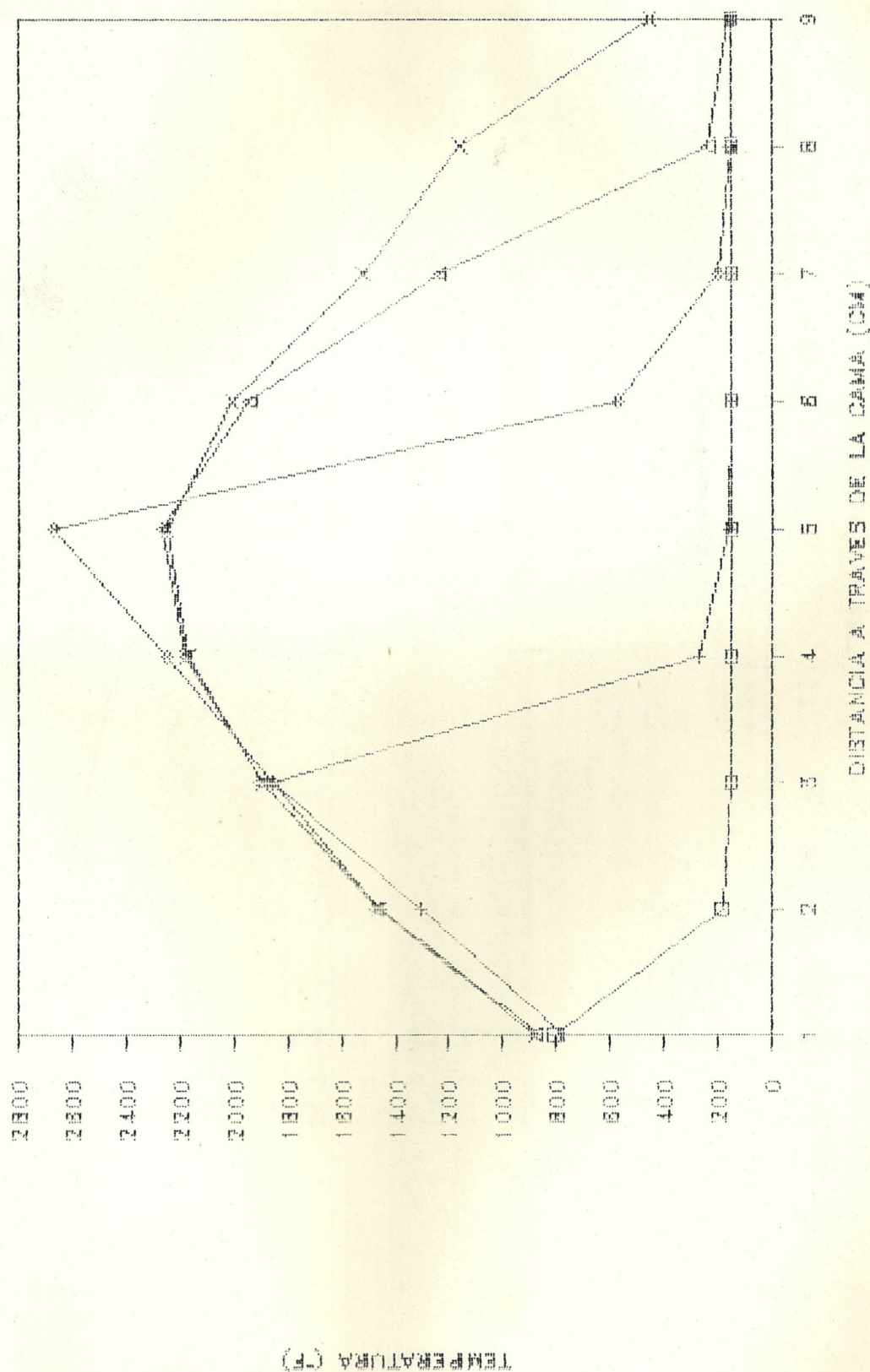


TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA

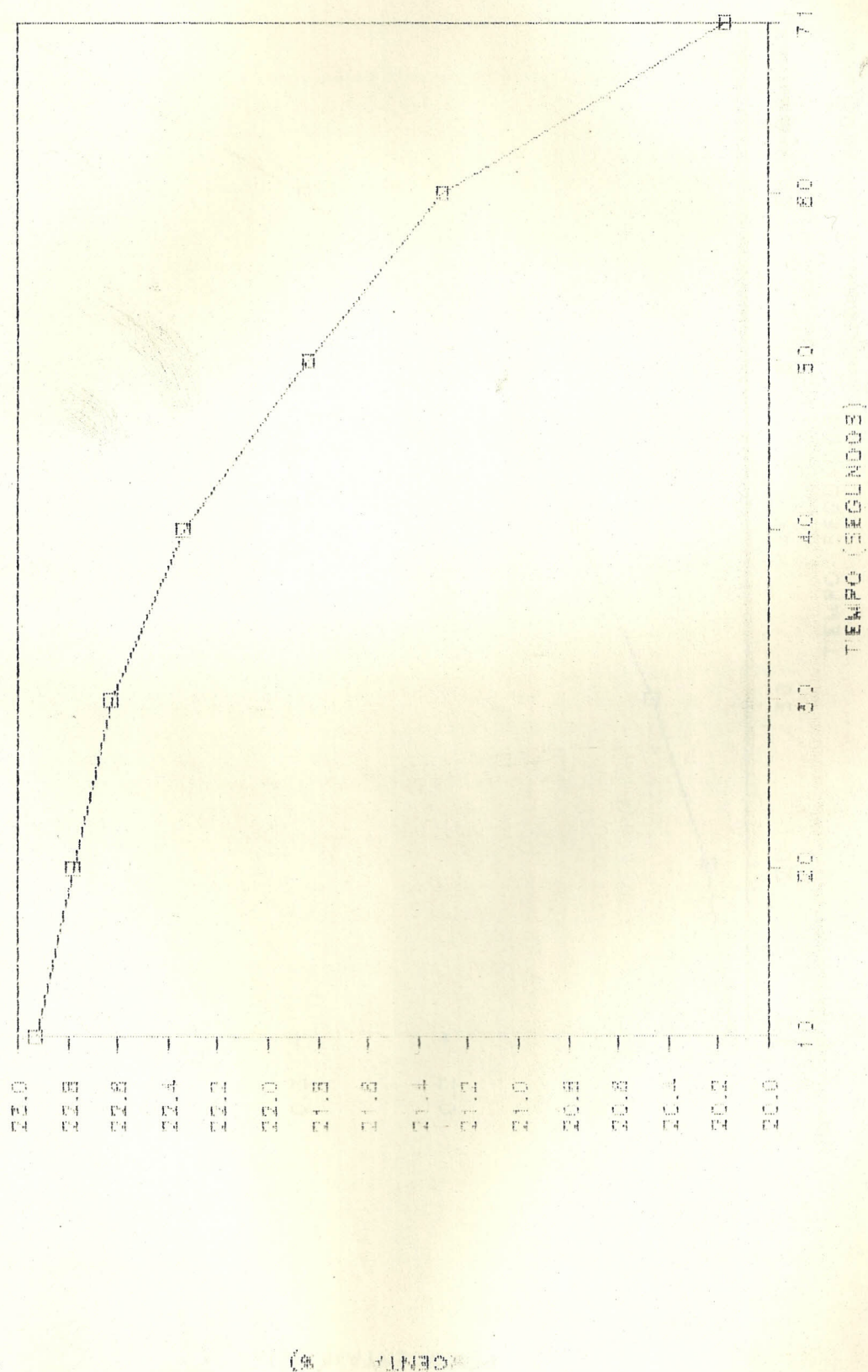
NODOS LATERALES COMBUSTIONADOS



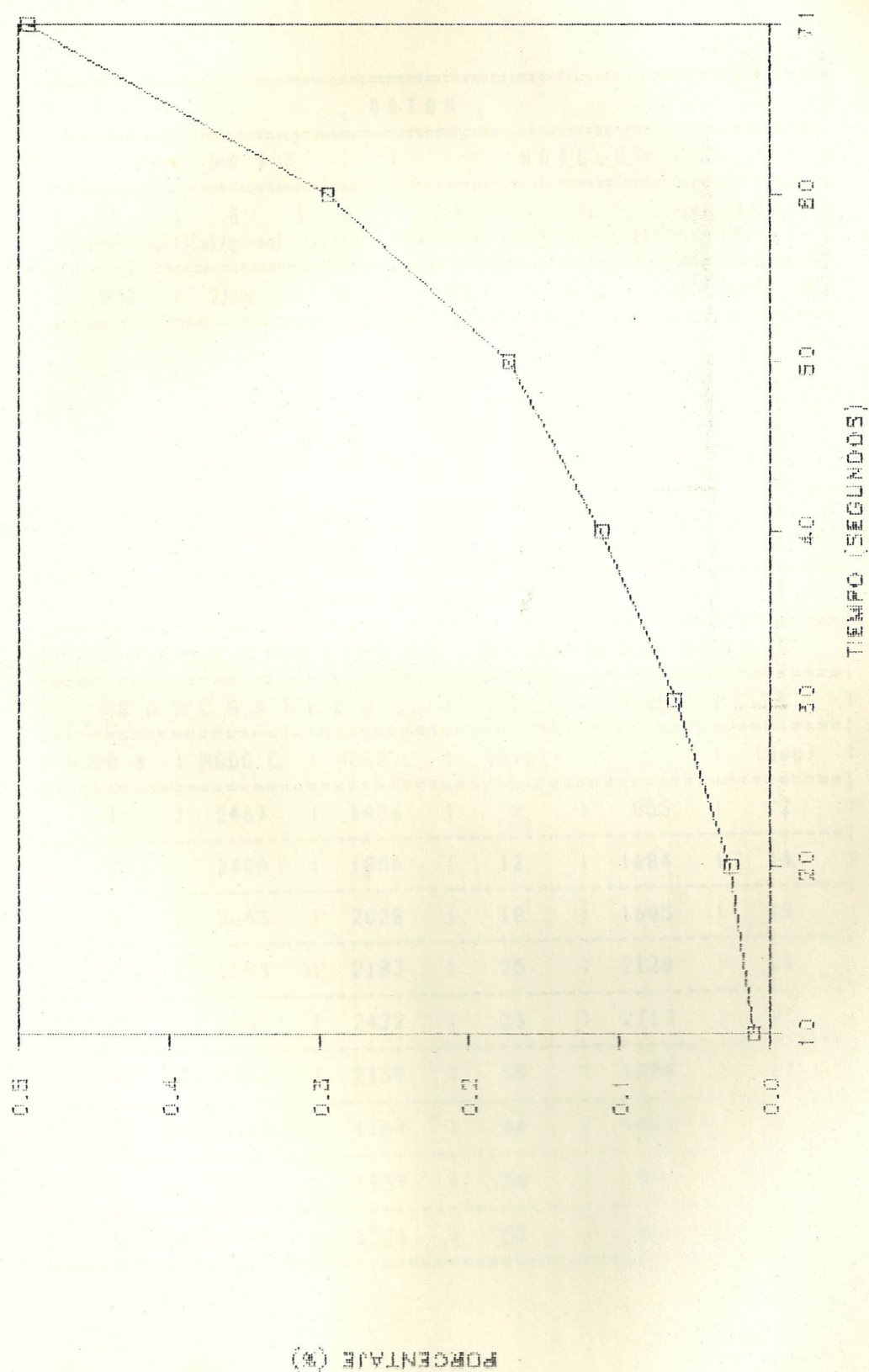
TEMPERATURAS MAXIMAS EN EL AIRE



TASA DE CONSUMO DE OXIGENO



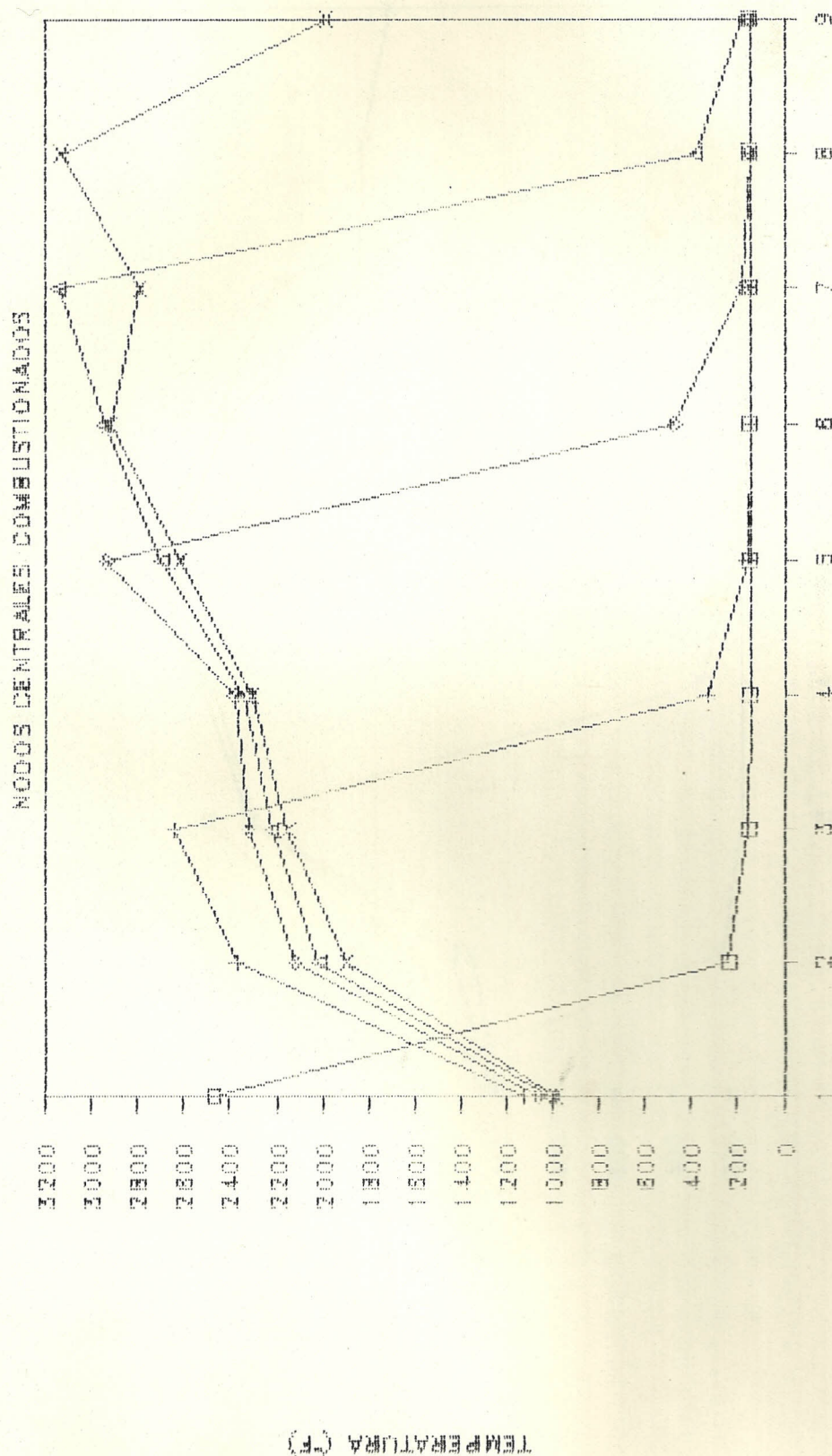
TASA DE GENERACION DE CO2



D A T O S						
P R U E B A # 4				M O D E L O # 1		
A	E	m	K	Kc	Temp. inicial	
(gr/cm ² -seg)	(Cal/gr-mol)	(Lbm/hr)	(BTU/hr-P-°F)	(BTU/hr-P-°F)	(°F)	
65000	23000	10	0.1	0.02	750-150-150-700	

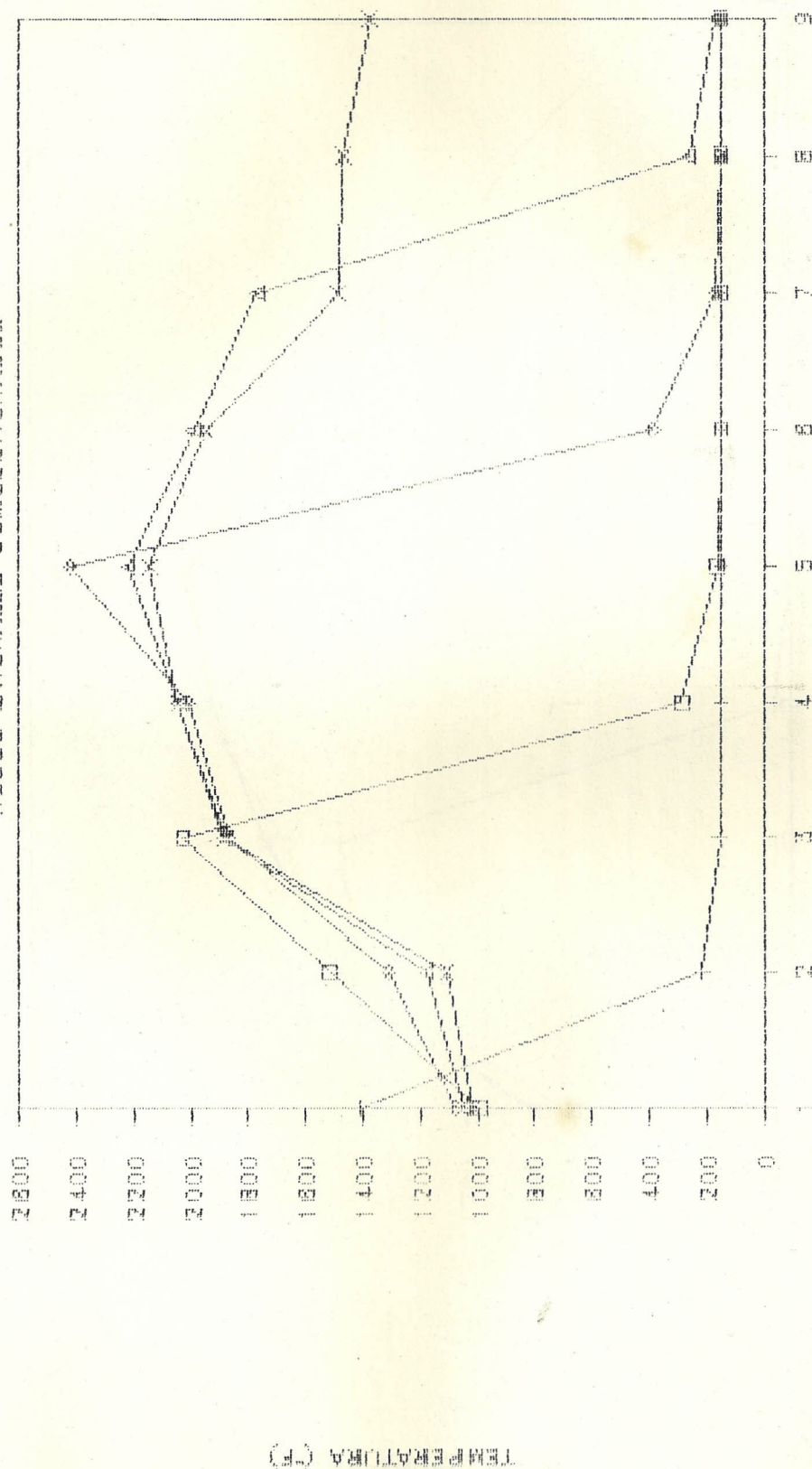
R E S U L T A D O S						
T E M P E R A T U R A S M A X I M A S (°F)						
C A S C A R I L L A			t	A I R E	t	
NODO #	NODO C	NODO L	(Seg)		(Seg)	
1	2467	1406	2	855	2	
2	2400	1856	12	1684	14	
3	2643	2028	18	1605	19	
4	2593	2183	25	2128	26	
5	2935	2422	33	2713	33	
6	3131	2139	39	1794	38	
7	3143	1769	44	1014	44	
8	3271	1959	50	801	51	
9	1985	1573	52	624	55	

TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA

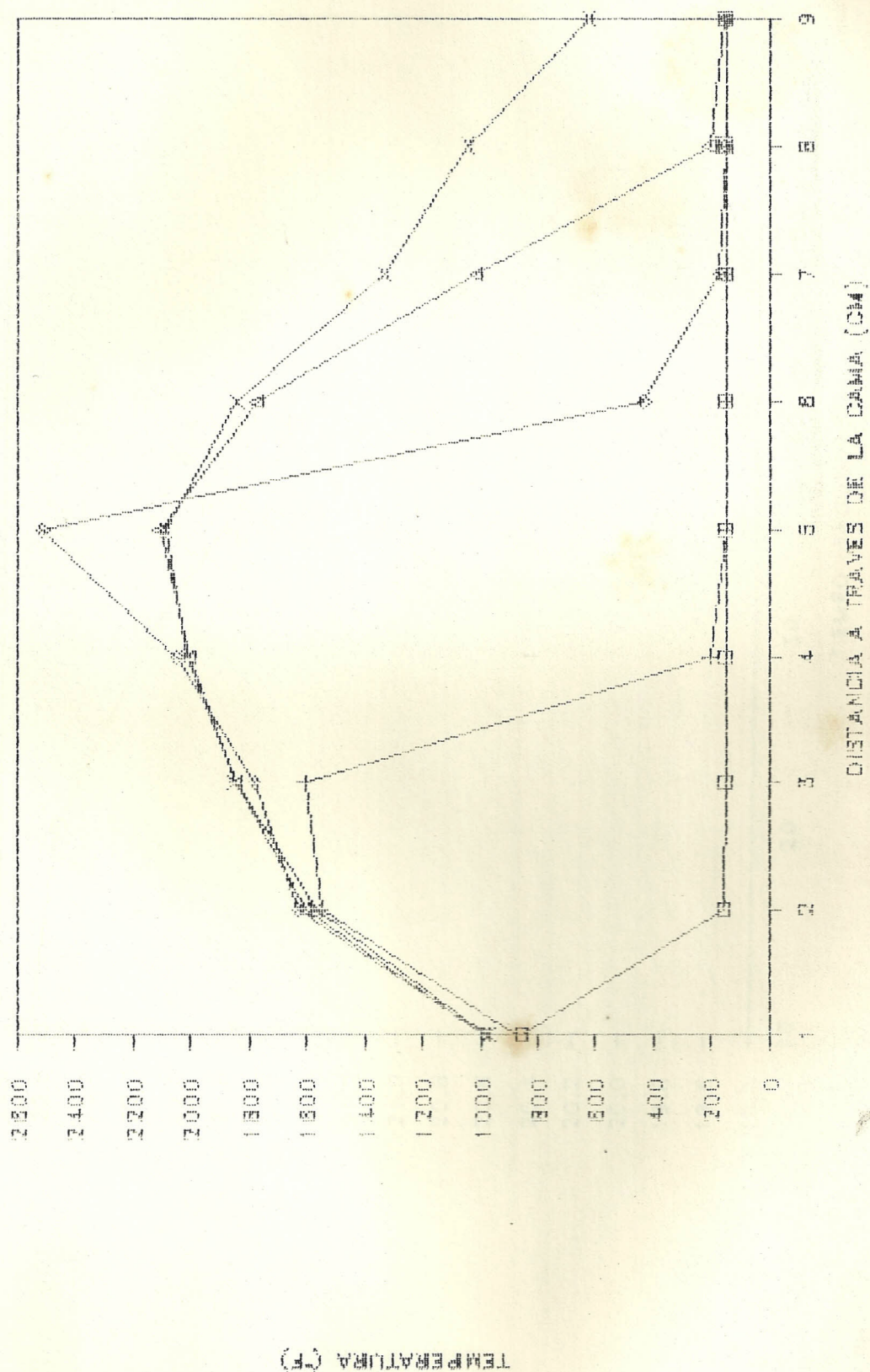


TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA

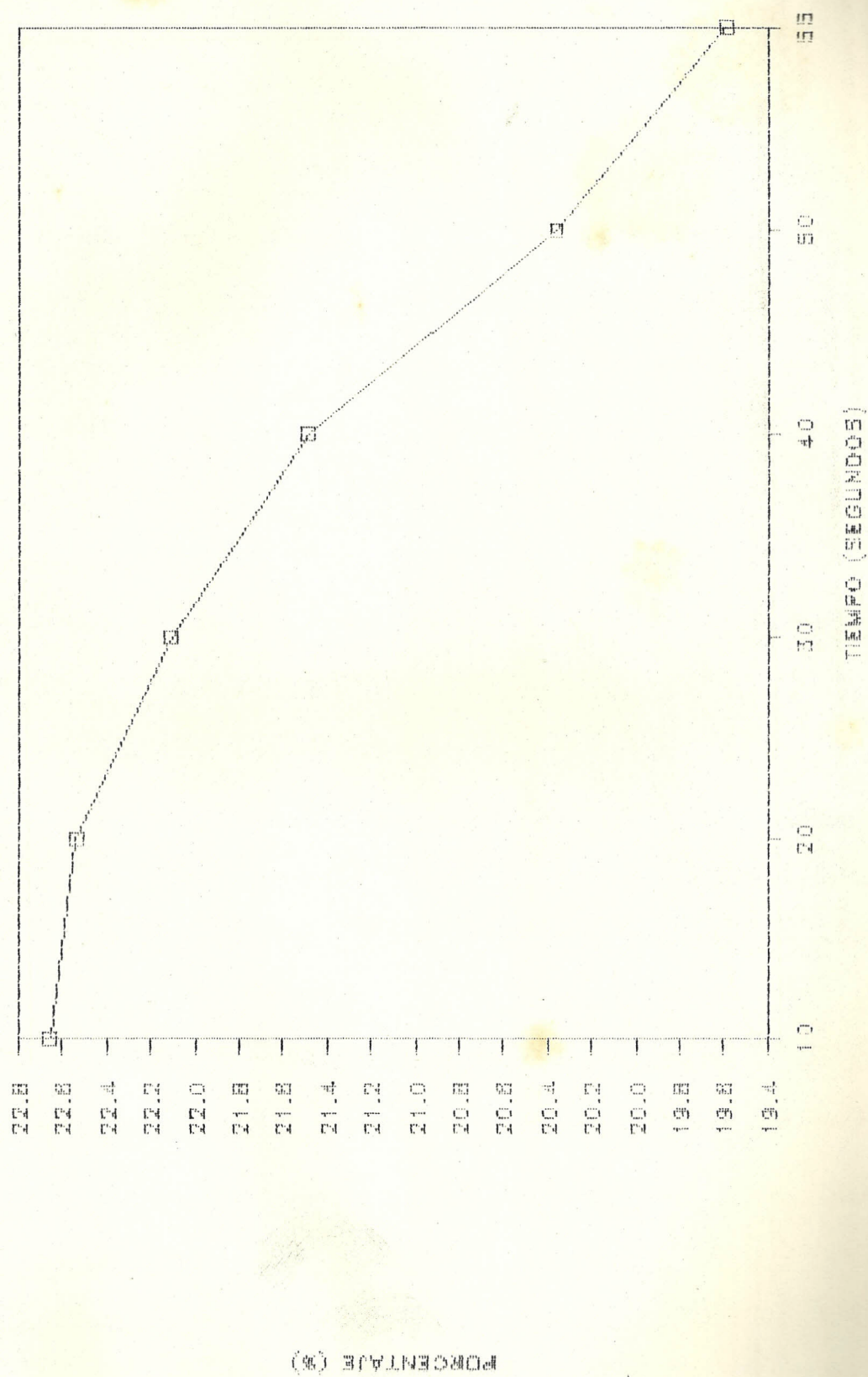
NODOS LATERALES COMBUSTIONADOS

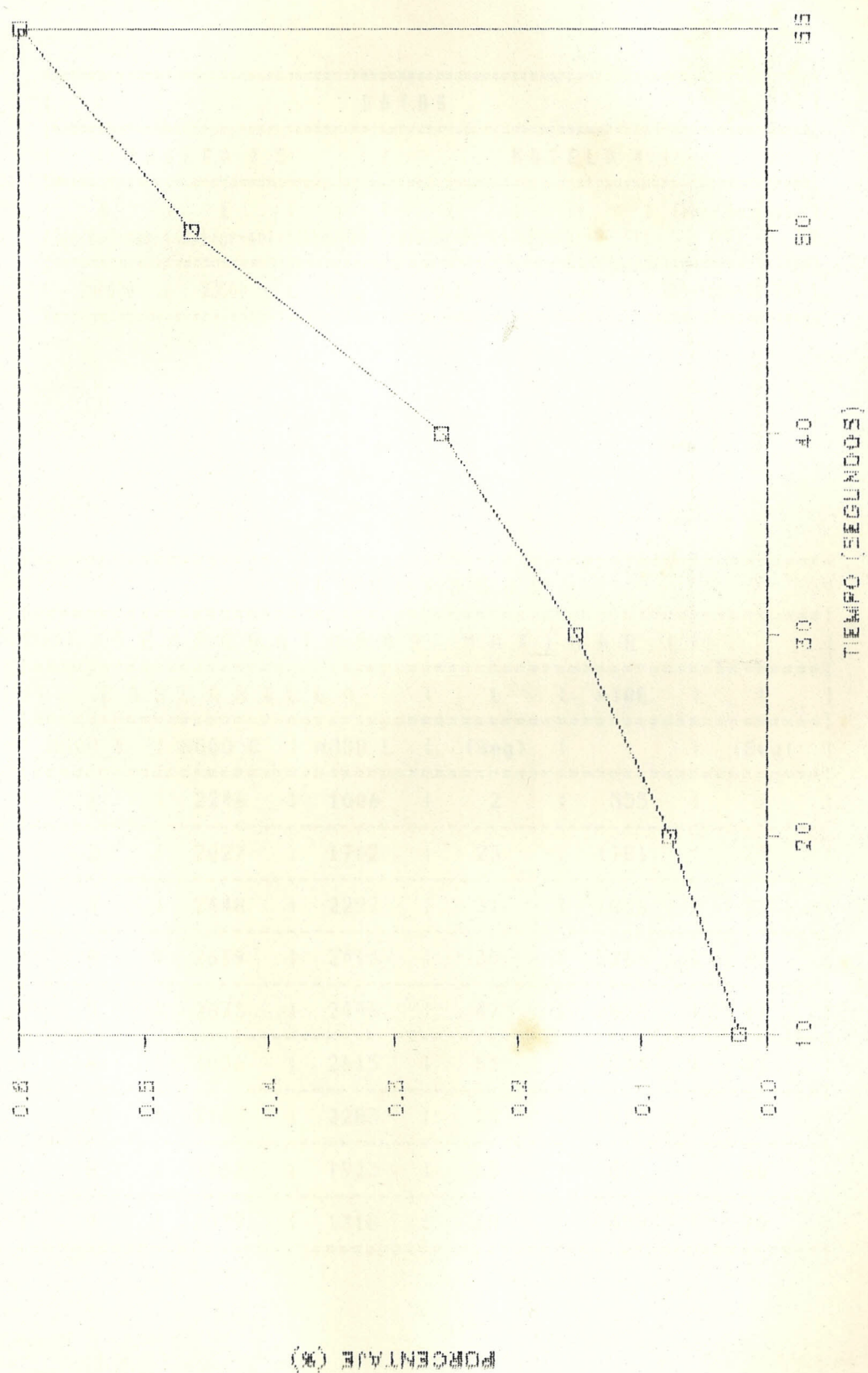


TEMPERATURAS MAXIMAS EN EL AIRE



TASA DE CONSUMO DE OXIGENO

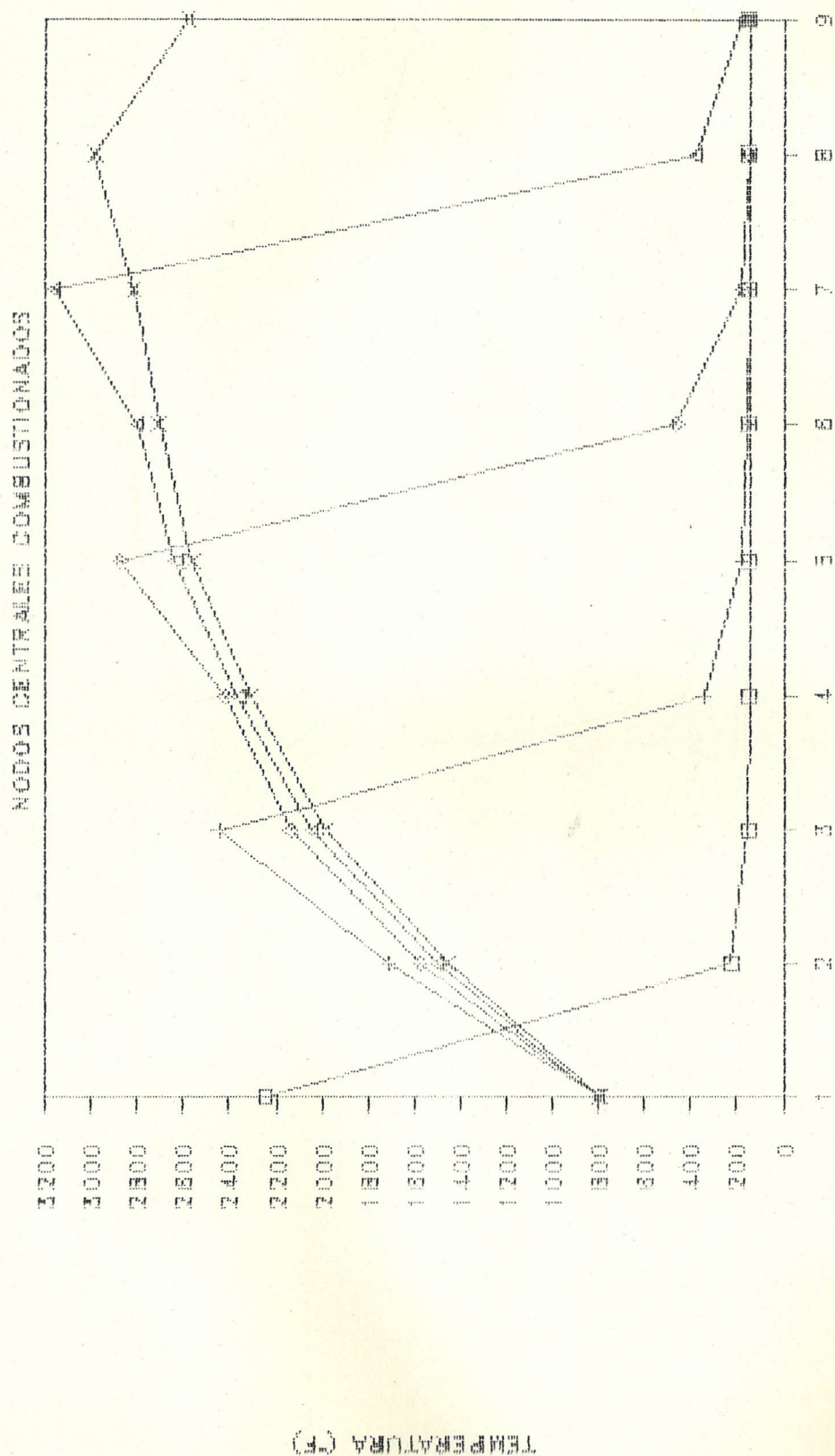


TASA DE GENERACION DE CO₂

DATOS						
PRUEBA # 5				MODELO # 1		
A	E	m	K	Kc	Temp. inicial	
(gr/cm ² -seg)	(Cal/gr-mol)	(Lbm/hr)	(BTU/hr-P-°F)	(BTU/hr-P-°F)	(°F)	
200000	25500	10	0.1	0.02	750-150-150-700	

RESULTADOS						
TEMPERATURAS MAXIMAS (°F)						
CASCARILLA			t	AIRE		
NODO #	NODO C	NODO L	(Seg)			(Seg)
1	2246	1006	2	555		2
2	2027	1762	23	1181		25
3	2448	2297	31	1856		33
4	2619	2413	39	2266		41
5	2873	2486	47	2826		47
6	3006	2615	53	2834		53
7	3165	2283	59	1314		59
8	3162	1923	65	800		66
9	2079	1316	68	489		70

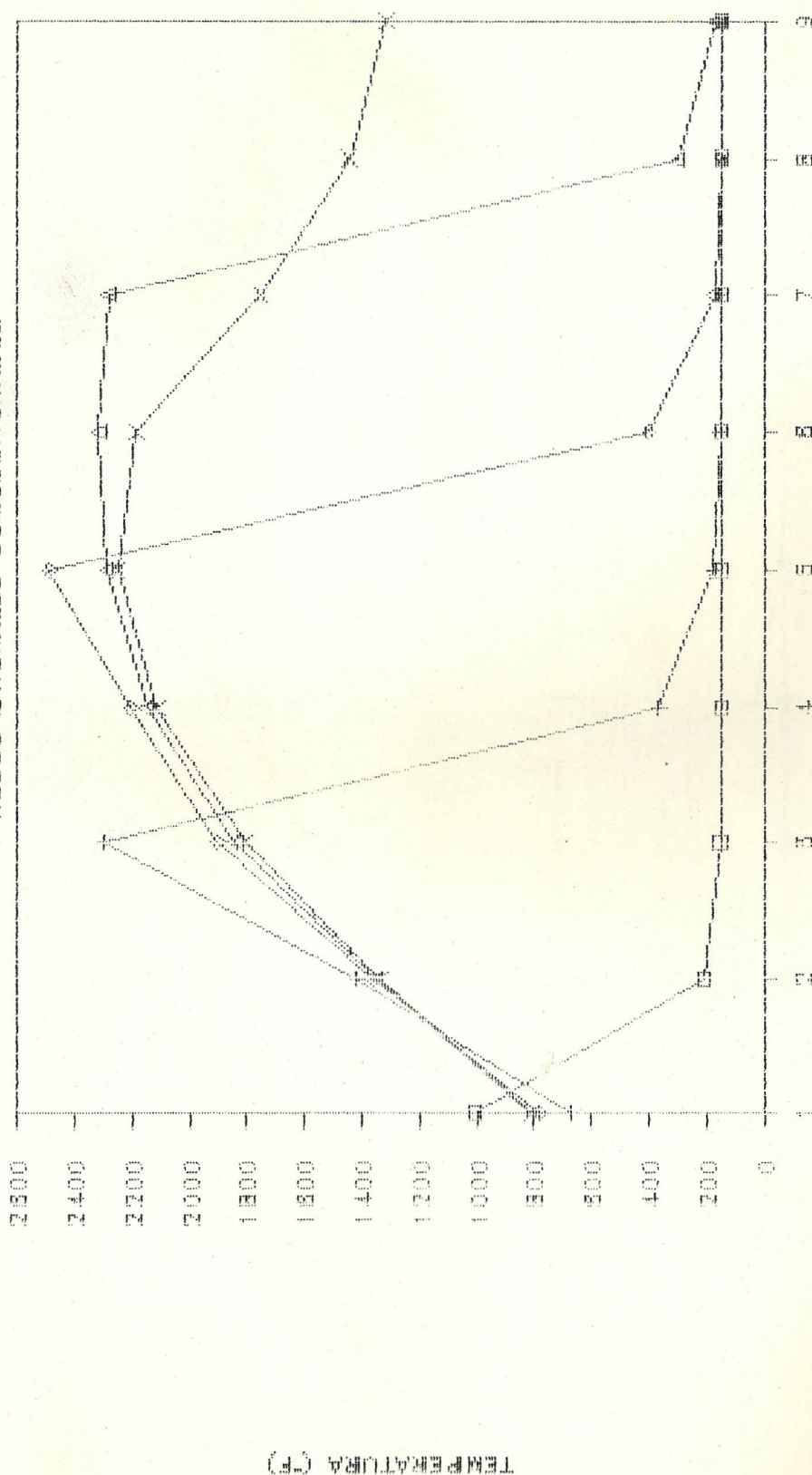
TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA



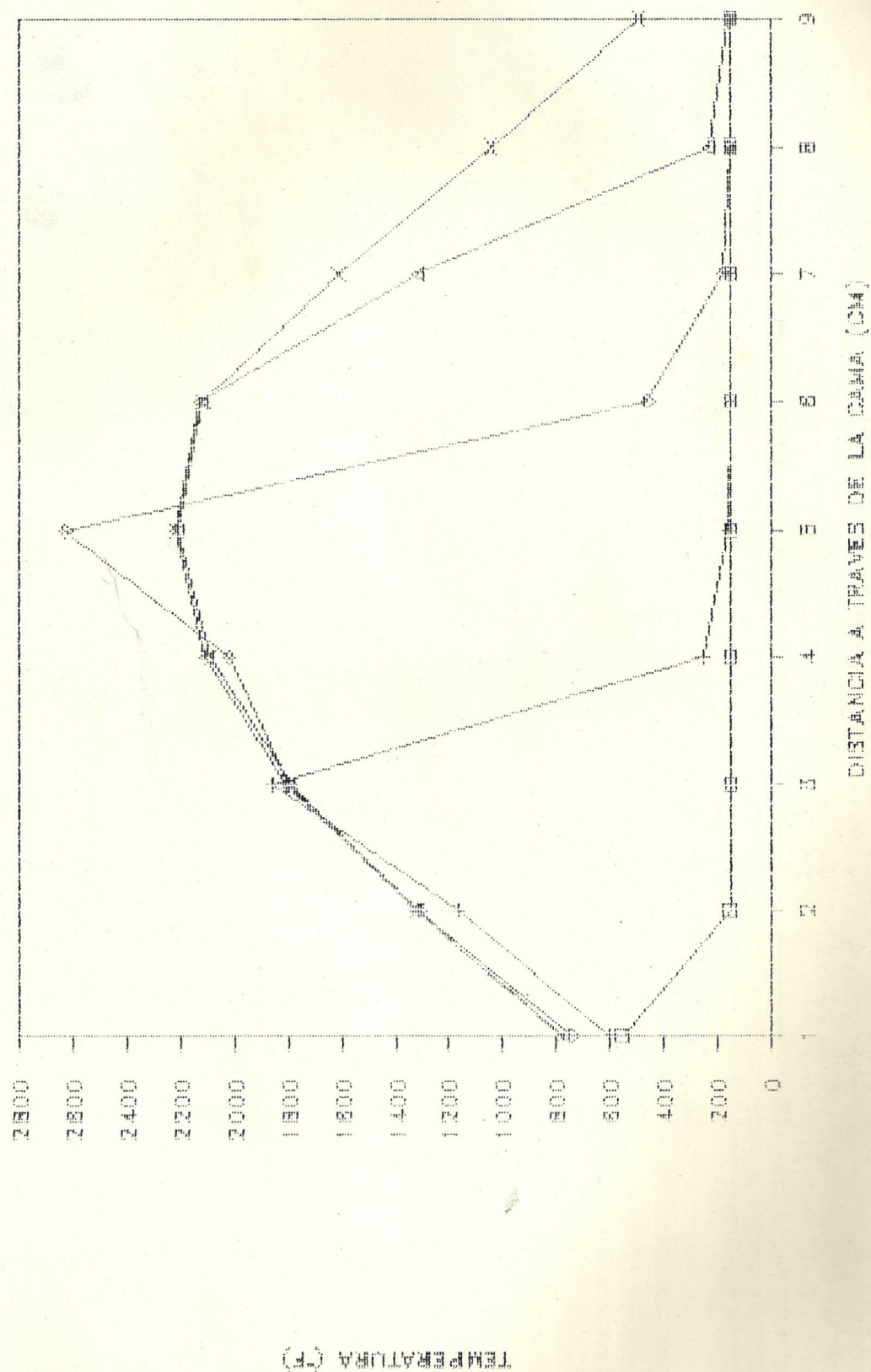
□ NODO 1 (2 SEG.)
 + NODO 3 (21 SEG.)
 Δ NODO 5 (47 SEG.)
 X NODO 7 (59 SEG.)
 * NODO 9 (88 SEG.)

TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA

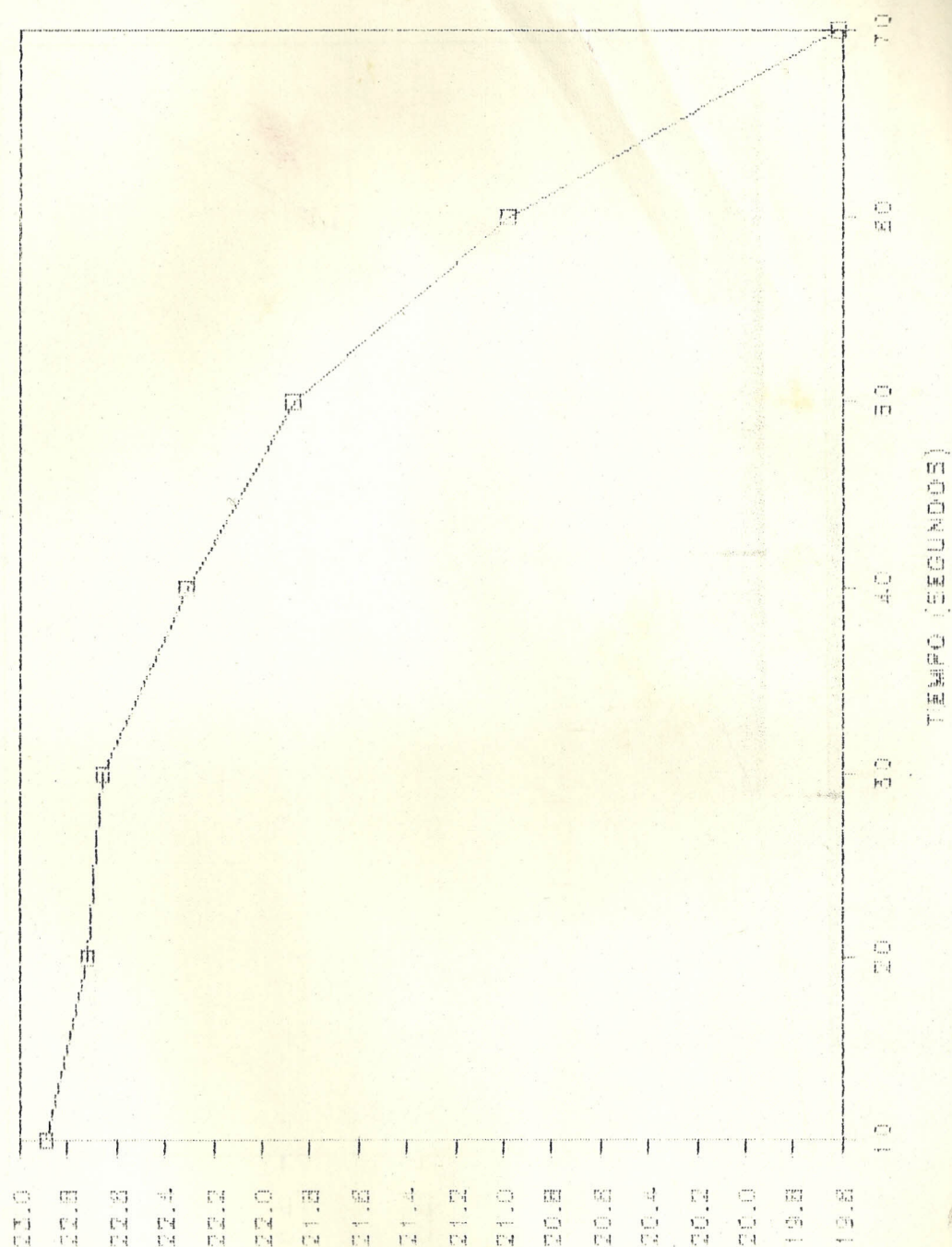
NODOS LATERALES COMBUSTIONADOS



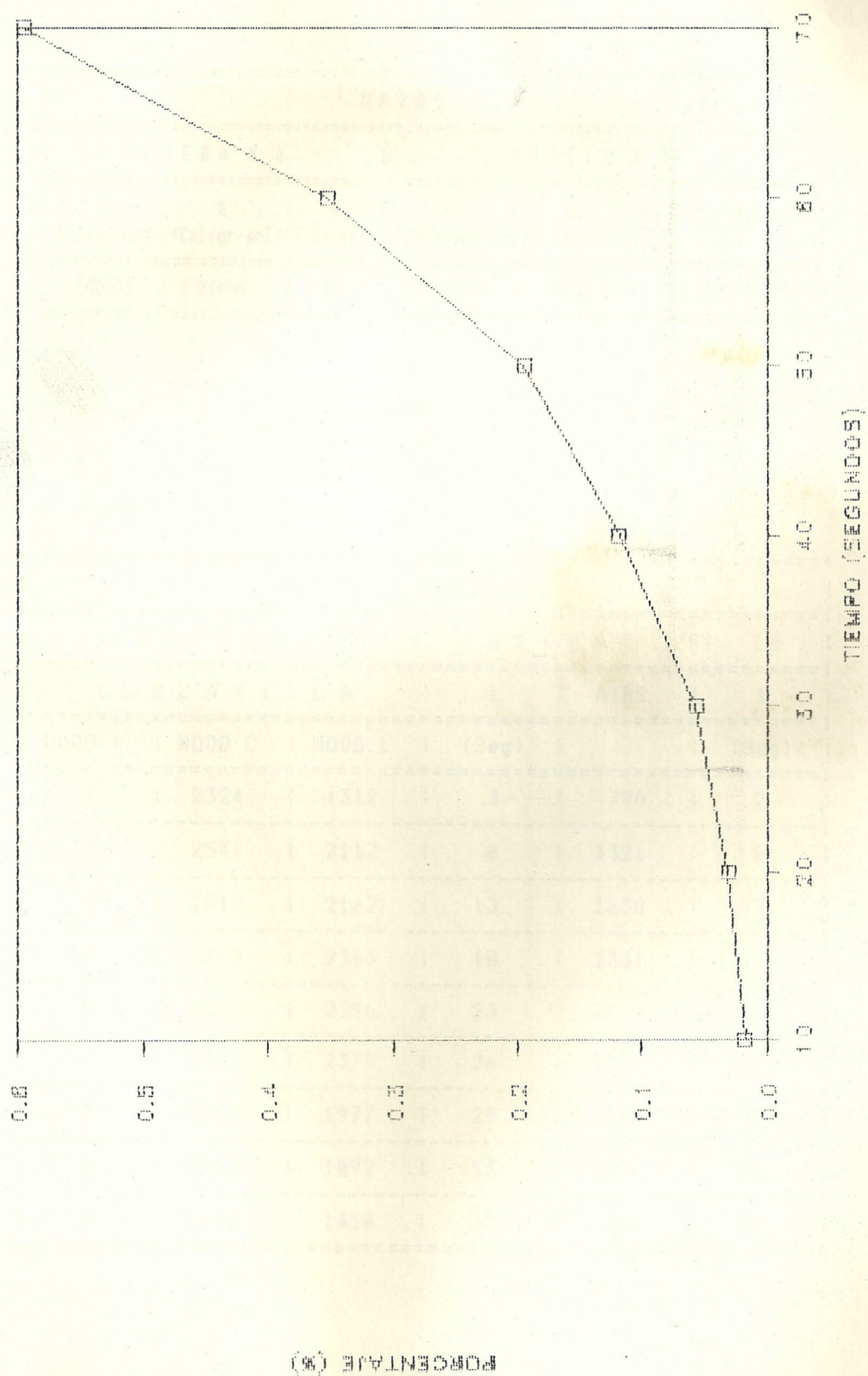
TEMPERATURAS MAXIMAS EN EL AIRE



TASA DE CONSUMO DE CIGARETO



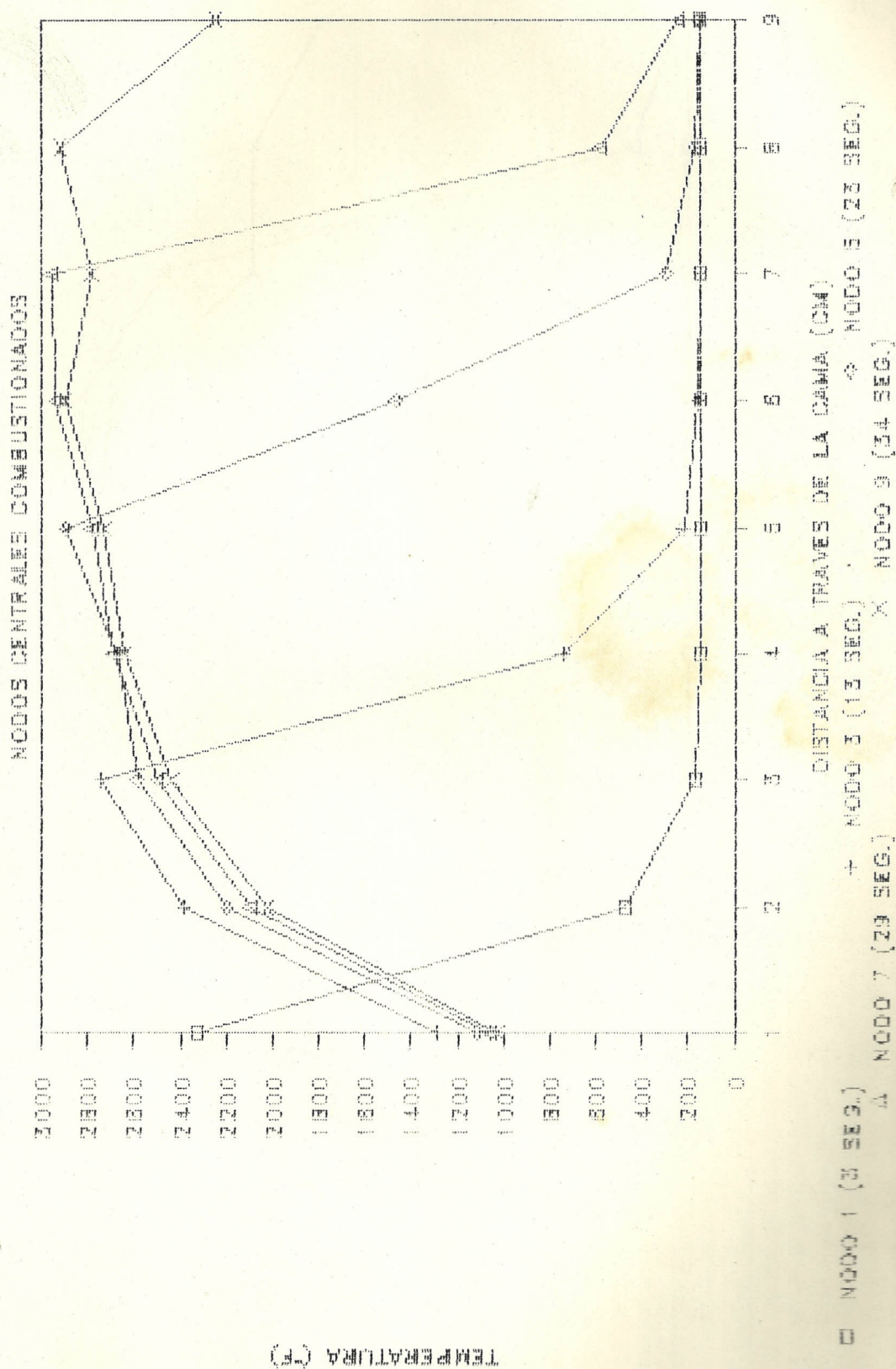
PORCENTAJE (%)

TASA DE GENERACION DE CO₂

DATOS						
PRUEBA # 6				MODELO # 1		
A	E	m	K	Kc	Temp. inicial	
(gr/cm ² -seg)	(Cal/gr-mol)	(Lbm/hr)	(BTU/hr-P-°F)	(BTU/hr-P-°F)	(°F)	
200000	23000	15	0.2	0.02	750-150-150-700	

RESULTADOS						
TEMPERATURAS MAXIMAS (°F)						
CASCARILLA			t	AIRE	t	
NODO #	NODO C	NODO L	(Seg)		(Seg)	
1	2324	1312	3	790	2	
2	2541	2112	8	1321	8	
3	2810	2162	13	1630	12	
4	2868	2363	18	2331	17	
5	2897	2396	23	2424	21	
6	3096	2379	26	1972	25	
7	2959	1977	29	1022	28	
8	3112	1892	33	1201	32	
9	2442	1418	34	375	34	

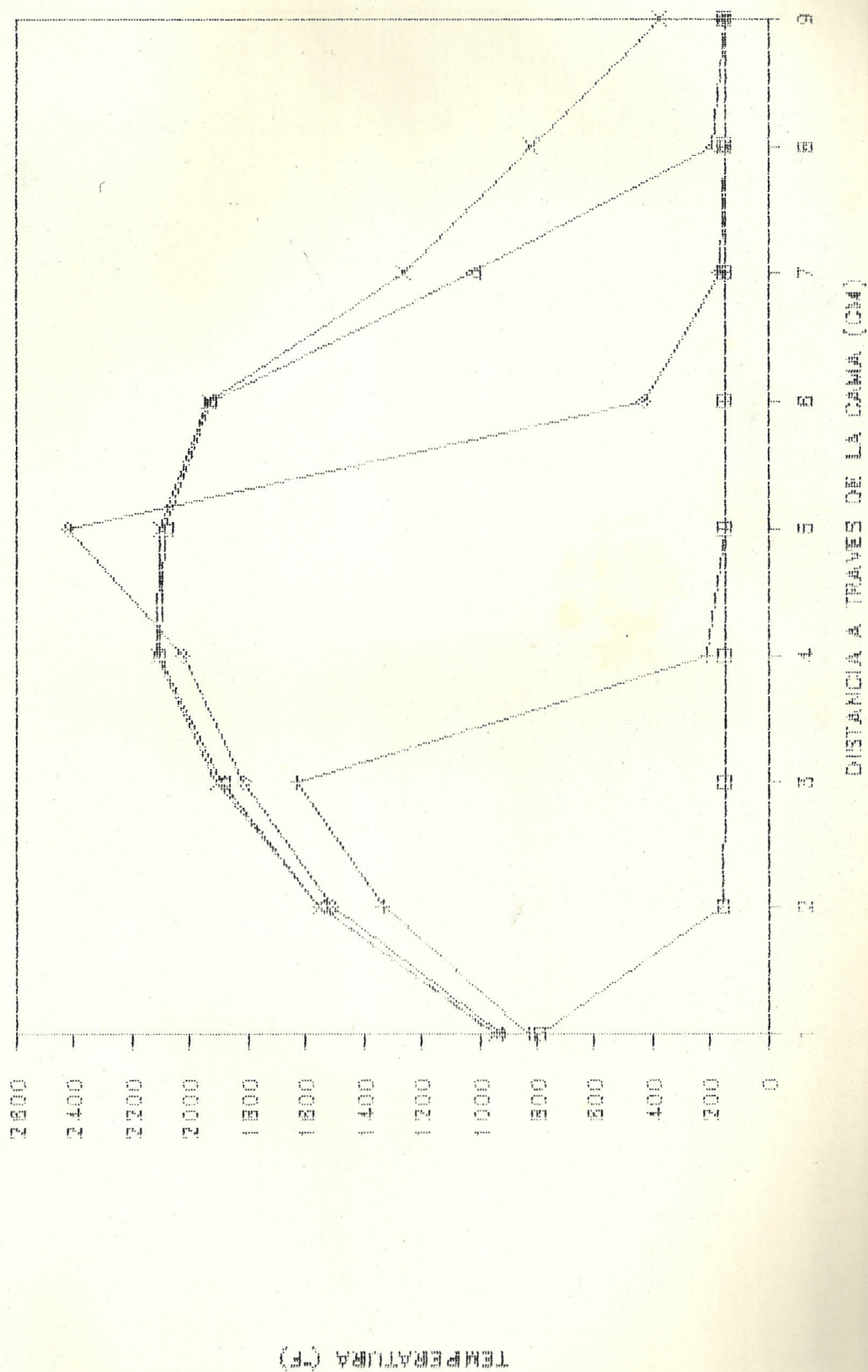
TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA



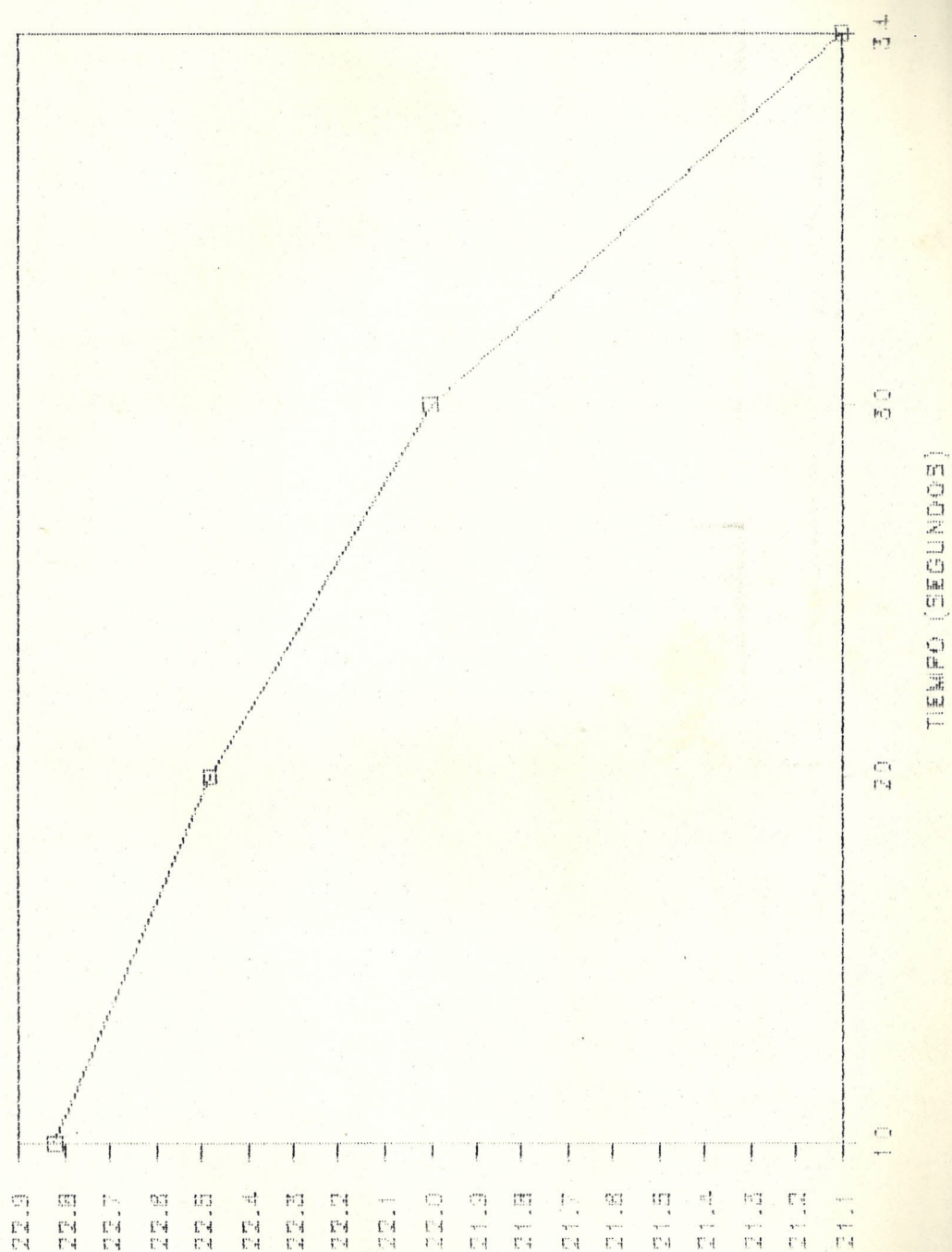
TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA



TEMPERATURAS MAXIMAS EN EL AIRE

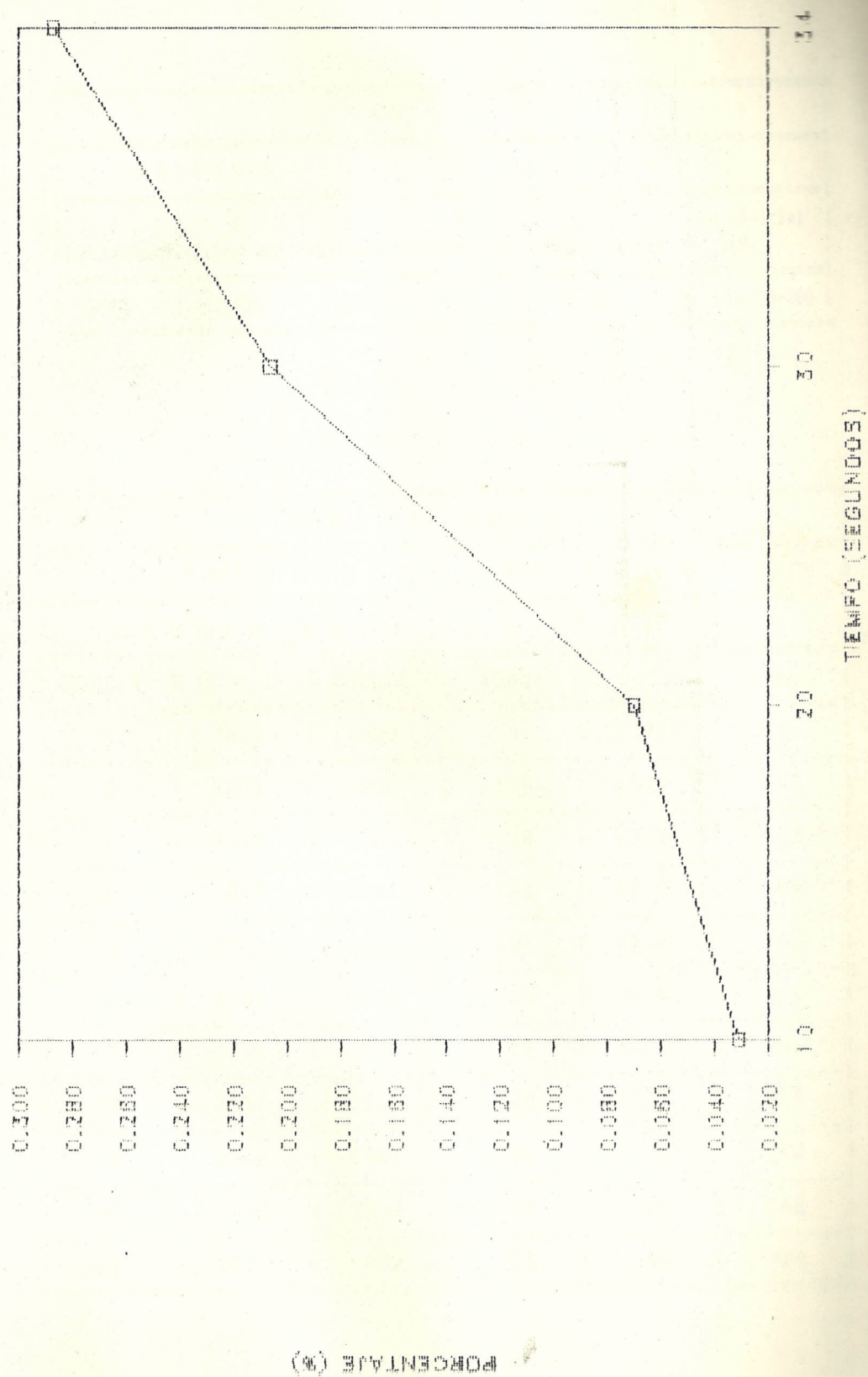


TASA DE CONSUMO DE OXIGENO



PORCENTAJE (%)

TASA DE GENERACION DE CO2

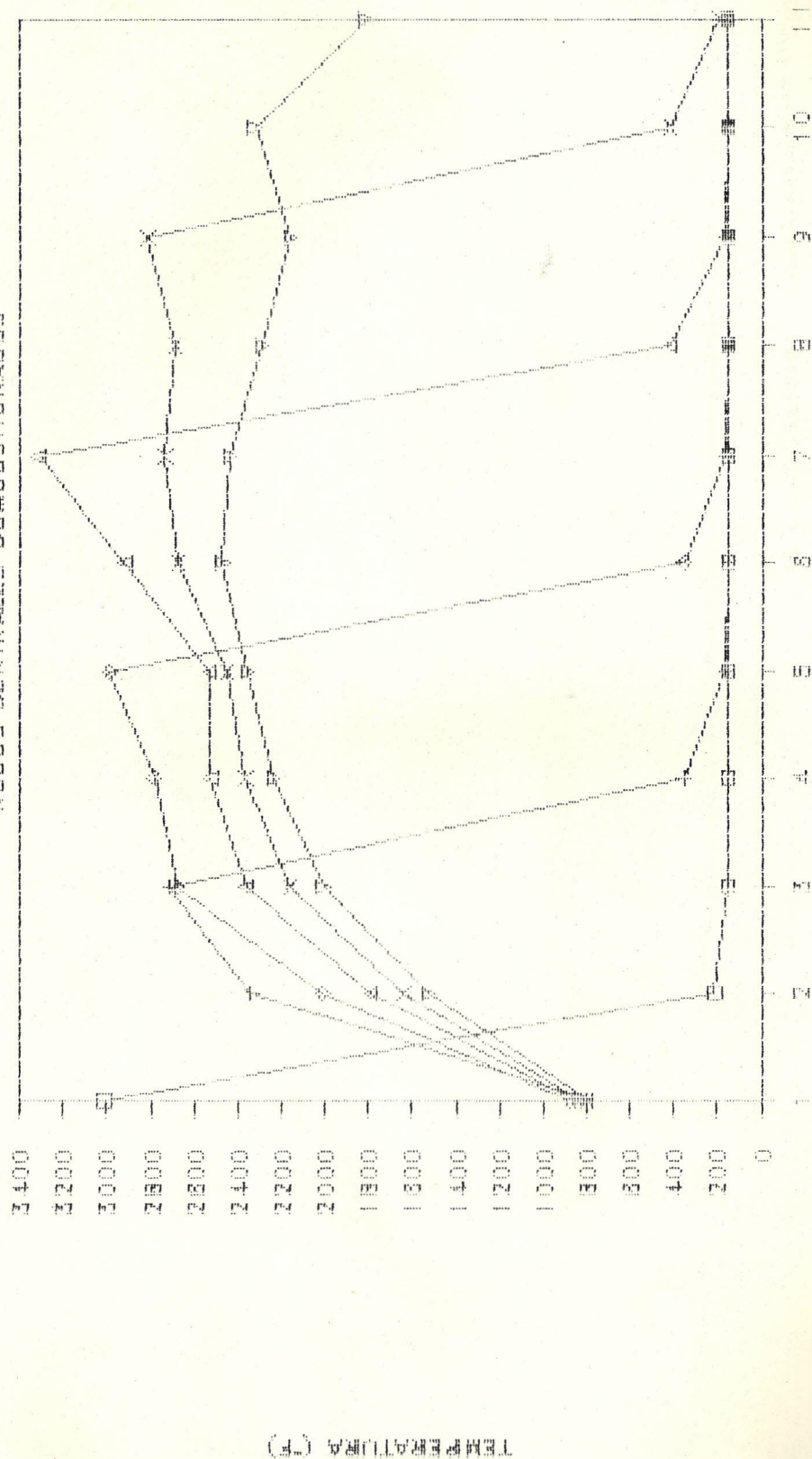


DATOS						
PRUEBA # 1				MODELO # 2		
A	E	m	K	Kc	Temp. inicial	
(gr/cm ² -seg)	(Cal/gr-mol)	(Lbm/hr)	(BTU/hr-P-°F)	(BTU/hr-P-°F)	(°F)	
69000	25100	20	0.1	0.03	950-150-150-700	

RESULTADOS						
TEMPERATURAS MAXIMAS (°F)						
CASCARILLA			t	AIRE		
NODO #	NODO C	NODO L	(Seg)			(Seg)
1	3010	1828	4	1092		4
2	2673	1836	118	1650		112
3	2714	2305	138	1965		142
4	2871	2281	160	2162		164
5	2987	2298	184	2317		190
6	3239	2538	214	2578		216
7	3316	2421	236	1878		236
8	3151	2206	260	1357		264
9	2816	1961	288	1196		298
10	2585	1709	330	1268		348
11	1806	992	350	946		520

TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA

NODOS CENTRALES COMBUSTIONADOS



DISTANCIA A TRAVES DE LA CAMA (CM)

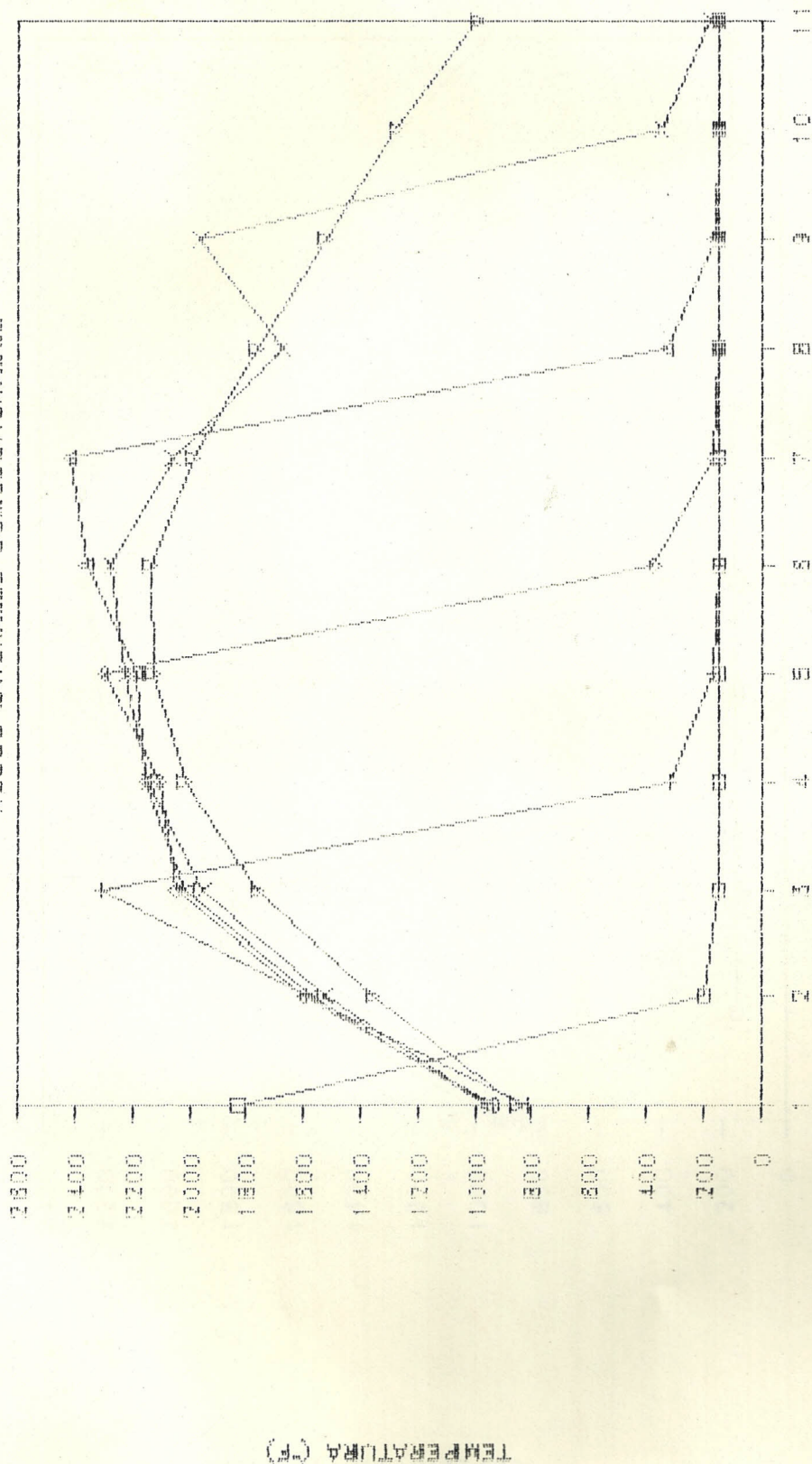
□ NODO 1 (4 SEG.)
 × NODO 7 (200 SEG.)

+ NODO 5 (184 SEG.)
 △ NODO 9 (288 SEG.)
 ▽ NODO 11 (350 SEG.)

TEMPERATURA (°F)

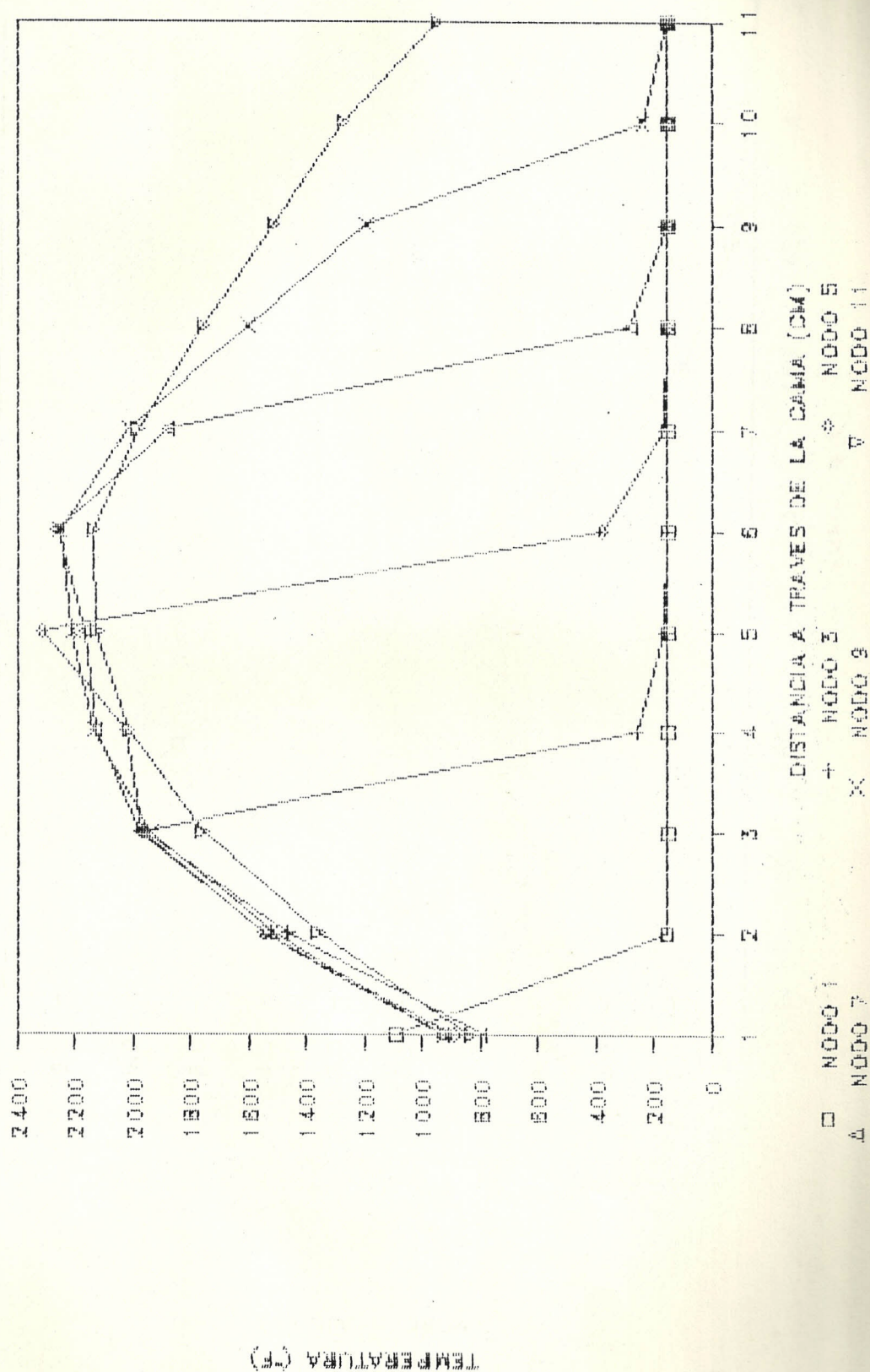
TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCAJILLA

NODOS LATERALES COMBUSTIONADOS

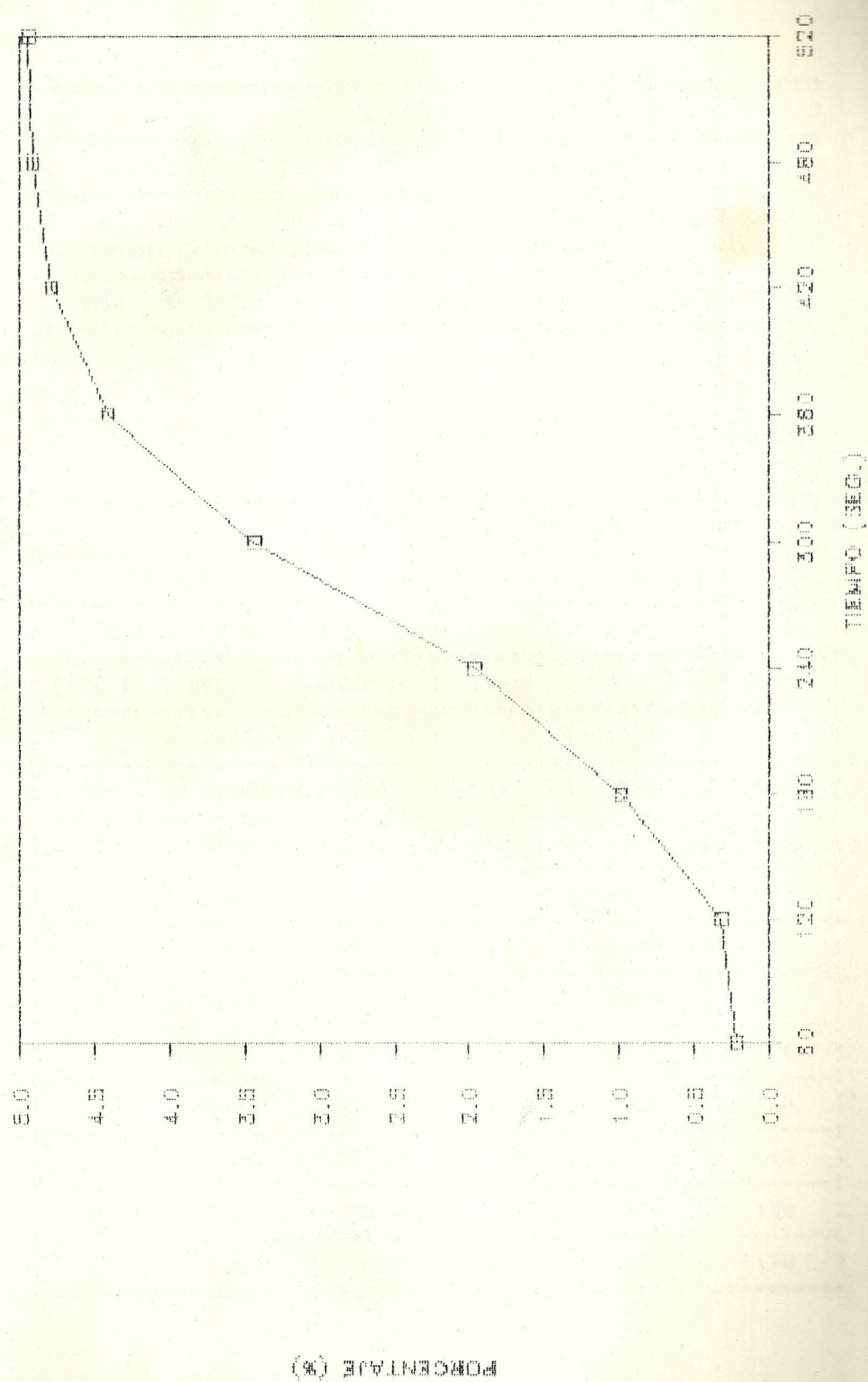


□ NODO 1 (4 SEG.)
 △ NODO 3 (142 SEG.)
 × NODO 7 (298 SEG.)
 ○ NODO 11 (520 SEG.)

TEMPERATURAS MAXIMAS EN EL AIRE



TASA DE GENERACION DE CO2

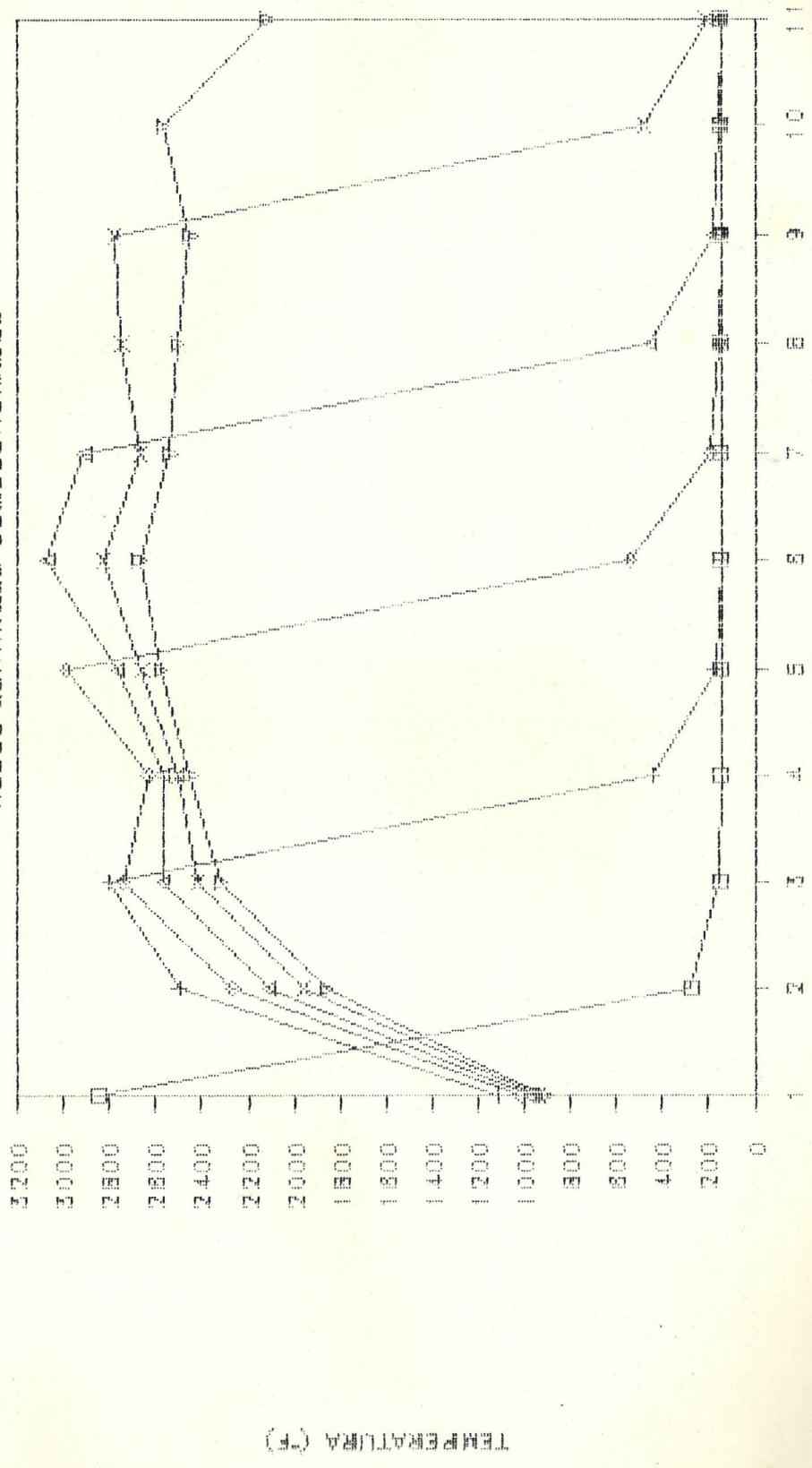


DATOS						
PRUEBA # 2				MODELO # 2		
A	E	m	K	Kc	Temp. inicial	
(gr/cm ² -seg)	(Cal/gr-mol)	(Lbm/hr)	(BTU/hr-P-°F)	(BTU/hr-P-°F)	(°F)	
69000	25100	20	0.2	0.03	950-150-150-700	

RESULTADOS						
TEMPERATURAS MAXIMAS (°F)						
CASCARILLA			t	AIRE		t
NODO #	NODO C	NODO L	(Seg)			(Seg)
1	2647	1757	4	1077		4
2	2794	2323	26	1578		30
3	2806	2421	42	1939		44
4	2815	2433	56	2184		58
5	2987	2422	74	2629		74
6	3073	2471	90	2243		90
7	2911	2545	102	1672		104
8	3007	2270	118	1151		120
9	2779	2228	134	1121		140
10	2675	1938	154	970		160
11	2116	1098	162	756		178

TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA

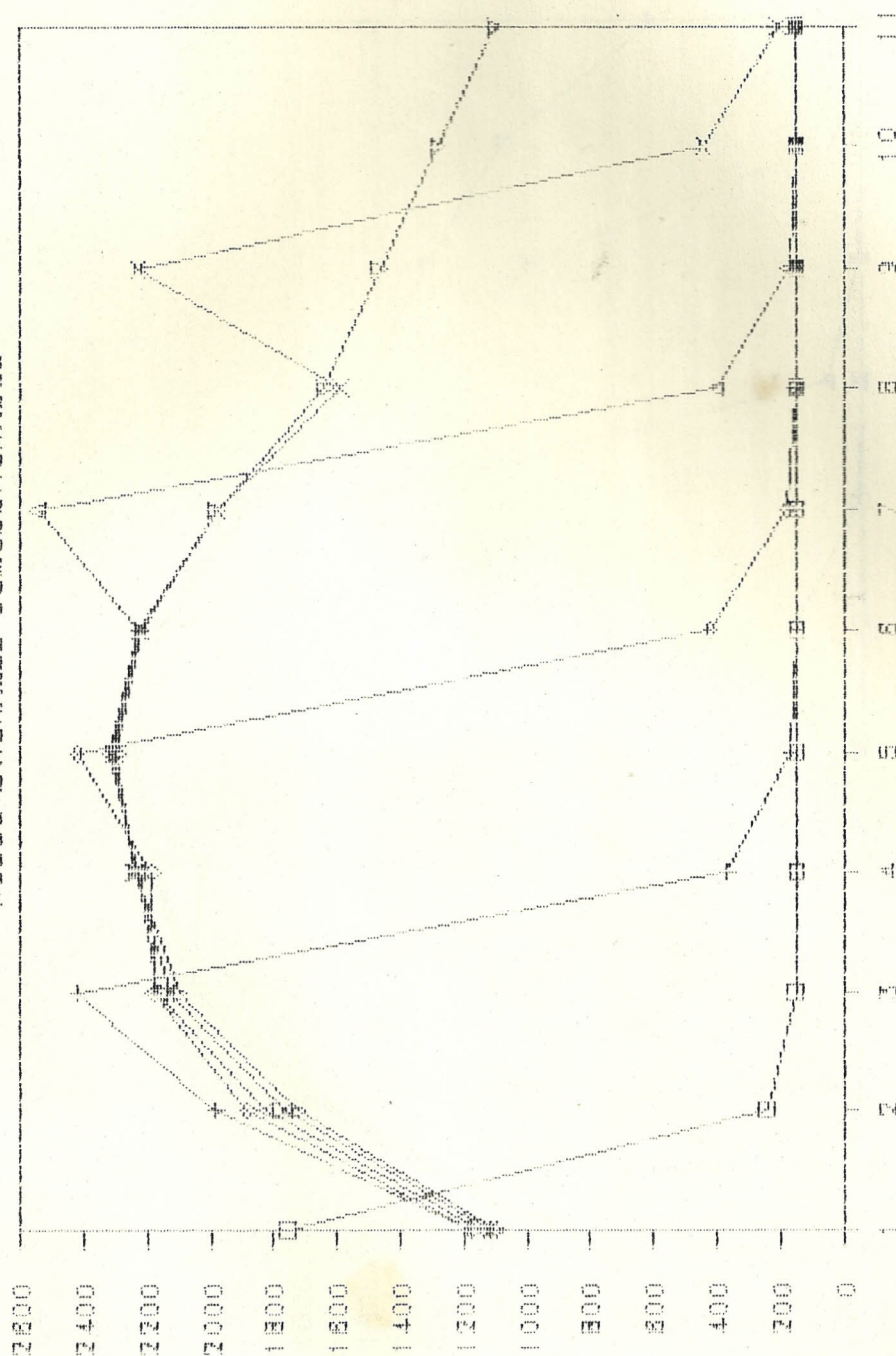
NODOS CENTRALES COMBUSTIONADOS



DISTANCIA A TRAVES DE LA CAMA (CM)
 + NODO 3 (42 SEG.)
 x NODO 5 (74 SEG.)
 □ NODO 7 (102 SEG.)
 △ NODO 9 (134 SEG.)

TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA

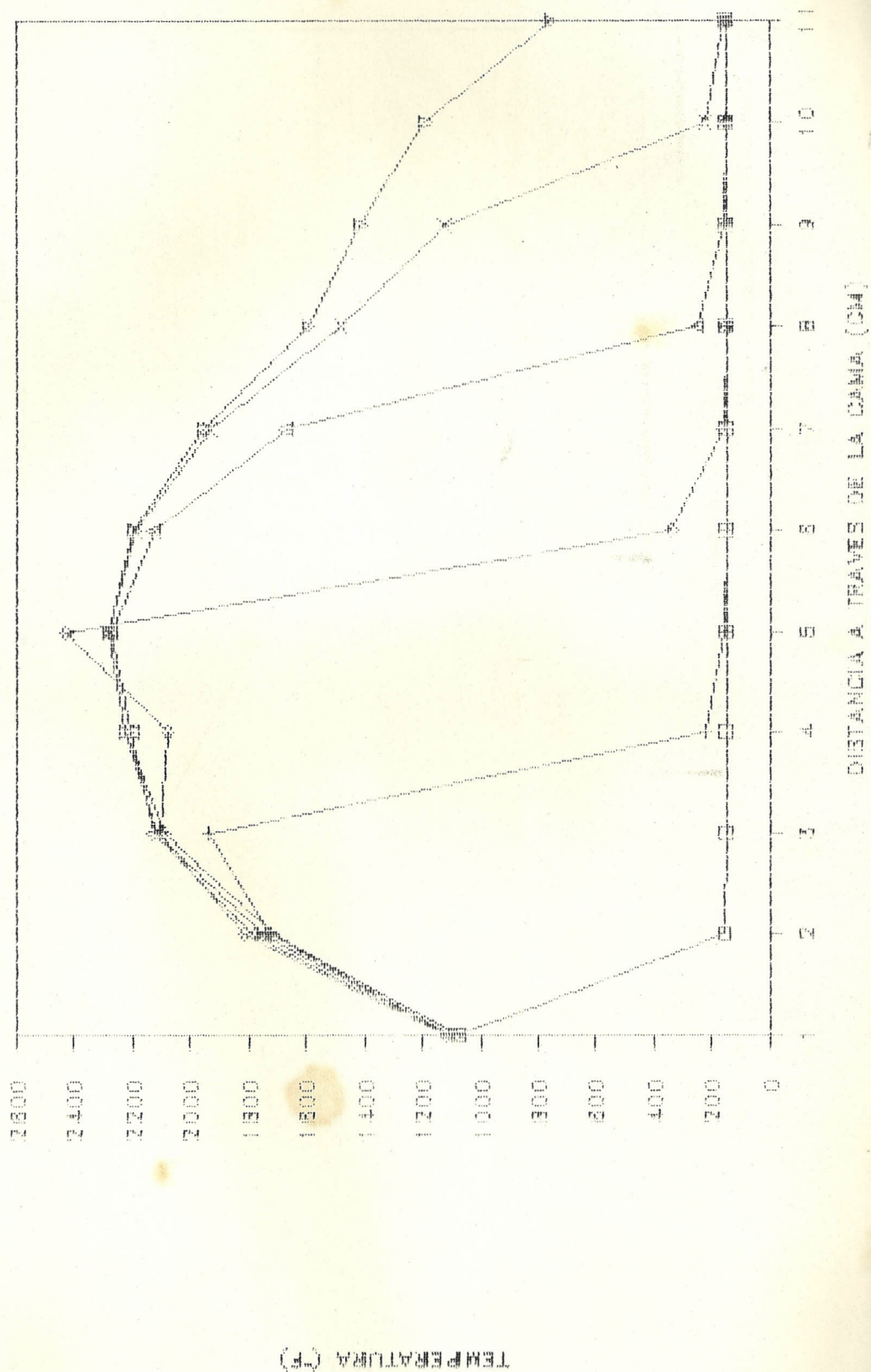
NODOS LATERALES COMBUSTIONADOS



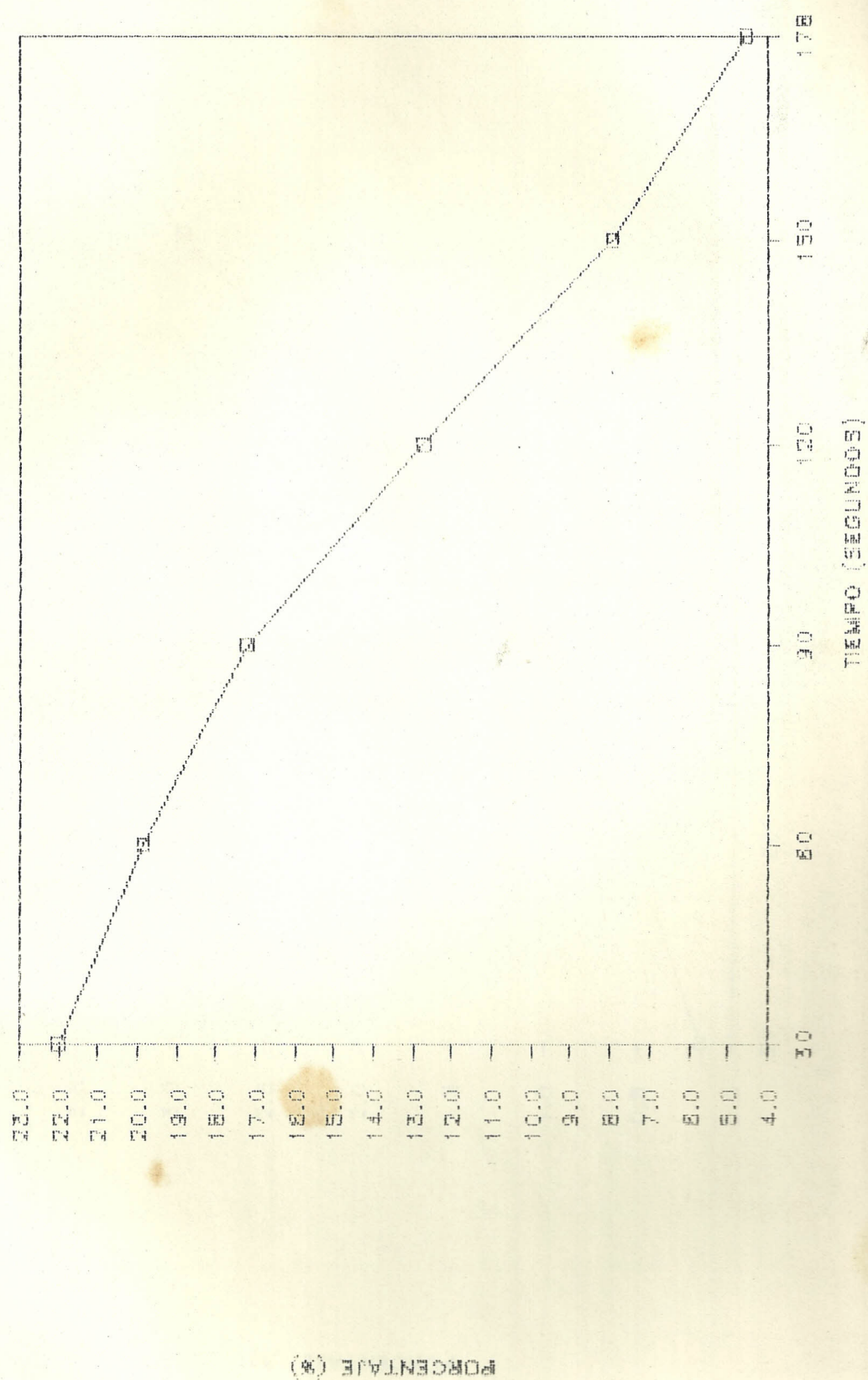
DISTANCIA A TRAVES DE LA CANA (CM)

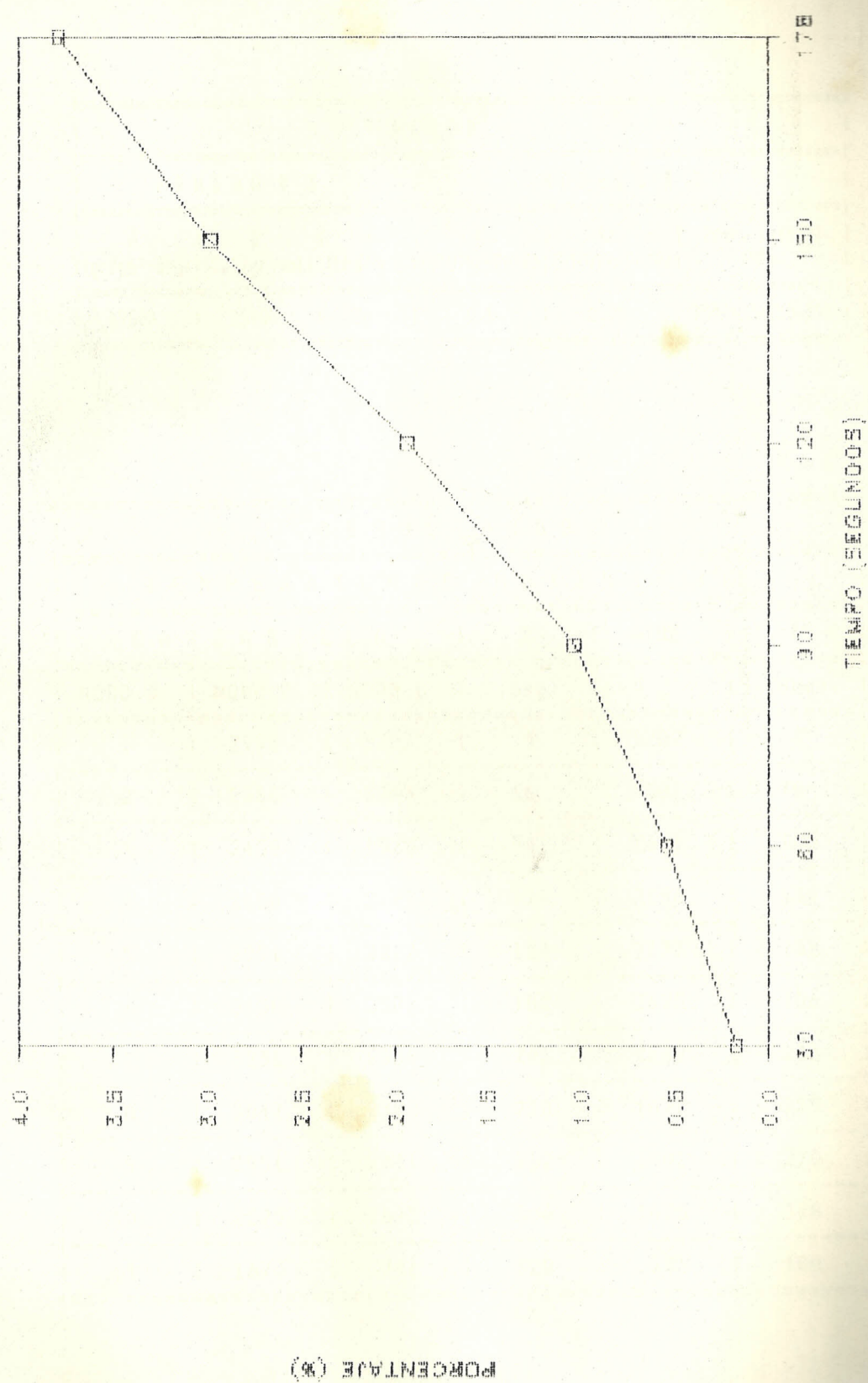
□ NODO 1 (4 SEG.)
 + NODO 3 (44 SEG.)
 x NODO 9 (140 SEG.)

TEMPERATURAS MAXIMAS EN EL AIRE



TASA DE CONSUMO DE OXIGENO

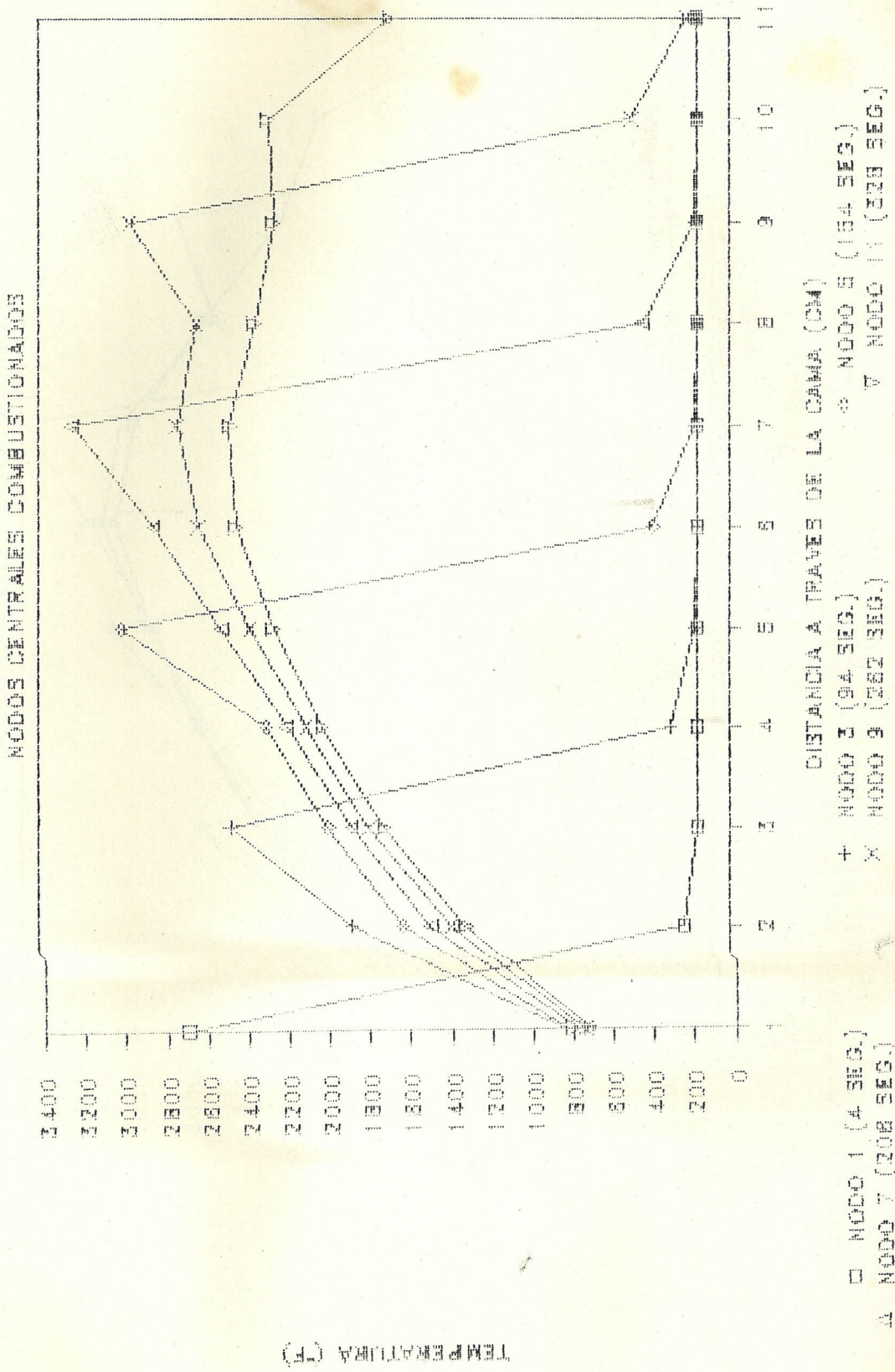


TASA DE GENERACION DE CO₂

D A T O S						
P R U E B A # 3				M O D E L O # 2		
A	E	m	K	Kc	Temp. inicial	
(gr/cm ² -seg)	(Cal/gr-mol)	(Lbm/hr)	(BTU/hr-P-°F)	(BTU/hr-P-°F)	(°F)	
69000	25100	30	0.1	0.03	950-150-150-700	

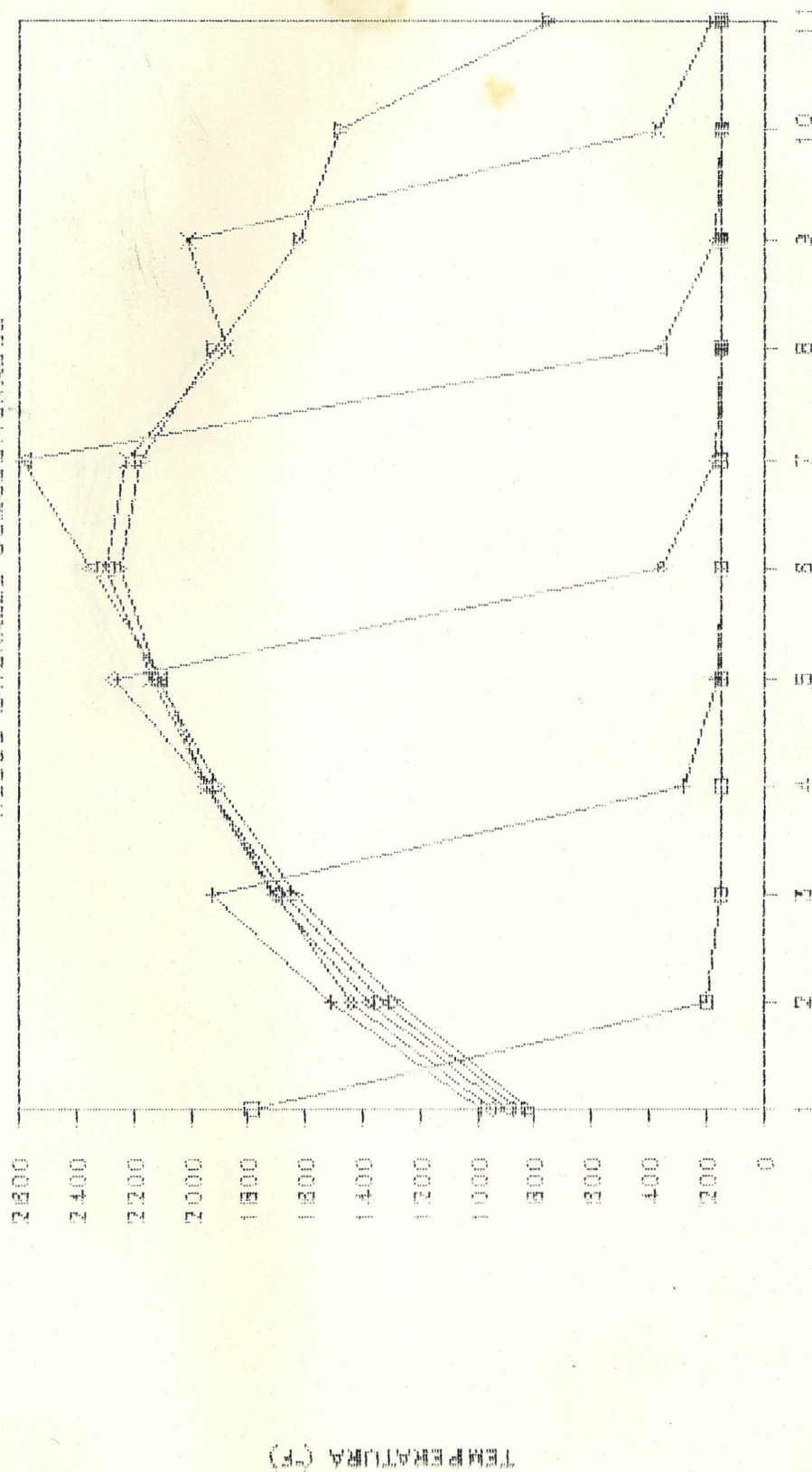
R E S U L T A D O S						
T E M P E R A T U R A S M A X I M A S (°F)						
C A S C A R I L L A			t	A I R E		
NODO #	NODO C	NODO L	(Seg)			(Seg)
1	2992	1787	4	1282		4
2	2266	1863	66	1507		70
3	2456	1923	94	1661		100
4	2650	2229	124	2186		130
5	2991	2272	154	2173		158
6	3150	2587	182	2625		186
7	3236	2588	206	2262		206
8	3047	2382	230	1677		234
9	2951	2011	262	1401		270
10	2525	1675	306	1435		328
11	1673	746	328	646		400

TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA



TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA

NODOS LATERALES COMBUSTIONADOS



DISTANCIA A TRAVES DE LA CAMA (CM)

□ NODO 1 (4 SEG.)

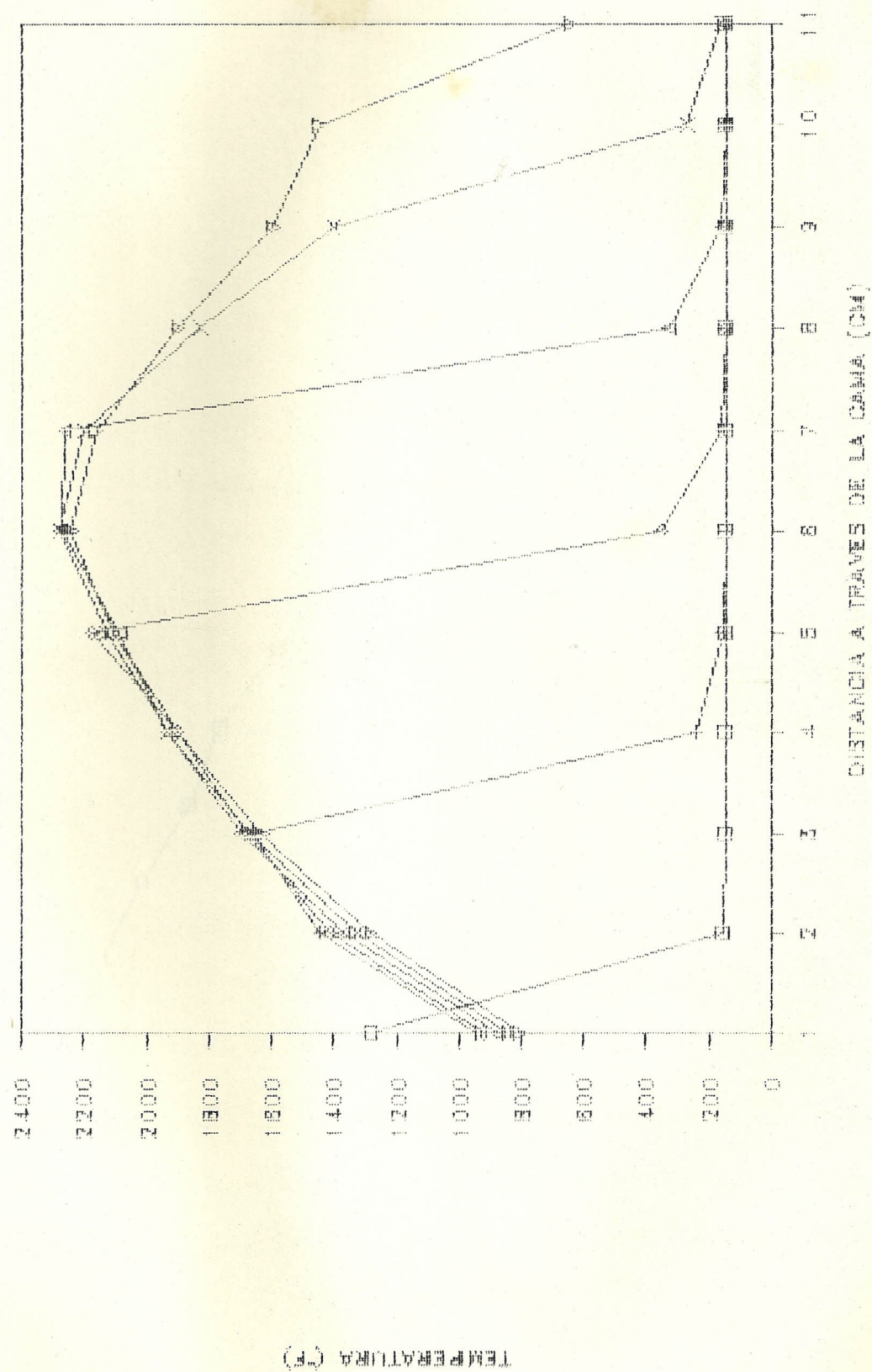
+ NODO 2 (100 SEG.)

○ NODO 5 (188 SEG.)

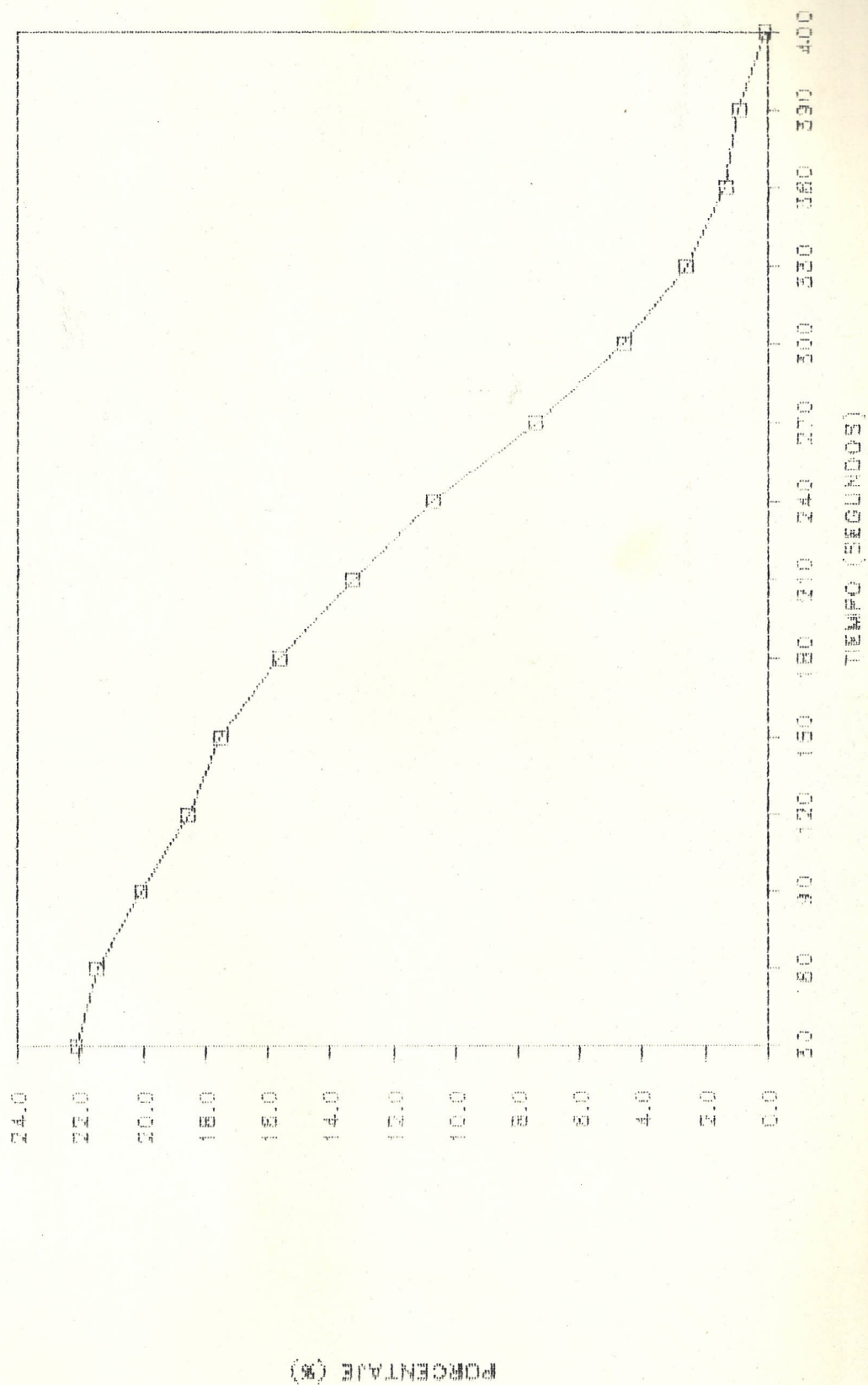
△ NODO 7 (208 SEG.)

× NODO 3 (270 SEG.)

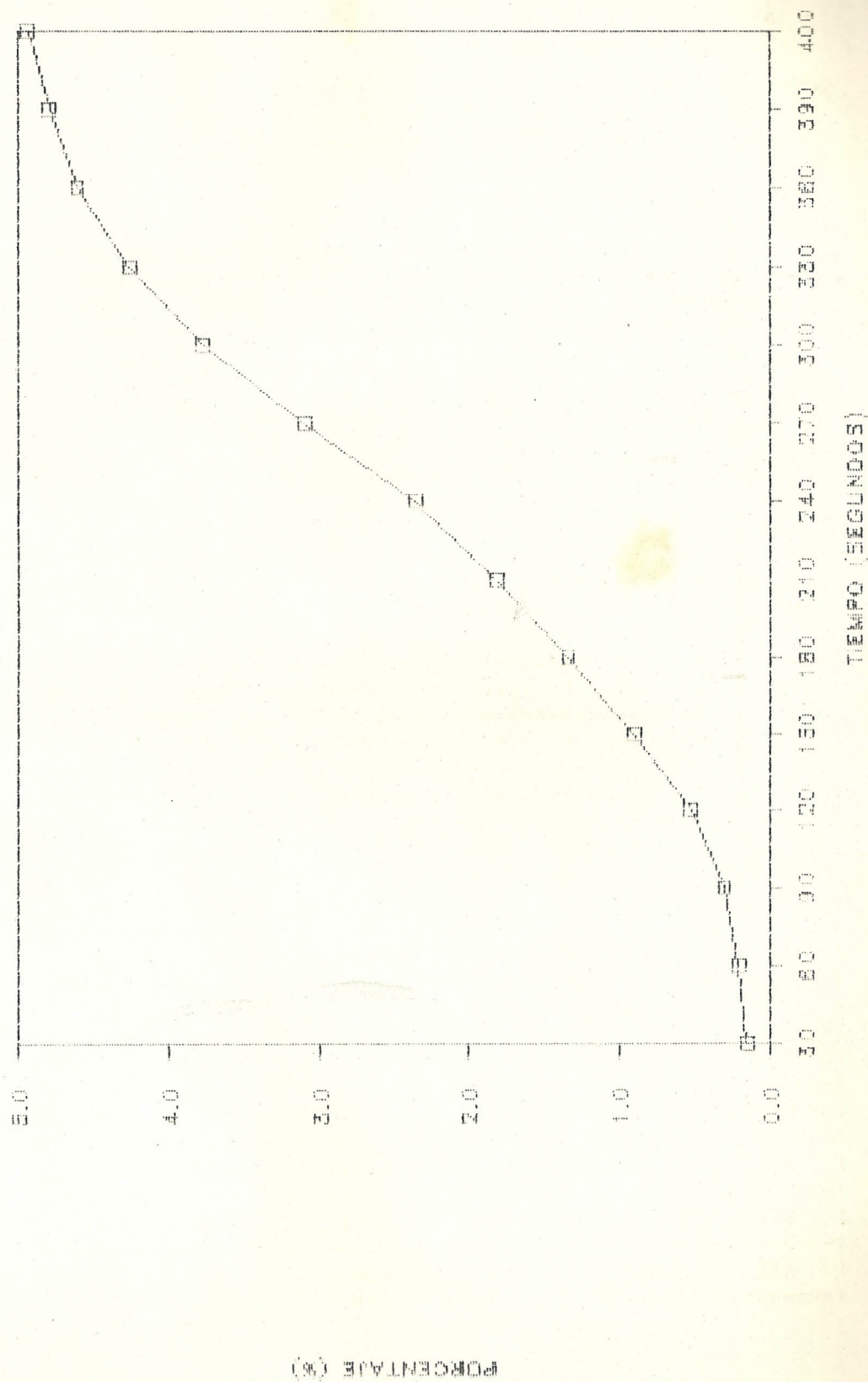
▽ NODO 11 (400 SEG.)



TASA DE CONSUMO DE OXIGENO



TASA DE GENERACION DE CO₂

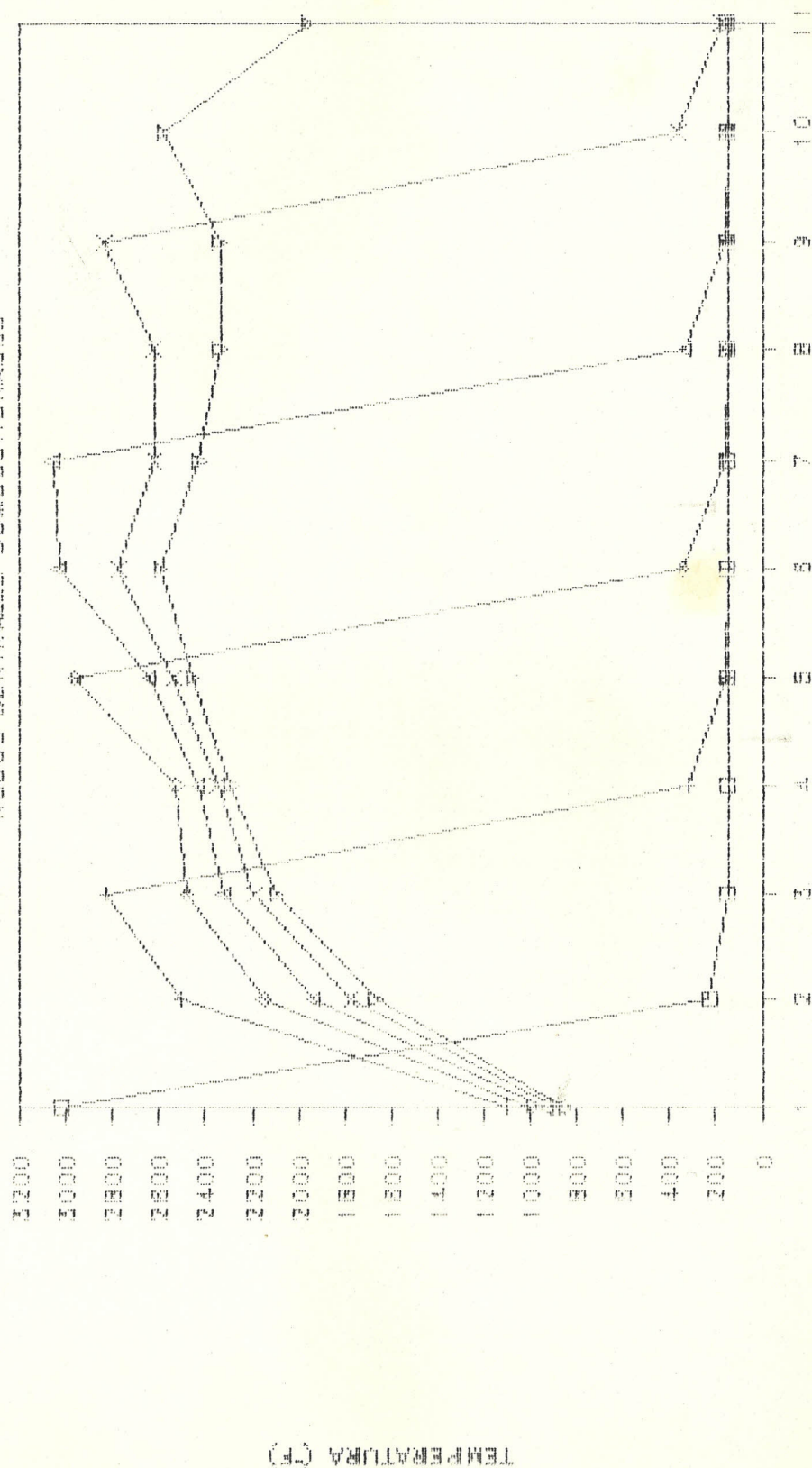


D A T O S						
P R U E B A # 4				M O D E L O # 2		
A	E	m	K	Kc	Temp. inicial	
(gr/cm ² -seg)	(Cal/gr-mol)	(Lbm/hr)	(BTU/hr-P-°F)	(BTU/hr-P-°F)	(°F)	
69000	22000	20	0.1	0.03	950-150-150-700	

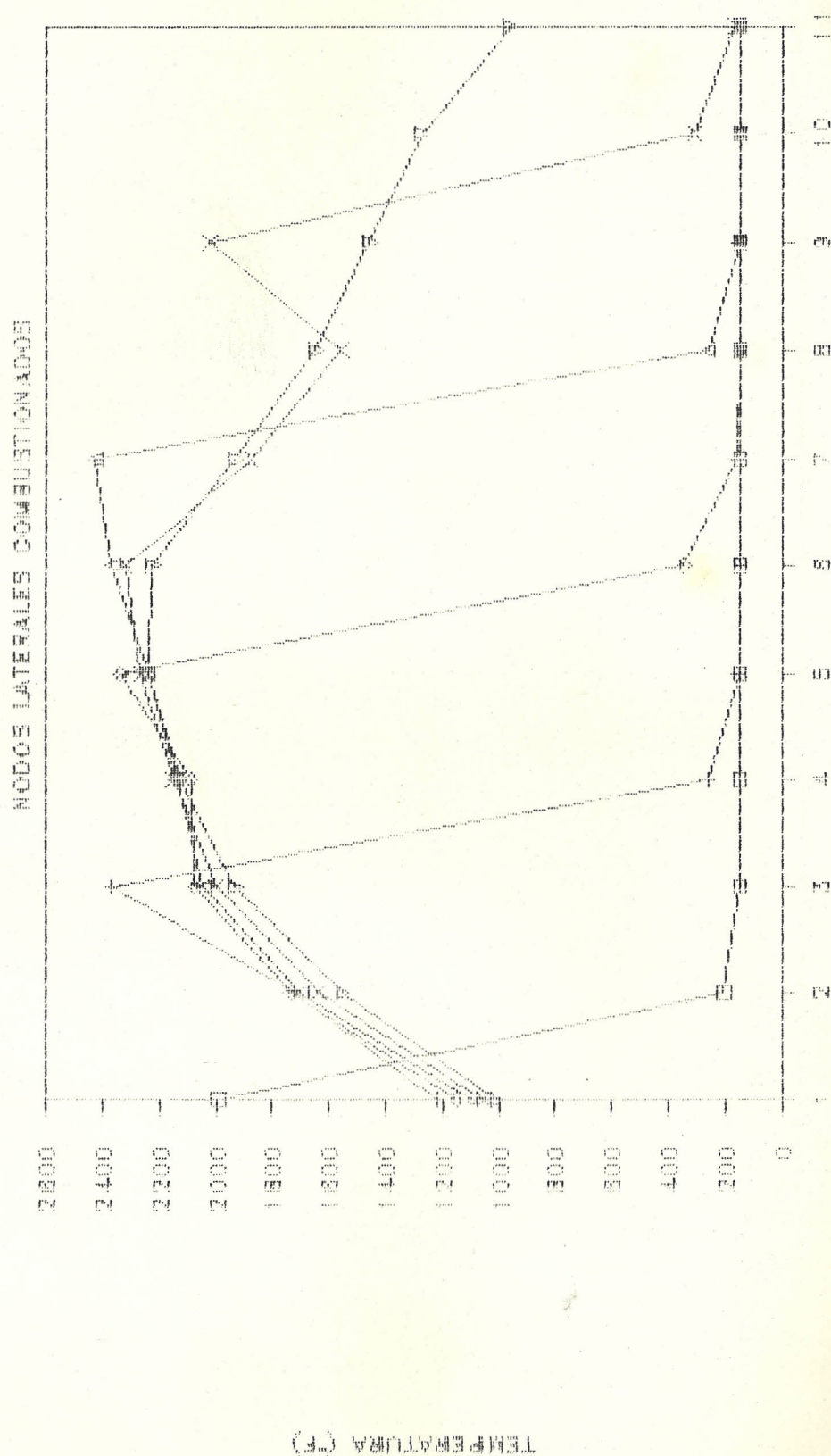
R E S U L T A D O S						
T E M P E R A T U R A S M A X I M A S (°F)						
C A S C A R I L L A			t	A I R E		
NODO #	NODO C	NODO L	(Seg)			(Seg)
1	3023	1989	4	1223		4
2	2750	2000	28	1432		32
3	2829	2365	48	2061		52
4	2899	2335	66	2228		70
5	2962	2334	88	2405		92
6	3276	2609	110	2655		110
7	3056	2125	126	1554		126
8	2982	2099	146	1217		150
9	2836	2018	168	1131		176
10	2778	1773	196	1070		206
11	1960	958	208	820		256

TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA

NODOS CENTRALES COMBUSTIONADOS



TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA



TEMPERATURAS MAXIMAS EN EL AIRE

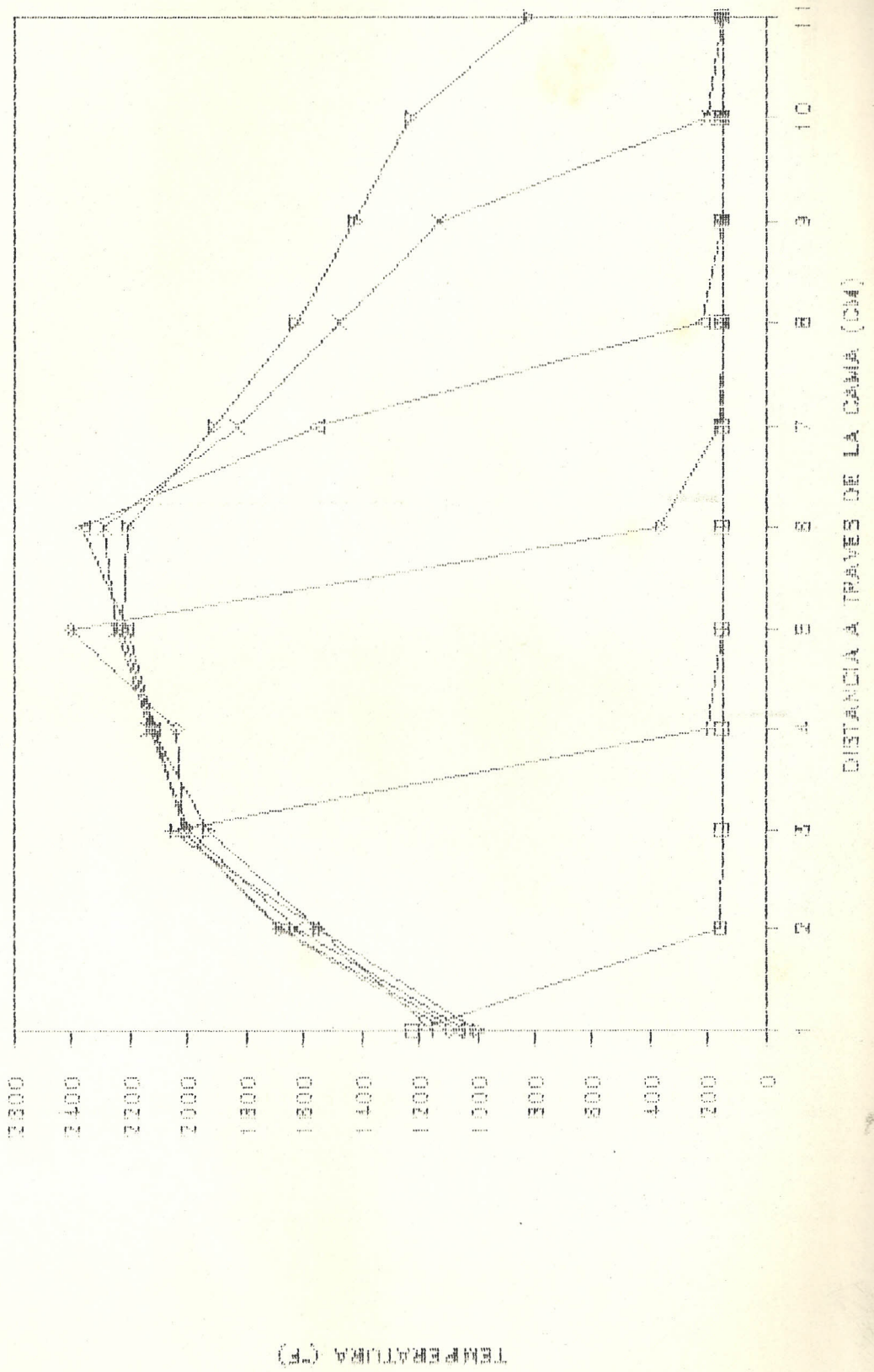
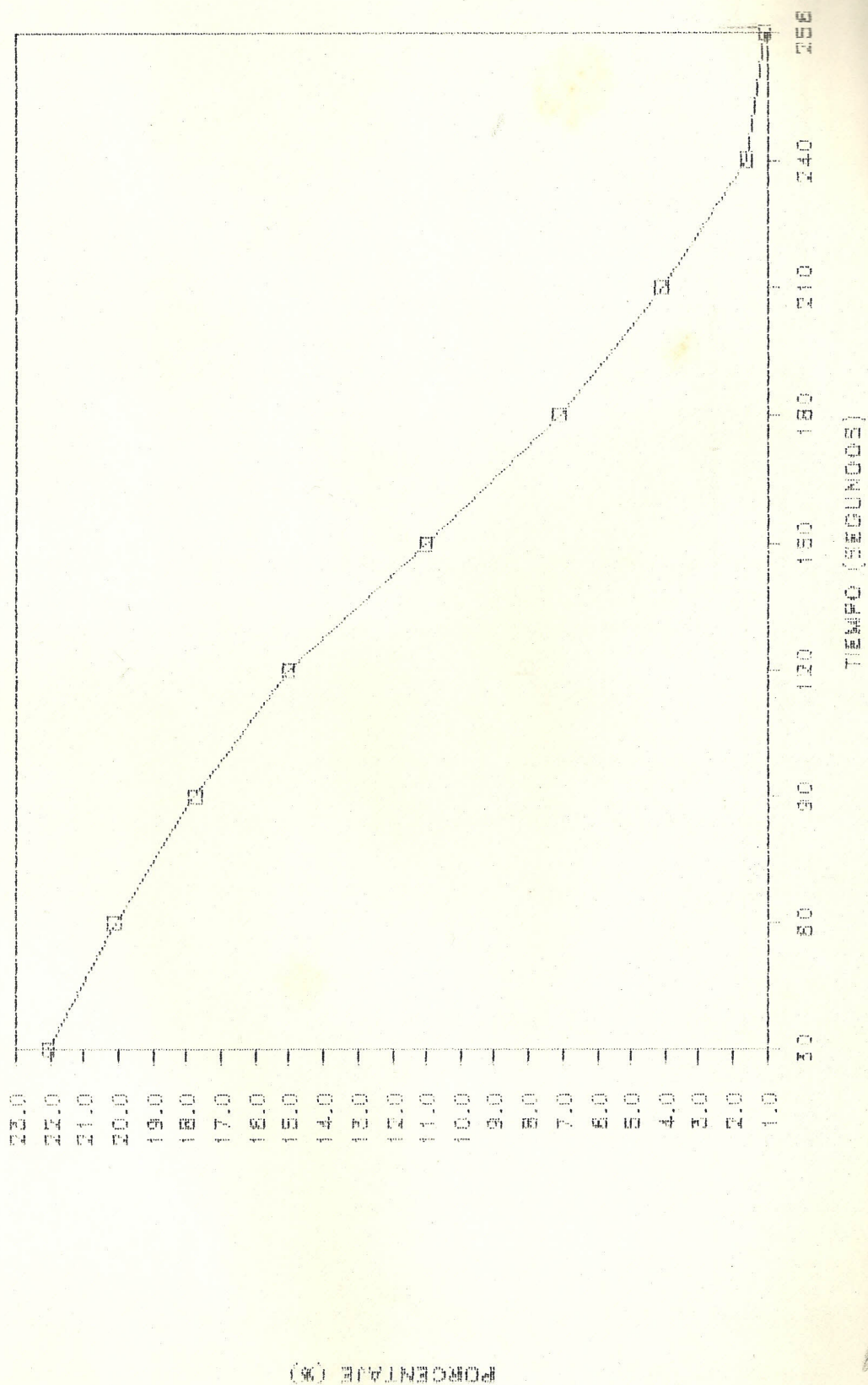
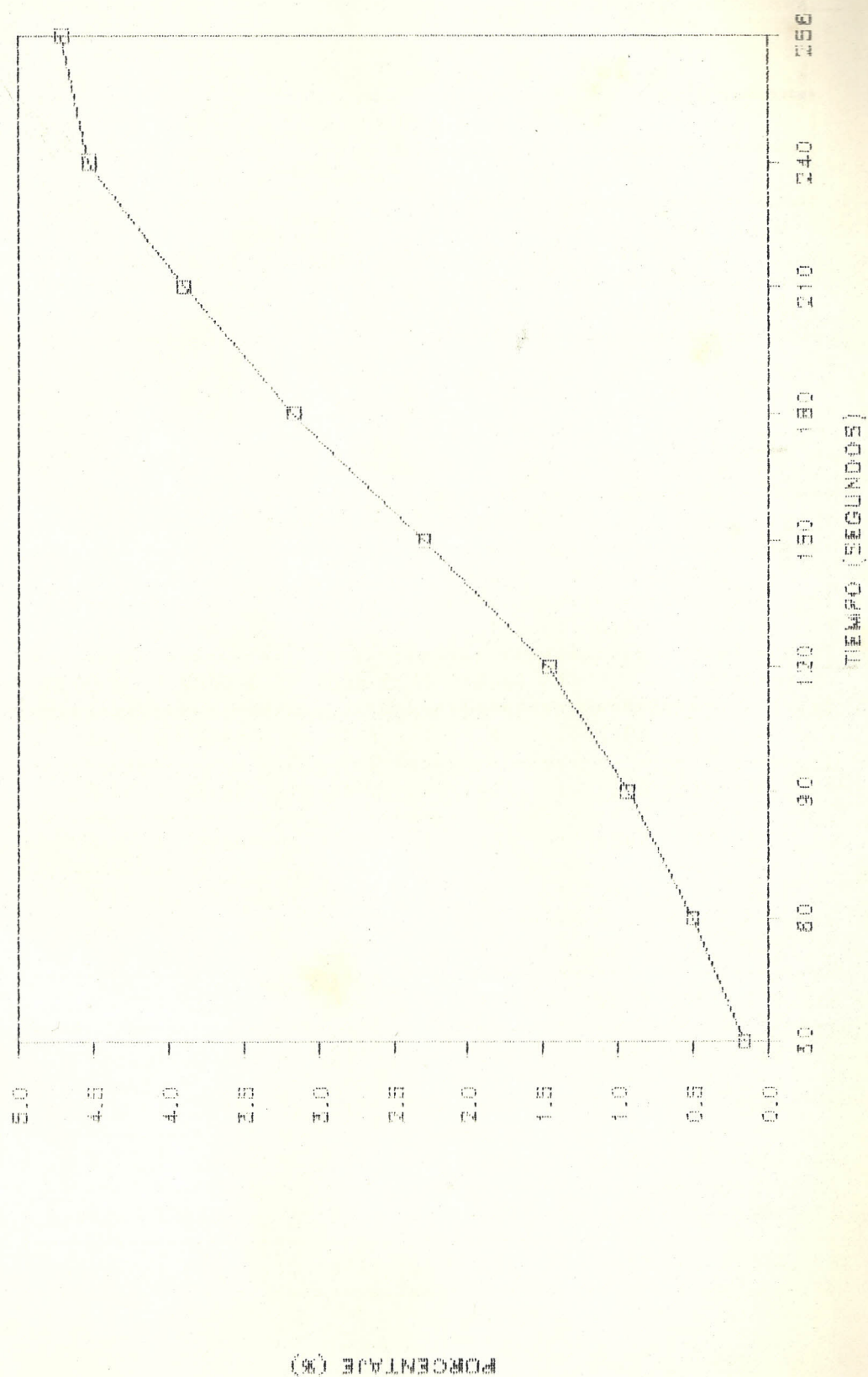


TABLE COMPLETING



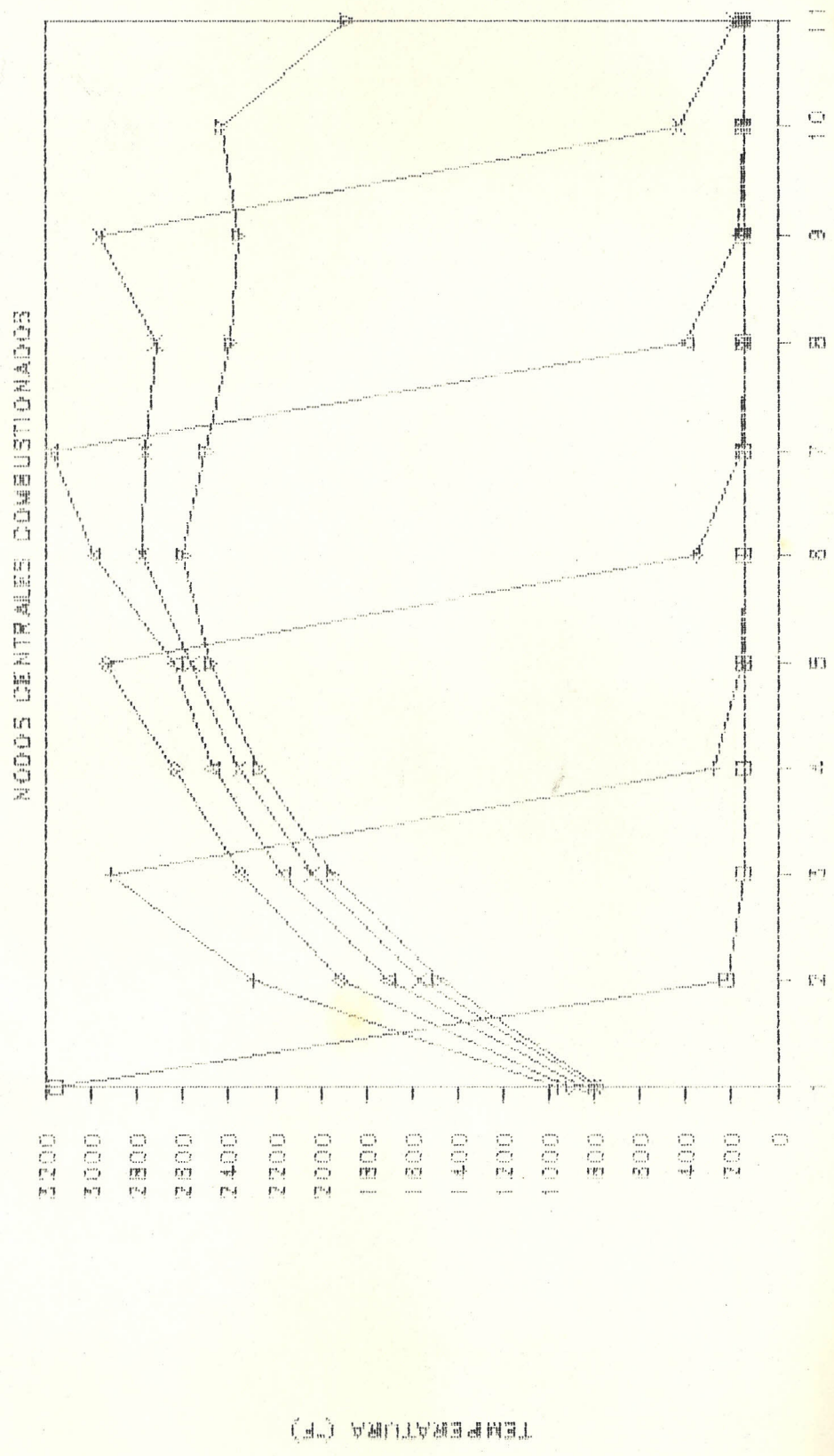
TASA DE GENERACION DE CO2



DATOS						
PRUEBA # 5				MODELO # 2		
A	E	m	K	Kc	Temp. inicial	
(gr/cm ² -seg)	(Cal/gr-mol)	(Lbm/hr)	(BTU/hr-F-°F)	(BTU/hr-F-°F)	(°F)	
200000	25100	20	0.1	0.03	950-150-150-700	

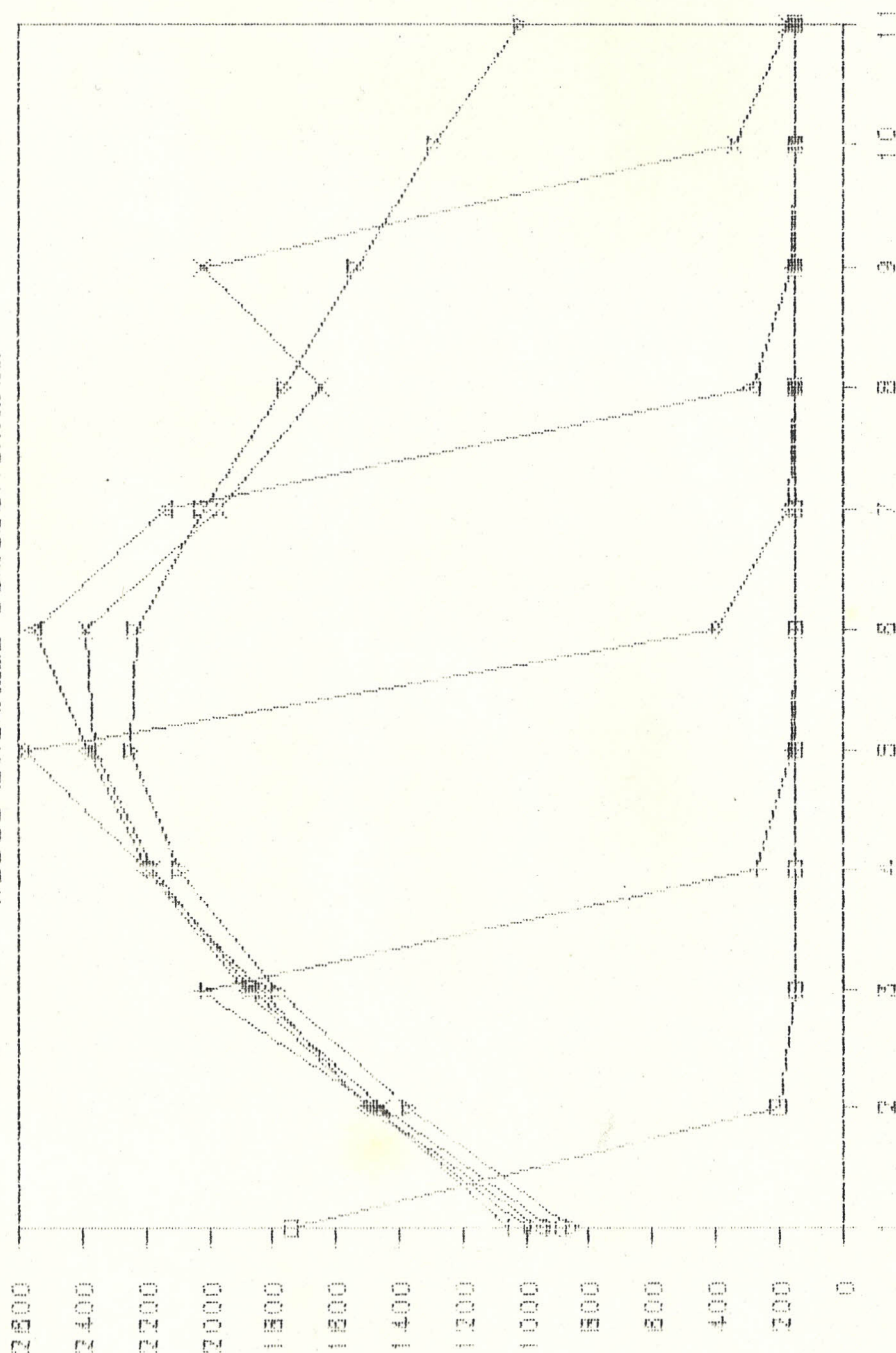
RESULTADOS						
TEMPERATURAS MAXIMAS (°F)						
CASCARILLA			t	AIRE		t
NODO #	NODO C	NODO L	(Seg)			(Seg)
1	3160	1741	4	1183		4
2	2788	1697	44	1223		48
3	2910	2023	66	1588		72
4	2990	2457	90	2364		96
5	2936	2581	114	2637		118
6	3252	2527	140	2819		140
7	3175	2135	160	1637		158
8	3149	2177	182	1321		186
9	2968	2019	208	1198		216
10	2659	1730	240	1170		254
11	1878	1017	256	957		390

TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA



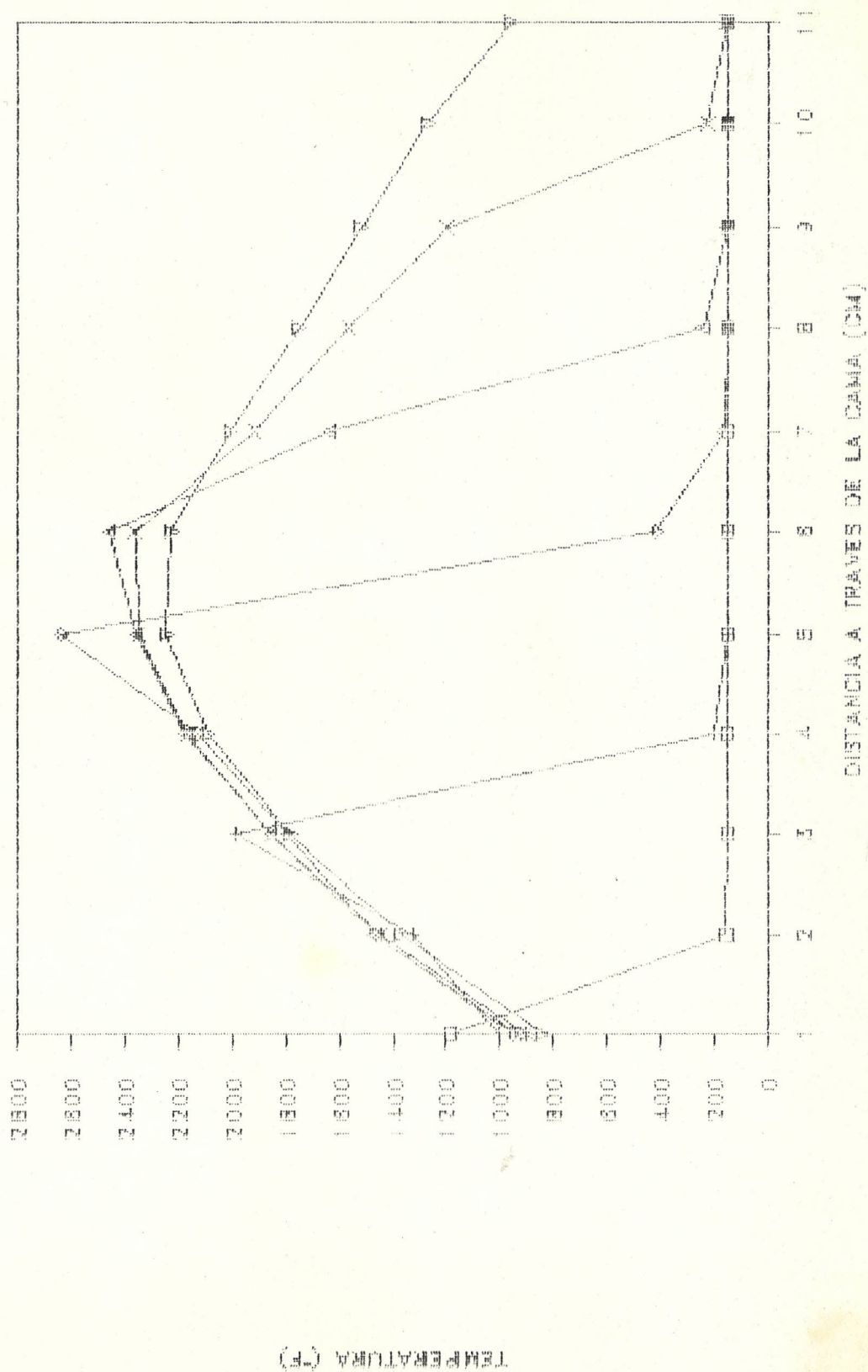
TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA

NODOS LATERALES COMBUSTIONADOS

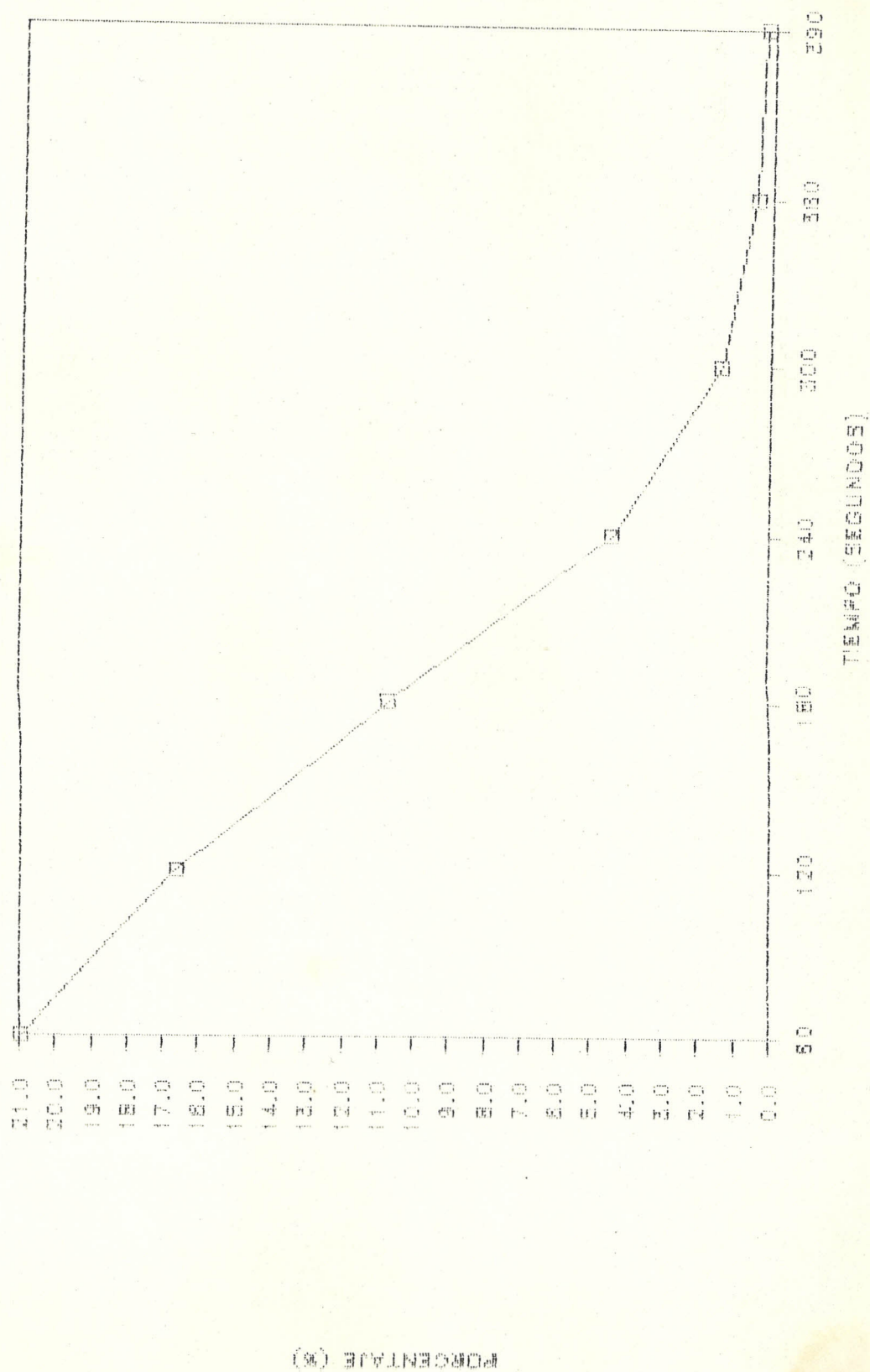


□ NODO 1 (4 SEG.)
 + NODO 3 (72 SEG.)
 △ NODO 7 (158 SEG.)
 × NODO 9 (216 SEG.)

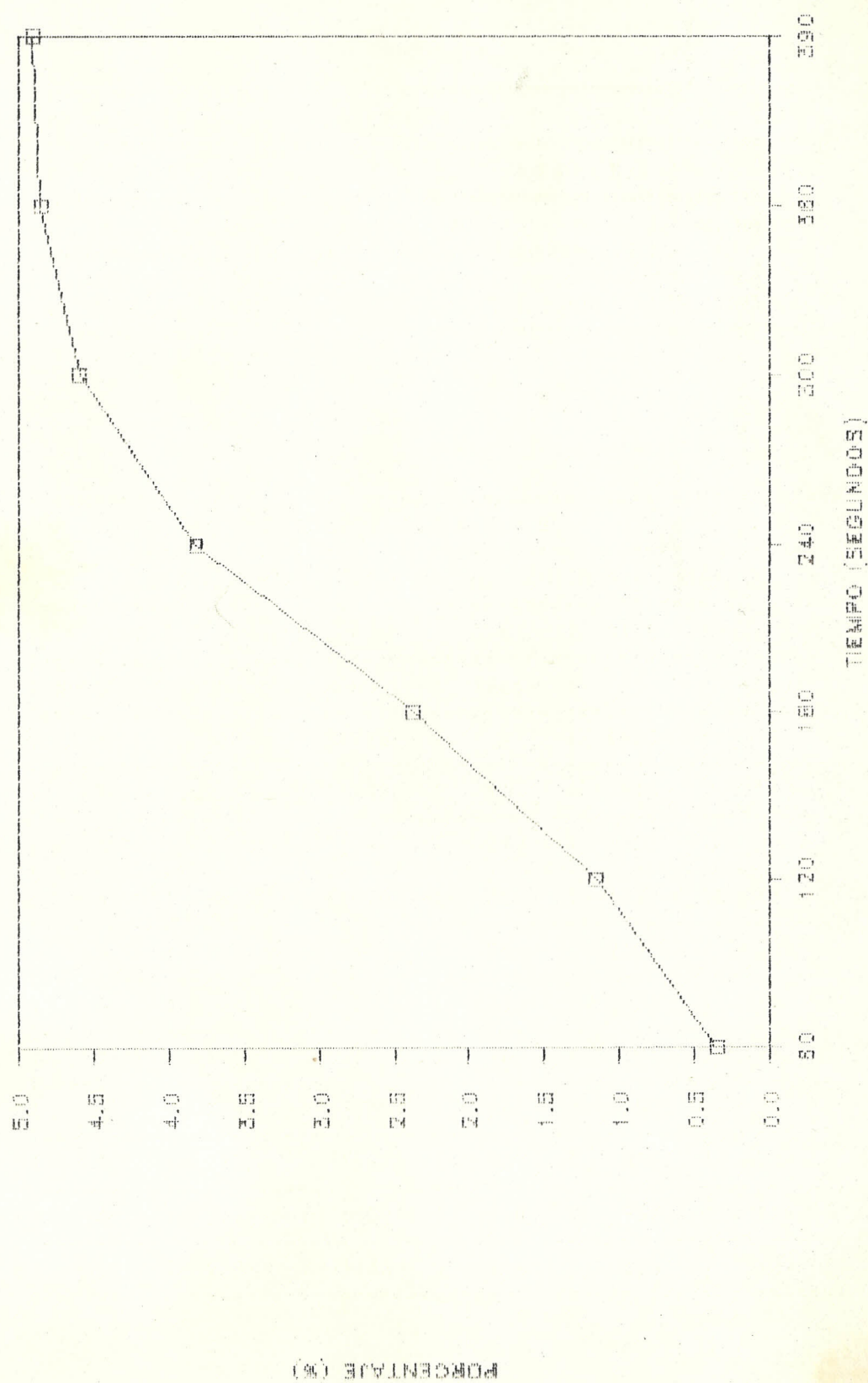
TEMPERATURAS MAXIMAS EN EL AIRE



TASA DE CONSUMO DE OXIGENO



TASA DE GENERACION DE CO2

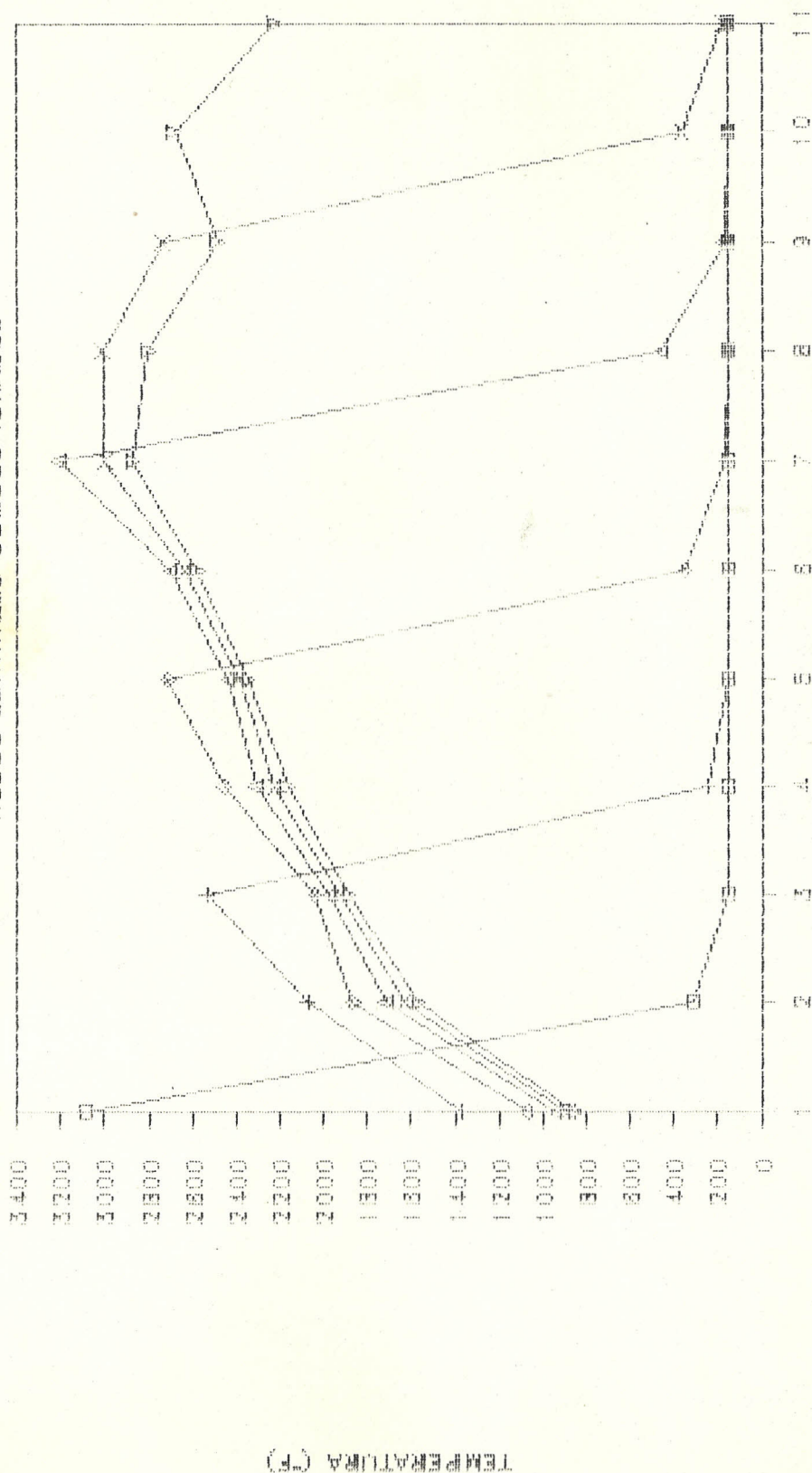


D A T O S						
P R U E B A # 6				M O D E L O # 2		
A	E	m	K	Kc	Temp. inicial	
(gr/cm ² -seg)	(Cal/gr-mol)	(Lbm/hr)	(BTU/hr-F-°F)	(BTU/hr-F-°F)	(°F)	
200000	22000	30	0.2	0.03	950-150-150-700	

R E S U L T A D O S						
T E M P E R A T U R A S M A X I M A S (°F)						
C A S C A R I L L A			t	A I R E	t	
NODO #	NODO C	NODO L	(Seg)		(Seg)	
1	3087	1776	4	1483	4	
2	2469	1882	12	916	14	
3	2532	1846	24	1403	28	
4	2634	1970	38	1722	40	
5	2612	2172	50	2190	52	
6	2840	2257	64	2534	64	
7	3208	2677	76	2304	76	
8	3187	2305	86	1358	86	
9	2732	1867	96	855	98	
10	2776	1952	110	937	114	
11	2221	1143	116	605	122	

TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCAJA

NODOS CENTRALES COMBUSTIONADOS

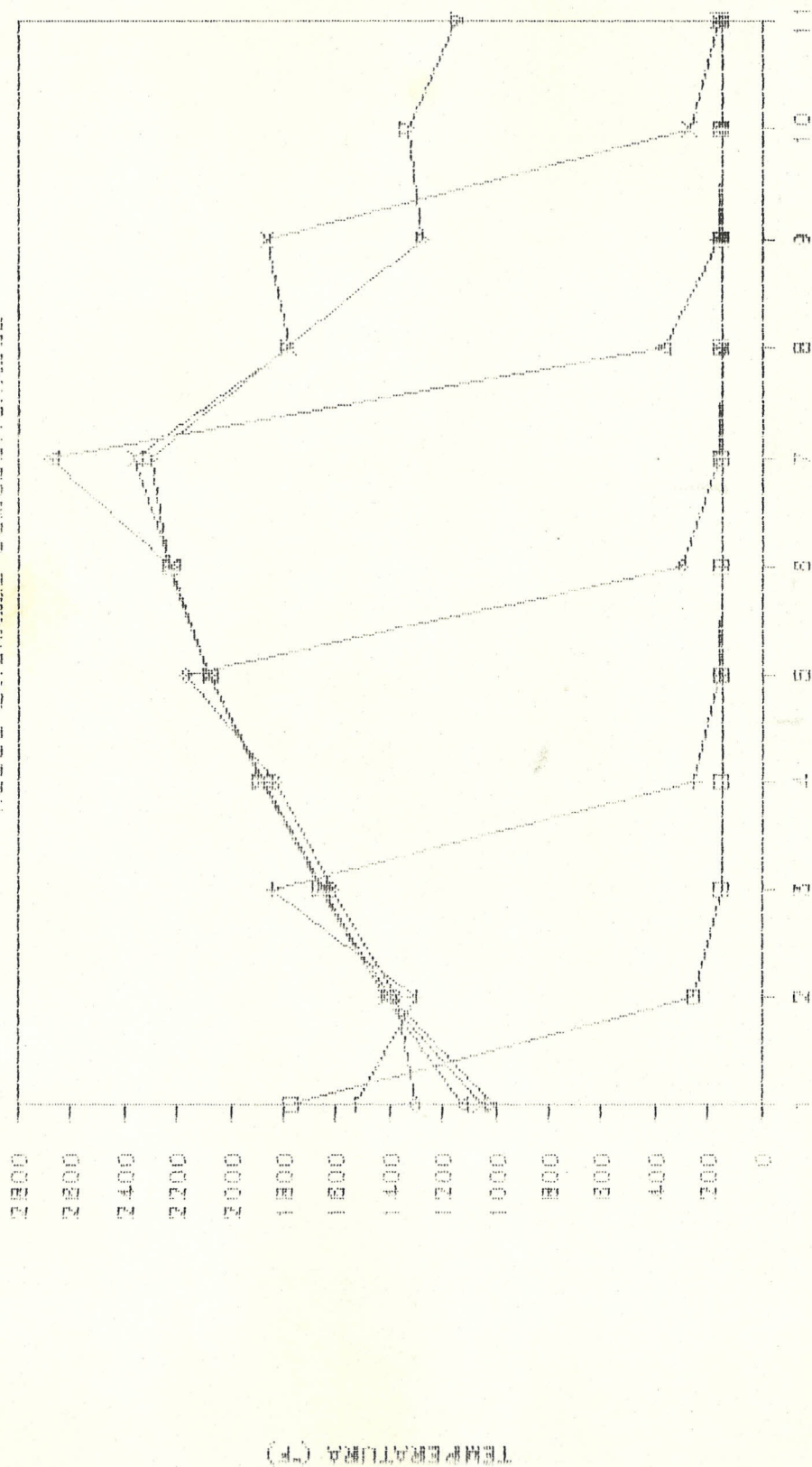


□ NODO 1 (4 SEG.)
 ▲ NODO 7 (76 SEG.)

+ NODO 2 (24 SEG.)
 ◆ NODO 3 (50 SEG.)
 ▼ NODO 11 (116 SEG.)

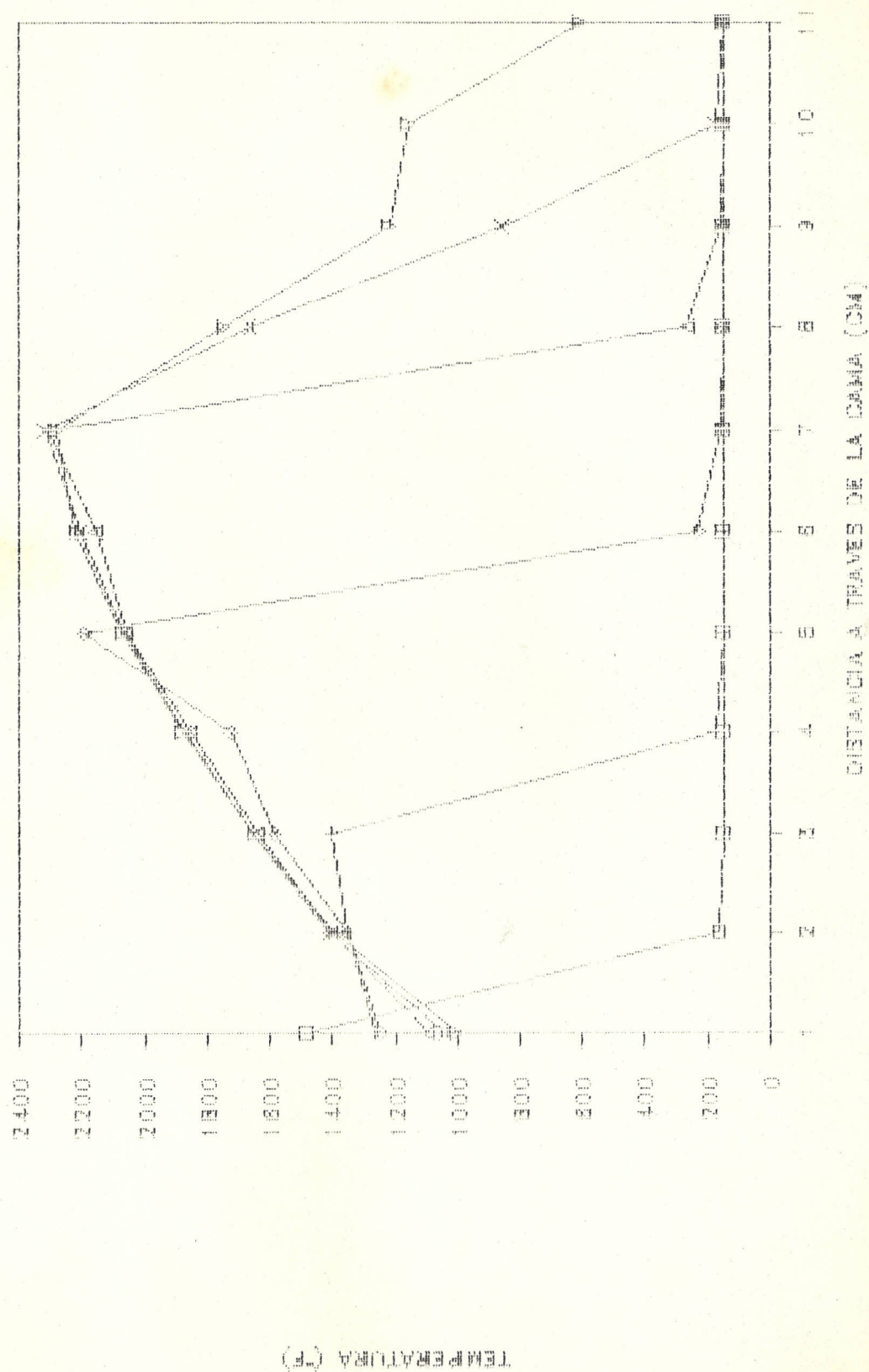
TEMPERATURAS MAXIMAS EN LA CASCARILLA

NODOS LATERALES COMBUSTIONADOS

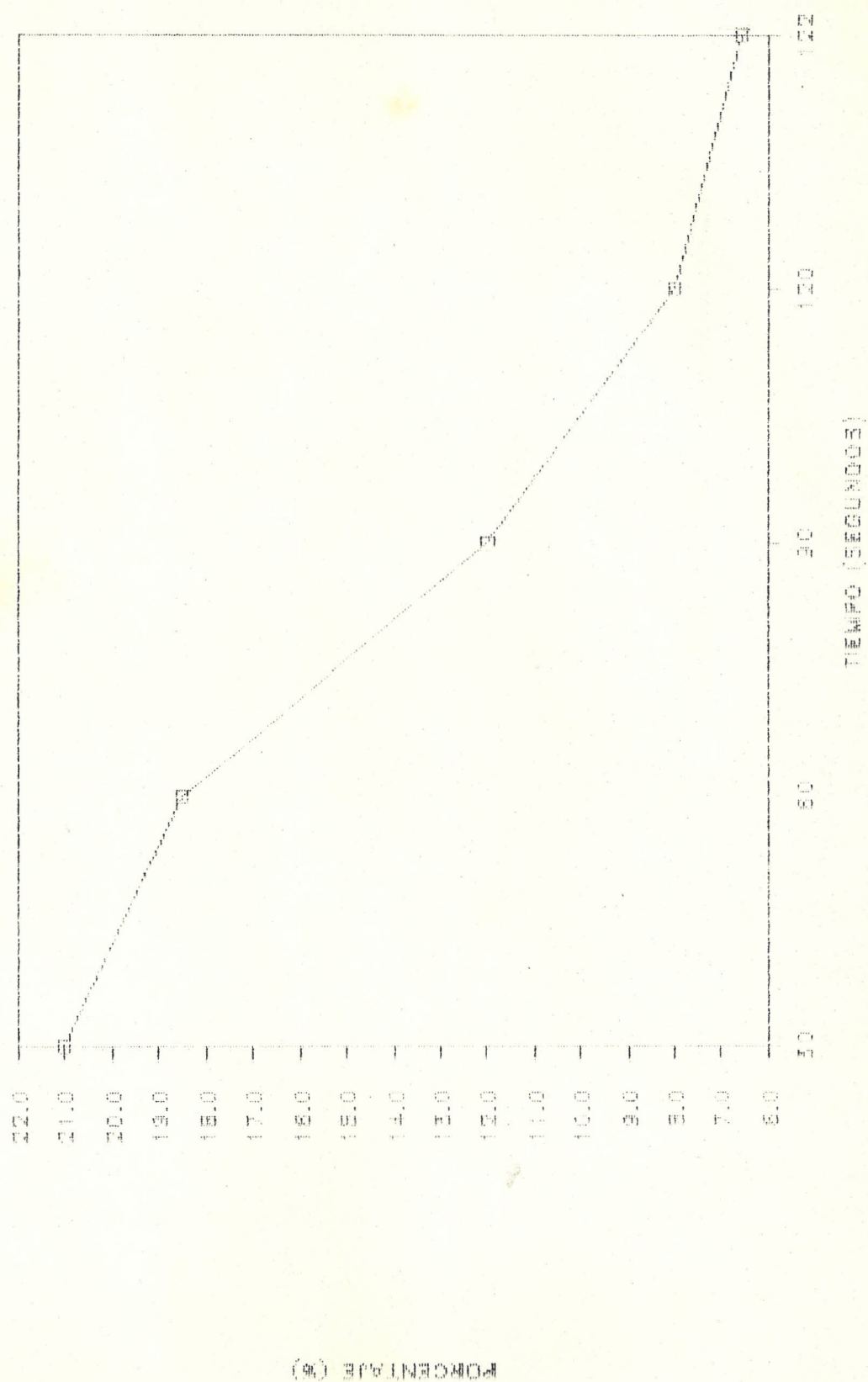


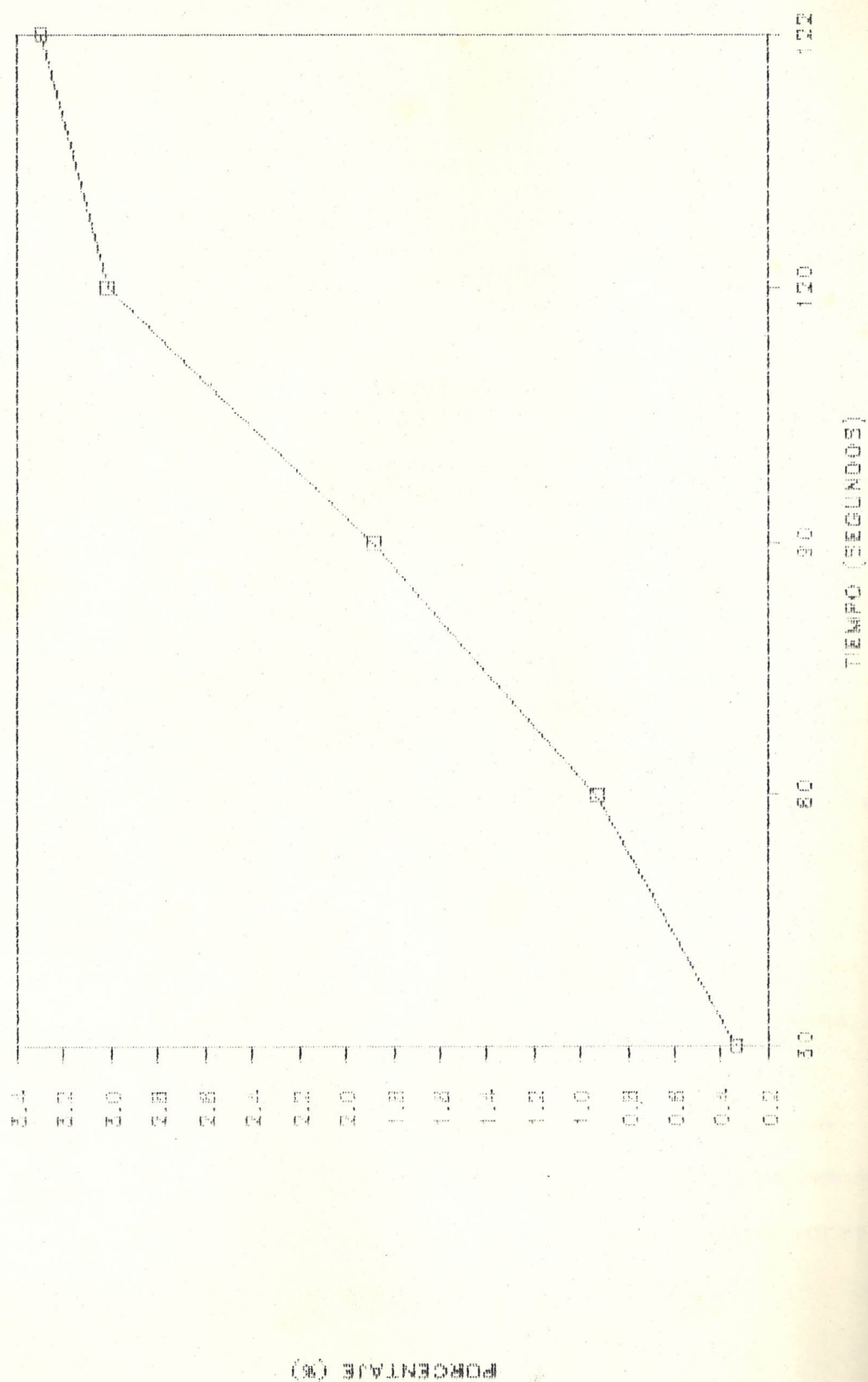
□ NODO 1 (4 SEG.)
 △ NODO 3 (28 SEG.)
 × NODO 5 (52 SEG.)
 ○ NODO 7 (76 SEG.)
 + NODO 11 (122 SEG.)

TEMPERATURAS MAXIMAS EN EL AIRE



TASA DE CONSUMO DE OXIGENO



TASA DE GENERACION DE CO₂

CAPITULO VII

ANALISIS DE RESULTADOS

De las pruebas realizadas, podemos establecer:

1.- El proceso global de combustión está determinado por dos efectos:

- La rapidez de difusión del O_2 hacia la superficie del combustible.
- La rapidez de reacción del combustible (cascarilla).

Donde el efecto dominante en el proceso es el de menor valor, o sea la etapa difusiva por lo tanto el proceso es de difusión controlada.

2.- La combustión a través del lecho ocurre debido a efectos térmicos y de concentración de oxígeno, la misma que tiende a disminuir, convirtiéndose en un factor que controla el proceso, sobretodo cuando se queman los nodos de la parte superior de la camada, quemándose a temperaturas menores que los nodos anteriores y liberando menos energía.

- 3.- El proceso global de combustión es acelerado cuando aumenta la constante de Arrhenius, la conductividad térmica de la cascarilla, o disminuye la energía de activación.
- 4.- Si el flujo de aire suministrado aumenta, se incrementa el tiempo de combustión debido a la disminución de la rapidez de calentamiento en los nodos laterales.
- 5.- La capa de cenizas formada evita excesivas pérdidas de energía hacia la parte inferior de la camada y favorece el calentamiento de la cascarilla sin quemar.
- 6.- A temperaturas altas la reactividad, (K_s), aumenta rápidamente provocando el consumo acelerado del oxígeno tan pronto como entra en contacto con la superficie de la partícula, por lo tanto la rapidez de difusión del O_2 hacia el interior de la misma, (K_D), disminuye.
- 7.- Las temperaturas nodales dependen de la rapidez total de combustión, los efectos térmicos y la concentración de oxígeno presente.
- 8.- El proceso puede extinguirse por excesivo flujo suministrado, por baja generación de calor, demasiada carga térmica en la camada y por elevadas pérdidas debido a radiación.

Para flujos mayores a 35 Lbm/hr, el sistema tiende a apagarse por las pérdidas convectivas. Igual efecto sucede cuando la temperatura de las paredes interiores alcanzan valores mayores a los 1000°F , debido a las pérdidas por radiación. Los nodos laterales son afectados directamente y se manifiesta en las máximas temperaturas que alcanzan, mientras que en los nodos centrales las pérdidas son mínimas por lo tanto las temperaturas máximas generadas son mayores.

9.- El modelo permite la simulación de pruebas para diferentes condiciones de operación.

10.- Los procesos más influentes en la combustión de la cascarilla son la conducción, convección, reactividad, rapidez de difusión del O_2 y la tasa de consumo de O_2 a través de la camada.

11.- La conductividad térmica es muy influyente en la disipación de la energía liberada por la reacción de la cascarilla, sobretodo cuando se está quemando los nodos inferiores, por lo tanto si la conductividad está en el orden de 0.1 a $0.12 \text{ BTU/hr-F-}^{\circ}\text{F}$, dichos nodos alcanzan altas temperaturas.

- Validación de Resultados

Los resultados predictivos obtenidos deben compararse con

los resultados experimentales o teóricos para establecer su validez.

De las pruebas simuladas, tomamos los valores promedios tanto de las temperaturas para cascarilla y aire, como de los porcentajes de oxígeno y dióxido de carbono.

De esta manera obtenemos:

Para aire: $T_{aire} = 1650^{\circ}\text{F} - 1800^{\circ}\text{F}$

Si calculamos la temperatura teórica de los gases con la fórmula:

$$T_g = T_a + P C * (1 - \%PT) / C_{pa} * [1 + m_a/c * (1 + EA)]$$

Considerando $T_a = 100^{\circ}\text{F}$, pérdidas térmicas = 30%, y $EA = 600\%$ como promedio, entonces $T_g = 2110^{\circ}\text{F}$, lo que significa un error aproximado de 19%.

Para la cascarilla las temperaturas promedio generadas en el modelo oscilan entre 2500°F y 2800°F , para los nodos centrales y para los nodos laterales entre 2300°F y 2600°F .

La temperatura adiabática para la cascarilla está establecida con un valor de 2200°F que comparada con los temperaturas promedios antes calculadas obtenemos un error de predicción de 27% y 20% respectivamente.

Con las pruebas experimentales las temperaturas máximas reportadas están alrededor de los 1850°F, para condiciones de operación del horno similares a las utilizadas en las pruebas predictivas, obteniéndose errores de predicción para éste caso de 30% para las temperaturas máximas de los nodos centrales y de 35% para los nodos laterales.

Además, las concentraciones de dióxido de carbono obtenidas en el modelo están muy próximas a los valores generados en las pruebas experimentales, es decir entre 4% a 5% para ambos casos.

RECOMENDACIONES

Un modelo más elaborado requiere la evaluación de ciertos parámetros en forma más exacta, como por ejemplo las propiedades físico-químicas de la cascarilla.

Además se debe enfocar en forma más amplia algunos procesos como la difusión con todas sus etapas respectivas, la reacción de la cascarilla, el calentamiento tanto de la parrilla como las paredes del horno durante la combustión, las pérdidas térmicas con el medio, etc., con sus efectos transcientes para incorporarlos al análisis global.

De esta forma se consigue delinear el procedimiento para futuros proyectos predictivos de otros combustibles biomásicos.

CONCLUSIONES

El modelo predictivo para la combustión de cascarilla de arroz ha sido desarrollado considerando leyes físicas y químicas dentro de las cuales existen procesos que en forma particular se analizaron para dar la secuencia al proceso total.

Los factores más influyentes y controlantes en la combustión son:

- La rapidez de reacción de la cascarilla, K_s .
- La rapidez de difusión del oxígeno, K_D .
- Los procesos de transferencia de calor, en particular la conducción térmica en el lecho.
- El flujo de aire suministrado.

Para el caso de la cascarilla, dichos factores se encuentran comprendidos en los siguientes rangos:

- Energía de activación entre 25000 - 26000 Cal/gr-mol.
- Constante de Arrhenius entre 65000 - 70000 gr/cm²-seg.
- Conductividad térmica entre 0.1 - 0.12 BTU/hr-P-°F.

Con estos valores se han obtenido resultados satisfactorios, con los cuales se realizaron los perfiles de temperatura tanto para la cascarilla como aire y de concentración de oxígeno y dióxido de carbono, que comparados con los resultados experimentales o teóricos muestran valores y tendencias aceptables, con errores de predicción del orden del 25% - 30%.

B I B L I O G R A F I A

BEAGLE E. C. "Rice Husk Conversion To Energy", FAO Agricultural Services Bulletin, Rome 1978.

BARRIGA A. "Development of a Predictive Model for Optimization of Industrial Gas Producers", PSU 1977.

BIRD R. B., STEWART W. E. And LIGHTFOOT E. N. "Transport Phenomena", Wiley & Sons, N.Y. 1960.

"Cuantificación de Desechos Agrícolas y sus Perspectivas de Aprovechamiento como Fuente de Energía en la República Dominicana", Santo Domingo 1980.

CHAO J. "Pautas para el Diseño y Construcción de Fogones Eficientes para la Combustión de la Cascarilla de Arroz", Tesis de Grado, ESPOL 1987.

GEIGER G. H., POIRIER D.R. "Transport Phenomena in Metallurgy", Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts 1980.

INCROPERA, DE WITT. "Fundamentals of Heat Transfer", Wiley & Sons, N.Y. 1981.

KREITH F. "Principios de Transferencia de Calor", International Textbook Company, Pensilvania 1968.

LANDIRES C. "Estudio de Factibilidad del Uso de la Cascarilla de Arroz como Combustible para Secado de Arroz en Ecuador", Tesis de Grado, ESPOL 1988.

LEVENSPIEL O. "Chemical Reaction Engineering", Wiley & Sons, N.Y. 1974.

LEWIS R. W. "Numerical Methods in Heat Transfer", Volume III, Wiley & Sons, N.Y. 1985.

"Renewable Energy for Development", A Stockholm Environment Institute Newsletter, 1990.

SCHUTTE E., KRISHNA K., NIEUWVELT C. "Mathematical Modelling of a Woodburning Bakery Oven", Eindhoven University of Technology, Eindhoven 1988.

WELTY J. "Engineering Heat Transfer", University Microfilms International, Michigan 1986.