



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Mecánica



“ANALISIS TERMICO DE HORNOS ARTESANALES
PARA PANADERIAS”

PROYECTO DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:
INGENIERO MECANICO

Presentado por:

Kléber Gustavo Figueroa Villalta

Guayaquil - Ecuador

1989

AGRADECIMIENTO

Al Dr. ALFREDO BARRIGA RIVERA, Director de Tópico de Graduación, por su gran colaboración para el desarrollo de este trabajo.

Al CETE, por su ayuda invaluable.

DEDICATORIA

A mis PADRES.

A mis HERMANOS.

A mi primo Sr. ROSENDO
LUCERO FIGUEROA.

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en este PROYECTO DE GRADO, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

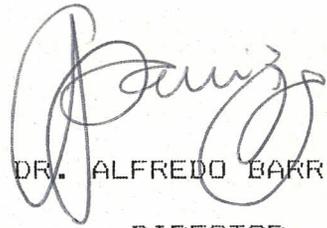
(Reglamento de Tópico de Graduación)

A handwritten signature in blue ink, reading "Kleber Gustavo Figueroa Villalta", written over a horizontal dotted line.

KLEBER GUSTAVO FIGUEROA VILLALTA



ING. NELSON CEVALLOS
DECANO DE LA FACULTAD EN
INGENIERIA MECANICA



DR. ALFREDO BARRIGA
DIRECTOR
TOPICO DE GRADUACION



ING. JORGE DUQUE
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



ING. FRANCISCO ANDRADE
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

RESUMEN

El progresivo aumento en el costo de los combustibles, así como la reducción de sus reservas, ha hecho que se despierte el interés en volver al aprovechamiento de la leña, o sea utilizar la mayor cantidad posible de la energía contenida en el combustible "leña".

El análisis de este proyecto, es el de determinar la eficiencia térmica (η_t) de un horno artesanal para panaderías, hornos típicos que utiliza la comunidad para su subsistencia diaria.

Comenzaremos haciendo un análisis de la situación actual del País y una evaluación del recurso leña para garantizar un adecuado suministro de energía.

Para analizar la eficiencia, se determinará el calor guardado o almacenado en las paredes, las diferentes pérdidas térmicas que ocurren comunmente en un horno, así como también el calor extraído por la carga (pan); luego de determinar la eficiencia térmica y el consumo de combustible (leña) se presentarán los resultados en forma de tablas y gráficos, como la variación de la temperatura con el tiempo y variación de la temperatura con la distancia (diagrama de Schmidt).

Se hará el balance térmico del horno y se lo presentará por medio del diagrama de Sankey.

INDICE GENERAL

	PAGS.
RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VIII
INDICE DE FIGURAS	XII
INDICE DE TABLAS	XV
INTRODUCCION	XVI
CAPITULO I	
GENERALIDADES DEL PROYECTO	
1.1 OBJETIVO	XVIII
1.2 ANALISIS Y METAS DEL SISTEMA	XVIII
1.3 JUSTIFICACION	19
CAPITULO II	
LA EVOLUCION DE LAS ARTES DE LA PANIFICACION	20
CAPITULO III	
SITUACION FORESTAL ECUATORIANA	25
3.1 INTRODUCCION	25
3.2 BALANCE ENERGETICO FORESTAL	26
3.3 FACTORES DETERMINANTES EN LA SELECCION DE FORMACION DE MACIZOS FORESTALES DE:	26

3.3.1 Factor Social	27
3.3.2 Factor Económico	27
3.3.3 Factor Político	28
3.3.4 Factor Técnico	28

CAPITULO IV

DIFERENTES NIVELES DE ENERGIA

4.1 ENERGIA TOTAL DISPONIBLE EN EL COMBUSTIBLE: LENA	30
4.1.1 Valor Calórico	30
4.2 ENERGIA DISPONIBLE EN LOS GASES DE LA CAMARA	31
4.3 ENERGIA DISPONIBLE EN LOS GASES	32
4.4 EFICIENCIA EN LOS DIFERENTES NIVELES DE ENERGIA	33

CAPITULO V

ANALISIS TERMICO

5.1 METODOLOGIA EN SU FUNCIONAMIENTO	35
5.2 TRANSFERENCIA DEL CALOR POR RADIACION	41
5.3 TRANSFERENCIA DEL CALOR POR CONVECCION	45
5.4 PERDIDA DEL CALOR A TRAVES DE LAS PAREDES	48
5.4.1 Método gráfico de Schmidt.	50
5.5 COMPOSICION DE LA MADERA	56

CAPITULO VI

SISTEMA EXPERIMENTAL Y CALCULOS

6.1	COMBUSTION DE LA LENA	59
6.1.1	Energía total de la leña	59
6.1.2	Energía remanente "carbón"	60
6.1.3	Energía de la leña consumida	60
6.1.4	Evaporación del agua de la leña	60
6.1.5	Energía utilizable	61
6.2	CALENTAMIENTO DE LAS PAREDES	61
6.2.1.	Coeficiente radiativo " h_r " interior	61
6.2.2.	Coeficiente convectivo " h_c " interior	63
6.2.3.	Gráfico T vs. t	64
6.2.4.	Diagrama de Schmidt	66
6.2.4.1	Calentamiento de pared	66
6.2.5.	Calor o energía acumulada en pared	67
6.3	ENFRIAMIENTO DE PARED-COCCION DEL PAN (DIAGRAMA DE SCHMIDT)	69
6.3.1.	Enfriamiento de pared (horno) para un espesor de 4 cm.	69
6.3.2.	Cocción del pan	72
6.3.3.	Energía en pared (energía remanente)	75
6.4	PERDIDAS TERMICAS	77
6.4.1.	Por la puerta de entrada, trasera y boquete de chimenea	77
6.4.2.	Por las paredes exteriores	77

6.4.2.1	Cálculo del coeficiente radiativo exterior "hro"	78
6.4.2.2	Coefficiente convectivo exterior "hco"	79
6.5	DIAGRAMA DE SANKEY	81
6.6	EFICIENCIA DEL HORNO	82
CAPITULO VII		
	ANALISIS DE RESULTADOS	85
7.1	COMBUSTION DE LA LENA	85
7.2	CALENTAMIENTO DE PAREDES	85
7.3	ENFRIAMIENTO DE PARED-COCCION DEL FAN	87
7.4	PERDIDAS TERMICAS	87
7.4.1	Por la puerta de entrada, trasera y boquete de chimenea	87
7.5	EFICIENCIA DEL HORNO	88
7.6	ENERGIA REMANENTE EN LA PARED	88
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
	AFENDICES	93
	BIBLIOGRAFIA	111

INDICE DE FIGURAS

No.	PAGS.
3.1 TIPOS FORESTALES EN EL ECUADOR	29
5.1 ESQUEMA DEL HORNO ARTESANAL TIPICO	36
5.1.A INTRODUCCION DE LA LENA AL HORNO	37
5.1.B COMBUSTION DE LA LENA	37
5.1.C ESQUEMA DE LA COMBUSTION DE LA LENA	39
5.1.D INTRODUCCION DEL PAN CRUDO	40
5.1.E COCCION DEL PAN	40
5.1.F ESQUEMA DE LA COCCION DEL PAN	42
5.4.1 METODO GRAFICO DE SCHMIDT: TEMPERATURA VS. DISTANCIA	51
5.4.2 METODO GRAFICO DE SCHMIDT: PARA PARED DIVIDIDA EN 8 SECCIONES	54
6.1 GRAFICO: TEMPERATURA VS. TIEMPO, DURANTE EL CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO DE LAS PAREDES DEL HORNO	65
6.2 GRAFICO DE SCHMIDT: TEMPERATURA VS. DISTANCIA, DURANTE EL CALENTAMIENTO DE LA PARED	68
6.3 GRAFICO DE SCHMIDT: TEMPERATURA VS. DISTANCIA, DURANTE EL ENFRIAMIENTO DE LA PARED	71

6.4 GRAFICO DE SCHMIDT: TEMPERATURA VS.	73
DISTANCIA, DURANTE LA COCCION DEL PAN.	
6.4.A GRAFICO T vs t (COCCION DEL PAN)	74
6.5 DIAGRAMA DE SANKEY.	84

APENDICE A

A.1 HORNO ARTESANAL TIPICO, CON LA RESPECTIVA INSTRUMENTACION PARA MEDIR LAS TEMPERATURAS	95
A.2 FORMA DE MEDIR Y TRANSPORTAR LA LENA	95
A.3 PESADA DE LA LENA	96
A.4 INTRODUCCION DE LA LENA AL HORNO	96
A.5 ENCENDIDO DE LA LENA	97
A.6 PROCESOS DE COMBUSTION DE LA LENA	97
A.7 MEDICION DE TEMPERATURAS	98
A.8 SACAR RESIDUOS DE LA LENA COMBUSTIONADA (CARBON)	98
A.9 LIMPIEZA TOTAL DE CENIZAS	99
A.10 PAN CRUDO	99
A.11 PESADA DE PAN CRUDO	100
A.12 METIDA DE PAN CRUDO AL HORNO	100
A.13 INICIO DEL PROCESO DE COMBUSTION DEL PAN	101
A.14 FIN DEL PROCESO DE COCCION (PAN COCIDO)	101
A.15 SACAR PAN	102

A.16 METIDA DE LA SEGUNDA CARGA	102
FIN DEL PRIMER PROCESO-INICIO DEL SEGUNDO PROCESO	
A.17 MANIFULEO DEL PAN	103
A.18 PESADA DEL PAN COCIDO	103

INDICE DE TABLAS

No.		PAGS.
I	VALORES DE ENERGIA ENTREGADA (PARED)- RECIBIDA (PAN)	76
II	BALANCE TERMICO	82
APENDICE B		
B-1	DATOS DE TEMPERATURAS EXPERIMENTALES CALENTAMIENTO DEL HORNO	105
B-2	DATOS DE TEMPERATURA EXPERIMENTALES ENFRIAMIENTO DEL HORNO, CUANDO SE METE LA CARGA (PAN)	106
B-3	VALORES CALCULADOS DE h_{ri} DURANTE EL CALENTAMIENTO DEL HORNO	107
B-4	ENFRIAMIENTO DE PARED CUANDO SE METE LA CARGA (PAN CRUDO)	108
B-5	COCCION DEL PAN	108
B-6	PERDIDAS TERMICAS POR LA PUERTA DE ENTRADA, TRASERA Y BOQUETE DE CHIMENEA	109
B-7	PERDIDAS TERMICAS VALORES CALCULADOS DE h_{ro} Y h_{co} DURANTE EL CALENTAMIENTO	110

INTRODUCCION

La crisis del petróleo y los requerimientos energéticos en las zonas rurales del Ecuador, ha promovido el interés de diversos Proyectos de diseminación de nuevas tecnologías referentes a las llamadas Fuentes Alternas de Energía, entre las cuales sobresale el bosque.

Debido a que la energía de leña no se la utiliza totalmente, aprovechándose solamente alrededor de un 60% de la energía disponible, mientras el resto se pierde en la atmósfera. Un método práctico y fácil de producir energía, es por medio de la combustión de la madera (leña), se calentarán las paredes del horno, las mismas que almacenarán la energía, esta energía almacenada servirá para cocer el pan.

Los hornos de campo, genuinamente criollos; nuestra gente de campo lo prefiere a cualquier otra forma de horno, tal vez por conservar la tradición o por la facilidad con que se lo construye en cualquier lugar con los recursos que tiene más a mano, pero lo que es innegable es la comodidad, la facilidad y economía que nos brinda su empleo ya sea en la confección del pan como en los sabrosos manjares que en él se pueden hacer. Su figura se destaca, lo mismo en las ricas estancias que

en las chozas del pobre, al aire libre, resistiendo largos años el castigo del viento y de la lluvia.

Con ligerísimas variantes, su construcción se identifica con la naturaleza de las distintas regiones del País; así en la pampa, por ejemplo se construye de barro amasado con paja o estiercol de caballo, asentado sobre una mesa formada con 4 estacas enterradas en el suelo.

En la zona montañosa se hace de barro y piedra, asentado sobre pilares de piedra. En las zonas boscosas vuelven a emplearse en la construcción de estacas de madera dura con la variante del empleo del adobe de barro crudo o con barro solamente, y por último en los lugares próximos a los centros poblados, donde abunda el ladrillo cocido se los confecciona con éstos, desaparecen las estacas, siendo sustituidas por plataforma de ladrillos.

CAPITULO I

GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVO

Analizar la eficiencia térmica de un horno artesanal típico, construido con ladrillo y mampostería.

1.2 ANALISIS Y METAS DEL SISTEMA

Hoy en día existen diversos tipos de hornos que funcionan con gas (GLP), corriente eléctrica y leña.

En este caso se va a analizar lo que funcionan con leña que son los más comunes, debido a que en tantas zonas rurales no llega la energía eléctrica y además es difícil conseguir el gas.

Estos hornos por utilizar leña traída especialmente desde los bosques, tablas y palos viejos, o residuos de los aserraderos resultan muy económicos comparados con los otros (corriente eléctrica y gas). Son construidos artesanalmente en forma de semiesfera con materiales que pueden ser arcilla o ladrillo con mampostería, esta mampostería sirve de elemento unión de los ladrillos.

En el presente trabajo se hará el estudio de los hornos contruídos con ladrillos y manpostería que parecen ser los más eficientes.

1.3 JUSTIFICACION

Este trabajo esta orientado en particular hacia aplicaciones rurales de tipo doméstico y pequeñas industrias, pues así, el área rural que se encuentra limitada por imposiciones de tipo social, económico y político pueda autobastecerse de un tipo de combustible que tenga la ventaja de ser renovable.

Según estadísticas de OLADE (Organización Latinoamericana de Energía) en América Latina, se ha estimado que aproximadamente el 30% de la población total depende de leña utilizados con eficiencia, que raramente superan el 8%; esto unido al enorme potencial forestal del Ecuador con aproximadamente 17'458.000 hectareas de aptitud preferentemente forestal, hacen de este recurso renovable de ser técnicamente aprovechado, una futura fuente energética de suma importancia.

(Ref. 1).

CAPITULO II

LA EVOLUCION DE LAS ARTES DE LA PANIFICACION

La forma en que el hombre ha perfeccionado el pan a lo largo de milenios refleja su evolución cultural y su ingenio. El hombre inventó y refinó sus herramientas para sembrar, cosechar y reducir el trigo a harina, así como sus hornos para cocer la harina y convertirla en pan. Cuando los habitantes de una comunidad establecían contacto con los de otra, hacían un intercambio tanto de ideas como de mercancías. En excavaciones realizadas en aldeas prehistóricas se han descubierto numerosos ejemplos de utensilios para labrar la tierra, segar, moler y hornear.

Para cocer su pan, los egipcios idearon un horno de barro en forma de cono truncado. Estaba provisto de una división horizontal, sobre la cual se colocaba la masa, introducida desde arriba. El fuego se encendía en la parte inferior del horno.

Más tarde, los griegos diseñaron un horno de piedra en forma de colmena. La bóveda ayudaba a conservar el calor durante más tiempo y a distribuirlo uniformemente. El fuego se encendía sobre el piso del horno. Una vez que quedaban bien calientes las piedras, se extraían las

ascuas y se cocía la masa sobre el piso del horno, y a la temperatura necesaria.

Los romanos lograron el siguiente avance al encerrar la colmena entre ladrillos y dotarla de una chimenea. Con refinamientos, este tipo de horno llegó a conocerse como "horno de pala", así llamado por el instrumento de mango largo que se utilizaba para introducir la masa en la cámara caliente y más tarde, sacar el pan. Los romanos idearon una amplia diversidad de manjares cocidos al horno. El "horno de pala" inventado por ellos es un tipo de horno que aún se utiliza para hacer pan en muchas regiones del mundo.

Durante la Edad Media, es decir desde la desintegración del Imperio Romano hasta el principio del Renacimiento, mil años más tarde, el comercio declinó y con él languideció el intercambio de las mercancías y las ideas que contribuían al perfeccionamiento del pan. El trigo antes importado de Egipto y del norte de Africa llegó a escasear. La harina blanca era un lujo. El europeo en general volvió a consumir un pan de clase más primitiva: panes ázimos morenos hechos de mezclas de cebada o de centeno. Incluso a medida que el trigo comenzó a ser más abundante, hacia fines de aquella época, poca gente podían comprarlo o carecían de la habilidad o de los recursos para construir un horno. Se hacía pan en los castillos feudales o en los monasterios, centralización

que a la larga condujo al resurgimiento del arte de la panificación. A medida que las aldeas cobraban nueva vida, el panadero adquiría mayor importancia entre los comerciantes, y las amas de casa acudían a él para comprar pan o llevarle masa ya preparada a fin de que la cociera en su horno.

En contraste, en las indómitas tierras del Nuevo Mundo, los dispersos poblados eran demasiado pequeños para sostener a un panadero profesional. El pan hecho en casa se convirtió en un arte peculiarmente norteamericano, nacido de la necesidad del ama de casa radicada en sitios recién colonizados. Aprendió a utilizar lo que tenía a su alcance, principalmente el maíz.

Los primeros colonizadores conocieron el maíz a través de los indios. Lo cultivaban en los pequeños claros de tierras parcialmente desmontadas. Seco, podía ser golpeado o molido para obtener una harina tosca que servía al ama de casa para hacer varios tipos de pan. Los llamados "corn dodgers", "pastel de azadón", "Johnny cake", borona y "pan de cuchara" fueron variaciones de una misma masa, a la que se añadía sal, a veces miel o melaza para endulzarla y manteca, mantequilla u otro tipo de grasa.

La cocción se hacía sobre el fuego de la chimenea o en olla de hierro gruesa hundida entre las brasas.

En tierras boscosas el desmonte de una extensión suficiente para lograr una cosecha de trigo exigía tiempo y trabajo. Después de desmontar el terreno se dejaba en reposo algunos años para que se ablandara; de lo contrario producía un trigo rugoso y con sabor a humedad. Los trigos adecuados para hacer pan se obtuvieron gradualmente, después de la emigración a las praderas del Oeste.

A medida que la frontera avanzaba hacia el Pacífico, dejando atrás tierras colonizadas, los molinos de harina iban formando parte de las comunidades. Después de cada cosecha el agricultor llevaba trigo al molino o lo guardaba para molerlo en el curso del año conforme a sus necesidades. A menudo, como remuneración por sus servicios, el molinero se reservaba una parte de trigo o de la harina para ofrecerla en venta localmente. Muchas de las grandes empresas harineras de la actualidad comenzaron así.

No obstante, los molinos de harina resultaban inalcanzable para muchos colonos, pues precisaban un viaje de varias millas durante un período prolongado.

La harina obtenida después de un día de viaje o un lapso aún mayor era muy preciada y se usaba pareamente, quizás como un agasajo dominguero o en festividades especiales. La tosca harina de fabricación casera se destinaba al consumo diario. Es comprensible que el pan blanco

llegara a tenerse en alta estima.

el transporte ferroviario y los adelantos logrados en maquinaria agrícola permitieron obtener finalmente cantidades abundantes de trigo, a medida que la frontera avanzaba hacia el oeste. La harina de trigo logró gradualmente una producción suficiente para permitir su consumo liberal. A la vez, se facilitó la elaboración casera de pan. La chimenea fue gradualmente reemplazada por cocinas con hornos, a su vez sometidos a constante perfeccionamiento.

La historia del pan, así como se lo narra para Norte América de la misma forma es para Sur América, pero con algunas variantes.

(Ref. 2).

CAPITULO III

SITUACION FORESTAL ECUATORIANA

3.1 INTRODUCCION

Se ha determinado que de 27'507.000 hectáreas (has) de territorio ecuatoriano, aproximadamente 15'172.000 has (55.2%) están constituidas por bosques naturales, 2'286.000 has (8.3%) pueden ser consideradas no aptas para el uso agropecuario y sólo aptas para uso forestal, 1'101,000 has (4.0%) son suelos netamente improductivos y solamente 8'944.000 has (32.5%) pueden ser destinadas al uso agropecuario propiamente dicho.

Estas cifras son demasiadas significativas para concluir que el Ecuador tiene un evidente destino forestal; sin embargo, este cuadro impresionante de recursos forestales, se ha venido deteriorando en forma acelerada por la Tala indiscriminada, con desperdicio de dos tercios, puesto que de 2'400.000 m² cortados anualmente, solamente un tercio, o sea 800.000 m han tenido uso industrial racional; el resto ha quedado en el extinto bosque o ha sido dedicado al uso doméstico, a usos domésticos con eficiencia muy bajas.

Este proceso de destrucción acelerada exige una acción inmediata de recuperación mediante programas intensivos de reforestación con variedades apropiadas a cada zona, completada con sistemas de recuperación más eficientes que promuevan un uso más racional de la leña y residuos agroforestales.

3.2 BALANCE ENERGETICO FORESTAL

En la región de la costa, se estima que hay menos de dos millones de hectáreas de bosques potencialmente productivos, de los cuales un poco más de un millón de has se encuentran en el noroeste y casi medio millón de has en la cordillera de Chongón y Colonche (península); por lo tanto se ha considerado conveniente hacer una estimación actualizada de la situación de los recursos disponibles en estas regiones, con miras a las perspectivas que ofrecen para la planificación de un mayor desarrollo industrial, pues las condiciones climáticas, topográficas y especies forestales que se presentan tienen un gran interés.

3.3 FACTORES DETERMINANTES EN LA SELECCION DE FORMACION DE MACISOS FORESTALES

Se puede decir que existen cuatro factores básicos en la determinación de cualquier actividad empresarial:

factor social, económico, político y técnico. Estos factores se asocian para sugerir una directriz, en muchos casos a ser seguida.

3.3.1 FACTOR SOCIAL

La realidad social ecuatoriana nos presenta un cuadro cuyos indicadores muestran una gran disponibilidad de mano de obra, o sea, de un alto índice de desempleo, en especial en las regiones rurales del país donde el índice de analfabetismo es elevado.

La actividad forestal localizadas en regiones, tienen por consiguiente la oportunidad de ser bien orientada, promover una mayor fijación de hombres para que habitan la región, dándoles condiciones de desenvolverse en su propio medio, sin provocar alteraciones violentas en sus valores culturales, que la migración normalmente acarrea.

3.3.2 FACTOR ECONOMICO

La inestabilidad de los precios de combustibles derivados del petróleo con aumentos sucesivos y progresivos, elevan los costos de los productos a precios incompatibles, debido al gasto extra que deben realizar las diferentes empresas, tornándose necesario por tanto, dirigir enfoques en el sentido de visualizar soluciones alternativas a nivel

energético de formas de minimizar los costos, tratando de mantener una producción deseable.

Una de estas alternativas podría ser: desarrollar programas de tecnificación en hornos artesanales para panaderías y obtener eficiencias más elevadas que prometan un energético de costo menor.

3.3.3 FACTOR POLITICO

Nada más que la asociación de dos factores socio-económico son necesarios para la orientación de una nación; la plena ocupación en forma de trabajo expresada en mano de obra, la cual tenemos en abundancia, aliada al factor de mantenernos en una balanza de pagos equilibrada. esto es, tratar de usar los recursos y tecnologías que disponemos para evitar las importaciones de insumos.

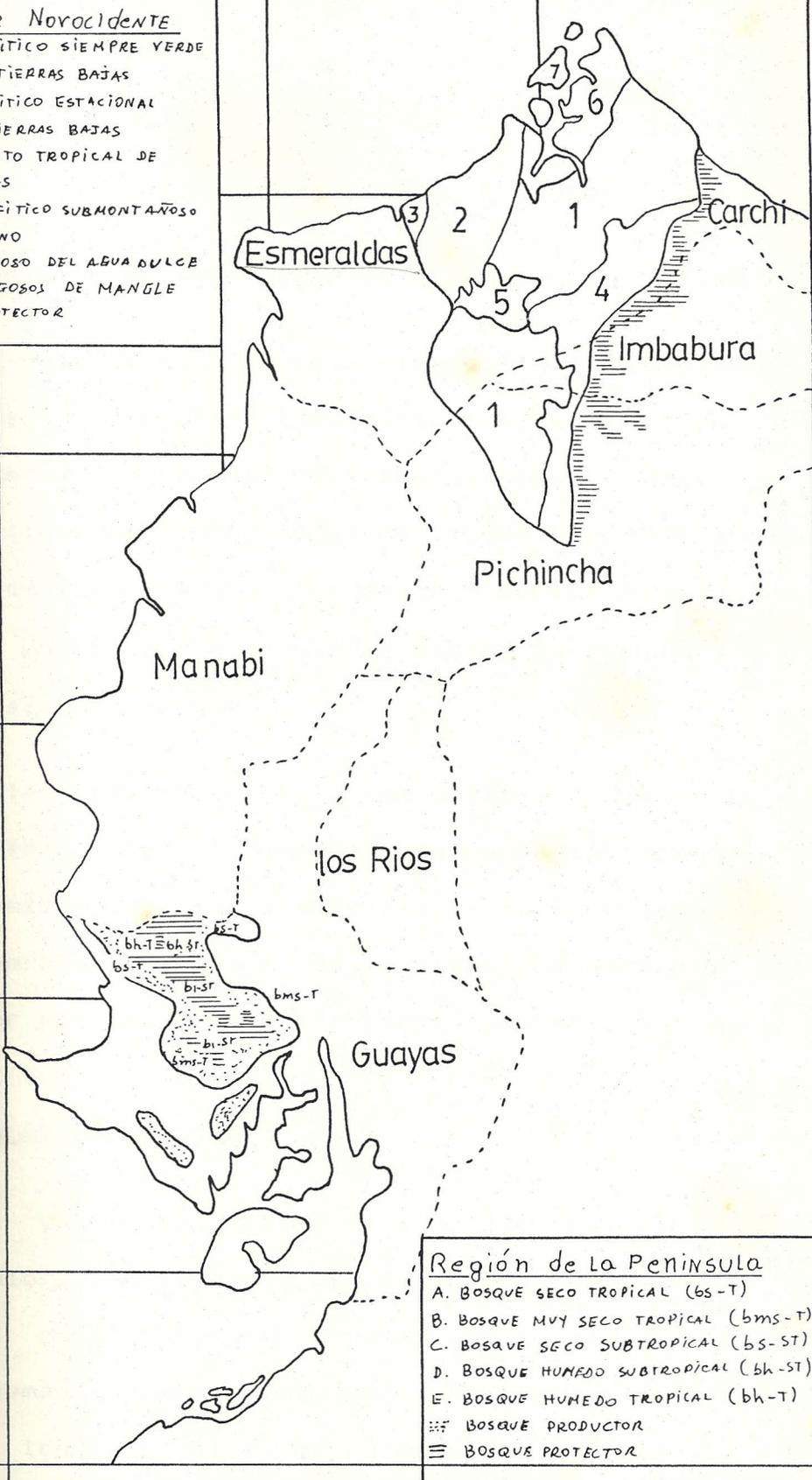
3.3.4 FACTOR TECNICO

Debido a la falta de mano de obra especializada para la utilización de mecanismos sofisticados se hace necesario utilizar la propia tradición forestal que está más íntimamente ligada a los métodos y procesos de utilización más intensiva de mano de obra.

(Ref. 3)

FIG 3-1 TIPOS FORESTALES

- Región de Noroeste
- 1 MONTE HIROFÍTICO SIEMPRE VERDE TROPICAL DE TIERRAS BAJAS
 - 2 MONTE HIROFÍTICO ESTACIONAL TROPICAL DE TIERRAS BAJAS
 - 3 MONTE TROPOFITO TROPICAL DE TIERRAS BAJAS
 - 4 MONTE HIROFÍTICO SUBMONTAÑOSO
 - 5 MONTE SERRINO
 - 6 MONTE CENAGOSO DEL AGUA DULCE
 - 7 MONTES CENAGOSOS DE MANGLE
 - ≡ BOSQUE PRODUCTOR
 - ≡ BOSQUE PROTECTOR



- Región de La Península
- A. BOSQUE SECO TROPICAL (bs-T)
 - B. BOSQUE MUY SECO TROPICAL (bms-T)
 - C. BOSQUE SECO SUBTROPICAL (bs-ST)
 - D. BOSQUE HUMEDO SUBTROPICAL (bh-ST)
 - E. BOSQUE HUMEDO TROPICAL (bh-T)
 - ≡ BOSQUE PRODUCTOR
 - ≡ BOSQUE PROTECTOR

CAPITULO IV

DIFERENTES NIVELES DE ENERGIA

4.1 ENERGIA TOTAL DISPONIBLE EN EL COMBUSTIBLE: LENA

Con definición "energía disponible, es la que se podría convertir totalmente en trabajo si los procesos reversibles fueran posibles". Uno de los cometidos más importantes del Ingeniero, es obtener la cantidad máxima de trabajo a partir de un proceso o de un ciclo y consumir el mínimo de trabajo en las operaciones inversas.

En la combustión de un combustible (ignorando las pérdidas por radiación) la energía química es transformada a calor sensible de la masa gaseosa a la temperatura teórica de la llama, dependiendo este calor del poder calorífico del combustible (leña).

4.1.1 VALOR CALORIFICO

El valor calorífico (calorific value) ó poder calorífico de cualquier sustancia, es definida como el calor obtenible cuando una unidad de peso es quemada completamente bajo condiciones específicas y los productos de combustión enfriados a la

temperatura estándar.

Se debe distinguir entre potencia calorífica superior e inferior. Por ejemplo cuando en un combustible hay presente hidrógeno, uno de los productos de combustión es el vapor de agua, y si ésta se condensa, el calor latente liberado se suma a los restantes calores de combustión; el total constituye la potencia calorífica superior del combustible.

En principio, las potencias caloríficas se pueden calcular de los análisis completos, si se conocen todos los valores de las reacciones que tienen lugar durante la combustión.

4.2 ENERGIA DISPONIBLE EN LOS GASES DE CAMARA

Si la temperatura de un cuerpo de gas de combustible es T_2 y su calor específico medio (entre 0 y T_2 °C) es C_p por m^3 (a STP); luego el calor sensible contenido en los gases será $C_p T_2$ (por m^3). Supóngase que el gas se enfría hasta T_1 °C para dar algo de su calor para elevar la temperatura de un elemento de carga desde $(T_1 - DT)$ °C hasta T_1 °C. Debido a tal cesión, el calor contenido en los gases pasa a ser $C_p T_1$ (suponiendo que C_p no ha variado apreciablemente) y el calor utilizable para ceder calor a la temperatura T_1 será evidentemente $C_p (T_2 - T_1)$ por m^3 .

La calidad de una cantidad de energía es definida por Tring como la parte de energía que puede convertirse en trabajo en un sistema ideal perfecto. La calidad de la energía de una masa de gases de combustión (que se encuentran a $T_1^{\circ}k$) respecto de sus inmediaciones (por ejemplo, la carga de un horno a $T_0^{\circ}k$), corresponde a la parte termodinámicamente disponible del calor utilizable y puede calcularse de acuerdo con lo que se acaba de indicar. De aquí la importancia de lograr altas temperaturas de llamas.

Esta temperatura de llama que se obtiene mediante la combustión de un combustible depende no sólo de su poder calorífico, sino también de la técnica utilizada en la combustión.

4.3 ENERGIA DISPONIBLE EN LOS GASES

La disminución de eficiencia térmica con hornos de alta temperatura es en parte debido a las grandes pérdidas por radiación y convección, pero se debe aún más a que el calor es sacado del horno por los productos de combustión, ya sea en forma de calor sensible o como calor no desarrollado de combustibles sin quemar (combustión incompleta).

Este calor sensible que escapa en los gases de combustión del horno, llamado calor residual o "perdido" posee una parte termodinámicamente

disponible, razón por la cual deben usarse a un potencial tan alto como sea posible.

4.4 EFICIENCIA EN LOS DIFERENTES NIVELES DE ENERGIA

La eficiencia en su forma más sencilla es la producción dividida con el consumo.

En el primer nivel podemos definir una eficiencia de combustión η_c como la relación: calor generado en la cámara de combustión/potencia calorífica, así:

$$\eta_c = \frac{Q_g}{M_c P_c}$$

Q_g = Energía generada en la cámara de combustión
(w/hr)

M_c = Flujo de combustible (kg/hr)

P_c = Poder calorífico del combustible (kj/kg)

En el segundo nivel, se puede definir una eficiencia de transmisión o eficiencia térmica η_t . Se entiende por eficiencia térmica como la razón del calor extraído por la carga del calor potencial en el combustible, siendo deseable en todas las operaciones de calentamiento obtener una η_t elevada. Esto significa que las calorías disponibles en el combustible deben ser aprovechadas, tanto como sea posible en calentar la carga, con la menor cantidad de pérdidas a los alrededores y después que el calor haya tenido el efecto deseado a la carga será

usado para algún otro propósito de ser posible. De lo anterior se tiene:

$$\eta_t = \frac{Q_c}{M_c H_r}$$

Ecuación 4.2

Q_c = Calor extraído por la carga

La η_t sería mayor (o la pérdida de virtud menor) cuando la diferencia de temperatura entre el foco caliente y el frío fuera un mínimo. Al mismo tiempo, la velocidad de transferencia es mayor cuando la diferencia de temperatura es un máximo y, como la pérdida de calor a los alrededores es una función del tiempo, hay obviamente una ventaja al trabajar con velocidades altas de transmisión de calor.

(Ref. 4).

CAPITULO V

ANALISIS TERMICO

5.1 METODOLOGIA EN SU FUNCIONAMIENTO

Los términos "eficiencia" y "economía" cuando son usados en su verdadero sentido en relación con hornos industriales se refieren al costo del calentamiento por unidad de peso de producto vendible terminado "pan" (carga). Siendo hoy en día el término sobresaliente de este costo de calentamiento el precio de combustible, que es digno de estudio la economía del mismo.

En este caso se utiliza un horno artesanal típico ubicado en la zona rural del cantón Piñas, provincia de El Oro. Fig. 5.1 (Diagrama del horno artesanal).

Para hacer este análisis térmico, se utilizará cierta cantidad de leños, los mismos que se los pesará y se los procede a introducir en el horno, fig. # 5.1 a, se los enciende y se los deja que se combustionen (cenizas), fig. # 5.1 b.

El calor generado por la combustión de la leña, llega a las paredes en forma de radiación y convección. Una parte de este calor pasa a través de las paredes

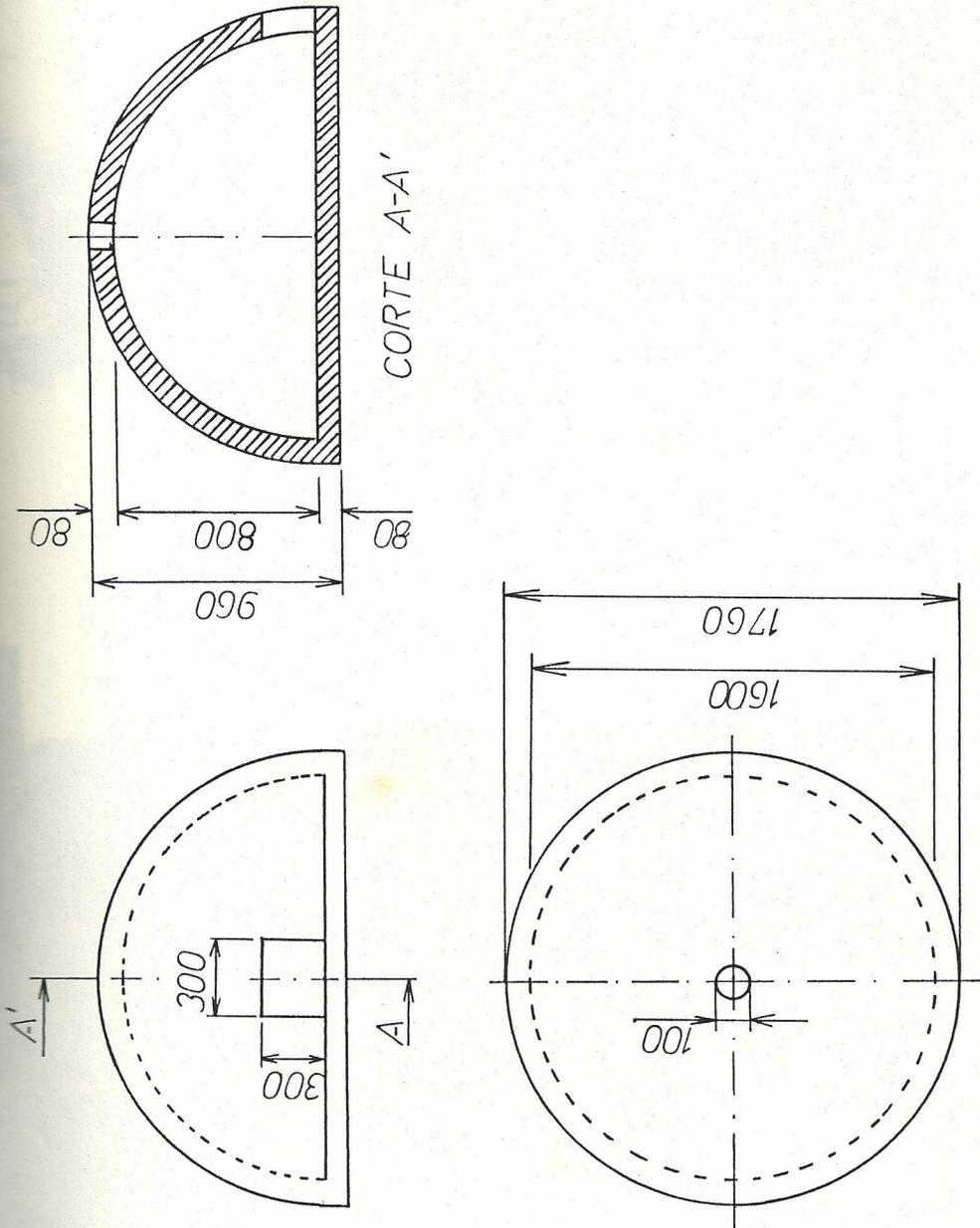


FIGURA 5.1 ESQUEMA DEL HORNO ARTESANAL TIPICO



Fig. 5.1.A Introducción de la leña al horno

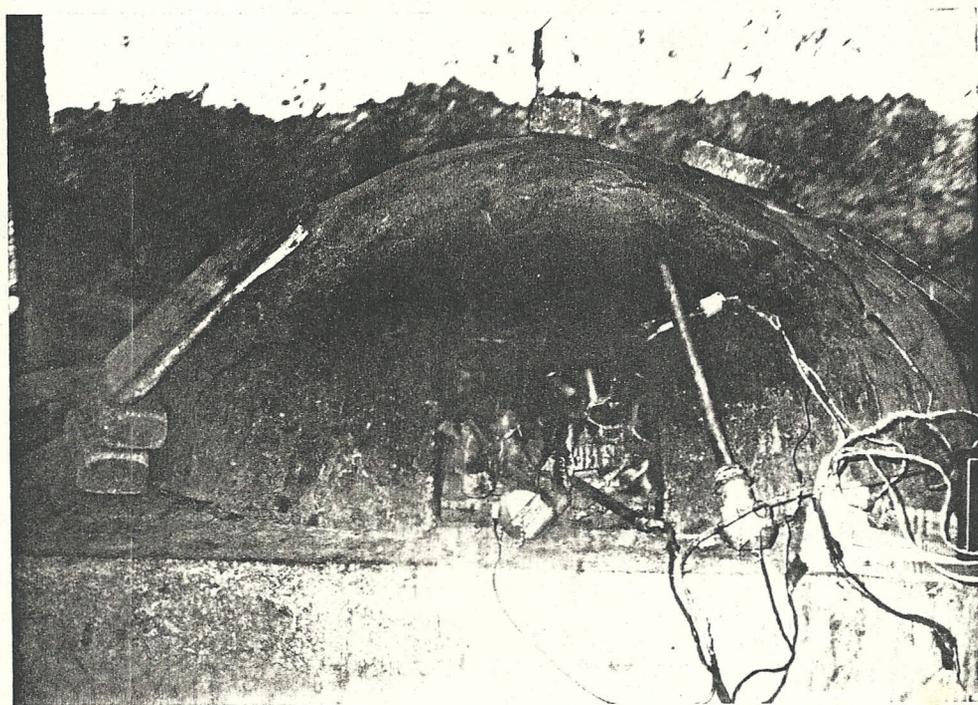


Fig. 5.1.B Combustión de la leña

Y pisos aumentado la temperatura de esas partes (se almacena calor) que luego se pierde a los alrededores por radiación y convección.

La energía que es radiada a la pared, una parte es absorbida (α), otra transmitida (τ) y otra reflejada (ρ) fig. 5.1 c.

La energía se refleja en forma difusa debido a que las paredes son asperas.

τ = Transmisividad

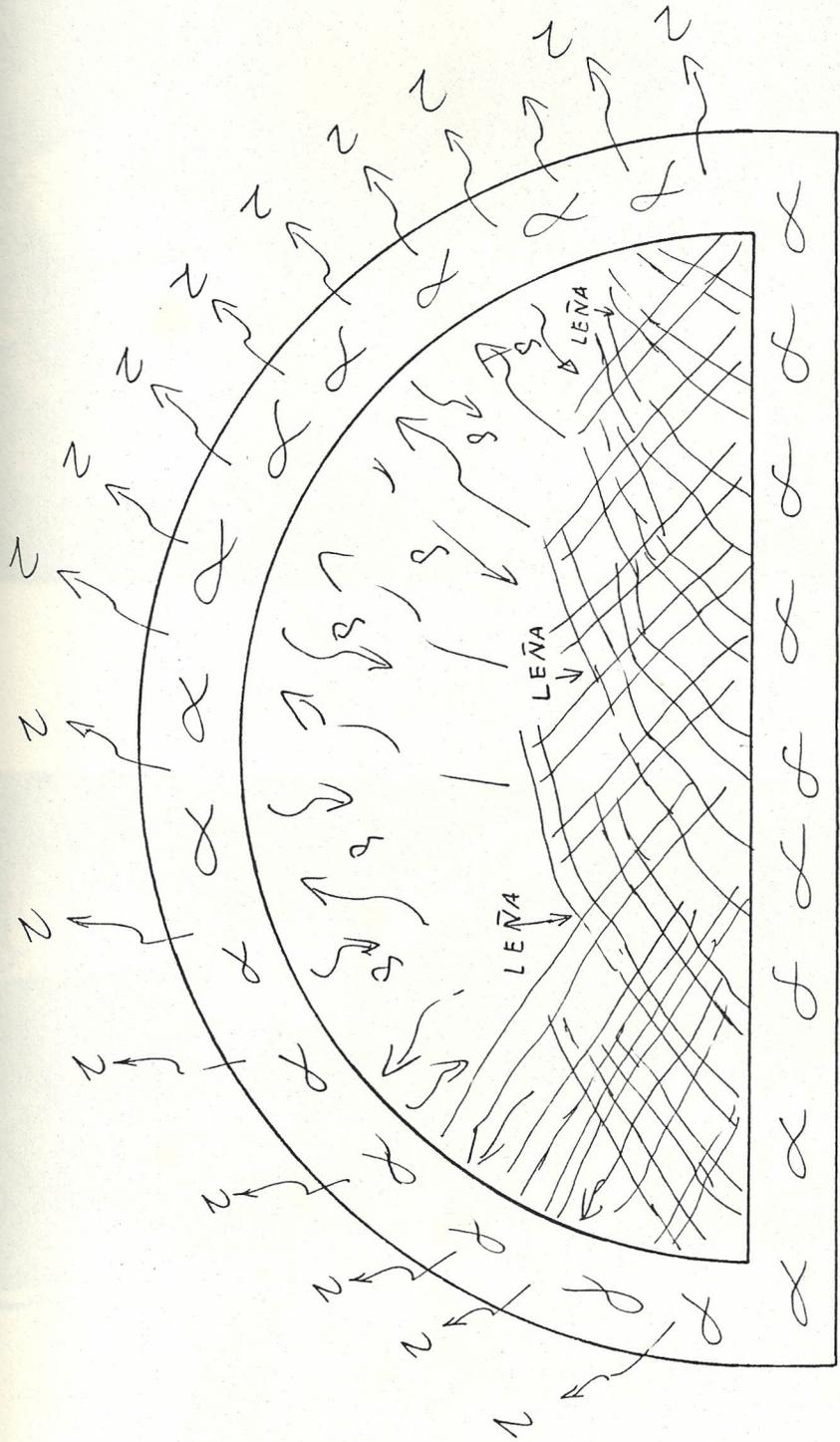
α = Absortividad

ρ = Reflexibilidad

(Ref. 5).

Cuando las paredes interiores del horno toman un color azul cielo, empíricamente se conoce que el horno ha llegado a su temperatura de trabajo (se toman lectura de temperatura). En este momento se procede a sacar los residuos de leña, se los deja enfriar y se los pesa para conocer cuanta humedad ha perdido y cuanta energía ha entregado.

Si es que el horno esta demasiado caliente se deja enfriar de 5 a 10 minutos. Se procede a pesar y a introducir al horno los panes crudos (masa de pan) fig. # 5.1 d, estos empiezan a cocerse o perder humedad por efecto de la energía guardada en las paredes que emiten en forma de radiación fig. # 5.1 e



5.1.C ESQUEMA DE LA COMBUSTION DE LA LEÑA



Fig. 5.1.D Introducción de pan crudo

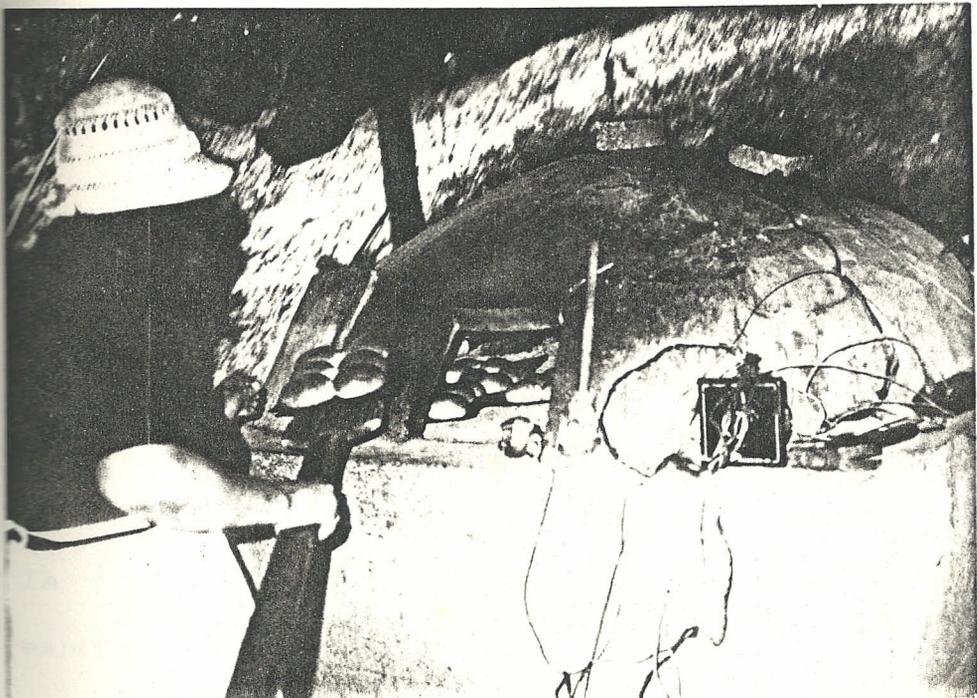


Fig. 5.1.E Cocción del pan

y 5.1 f.

Durante el proceso de calentamiento y enfriamiento del horno se procede a tomar datos de temperatura de la pared con termocuplas tipo "k" que son las indicadas para este tipo de trabajos.

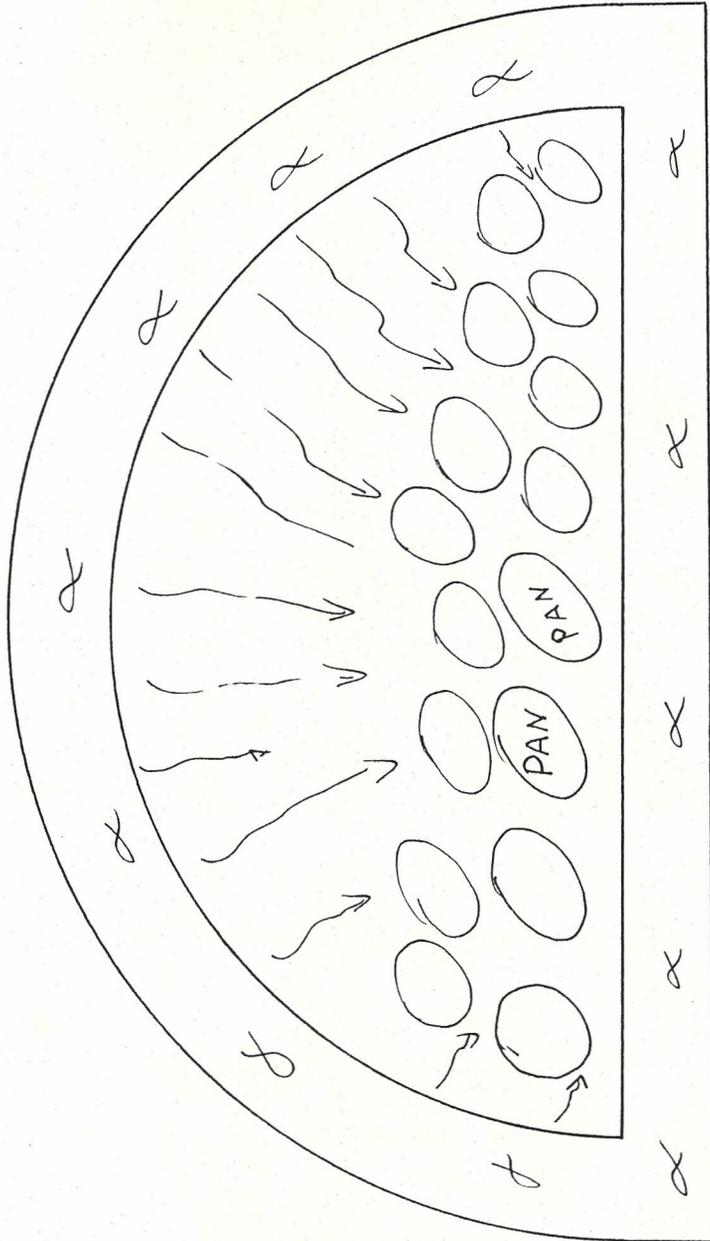
(Ref. 6 y 7).

5.2 TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACION

A diferencia de los fenómenos intrínsecos de convección y conducción que son afectados principalmente por la diferencia de temperatura, y muy poco por el nivel de temperatura, el intercambio de radiación aumenta rápidamente con el incremento en el nivel de temperatura, de ello se deduce que a altas temperaturas la radiación es el factor dominante en la transferencia de calor.

Debe hacerse una diferencia en la radiación de los productos de combustión a los sólidos, entre la radiación de los gases claros y la radiación de las llamadas llamas luminosas.

La radiación de los gases claros no sigue la ley de la cuarta potencia ni de cualquier otra ley exponencial (excepto en un limitado rango de temperaturas). La razón es porque los gases no radian en todas las longitudes de onda como lo hacen los sólidos, en lugar de ello cada gas radia en 3 o 4



5.1.F ESQUEMA DE LA COCCION DEL PAN

bandas definidas en las longitudes de ondas.

La radiación total de los gases claros no depende únicamente de su temperatura, sino también de su composición y del espesor de la capa de gas, así como también de la forma de la capa de gas.

Los gases más importantes de los hornos son CO_2 y H_2O .

Aunque la absorptividad del gas debe ser igual a su emisividad cuando $T_w = T_g$, conforme T_g aumenta, aumenta por encima de T_w , la absorptividad es afectada por la temperatura cuando el CO_2 y el H_2O están presentes juntos. La radiación total debida a ambos es algo menor que la suma de los efectos calculados separadamente.

La transferencia de calor desde una llama luminosa es mayor que la de los gases claros a la misma temperatura, esto es debido a que con el aumento de temperatura la radiación de los gases claros no puede crecer tan rápidamente como la radiación de los sólidos. De aquí se deduce que una moderada cantidad de luminosidad en los gases del horno aumenta la velocidad de transferencia de calor.

El número de factores que afecta la luminosidad es tan grande, que la luminosidad la cual produce la mayor transferencia de calor no puede ser determinada

por cálculos. Por lo tanto para evaluar la luz de luminosidad en hornos pequeños se tiene que recurrir a valores experimentales obtenidos en hornos modelos muy grandes. No obstante las propiedades significativas de una llama, su temperatura y su emisividad pueden ser determinadas experimentalmente por dos instrumentos comunmente disponibles; el pirómetro óptico y el pirómetro de radiación total.

La radiación en un recinto cerrado como la cavidad de un horno conteniendo un gas absorbente-emisor, y un sumidero (pared), es un problema muy complejo, por lo que para propósitos de cálculos deberán hacerse varias consideraciones: 1) El gas es gris, es decir que para radiación de cualquier fuente, su absorptividad α_g es igual a su emisividad ϵ_g , la superficie del sumidero de calor que en este caso es la pared del horno, las cuales son parcialmente reflectora-difusa 100% absorbente, razón por la cual $\alpha_w = 1$, reciben calor por convección y radiación en el interior, guarda calor y pierde por conducción hasta el exterior de la pared, y de ahí, pierde calor hacia el ambiente por radiación y convección.

El calor transferido desde el gas estará dado por:

$$Q = TAc F_{egw} (\epsilon T_g - \alpha T_w) + h Ac (T_g - T_w) + U_p A_w (T_g - T_o) \quad \text{Ec. 5.1}$$

De donde el intercambio radiante entre el gas y la carga está dado por:

$$Q = A_c F_{gw} (\epsilon T_g - \alpha T_w) \quad \text{Ec. 5.2}$$

Para efectos de cálculos la Ec. 5.2 se la expresa en un coeficiente radiativo.

Por lo que:

$$Q = h_r A_c (t_g - T_w) \quad 5.2.1$$

Igualando 5.2 y 5.2.1 se tiene:

$$h_r = \frac{F_{g-w} \alpha (\epsilon T_g^4 - \alpha T_w^4)}{T_g - T_w} \quad 5.3$$

Donde:

F_{g-w} = Factor que depende de la geometría del sistema

ϵ = Emisividad

α = Absortividad

σ = cte de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2 \text{ k}^4$)

(Ref. 5 y 8).

5.3 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCION

La transferencia de calor por convección ocurre siempre que un cuerpo se coloca en un fluido cuya temperatura es mayor o menor que la del cuerpo. Como resultado de la diferencia de temperaturas, fluye calor entre el fluido y el cuerpo, ocasiona un cambio

en la densidad de las capas de fluido en la vecindad de la superficie. La diferencia de densidades provoca un flujo descendente del fluido más pesado y un flujo ascendente del fluido más ligero. Si el movimiento del fluido es ocasionado solamente por la diferencia de densidad resultantes de los gradientes de temperatura, sin ayuda de una bomba o de un agitador, el mecanismo de transferencia de calor asociado se conoce como convección libre o natural. Las corrientes de convección libre transfieren la energía interna almacenada en el fluido, esencialmente en la misma forma que corrientes de convección forzada. Sin embargo, la intensidad del movimiento de mezclado es generalmente menor en la convección libre, y como consecuencia los coeficientes de transferencia de calor son menores que en la convección forzada.

Las velocidades del fluido en corrientes de convección libre, especialmente en aquellas generadas por la gravedad, son generalmente bajas.

El campo de temperatura en convección libre es similar al de convección forzada. Por lo tanto se aplica la interpretación física del número de Nusselt, sin embargo para aplicación práctica, generalmente se usa la ecuación de Newton:

$$dq = hc \, dA \, (T_s - T_w)$$

Ec. 5.4

Para encontrar el coeficiente convectivo 'hc' desde la fuente de energía (leña combustionándose) hacia las paredes del horno, se lo halla utilizando la ecuación 5.5 (ref. 9).

$$Nuy = 0.332 Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad \text{Ec. 5.5}$$

Esta ecuación 5.5 expresa el valor local del coeficiente de transferencia de calor en términos de distancia a partir del borde principal de la pared y las propiedades del fluido (propiedades del Gas de la combustión).

Para que la ecuación 5.5. nos dé un valor global se debe multiplicar por dos el valor de Nuy, y se tendrá un Nul global.

$$Nul = 2 * Nuy$$

$$Nul = 2 (0.332 Pr^{1/3} Re^{1/2})$$

$$Nul = 0.664 Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad \text{ec. 5.6}$$

$$Re = V * L/\nu$$

$$Nul = h * L/k \quad \text{ec. 5.7}$$

Donde:

Nul = Número de nusselt global

Pr = Prandlt

Re = Número de Reynolds

L = Altura de la pared

Cuando hay variación apreciable entre las condiciones del gas y de la pared, se recomienda que las propiedades del fluido se evalúen a la llamada temperatura de película T_f , definida como:

La media aritmética entre la temperatura del gas y de la pared.

$$T_f = \frac{T_G + T_w}{2}$$

(Ref. 9).

5.4 PERDIDA DE CALOR A TRAVES DE LAS PAREDES

Un factor importante de la disminución de la eficiencia térmica de un horno es la pérdida de calor desde el exterior de las paredes. Para evaluar la eficiencia térmica se debe trabajar en un régimen de estado estable, es decir donde la temperatura en un punto dado es independiente del tiempo.

Para flujo estable de calor a través de una pared, la temperatura de los productos de combustión excede la temperatura de la superficie interior de la pared. La temperatura de la pared decrece establemente hacia su superficie exterior, en cuyo lugar la temperatura excede del aire circundante. Por lo tanto el calor transferido a través de las paredes del horno estará dado por:

$$Q = U_r A_r (T_g - T_o)$$

Ec. 5.8

$$U_r = \frac{1}{\frac{1}{h_{T1}} + \frac{L1}{K1} + \dots + \frac{1}{h_{To}}}$$

$h_{T1} = h_{ci} + h_{ri}$, coeficiente total en el interior de la pared.

$h_{To} = h_{co} + h_{ro}$, coeficiente total en el exterior de la pared.

$L =$ Espesor del tabique (ladrillo) que forma la pared.

$K =$ Conductividad de pared

La pérdida de calor para una extensión dada de pared y para una temperatura de horno dada es menor si la pared es más gruesa o si la pared es hecha de un mejor aislante o si la superficie exterior de la pared es de tal característica que no pierde calor al medio circundante.

Para alcanzar un régimen estable y para propósitos de operación es necesario saber el tiempo de calentamiento de las paredes del horno hasta lograr un alto porcentaje de su estabilidad y poder evaluar las propiedades promedio de las mismas.

La conducción de calor en el estado inestable es difícil de resolver por métodos analíticos por lo que

se ha recurrido al método gráfico de Schmidt.

(Ref. 5 y 8).

5.4.1 METODO GRAFICO DE SCHMIDT

El método gráfico de Schmidt fue desarrollado para el calentamiento o enfriamiento de placas planas o curvas. Consideramos la fig. 5.4.1 digamos que Δx sea un pequeño elemento finito o porción del espesor de una pared y $\Delta \theta$ sea un intervalo finito de tiempo; digamos que T_1, T_2, \dots , sean temperaturas, k la conductividad de la pared, δ la densidad y C_p el calor específico de la pared.

Luego, $(T_4 - T_3) K \Delta \theta / \Delta x$ es el calor transmitido en el tiempo $\Delta \theta$ por unidad de área del elemento 3 - 4.

$(T_3 - T_2) K \Delta \theta / \Delta x$ es el calor transmitido en el tiempo $\Delta \theta$ por unidad de área del elemento 2 - 3.

La diferencia $(T_4 - 2T_3 + T_2) K \Delta \theta / \Delta x$ es el calor almacenado en el elemento Δx localizado simétricamente a ambos lados del plano 3, el cual es igual a $(T_3' - T_3) \delta C_p \Delta x$. de aquí

$$(T_3' - T_3) = K \Delta \theta / \delta C_p \Delta x^2 (T_4 - 2T_3 + T_2) \quad \text{Ec. 5.8}$$

En la cual T_3' y T_3 son las temperaturas al final y al comienzo del intervalo $\Delta \theta$.

Si los terminales de temperatura 2 y 4 son unidos

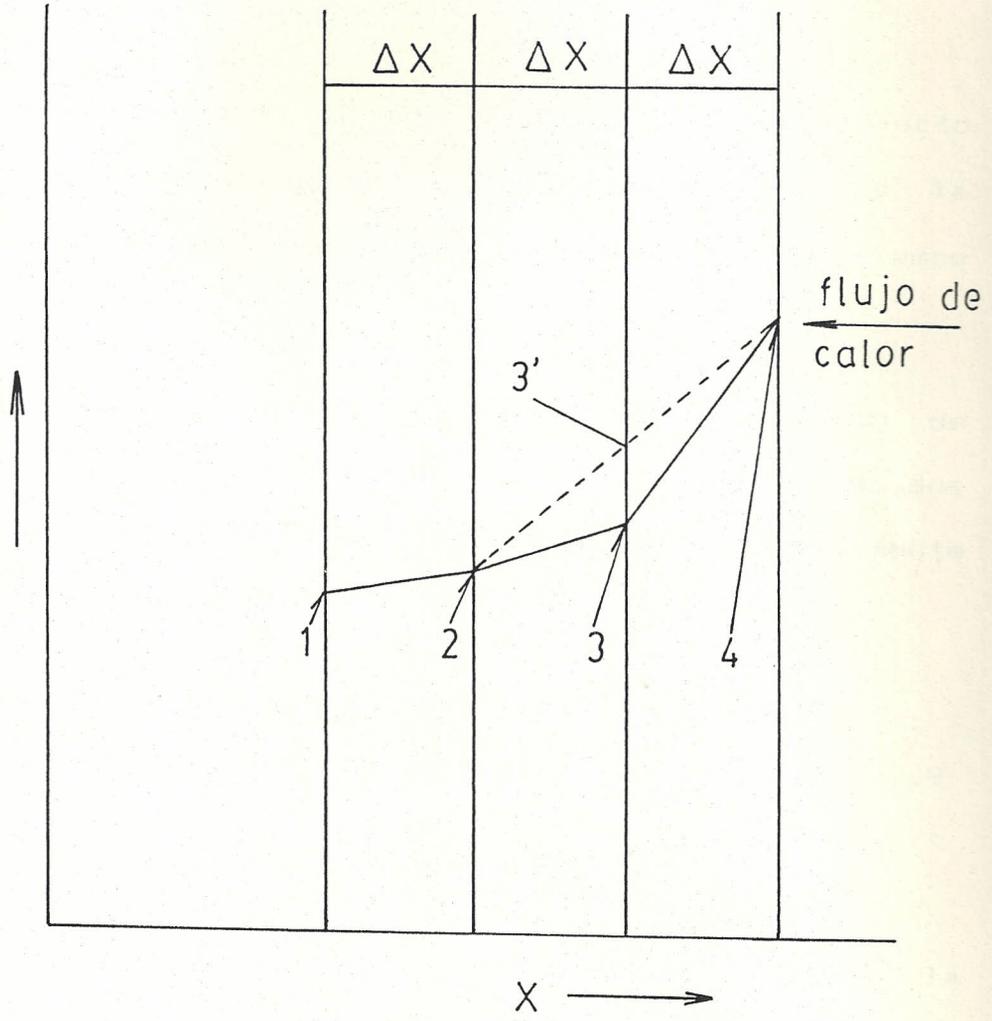


Fig. 5.4.1 Método gráfico de SCHMIDT: Temperatura vs. distancia.

por una línea recta, luego la distancia 3-3' es igual a $\frac{1}{2} (T_4 - 2T_3 + T_2)$, porque la temperatura en 3' es igual a $\frac{1}{2} (T_4 + T_2)$.

Multiplicando 3 - 3' por $2k\Delta\theta/8Cp \Delta x^2$, el producto obtenido de acuerdo a la ecuación 5.8 es la elevación de temperatura en el plano 3 en el tiempo $\Delta\theta$.

El intervalo de tiempo $\Delta\theta$ y el incremento de espacio Δx pueden ser seleccionados arbitrariamente; pero deben ser lo suficientemente pequeños para producir resultados exactos.

El cálculo gráfico es muy simple si se hace que $2k\Delta\theta/8Cp \Delta x^2 = 1$ ó $\Delta x^2 8Cp/\Delta\theta k = 2 = M$ Ec. 5.9

Donde M es un módulo sin dimensiones.

En problemas técnicos, debe tenerse en cuenta la transferencia de calor en la superficie de la pared. Es costumbre asumir que la transferencia de calor es proporcional a la diferencia de temperaturas de la superficie interior T_{s1} y del medio circundante T_g , o en otras palabras que h es independiente del nivel de temperatura. De acuerdo a la fig. 5.4.2. Se tiene.

$$h (T_g - T_{s1}) = K \Delta\theta/\Delta x \quad \text{Ec.5.10}$$

O sea que el calor transmitido del medio al área unitaria de pared en unidad de tiempo es igual al calor conducido a través del área unitaria de superficie de pared por unidad de tiempo.

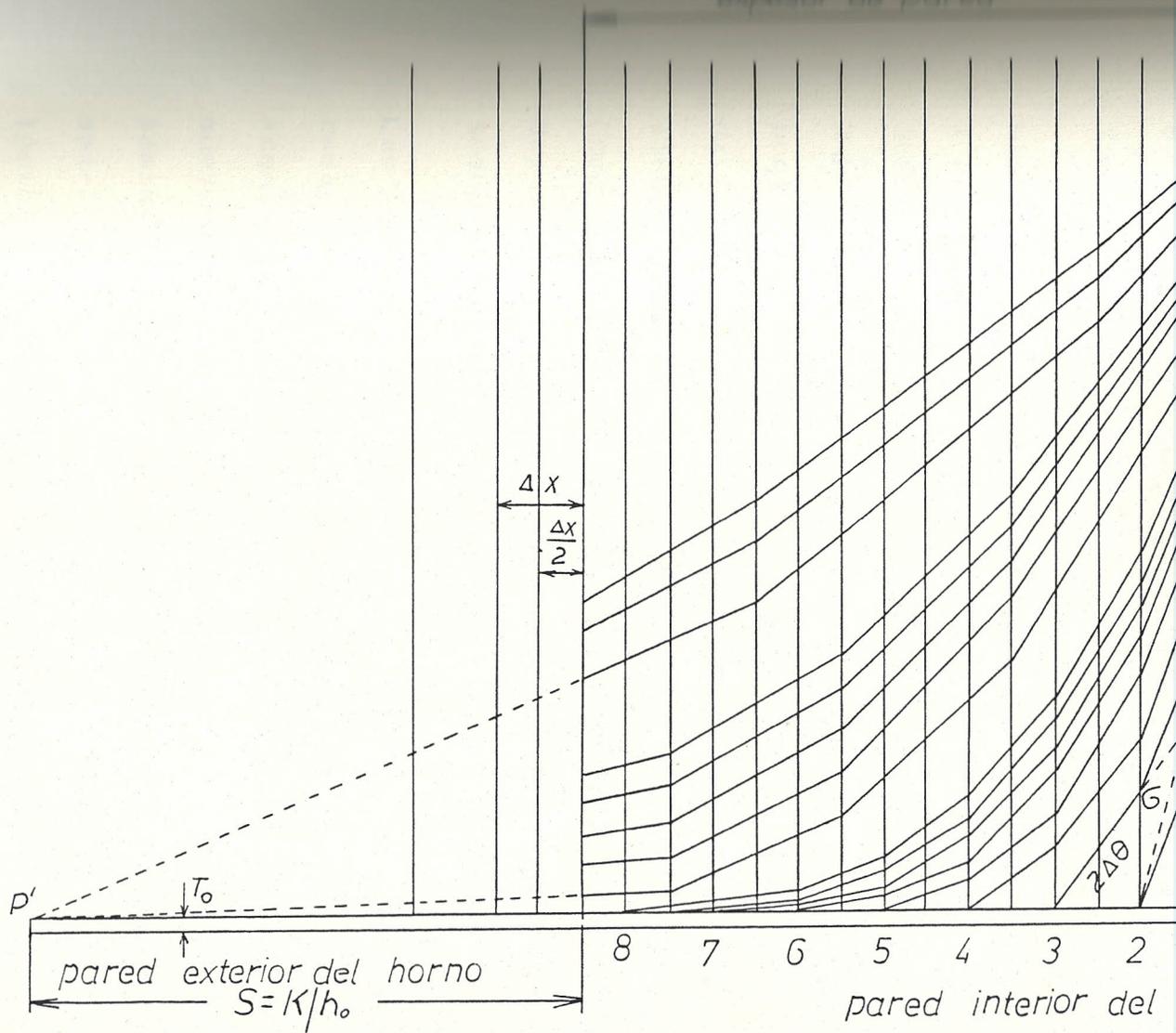
La ecuación 5.10 puede ser interpretada geoméricamente. La tangente a la curva de temperatura en la superficie de la pared interior pasa a través de un punto localizado a una altura.

T_g y k/hr distante de la pared.

Si T_g y hr varían con el tiempo, tal variación puede ser considerada en el cálculo, gráfico, además esta variación puede ser calculada por métodos computacionales pero no puede hacerse en un cálculo analítico.

La tangente a la curva de temperatura en la pared exterior estará a una distancia k/h_o de la superficie y en un punto con una altura T_o .

Digamos que la fig. 5.4.2 representa una pared de espesor X que ha sido dividida en 8 secciones y que por el centro de cada una se ha dibujado una línea divisoria. Si un lado de la pared es súbitamente expuesto a una temperatura T_g , la tangente a la curva de temperatura en el punto A de la superficie debe señalar al polo P, de aquí la intersección B entre AP y la línea vertical a través del punto O



5.4.2 METODO GRAFICO DE SCHMIDT: PARA PARED DIVIDIDA EN 8 SECCIONES

(una distancia $\Delta X/2$ detrás de la superficie) y este punto es el terminal de la primera línea de construcción 2B. La línea 2B' es parte del primer polígono de temperatura, la otra parte es completada dibujando una línea B'F. La línea 2B'D luego representa la temperatura en la pared después de un intervalo de $\Delta \theta$ hr. desde que comienza el calentamiento.

Luego se construye 2E y su intersección a través de 1 da F. 3B' intersecta en 2 a G. Luego conectamos 3GFP y la distribución de temperatura después de $2\Delta \theta$ será 3GFJ y así sucesivamente hasta llegar al punto 8, a partir de aquí nos valemos de una división auxiliar localizando el punto 9 sobre la línea base una distancia $1/2 \Delta X$ a la izquierda. Como último tramo del polígono trazamos una línea desde el punto obtenido en 8 hasta el polo P' y todos los demás extremos señalarán a este polo.

Las curvas de temperatura sucesivas se acercarán cada vez más, antes que ocurra una confusión es aconsejable saltar cada 2 divisiones siendo el nuevo intervalo de tiempo $4\Delta \theta$. Si al doblar la lámina la nueva línea OB localizada una distancia detrás de la superficie de $1/2$ el ancho de la nueva lámina, se ve que está más lejos que P, luego se omite la intersección con esta línea como B y P

será usado como el punto final de todas las líneas. Más adelante cuando las líneas se vuelven a acercar, el ancho de las divisiones puede ser doblado otra vez y el tiempo cuadruplicado.

Se puede ahora considerar el caso de una pared compuesta de dos materias A y B con buen contacto en la unión. Si se usa el mismo M de 1 a ec. 2.8 y el mismo θ para ambos se tiene:

$$M \Delta \theta = \Delta X^2 A / \alpha A = \Delta X^2 B / \alpha B \quad \text{Ec.5.11}$$

$$\alpha = k / \delta C_p$$

y consecuentemente la razón de los espesores de las divisiones debe ser tomado como igual a la raíz cuadrada de las difusividades térmicas:

$$\Delta X_A / \Delta X_B = (\alpha_A / \alpha_B)^{\frac{1}{2}}$$

siendo el único inconveniente el gran número de divisiones que puede haber en uno de los dos materiales.

En el estado estable la temperatura en una pared compuesta decrecerá establemente hacia la superficie exterior, pero con un cambio de pendiente en la interface.

(Ref. 5 y 8).

3.5 COMPOSICION DE LA MADERA

Con 15% de humedad

42.9% C, 6.9% H, 49.7% O

(Referencia 6)

La fórmula química para esta madera obtenida en base al dato anterior es:

C 3.57	C x/x	x/x = 1	C
H 6.9	H y/x	y/x = 1.93	H 1.93
O 3.1	O z/x	z/x = 0.86	O 0.86

CH y/x Oz/x + [(1+y/4x) - z/2x](O2+3.76 N2)]

C02 + (y/2x) H2O + [(1+y/4x) - z/2x] 3.76 N2

$$m \text{ a/f) estq.} = \frac{[(1+ y/4x) - z/2x](O_2+3.76 N_2)}{CH \ y/x \ O z/x}$$

$$= \frac{[(1+1.9/4) - ---][32+3.76 (28)]}{12 + 1(1.9) + 16 \times 0.86}$$

$$= \frac{143.458}{27.66} = 5.18$$

$$m \text{ a/f) estq.} = 5.2$$

$$\phi = \frac{m \text{ a/f) real}}{m \text{ a/f) estq.}}$$

$$m \text{ a/f) real} = (\phi) m \text{ a/f) estq.}$$

$$m \text{ a/f) real} = (1+EA) m \text{ a/f) estq.}$$

Si se tiene un exceso de aire de 30%

Entonces

$$m_{a/f) \text{ real}} = (1+0.30) (5.2)$$

$$m_{a/f) \text{ real}} = 6.76 \frac{\text{kg de aire}}{\text{kg de combustible}}$$

Durante el proceso de calentamiento del horno se

$$\text{consumio } m_{f) \text{ real}} = 9.03 \text{ kg/hr}$$

$$m_{a/f) \text{ real}} = \frac{m_a}{m_f} \text{ real}$$

$$\frac{m_a}{m_f} \text{ real} = 6.76$$

$$m_a \text{ real} = (6.76) \quad m_f \text{ real} = (6.76) (9.03) \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

$$m_a \text{ real} = 61 \text{ kg/hr}$$

$$m_g \text{ real} = m_a \text{ real} + m_f \text{ real}$$

$$= 61 + 9.03$$

$$m_g \text{ real} = 70.03 \text{ kg/hr}$$

(Ref. 10).

CAPITULO VI

SISTEMA EXPERIMENTAL Y CALCULOS

6.1 COMBUSTION DE LA LENA

Al combustionarse la leña, esta entrega energía que son utilizables y otros que no son. Como se puede apreciar a continuación.

6.1.1 ENERGIA TOTAL DE LA LENA

Para saber cual es el valor total de la energía de leña.

$$Et1 = (Pc)1 (m)1 (1 - \% \text{ humedad})$$

Donde

$$(Pc)1 = \text{Poder calorífico de la leña} = 17000 \begin{matrix} \text{kJ} \\ \text{--} \\ \text{kg} \end{matrix}$$

$$(m)1 = \text{Masa total de leña} = 17.3 \text{ kg}$$

Considerando un 30% humedad

Reemplazando estos valores en la ecuación

$$Et1 = (15000 \begin{matrix} \text{kJ} \\ \text{--} \\ \text{kg} \end{matrix}) (17.3 \text{ kg}) (1-0.30\%)$$

$$Et1 = 205 \text{ MJ}$$

6.1.2 ENERGIA REMANENTE "CARBON"

Una vez que se ha combustionado la leña queda unos residuos, que es conocido con el nombre de carbón.

$$E_c = (m)_c (P_c)_c$$

Donde:

$$(m)_c = \text{Masa del carbón} = 2.5 \text{ kg}$$

$$(P_c)_c = \text{Poder calorífico del carbón} = 28.000 \text{ kJ/kg}$$

$$E_c = (2.5) \text{ kg} \left(\frac{28000 \text{ kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$E_c = 70.000 \text{ kJ}$$

6.1.3 ENERGIA DE LENA CONSUMIDA

El valor de la energía de la leña consumida es la diferencia entre la energía total de leña y la energía remanente "carbón".

$$E = E_{t1} - E_c$$

$$E = 205 \text{ MJ} - 70 \text{ MJ}$$

$$E = 135 \text{ MJ}$$

6.1.4 EVAPORACION DE AGUA DE LA LENA

Cuando se combustiona la leña, se evapora el agua que contiene la misma.

$$E = (m)_l (\% \text{ humedad}) (L)$$

Donde

$$L = \text{Calor latente del agua} = 2400 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg}}$$

$$E = (17.3 \text{ kg}) (0.30) (2400 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg}})$$

$$E = 12.456 \text{ kJ}$$

$$E = 12 \text{ MJ}$$

6.1.5 ENERGIA UTILIZABLE

El verdadero valor que se utiliza para este proceso de calentamiento de las paredes es la diferencia entre la energía de la leña consumida y la evaporación de agua.

$$E = E_{\text{cons}} - E_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$E = (135 - 12) \text{ MJ}$$

$$E = 123 \text{ MJ}$$

6.2 CALENTAMIENTO DE LAS PAREDES

Como este problema a tratarse es en estado transiente, realizaremos solamente un ejemplo con cada fórmula que se presente y de esta forma tendremos una idea clara como funcionan las mismas o que valores nos dan o presentan.

6.2.1 COEFICIENTE RADIATIVO INTERIOR 'hri'

Para trabajar con los datos experimentales y obtener buenos resultados, trabajaremos con el coeficiente radiactivo dado en la ecuación 5.3.

$$h_{ri} = \frac{\sigma F_{1-2} (\epsilon T_g^4 - \alpha T_{wi}^4)}{T_g - T_{wi}}$$

$\epsilon = 0.2$ Llamas limpias traslucidas

$\epsilon = 0.7$ Llama amarilla

Con los datos experimentales para calcular el coeficiente interior h_{ri}

$$T_g = 939^\circ\text{k}$$

$$T_{wi} = 714^\circ\text{k}$$

Se asume

Como el espesor de la pared es mucho menor que el radio ($8 \text{ cm} \lll 80 \text{ cm}$), se toma como si la pared fuese plana.

$F_{1-2} = 1$ Porque las paredes del horno cubren todo el gas o llama

$\alpha = 1$ Porque absorbe toda la energía que llega a ella.

$\epsilon = 0.7$ Porque es llama amarilla.

Reemplazando todos estos valores en la ecuación 5.3 se tiene:

$$h_{ri} = \frac{(5.67 \times 10^{-8}) \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{k}^4} \right) (1) [(0.7)(939)^4 - (1)(714)^4]}{(939 - 714)^\circ\text{k}}$$

$$h_{ri} = 72 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{k}}$$

Y así se hacen todos los cálculos para las temperatura cada cierto tiempo (5 minutos). Todos estos cálculos se tabulan en la tabla # 3.

6.2.2 COEFICIENTE CONVECTIVO INTERIOR 'h_{ci}'

Con la ecuación 5.6.

$$Nu_l = 0.664 Pr^{1/3} Re^{1/2}$$

Con los datos experimentales de temperatura para calcular el coeficiente convectivo interior.

$$T_g = 666^\circ\text{C} = 939^\circ\text{k}$$

$$T_{wi} = 441^\circ\text{C} = 714^\circ\text{k}$$

Se obtiene T_f

$$T_f = \frac{939 + 714}{2} = 678^\circ\text{k}$$

Con T_f = 678°k se evalúan las propiedades

$$\nu = 8.71 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{Seg} \quad \rho = 0.4273 \text{ kg/m}^3$$

$$Pr = 0.704 \quad k_f = 0.0584 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{k}}$$

Para calcular la velocidad con

$$Mg)_r = \text{Masa del gas real} = 70.03 \text{ kg/hr}$$

$$A = \text{Area de la base del horno} = 1.60 \text{ m}^2$$

$$L = \text{Altura del horno} = 0.80 \text{ m}$$

$$\text{Mg)r} = \delta AV \quad V = \frac{\text{Mg}}{\delta A} = \frac{70.03}{(0.4273)(1.60)}$$

$$V = 102.43 \text{ m/hr}$$

$$V = 0.0284 \text{ m/Seg}$$

Con la ecuación

$$\text{Re} = \frac{\delta V1}{\mu} = \frac{V1}{\mu} = \frac{(0.0284)(0.80)}{8.71 \times 10^{-5}}$$

$$\text{Re} = 2.61$$

Reemplazando en la ecuación 5.7

$$\text{Nu} = \frac{h_{ci} * l}{k_f} \quad h_{ci} = \frac{\text{Nu} * k_f}{L}$$

$$h_{ci} = \frac{(9.54)(0.0584)}{0.80} = 0.697$$

$$h_{ci} = 0.697 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Todos los valores se tabulan en la tabla B-3.

6.2.3 GRAFICO T vs t

Con los datos de la tabla B-1 calentamiento y B-2 enfriamiento, para cada 5 minutos procedemos a graficar la fig. 6.1.

Con este gráfico nos damos cuenta como va variando la temperatura ha medida que va pasando el tiempo, o sea el calentamiento y enfriamiento de la pared.

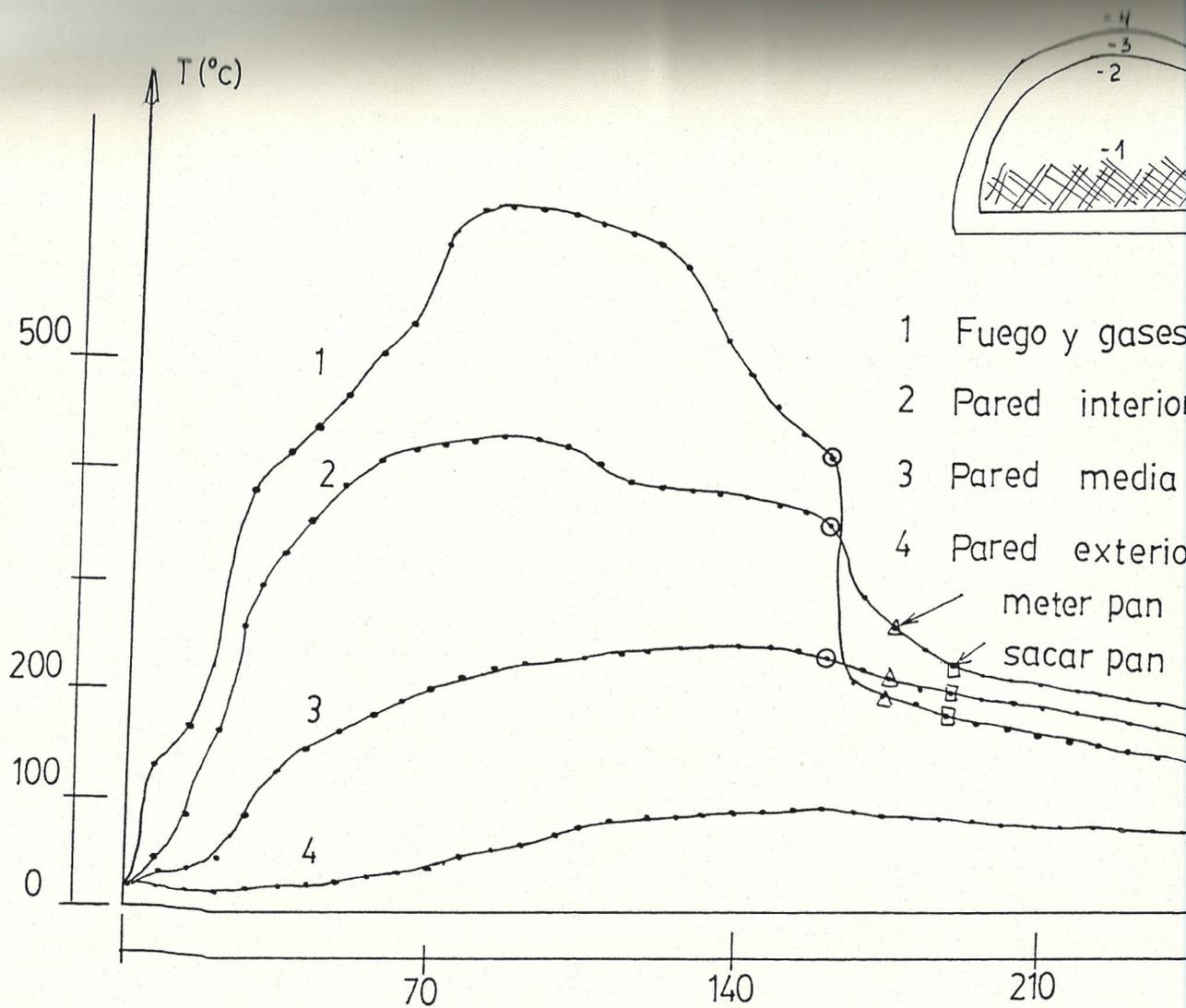


Fig. 6.1 Gráfico temperatura vs. tiempo

6.2.4 DIAGRAMA DE SCHMIDT

6.2.4.1 CALENTAMIENTO DE PARED

Propiedades del ladrillo (material con que esta construida la pared).

$$\delta = 1700 \text{ kg/m}^3$$

$$K = 0.72 \text{ w/m K}$$

$$C_p = 830 \text{ J/kg k}$$

$$\alpha = 4.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$$

Como ya se había explicado anteriormente la forma de construcción del diagrama.

Para construir la pared imaginaria como se muestra en la fig. 5.4.2.

$$S = \frac{k}{ht}$$

$$ht = h_{ri} + h_{ci}$$

Los valores de h_{ri} y h_{ci} se los toma de la Tabla B-3.

$$x = \frac{dx}{N} \quad \Delta\theta = \frac{(\theta - x)^2}{2\alpha}$$

Donde:

S = Distancia de la pared imaginaria. Ver gráfico 5.4.2.

ht = Coeficiente total, producto de la suma del coeficiente radiactivo y convectivo.

dx = Espesor de la pared

N = # de divisiones que se hace a la pared

X = Valor de las N divisiones en que se ha dividido la pared

$\Delta\theta$ = Intervalo de tiempo en que van subiendo o bajando las temperaturas.

$$X = \frac{0.08 \text{ m}}{6} = 0.0137 \text{ m}$$

$$\Delta\theta = \frac{(0.0133)^2 \text{ m}^2}{2 (4.5 \times 10^{-7}) \text{ m}^2/\text{seg}} = 197.5 \text{ seg}$$

$$S = \frac{k}{ht} = \frac{0.72 \text{ w/m}^\circ\text{k}}{7.24 \text{ w/m}^2 \text{ }^\circ\text{k}} = 0.099 \text{ m}$$

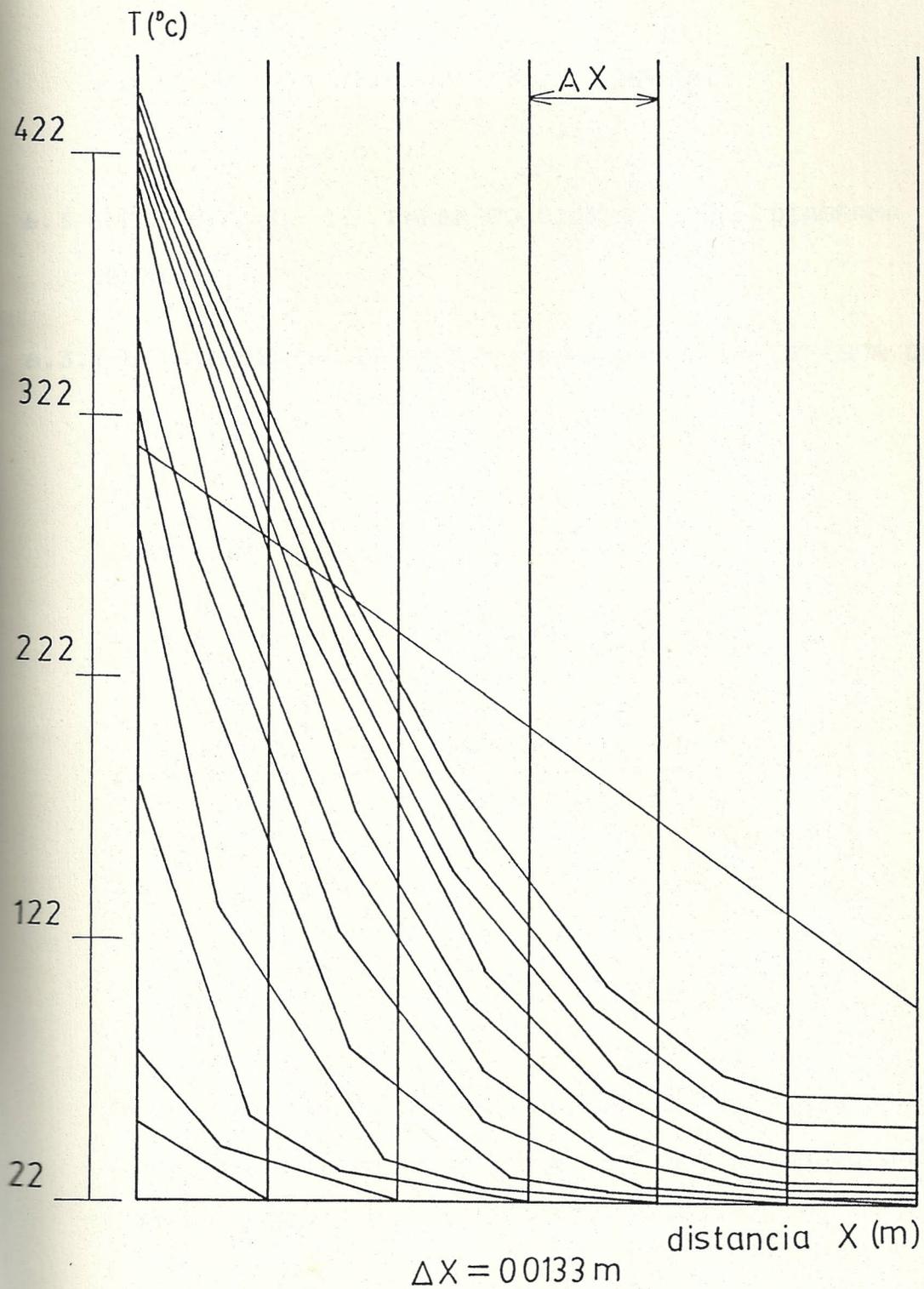
Los valores de ht se los toma de la tabla B-3, y así mismo los valores calculados de "S" se los tabula en la misma tabla (B-3).

Haciendo el calculo de $\Delta\theta$, indica que para llegar a la temperatura deseada de pared interior (temperatura de calentamiento del pan) Hay 35 intervalos de tiempo y temperatura, según el diagrama de Schmidt como se puede observar en la fig. 6.2.

6.2.5 CALOR O ENERGIA ACUMULADA EN PARED

Con la ayuda del diagrama de Schmidt. Se obtiene un valor aproximado de la energía almacenada.

Con $T_{wi} = 288^\circ\text{C}$



6.2 GRAFICO DE SCHMIDT: TEMPERATURA VS. DISTANCIA, DURANTE EL CALENTAMIENTO DE LA PARED.

$$T_w = 22^\circ\text{C}$$

$$Q = k A dx T$$

$$Q = (1700) (4) (0.08) (830) (288-22)$$

$$Q = 120 \text{ MJ}$$

6.3 ENFRIAMIENTO DE PARED-COCCION DEL PAN (DIAGRAMA DE SCHMIDT)

6.3.1 ENFRIAMIENTO DE PARED (HORNO) PARA UN ESPESOR DE 4 cm

$$k = 0.72 \text{ w/m}^\circ\text{k}$$

$$dx = 4 \text{ cm} = 0.04\text{m}$$

$$\Delta\theta = \frac{dx}{N} = \frac{0.04}{6} = 6.66 \times 10^{-3} \text{m}$$

$$\Delta\theta = \frac{(x)^2}{2\alpha} = \frac{(6.66 \times 10^{-3} \text{ m})^2}{2(4.5 \times 10^{-7}) \text{ m}^2/\text{seg}}$$

$$\Delta\theta = 100 \text{ seg}$$

$$S = \frac{k}{hcr} = \frac{0.72 \text{ w/m}^\circ\text{k}}{13 \text{ w/m}^\circ\text{k}} = 0.062 \text{ m}$$

Los valores de hcr se los toma de la tabla B-4, y los valores calculados de "S" se los tabula en la misma tabla.

Como se puede apreciar en la fig. 6.3 transcurren 9 intervalos de tiempo para enfriar la pared y cocer el pan, esto es:

$$\Delta\theta = 100 \text{ seg.} \times 9 = 900 \text{ seg.} = 15 \text{ min.}$$

Para la construcción del diagrama, nos ayudamos de la tabla B-4 y hacemos el gráfico 6.3, para ver cuanta energía entrega la pared según el diagrama de Schmidt, para cada intervalo de temperatura se hace lo siguiente:

Con la ecuación

$$E = (\rho)C_p DT = \delta A(dx) DT C_p$$

Donde:

δ = Densidad

A = Area de la pared

dx = Espesor de la pared

DT = Diferencia de temperatura

Cp = Calor específico

Con los datos de

$$T_{w1} = 288^\circ\text{C} = 561^\circ\text{k} \quad \delta = 1700 \text{ kg/m}^3$$

$$T_{w2} = 240^\circ\text{C} = 513^\circ\text{k}$$

$$dx = 0.08 \text{ m}$$

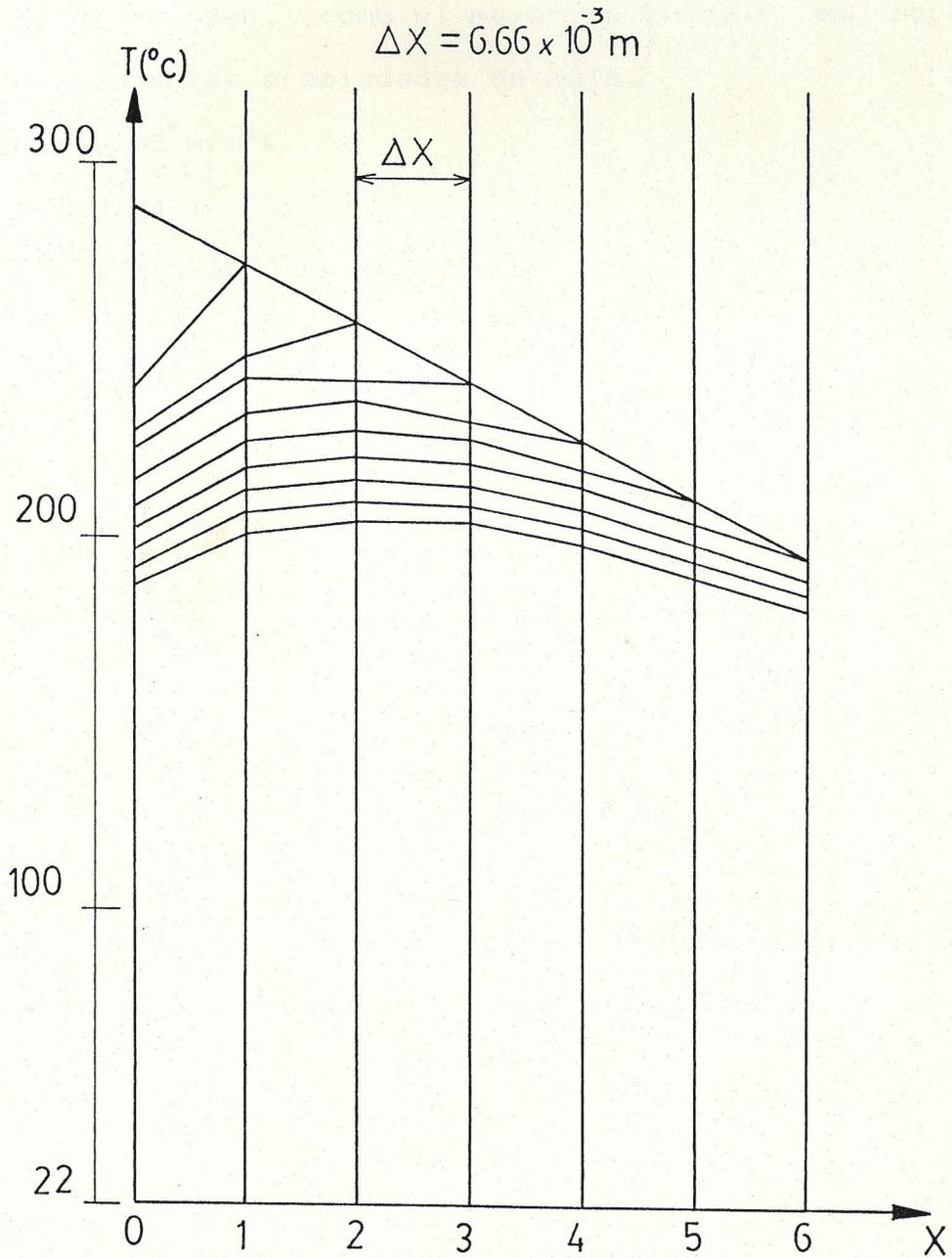
$$C_p = 830 \text{ J/seg k}$$

Reemplazando estos valores en la ecuación

$$E = (1700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(4\text{m}^2)(0.08\text{m})(830 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{k}})(561-513)^\circ\text{k}$$

$$E = 21.67 \text{ MJ}$$

Los cálculos de las energías se las tabula en la



6.3 GRAFICO DE SCHMIDT: TEMPERATURA VS. DISTANCIA, DURANTE EL ENFRIAMIENTO DE LA PARED.

tabla # I.

6.3.2 COCCION DEL PAN

Para el pan, como el mayor porcentaje es agua, asumimos las propiedades de éste.

$$K = 0.52 \text{ w/m}^\circ\text{k}$$

$$dx = 0.04 \text{ m}$$

$$\alpha = 1.462 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$$

$$C_p = 4220 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{k}}$$

$$A = 1.8 \text{ m}^2$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$X = \frac{dx}{N} = \frac{0.04}{6} = 6.66 \times 10^{-3} \text{ m}$$

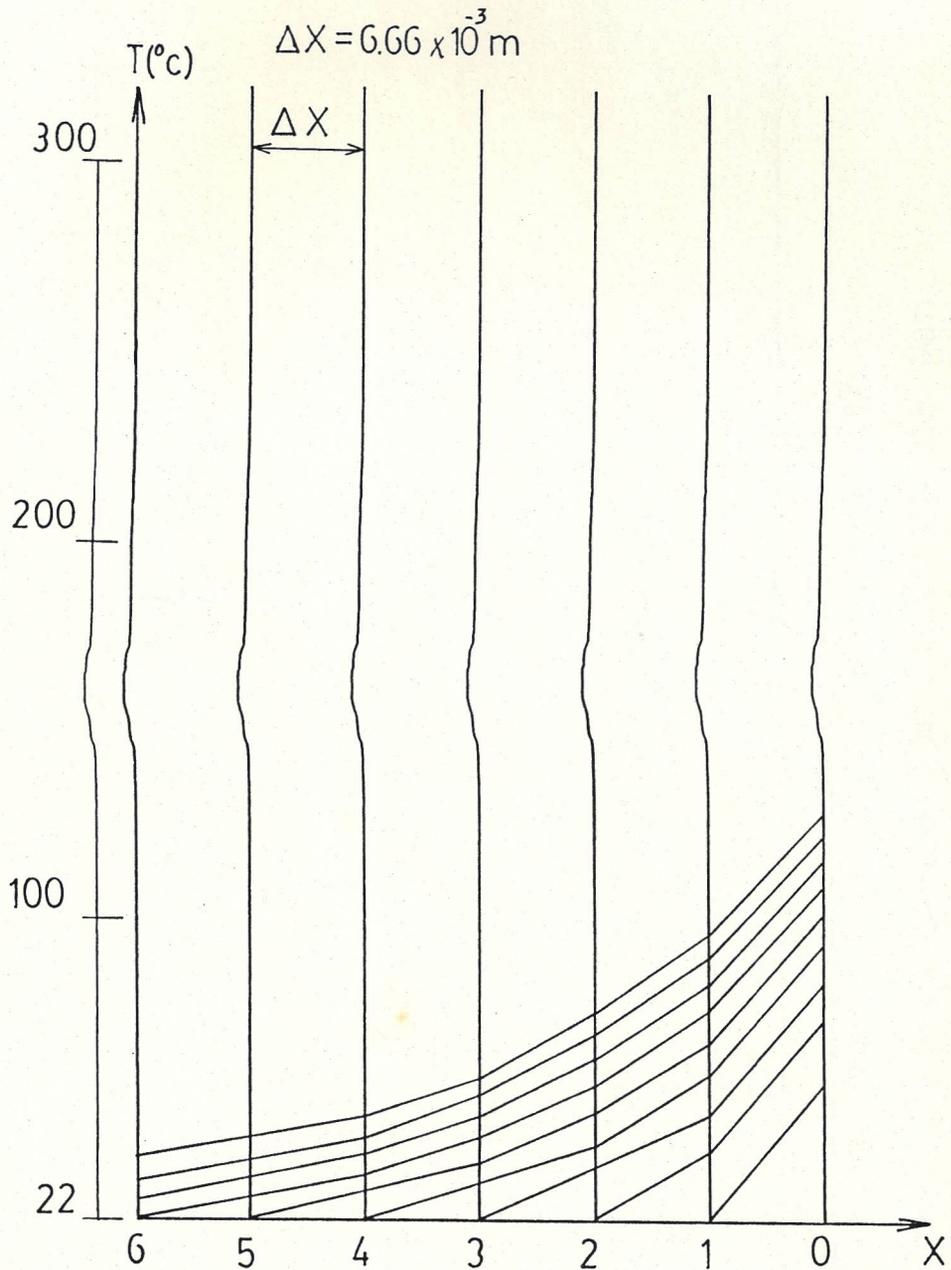
$$S = \frac{k}{h} = \frac{0.52 \text{ w/m}^\circ\text{k}}{13 \text{ w/m}^2 \text{ }^\circ\text{k}} = 0.04 \text{ m}$$

El valor de h se lo toma la tabla B-5, y los valores calculados de "S" se los tabula en la misma tabla.

$$\Delta\theta = \frac{(x)^2}{2\alpha} = \frac{(6.66 \times 10^{-3})^2 \text{ m}^2}{2(1.462 \times 10^{-7}) \text{ m}^2/\text{seg}}$$

$$\Delta\theta = 140 \text{ seg}$$

Para la construcción del diagrama nos ayudamos de la tabla B-5 y construimos el gráfico 6.4 para la



6.4 GRAFICO DE SCHMIDT: TEMPERATURA VS. DISTANCIA, DURANTE LA COCCION DEL PAN.

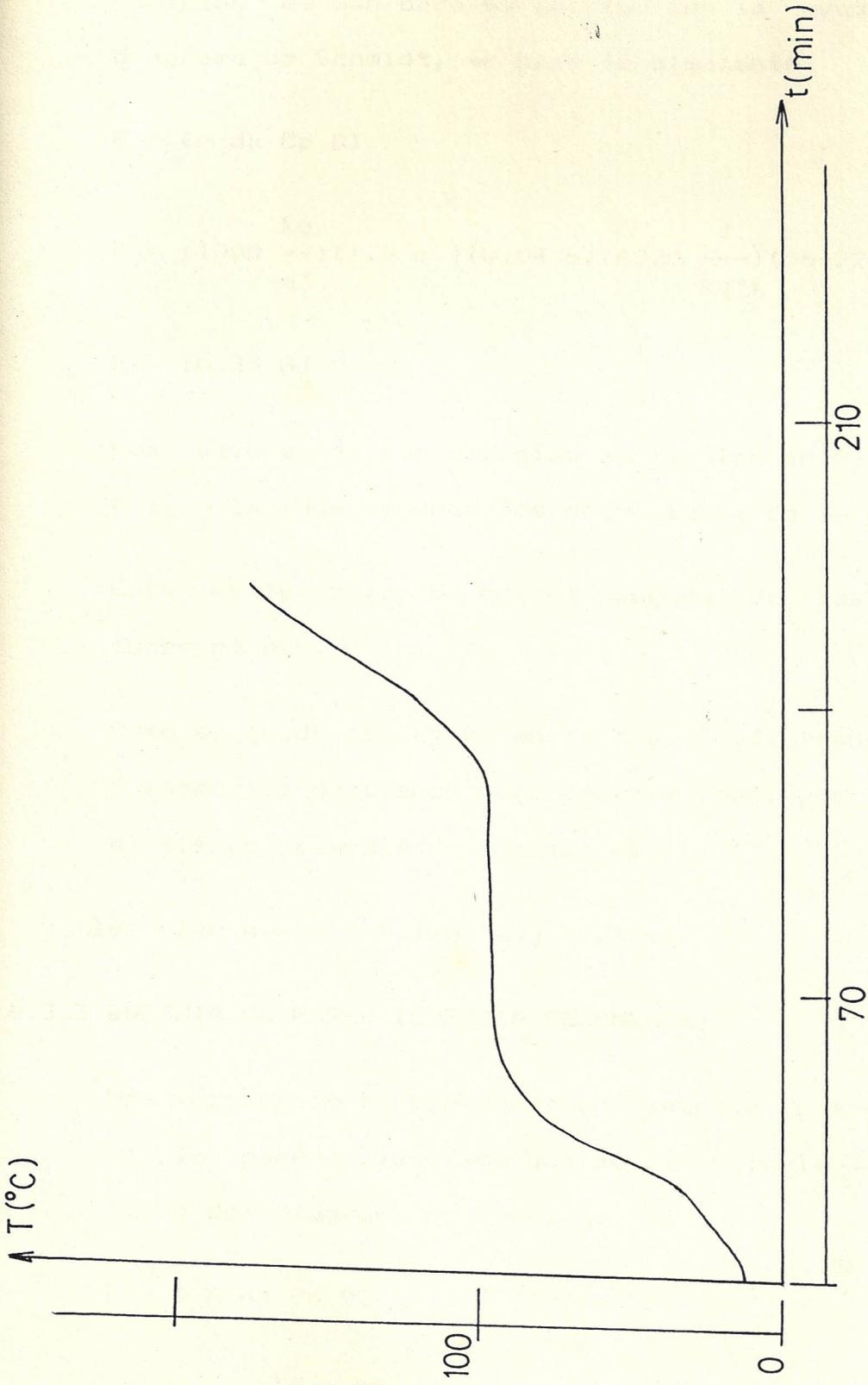


Fig 6.4 A GRAFICO T vs t Cocción del pan

cocción del pan. Para saber cuanta energía ha recibido el pan para su cocción con la ayuda del diagrama de Schmidt, se hace lo siguiente.

$$E = \delta A dx C_p DT$$

$$E = (1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(1.8 \text{ m}^2)(0.04 \text{ m})(4220 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{k}})(56-22)$$

$$E = 10.33 \text{ MJ}$$

Los valores de las energías se tabulan en la tabla # I, las que sumando nos da un total de 30 MJ.

Este es el valor de energía que se utiliza para cocer el pan.

Como se puede apreciar en la fig. 6.4, transcurre 9 intervalo de tiempo para cocer el pan, por lo que el tiempo promedio de cocción es:

$$\Delta\theta = 140 \text{ seg} * 9 = 1260 \text{ seg} = 21 \text{ min.}$$

6.3.3 ENERGIA EN PARED (ENERGIA REMANENTE)

Una vez cocido el pan queda una energía almacenada en la pared, la misma que se la calcula con la ayuda del diagrama de Schmidt.

$$E = \delta A dx C_p DT$$

$$E = (1700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(4 \text{ m}^2)(0.08 \text{ m})(830 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{k}})(200^\circ\text{k})$$

TABLA I
VALORES DE ENERGIA
ENTREGADA (PARED)
RECIBIDA (PAN)

ENFRIAMIENTO DE PARED			COCCION DE PAN		
Tw1	Tw2	E	Tw1	Tw2	E
(°C)	(°C)	(MJ)	(°C)	(°C)	(MJ)
288	240	21.67	56	22	<u>10.33</u>
240	228	5.41	74	56	5.08
228	224	3.03	84	74	2.8
224	216	3.16	194	84	3.03
216	208	3.16	102	94	3
208	202	2.7	110	102	2.43
202	197	2.25	116	110	1.82
197	192	2.25	122	116	1.82
TOTAL					30.3

$$E = 90 \text{ MJ}$$

6.4 PERDIDAS TERMICAS

Cuando se está quemando la leña, hay pérdidas térmicas, ya sea por la puerta de entrada, trasera o boquete de la chimenea, ya que éstas permanecen abiertas durante el proceso de combustión. Además también hay pérdidas por las paredes del horno, ya sea por convección o radiación.

6.4.1 POR LA FUERTA DE ENTRADA, TRASERA Y BOQUETE DE CHIMENEA

Para calcular estas pérdidas con los datos

$$A = 0.70 \text{ m}^2$$

$$T_g = 666^\circ\text{C} = 939^\circ\text{k}$$

$$T_\infty = 22^\circ\text{C} = 714^\circ\text{k}$$

Con la ecuación

$$hr = \frac{\sigma F_{1-2} \epsilon (T_g^4 - T_\infty^4)}{T_g - T_\infty}$$

Donde

$F_{1-2} = 1$ Porque el ambiente absorbe todo

$$\epsilon = 0.4$$

Reemplazando estos valores en la ecuación 5.3 se obtiene.

$$hr = \frac{(5.67 \times 10^{-8})(1)(0.4)[(939 \times 10^3)^4 - (714 \times 10^3)^4]}{(939 - 714)}$$

$$hr = 34 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ k}$$

Luego

$$Q = hr A (T_g - T_\infty)$$

Reemplazando

$$Q = (34 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ k}) (0.7 m^2) (939 - 714) ^\circ k$$

$$Q = 153280 W$$

Para cada cierto tiempo se hacen estos cálculos y se los tabula en la tabla B-6.

Sumando todos los valores de Q obtenemos un total de:

$$Q_{ta} = 20.3 MJ$$

6.4.2 FOR LA PAREDES EXTERIORES

6.4.2.1 CALCULO DEL COEFICIENTE RADIATIVO EXTERIOR "Hro"

Con los datos de temperaturas experimentales

$$T_{wo} = 58^\circ C = 331^\circ k$$

$$T_\infty = 22^\circ C = 295^\circ k$$

Con la ecuación:

$$hr = \frac{\sigma F_{1-2} (T_{wo}^4 - T_\infty^4)}{T_{wo} - T_\infty}$$

Donde:

$$\epsilon = 0.4$$

$F_{1-2} = 1$ Porque el medio lo cubre todo

Reemplando estos valores en la ecuación se tiene:

$$hr = \frac{(5.67 \times 10^{-8}) (1) (0.4) [(331 \times 10^4 - (235 \times 10^4))]}{(331 - 235)}$$

$$h_{ro} = 2.8 \frac{w}{m^2 \cdot k}$$

Los datos calculados de esta forma se tabula en la tabla B-7.

6.4.2.2 COEFICIENTE CONVECTIVO EXTERIOR "Hco"

Con los datos experimentales de temperatura

$$T_{wo} = 58^\circ C = 331^\circ k$$

$$T_{\infty} = 22^\circ C = 295^\circ k$$

$$T_f = \frac{331 + 295}{2} = 313^\circ k$$

Con T_f se calculan las propiedades

$$\nu = 1.694 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{seg} \quad \delta = 1.137 \text{ kg/m}^3$$

$$Pr = 0.7095$$

$$k = 0.027 \text{ w/m}^\circ k$$

Con una altura de $L_o = 0.96 \text{ m}$

Asumiendo una velocidad del viento de 2 m/seg

$$Re = \frac{VLo}{\nu} = \frac{(2 \text{ m/seg}) (0.96 \text{ m})}{1.694 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{seg}}$$

$$Re = 113341$$

Reemplazando la ecuación 5.6

$$Nul = 0.664 (07019)^{1/3} (113341)^{1/2}$$

$$Nul = 299$$

$$hco = \frac{Nu k}{Lo} = \frac{(299) (0.027)}{0.96}$$

$$hco = 5.03 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ\text{k}$$

Los datos calculados de esta forma se tabula en la tabla B-7.

Para calcular las pérdidas térmicas por las paredes exteriores durante el calentamiento, sumamos los dos coeficientes (radiativo y convectivo).

$$ht = hro + hco = 2.8 + 5.03$$

$$ht = 7.82 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ\text{k}$$

Con un radio base de 0.88 m, obtenemos el área exterior de la semiesfera.

$$Ao = 2 \pi ro^2 = 2\pi (0.88)^2$$

$$Ao = 4.8 \text{ m}^2$$

Con la ecuación

$$Q = ht A_o (T_{wo} - T_{\infty})$$

Obtendremos el calor instantaneo perdido por las paredes.

Con datos experimentales de :

$$T_{wo} = 58^{\circ}\text{C} = 331^{\circ}\text{k}$$

$$T_{\infty} = 22^{\circ}\text{C} = 295^{\circ}\text{k}$$

Estos valores reemplazando en la ecuación anterior.

$$Q = (7.82 \frac{\text{w}}{\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{k}}) (4.80\text{m}^2) (331-295)^{\circ}\text{k}$$

$$Q = 1352 \text{ w}$$

Todos estos cálculos para cada cierto tiempo, se los tabula en la tabla B-6.

Sumando todos los valores de Q, según la tabla # 5, obtenemos un Q total de:

$$Q_{tb} = 3731200 \text{ J}$$

$$Q_{tb} = 3.7 \text{ MJ}$$

Sumando los valores de Q_{ta} y Q_{tb} se tiene:

$$Q_t = Q_{ta} + Q_{tb} = (20.3 + 3.7) \text{ MJ}$$

$$Q_t = 24 \text{ MJ}$$

Que es el valor de las pérdidas térmicas.

6.5 DIAGRAMA DE SANKEY

El diagrama de Sankey, es un diagrama de flujo de calor para un proceso de calentamiento en el cual las

cantidades de calor en los varios términos de un balance térmico (tabla # II), son representadas por el ancho de una banda, para el nivel 4.5, ver fig. 6.5.

TABLA II

BALANCE TERMICO		
	E	%
	MJ	
Energía total de leña	205	100
Energía remanente "carbón"	70	34.1
Energía de leña consumida	135	65.8
Energía en la evaporación de agua de la leña	12	5.8
Energía utilizable	123	60
Energía acumulada en paredes	120	58.5
Energía por pérdidas térmicas	24	11.7
Energía para cocer pan (calor a elemt.)	30	14.6
Energía remanente en pared	90	43.9

6.6 EFICIENCIA DEL HORNO

$$\eta_t = \frac{\text{Energía del pan}}{\text{Energía de la leña}}$$

$$\eta_t = \frac{m C_p DT + (mav) L}{m_l (P_c)l - m_c (P_c)c}$$

Donde:

m = Masa de pan crudo

= 14.2 kg

$$m_{av} = \text{Masa de agua evaporada} = 5.66 \text{ kg} \\ \text{del pan}$$

$$m_l = \text{Masa de leña} = 17.3 \text{ kg}$$

$$m_c = \text{Masa de carbón} = 2.5 \text{ kg}$$

$$C_p = \text{Calor específico del agua} = 4.24 \text{ kJ/kg}^\circ\text{k}$$

$$L = \text{Calor latente del agua} = 2400 \text{ kJ/kg}$$

$$(Pc)_l = \text{Poder calorífico de leña} = 17000 \text{ kJ/kg}$$

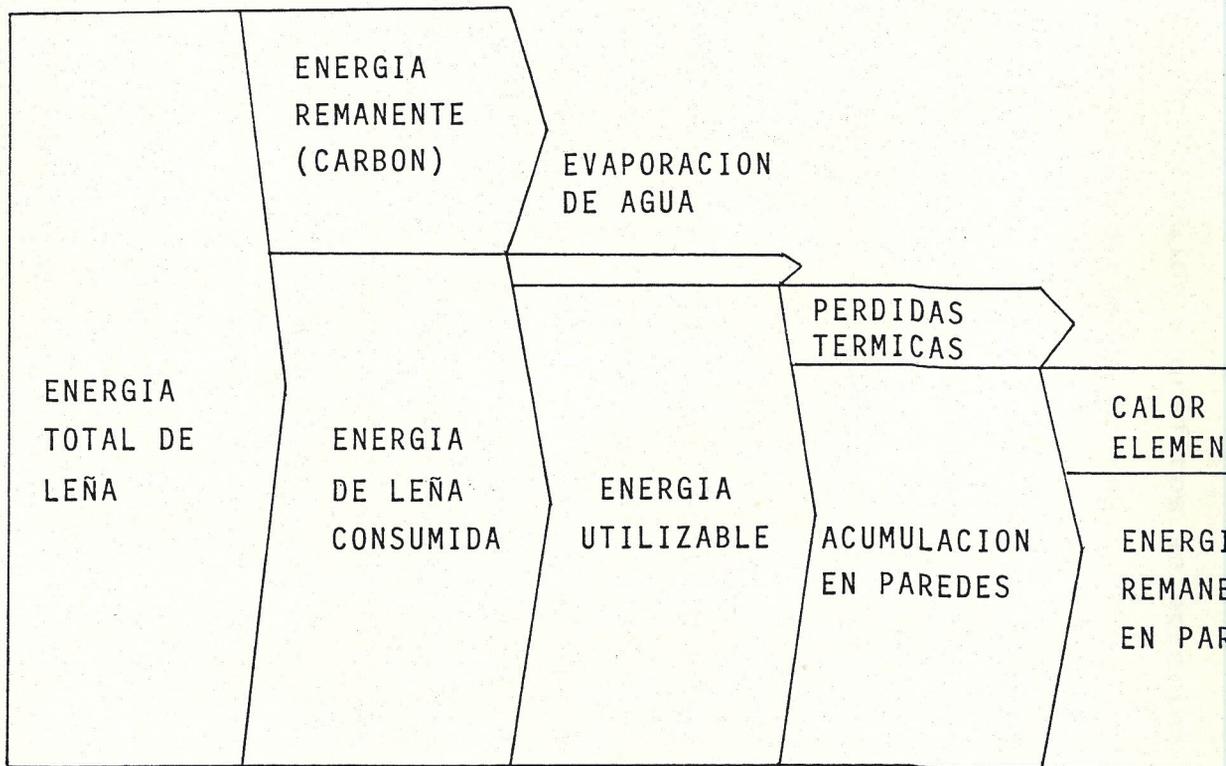
$$(Pc)_c = \text{Poder calorífico del carbón} = 28000 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta = \frac{(14.2 \text{ kg})(4.24 \text{ kJ/kg}^\circ\text{k})(401-295)^\circ\text{k} + (5.66 \text{ kg})(2400 \text{ kJ/kg})}{(17.3 \text{ kg})(17000 \text{ kJ/kg}) - (2.5 \text{ kg})(28000 \text{ kJ/kg})}$$

$$\eta = \frac{6382 + 13605.4}{294100 - 70000} = \frac{27210.83}{224100}$$

$$\eta = 0.1214$$

$$\eta = 12.14\%$$



6.5 DIAGRAMA DE SANKEY

CAPITULO VII

ANALISIS DE RESULTADOS

Como se puede observar que los resultados obtenidos a través de cálculos y gráficos se aprecian de una mejor manera en el diagrama de Sankey.

A continuación detallamos los factores que han influenciado en la obtención de resultados.

7.1 COMBUSTION DE LA LENA

Cuando se quema la leña (17.3 kg), ésta no nos da el 100% de su energía real, debido a que siempre tiene humedad, y además queda una energía remanente (carbón), la cual en los hornos de tipo industrial puede ser utilizado colocándolo en un rincón y de ésta manera seguir manteniendo la temperatura alta, pero si el horno es de tipo doméstico, este carbón no se lo utiliza por ser el horno demasiado pequeño y no queda espacio para meter la carga (pan).

El porcentaje total utilizado es 65.85%

7.2 CALENTAMIENTO DE PAREDES

A medida que se combustiona la leña se van

calentando las paredes y la forma de transmitir el calor del fuego y gases hacia la pared, se lo calcula con un coeficiente radiativo y un coeficiente convectivo, predominando el coeficiente radiativo, debido a que las temperaturas de los gases y llama son altos comparados con la temperatura inicial de la pared, y además hay un factor alto de absorptividad ($\alpha=1$), porque la pared absorbe todo, un factor emisivo de 0.7 ($\epsilon = 0.7$)

El coeficiente convectivo es demasiado bajo comparado con el radiativo, esto se debe a que los gases ocupan toda la cámara estando en contacto con la pared interior, por lo que no hay una diferencia de temperatura considerable entre los alrededores de la pared y la temperatura de la llama, por lo que así mismo la diferencia de densidades es poca y por lo tanto la velocidad es mínima para llevar el calor de la llama a la pared.

En el gráfico 6.1 se puede apreciar como va cambiando la temperatura a medida que transcurre el tiempo, se observa que hay unos cambios bruscos de temperatura, esto se debe a que hay unos fogonazos de viento y hace que la llama suba y toque con la pared haciendo que también suba su temperatura.

En la figura 6.2 se presenta mediante un diagrama de Schmidt la forma en que va ganando temperatura la

pared. Aquí se aprecia que a medida que hay más distancia la temperatura va disminuyendo, representa un 58.53%.

7.3 ENFRIAMIENTO DE PARED - COCCION DEL PAN

Con los datos de la tabla B-4 y B-5, construimos las figuras 6.3 y 6.4, con los datos de esta figura, calculamos cuanta energía entrega la pared, y así mismo cuanta energía gana el pan para cocerse.

En la fig. 6.1 y tabla B-2, se aprecia que el pan se cocc durante un tiempo de 10-15-20 minutos, dependiendo de donde esté ubicado el pan. Así el pan que está ubicado en los costados se cocc más rápido que el pan que está ubicado en el centro del horno.

En la tabla # 1 nos muestra los valores de energía entregada y recibida para cada intervalo de temperatura.

7.4 PERDIDAS TERMICAS

7.4.1 POR LA PUERTA DE ENTRADA, TRASERA Y BOQUETE DE CHIMENEA

Cuando se está quemando la leña hay bastantes pérdidas térmicas, ya que las puertas y boquete permanecen abiertos para que salgan los gases durante el proceso de combustión.

Además también hay pérdidas por las paredes exteriores, por convección y radiación. Aquí predominan las pérdidas por convección ya que se ha asumido una velocidad del viento de 2m/seg.

Esto nos representa un 11.7%.

7.5 EFICIENCIA DEL HORNO

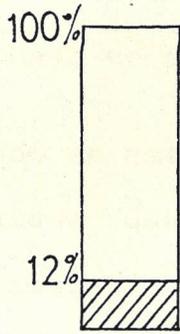
Haciendo el cálculo de la eficiencia nos damos cuenta que éste es relativamente baja (12.14%) Fig. A, esto se debe a que el horno inicialmente está frío y se necesita bastante leña (17.3kg) para calentarlo y llegar a su temperatura de trabajo.

7.6 ENERGIA REMANENTE EN LA PARED

En la fig. 6.3 (enfriamiento de la pared), el área bajo la curva representa el calor almacenado (no utilizado), nos representa un 43.9% de la energía total.

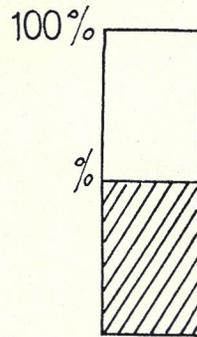
En los hornos de tipo industrial esta energía remanente nos sirve mucho, ya que para el siguiente calentamiento de la pared se gastará menos leña (la eficiencia subiría - Fig. B) para llegar a la temperatura óptima de la cocción del pan. En los hornos de tipo doméstico la energía remanente se pierde debido a que el proceso de cocción del pan no es continuo (la eficiencia es baja - Fig. A).

Como se puede apreciar en las siguientes figuras que la eficiencia subiría notablemente en un proceso continuo.



HORNO DOMESTICO

Fig A



HORNO INDUSTRIAL

Fig B

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

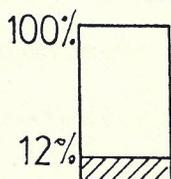
Luego de realizar la parte experimental y los cálculos de este trabajo se puede concluir que:

- 1.- Cuando se está combustionando la leña, hay bastantes pérdidas que ocurren por calor sensible en los gases que escapan por la puerta de entrada, trasera y boquete de chimenea. Esta puerta trasera se la ha construido de tal forma que ayude a salir los gases producto de la combustión, debido que no hay una chimenea para que realice este trabajo. Si es que no hubiese esta puerta trasera los gases se acumularían en el horno los cuales sofocarían el fuego, no pudiendo realizarse la combustión correctamente.
- 2.- El gráfico 6.2 diagrama de Schmidt se aprecia como se almacena calor en la pared, aquí se observa que la temperatura de trabajo no es la más alta, sino la que indica la línea recta inclinada ($T_{wi} = 288^{\circ}\text{C}$; $T_{wo} = 100^{\circ}\text{C}$).
- 3.- En el gráfico 6.3 diagrama de Schmidt se observa la forma en que va perdiendo calor la pared y como va ganando calor el pan para cocerse. Luego de que la pared entrega su calor o energía, queda una energía remanente en ella, esto se debe que para cocer el pan

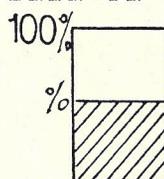
no se requiere toda la energía almacenada originalmente.

4.- Realizando el cálculo de la eficiencia notamos que esta es demasiado baja (12.14%) Fig. A, esto se debe a que inicialmente el horno esta a temperatura ambiente y necesita demasiada leña para calentar (17.3 kg), esta eficiencia siempre se dará con valores bajos, debido a que estos hornos son de tipos domésticos y se los utiliza poco (una o dos veces a la semana), o sea una carga por calentamiento del horno, es decir el proceso no es continuo, desperdiciando de esta manera el calor remanente que queda en las paredes.

Pero si hablamos de horno de tipo industrial la eficiencia subiría (Fig. B) ya que el proceso de metida de carga (pan) y calentamiento del horno es continuo, o sea que cuando se ha metido la primera carga, las paredes quedan con una energía remanente, por lo que para el segundo calentamiento del horno utilizan menos cantidad de leña (para llegar a la temperatura óptima de la pared para la cocción del pan), debido a que las paredes estan calientes haciendo de esta manera que suba la eficiencia.



HORNO DOMESTICO
fig A



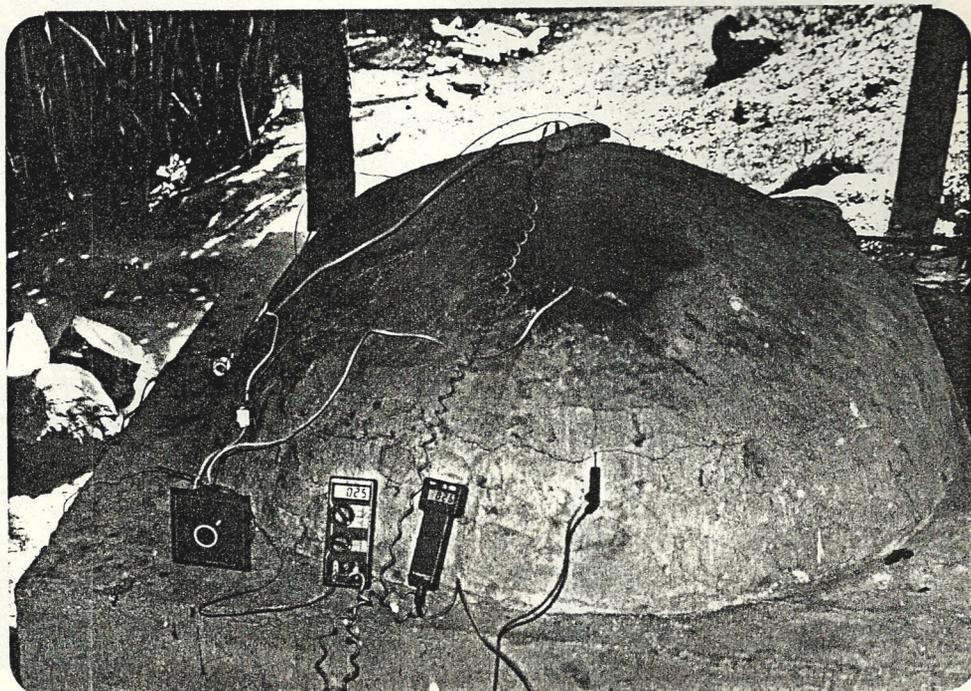
HORNO INDUSTRIAL
fig B

- 5.- El diagrama de Sankey nos da una idea clara de los valores y porcentajes de energía utilizados en este trabajo.
- 6.- Para el calentamiento del pan, en el gráfico T vs t, se puede observar que cuando llega a los 100°C. el gráfico se mantiene constante hasta que se evapora toda el agua, y luego comienza a subir (Fig. 6.4 A).
- 7.- Este proyecto ha sido realizado durante 6 meses, lo que representa un corto tiempo para la investigación y desarrollo de este trabajo, motivo por el cual no se ha llegado lo suficientemente a fondo con los resultados.

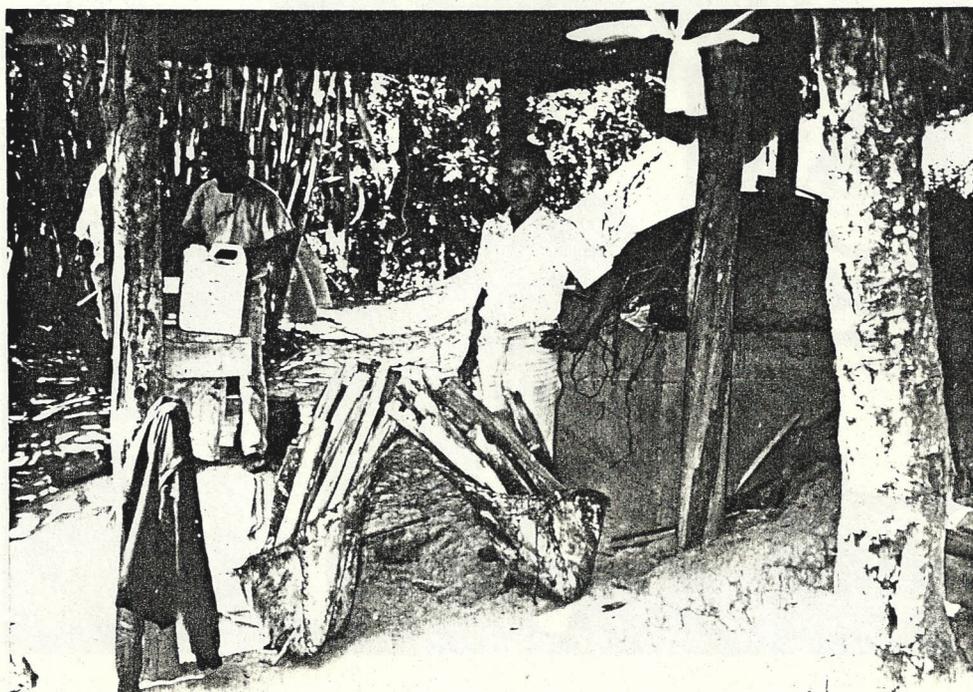
RECOMENDACIONES

- 1.- Para que no haya demasiada pérdidas térmicas por calor sensible, hay que eliminar puerta trasera y se debe construir una chimenea en la parte superior del techo del horno.
- 2.- Para que el cocido del pan sea mucho más rápido, el horno sea altamente eficiente (utilice poca leña), se debe tratar de que las paredes sean lo suficientemente gruesas y aisladas para obtener un mayor almacenamiento de energía.

APENDICES



A - 1 Horno artesanal típico, con la respectiva instrumentación para medir las temperaturas



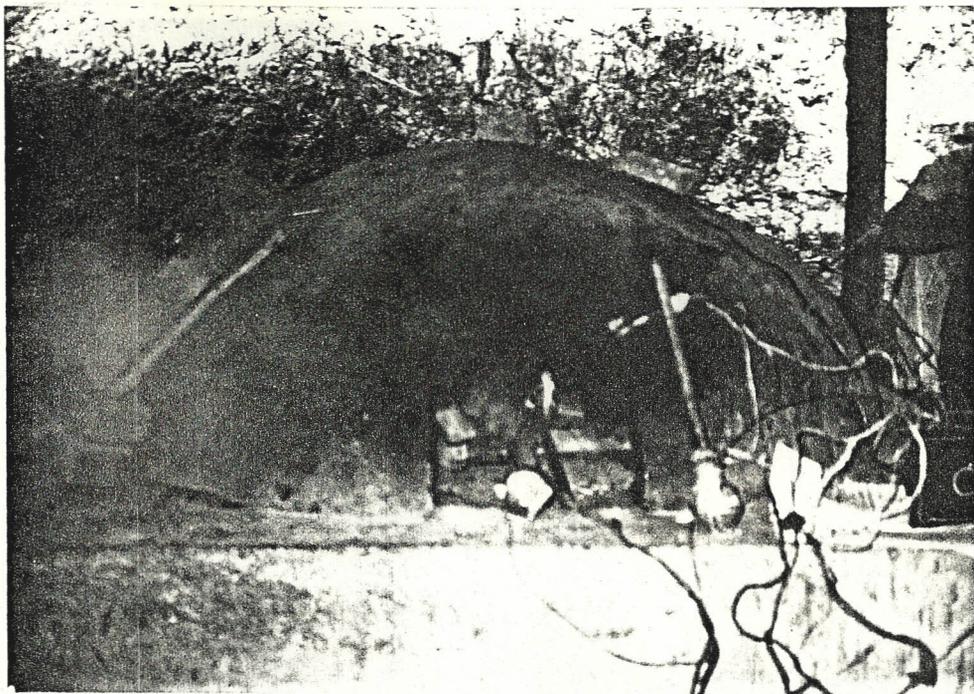
A - 2 Forma de medir y transportar la leña



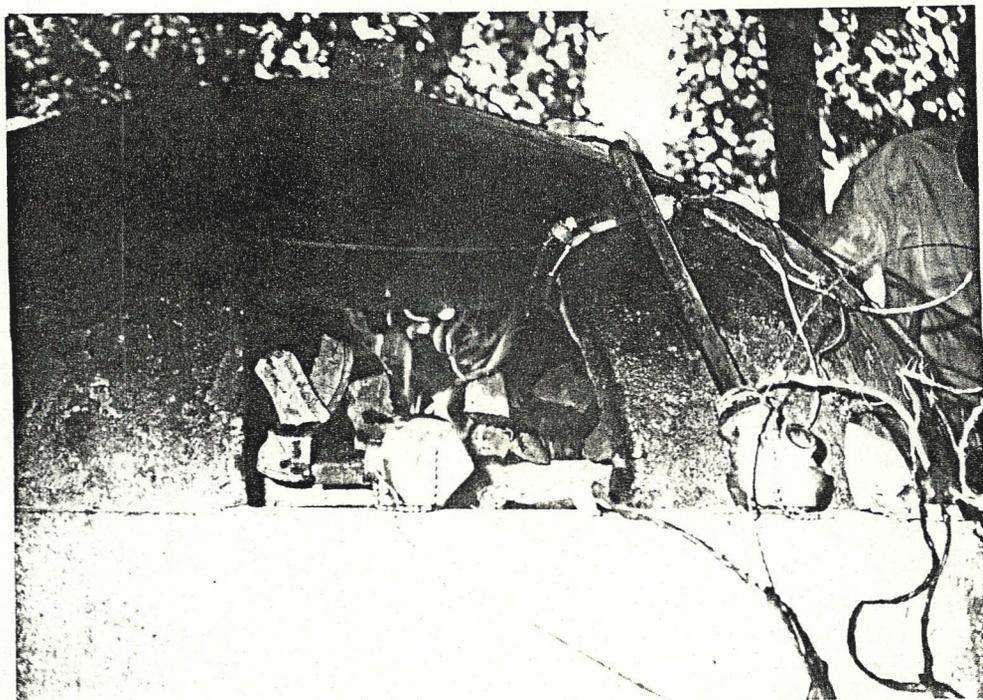
A - 3 Pesada de la leña



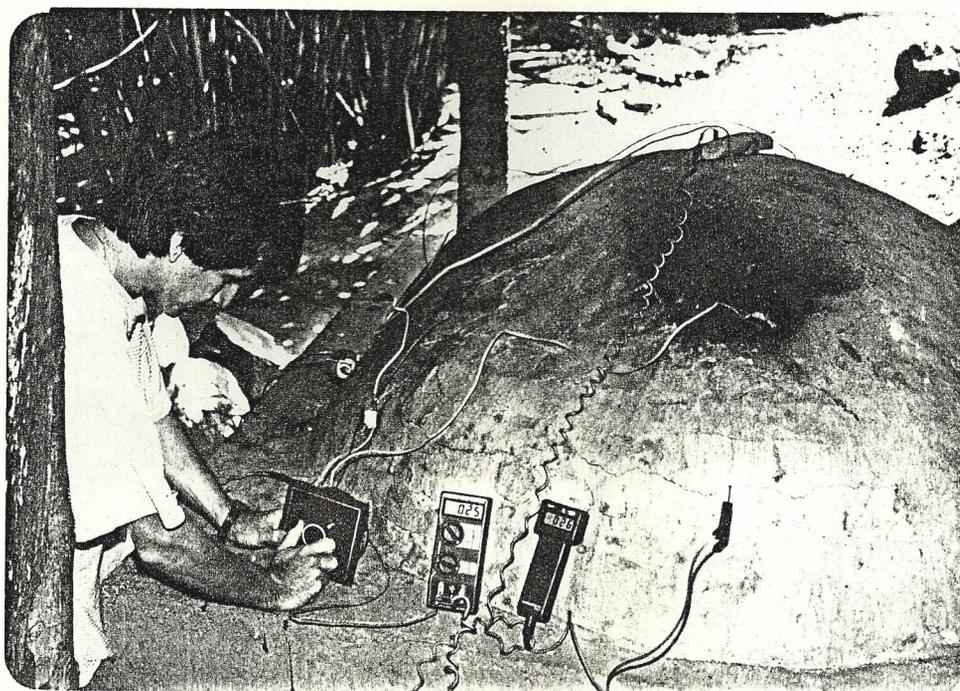
A - 4 Introducci3n de la leña al horno



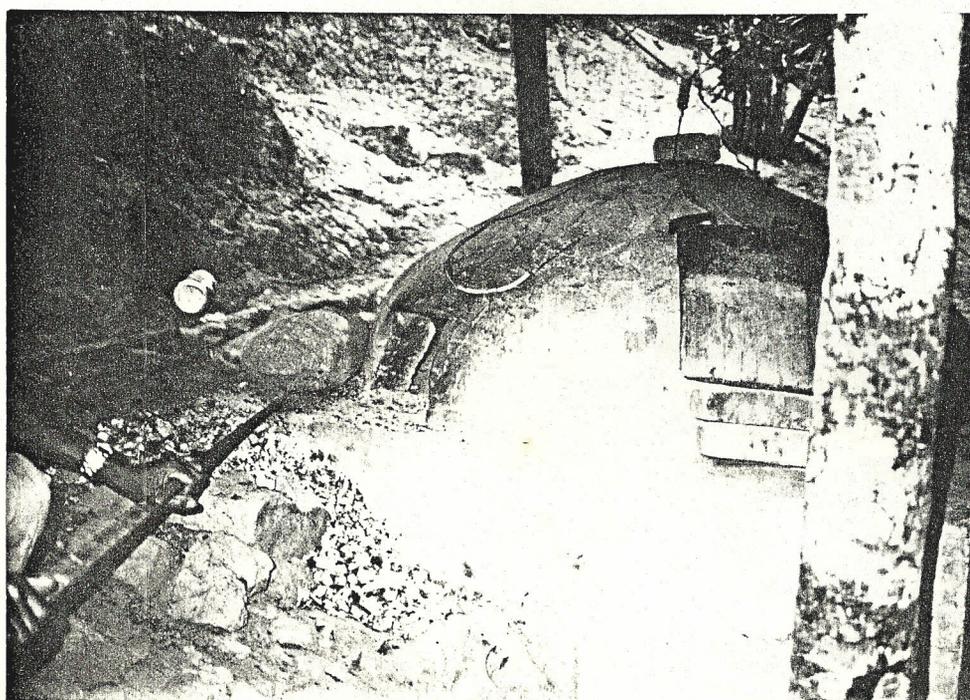
A - 5 Encendido de la leña



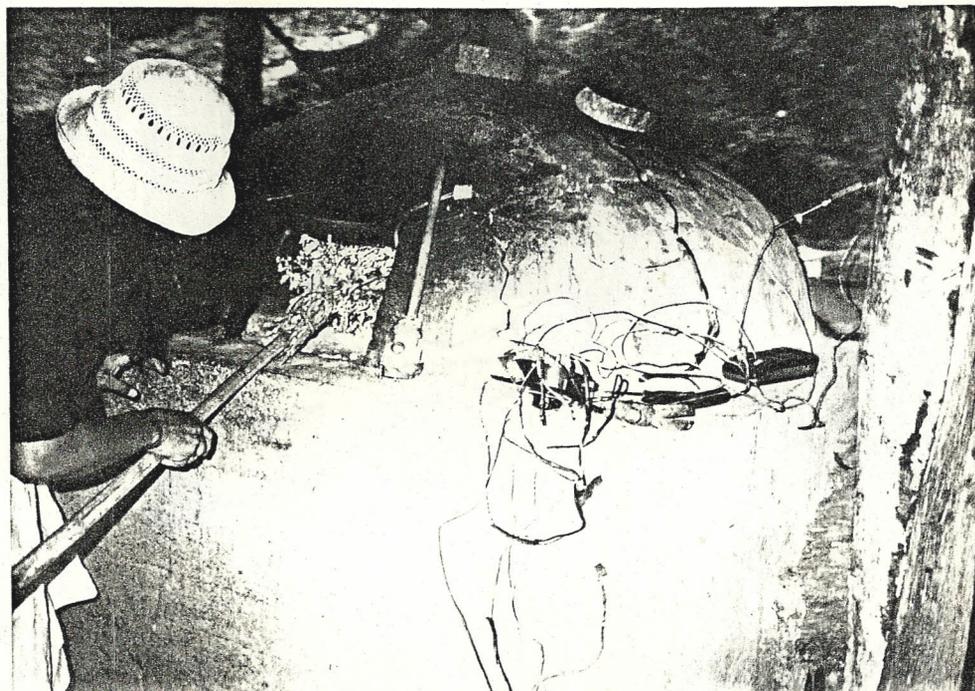
A - 6 Proceso de Combustión de la leña



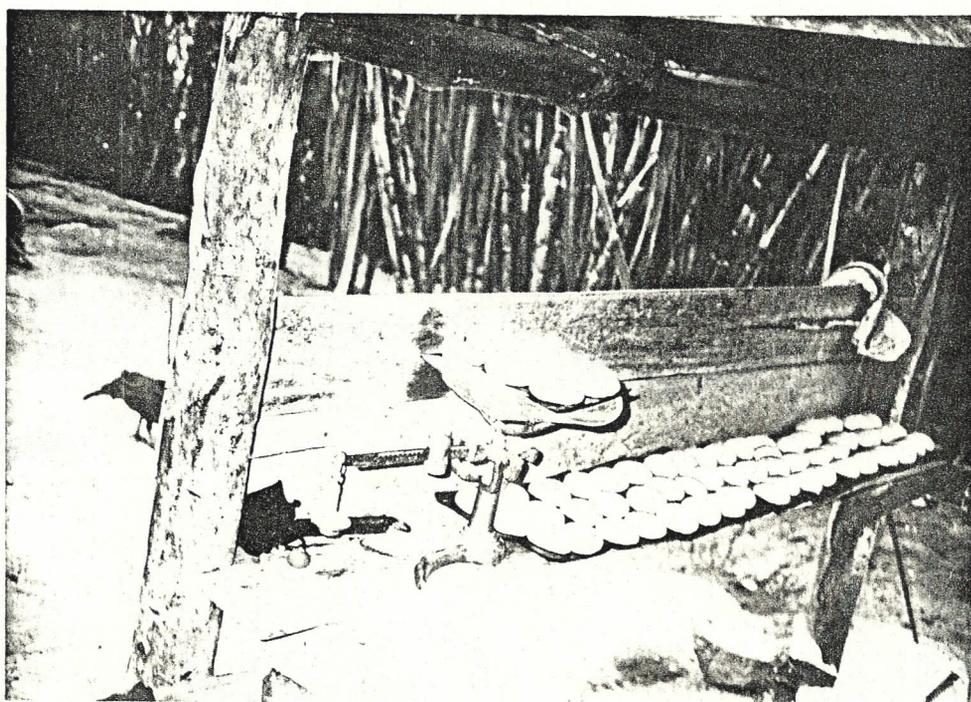
A - 7 Medición de temperaturas



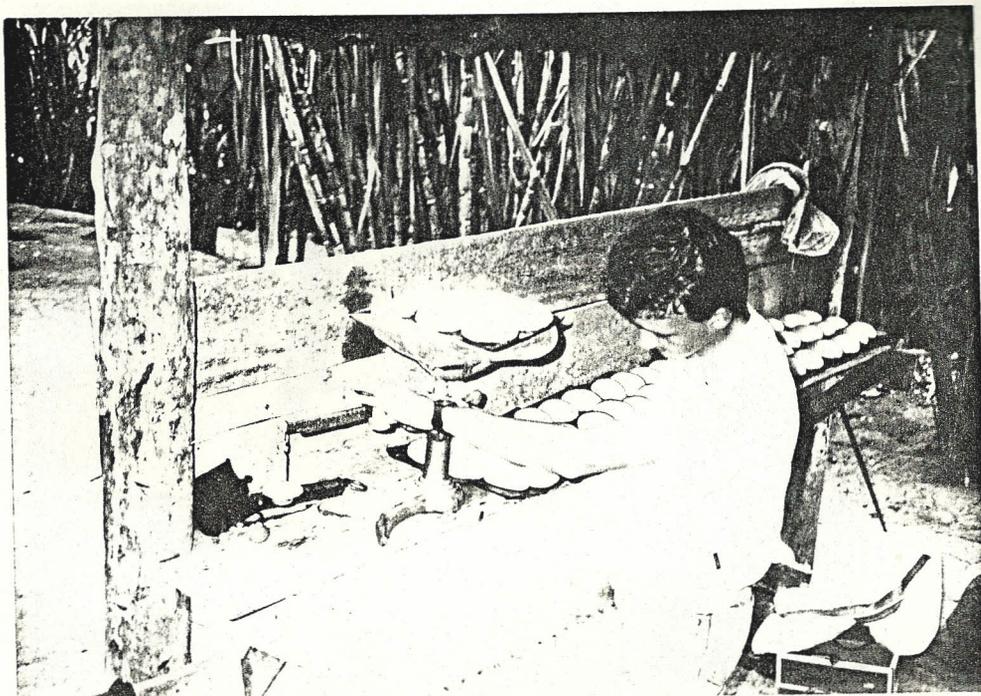
A - 8 Sacar residuos de leña combustionada
(carbón)



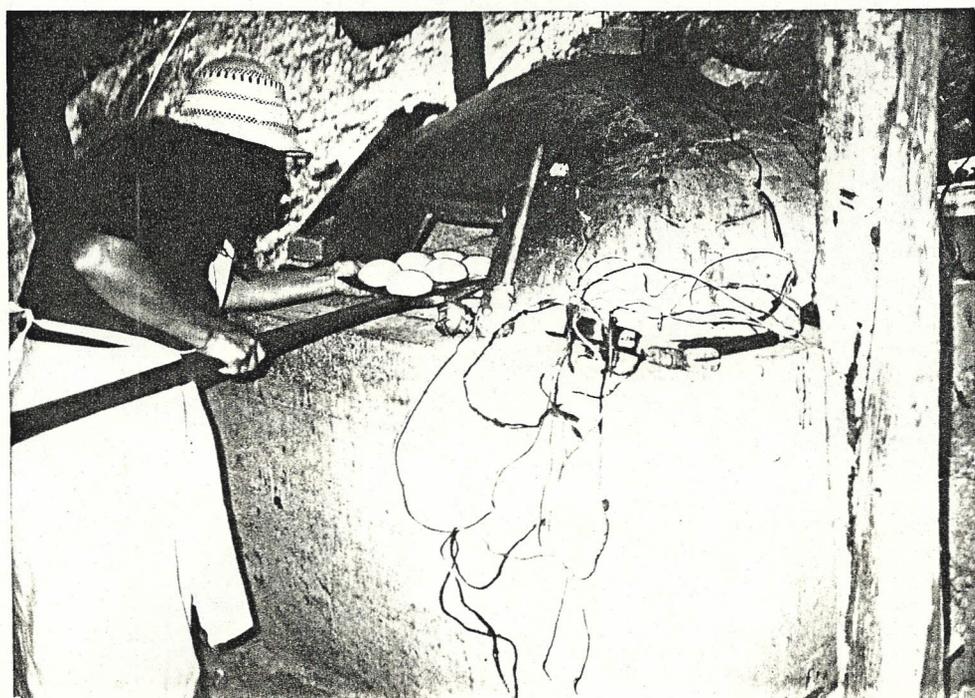
A - 9 Limpieza total de cenizas



A - 10 Pan crudo



A - 11 Pesada del pan crudo



A - 12 Metida de pan crudo al horno

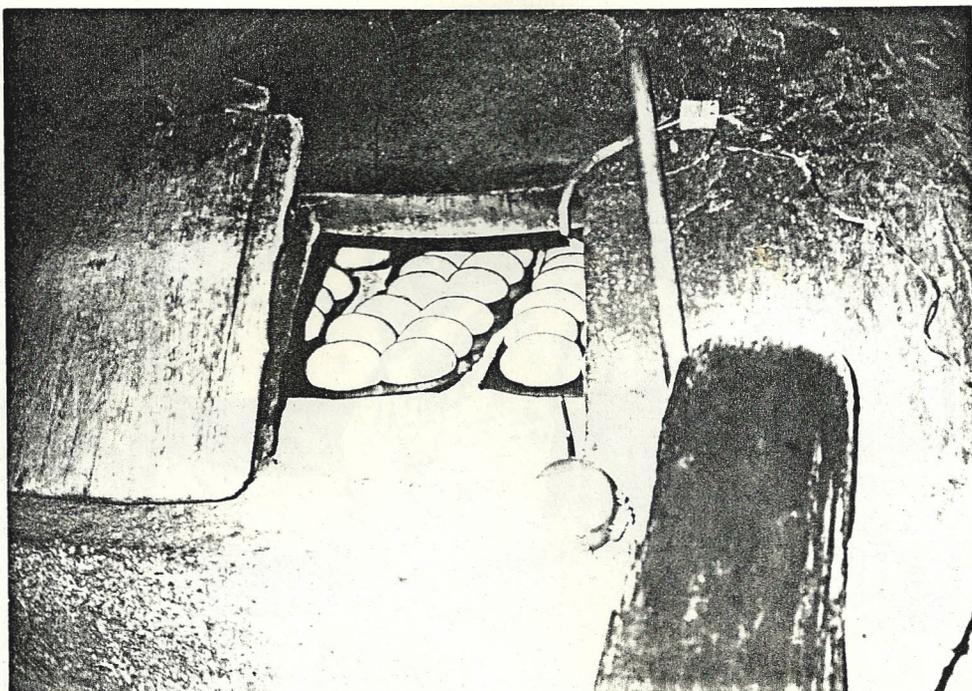
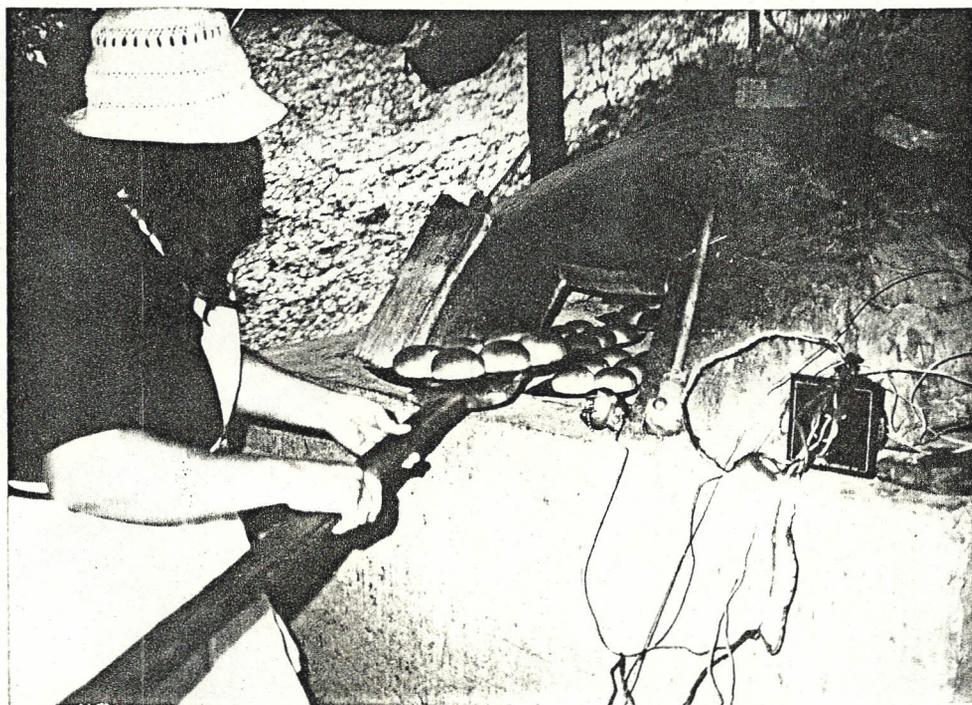
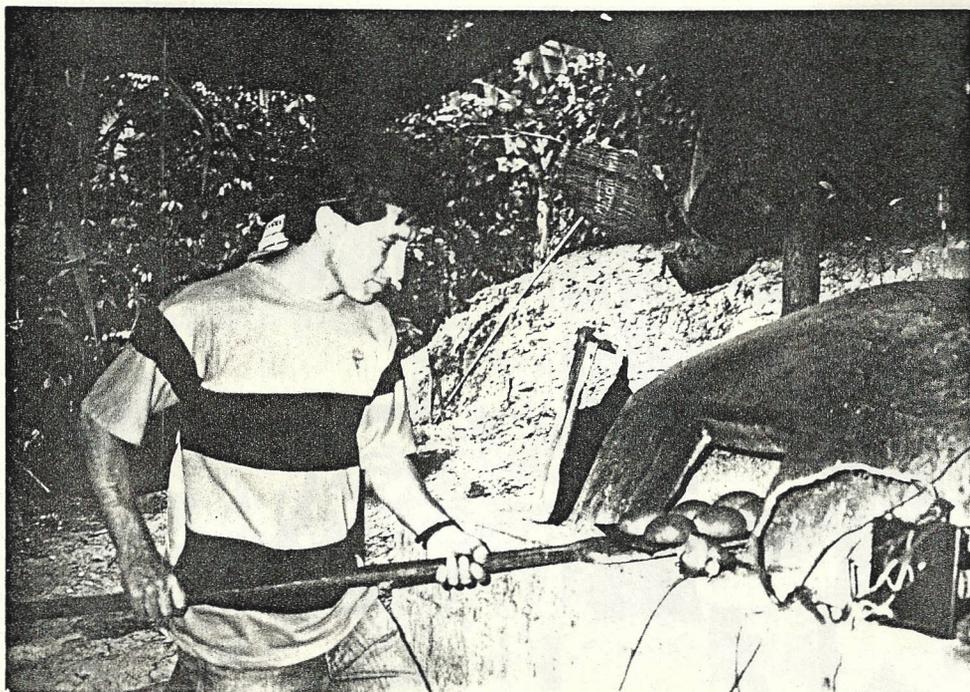


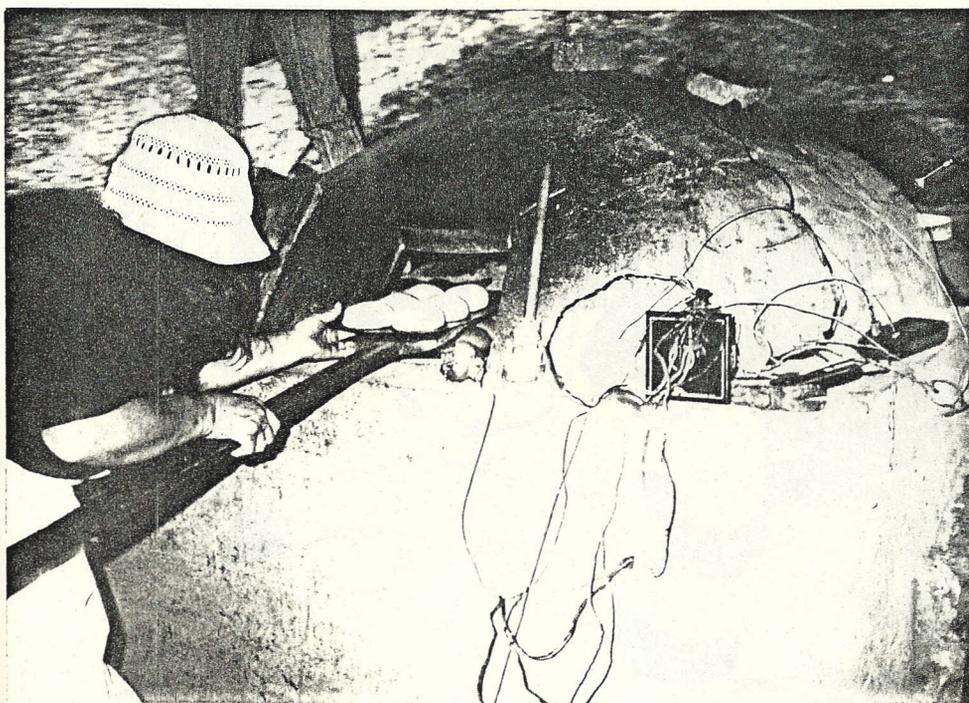
Fig. 13 Inicio del proceso de cocción del pan



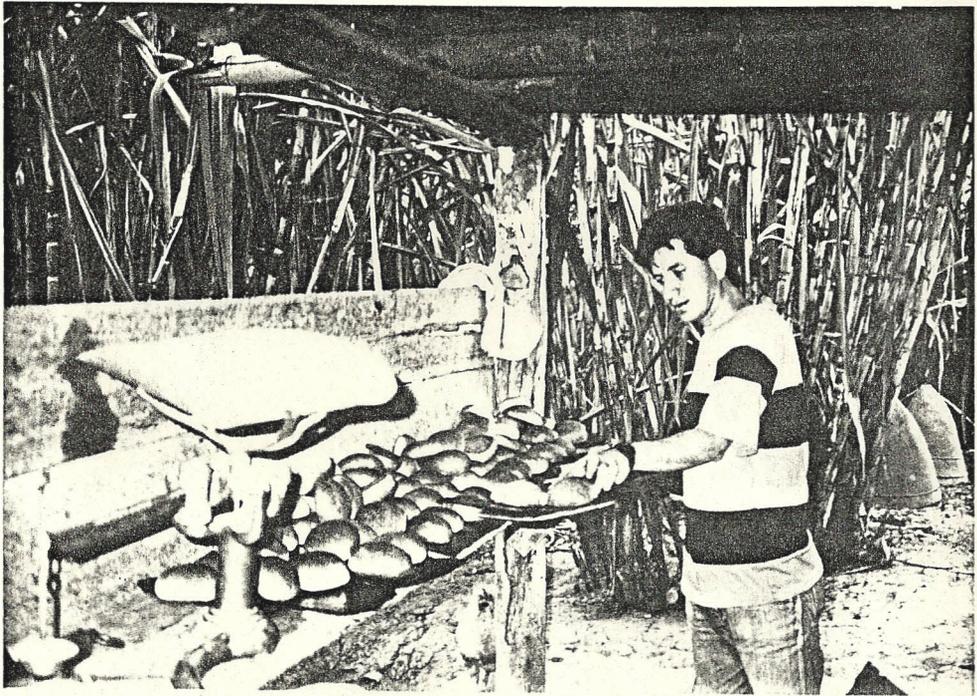
A - 14 Fin del proceso de cocción (pan cocido)



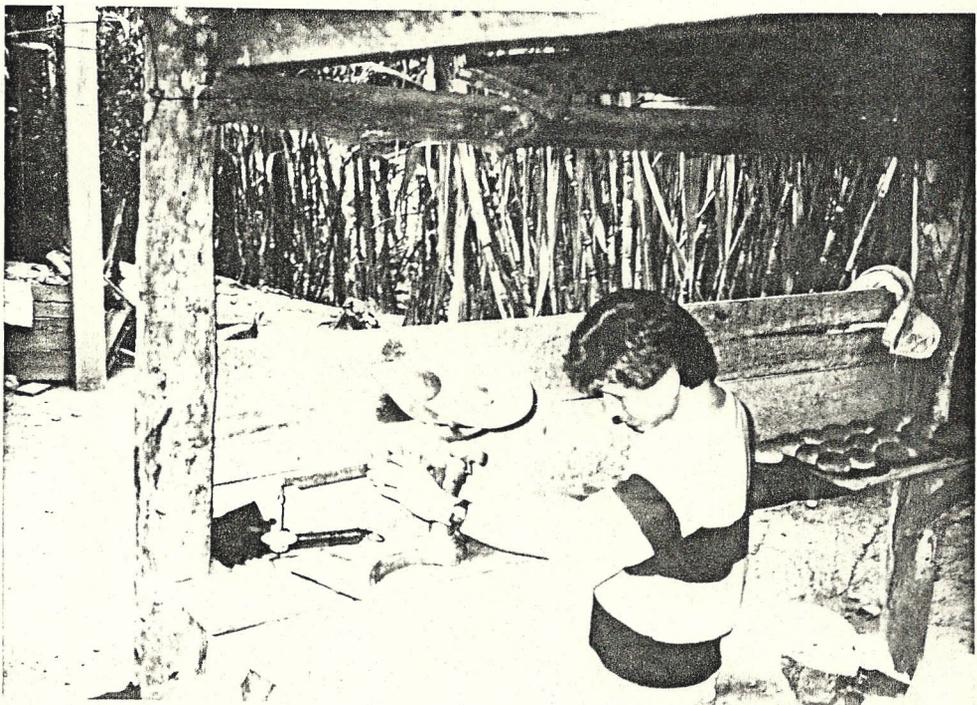
A - 15 Sacar pan



A -16 metida de la segunda carga
Fin del primer proceso-inicio del segundo
proceso



A - 17 Manipuleo del pan



A - 18 Pesada del pan cocido

APENDICE B

TABLA B-1

DATOS DE TEMPERATURAS EXPERIMENTALES
CALENTAMIENTO DEL HORNO

Tiempo t min.	Gas T (°C)	Pared Lado int. (°C)	Pared Intermed. (°C)	Pared Lado exte (°C)
5	145	51	36	22
10	168	79	39	22
15	243	183	51	23
20	415	299	90	24
25	426	333	131	25
30	447	363	148	28
35	510	417	168	31
40	517	422	184	34
45	556	427	200	40
50	628	429	213	42
55	655	438	223	53
60	666	441	228	58
65	660	441	234	62
70	652	438	239	70
75	640	432	244	80
80	635	410	246	89
85	624	407	249	93
90	622	404	250	94
95	550	402	254	95
100	509	400	256	97
105	483	395	255	98
110	453	387	255	99
115	438	381	252	100

TABLA B-2

DATOS DE TEMPERATURAS EXPERIMENTALES
ENFRIAMIENTO DEL HORNO
CUANDO SE METE LA CARGA (PAN)

Tiempo t min.	Piso Por lado de puerta (°C)	Pared Lado int. (°C)	Pared Intermed. (°C)	Pared Lado exte (°C)
5	223	314	246	98
* 10	216	285	234	96
15	204	268	223	94
** * 20	194	251	216	92
** * 25	183	239	211	89
** * 30	178	235	207	84
** * 35	172	230	204	83
40	170	227	200	82
45	167	223	196	82
50	161	217	189	80
55	156	211	184	80
60	150	206	178	79
65	145	201	173	76
70	140	196	169	74
75	134	191	159	73
80	127	186	155	72
85	120	181	151	71
90	110	177	149	70

* METIDA DE PAN

** SACADA DE PAN

TABLA B-3

VALORES CALCULADOS DE hri y hci DURANTE EL CALENTAMIENTO

CUANDO SE METE LA CARGA (PAN)

Tiempo t min.	Gas (°C)	Fared Lad. int. Twi (°C)	hri w ----- m ² °k	Vi m/seg	Re	Nu	hci w/m ² °k
5	145	51	6.74	0.0132	433	12.3	0.5
10	168	79	7.08	0.0136	427	12.3	0.52
15	243	183	9.05	0.0167	369	11.3	0.55
20	415	299	24.33	0.0216	310	10.4	0.61
25	426	333	28	0.027	270	9.7	0.68
30	447	363	31	0.0233	296	10.15	0.63
35	550	417	33	0.0253	282	9.9	0.66
40	517	422	36	0.0255	280	9.87	0.66
45	556	427	40	0.0262	275	9.79	0.67
50	628	429	63	0.0275	267	9.64	0.68
55	655	438	69	0.028	263	9.58	0.69
60	666	441	72	0.0285	261	9.55	0.697
65	660	441	70	0.0284	261	9.55	0.695
70	652	438	68	0.0281	263	9.58	0.693
75	640	432	65	0.0278	265	9.61	0.69
80	635	410	64	0.0274	268	9.66	0.68
85	624	407	63	0.027	269	9.69	0.68
90	622	404	62	0.0275	274	9.77	0.655
95	550	402	43.5	0.0257	278	9.85	0.66
100	509	400	29.5	0.025	282	9.9	0.65
105	483	395	19	0.0245	287	9.99	0.648
110	453	387	15	0.024	292	10	0.64
115	438	381	10	0.023	295	10.12	0.636

TABLA B-4
 ENFRIAMIENTO DE PARED
 CUANDO SE METE LA CARGA
 (PAN CRUDO)

Interv. de Tiempo θ	Pan Tw (°C)	Pared Tw (°C)	hcr w m ² °k	s (m)
0	22	288	13	0.062
1	22	240	11.23	0.064
2	22	228	10.7	0.067
3	22	224	10.5	0.068
4	22	216	10.14	0.07
5	22	208	9.8	0.073
6	22	202	9.6	0.075
7	22	197	9.34	0.077
8	22	192	9.14	0.078

TABLA B-5
 COCCION DEL PAN

Interv. de Tiempo θ	Pan Tw (°C)	Pared Tw (°C)	hcr w m ² °k	s (m)
0	22	288	13	0.04
1	56	288	14.9	0.039
2	74	288	15.7	0.038
3	84	288	16.2	0.037
4	94	288	16.6	0.0367
5	102	288	17	0.036
6	110	288	17.24	0.0352
7	116	288	17.6	0.035
8	122	288	17.9	0.034

TABLA B-6
 PERDIDAS TERMICAS
 POR LA PUERTA DE ENTRADA, TRASERA
 Y BOQUETE DE LA CHIMENEA

Tiempo t min.	Gas T (°C)	Tempet. Ambiente (°C)	hr w m ² °k	Q (w)
5	145	22	5.3	457
10	168	22	5.87	600
15	243	22	8.12	1257
20	415	22	15.62	4300
25	426	22	16.22	4587
30	447	22	17.42	5200
35	510	22	21.4	7311
40	517	22	22	7623
45	556	22	25	9345
50	628	22	30	12726
55	655	22	33	14623
60	666	22	34	15328
65	660	22	33.3	14872
70	652	22	32.6	14377
75	640	22	31.6	13627
80	635	22	31	13302
85	624	22	30.2	12727
90	622	22	30	12600
95	550	22	24.3	8982
100	509	22	21.4	7296
105	483	22	19.62	6332
110	453	22	17.8	5371
115	438	22	17	4951

TABLA B-7

PERDIDAS TERMICAS

VALORES CALCULADOS DE hro y hco DURANTE EL CALENTAMIENTO

Tiempo t min.	Pared Ext. T _w (°C)	Tempet. Ambiente (°C)	hro w ---- m ² °k	Vo m/seg	Re 10	Nu	hco w/m ² °k	Q 10 (w)
5	22	22	0	2	0	0	0	0
10	22	22	0	2	0	0	0	0
15	23	22	2.3	2	12.5	209	4.6	33.12
20	24	22	2.35	2	12.5	209	4.6	66.72
25	25	22	2.36	2	12.5	209	4.6	100.3
30	28	22	2.4	2	12.3	208	4.6	203
35	31	22	2.43	2	12.3	208	4.65	307
40	34	22	2.47	2	12.3	208	4.67	412
45	40	22	2.55	2	11.9	205	4.9	644
50	42	22	2.57	2	11.9	205	4.9	718
55	53	22	2.72	2	11.4	201	5.05	1157
60	58	22	2.79	2	11.36	199	5.03	1353
65	62	22	2.84	2	11.3	199	5.03	1510
70	70	22	2.96	2	10.9	196	5.1	1857
75	80	22	3.11	2	10.6	193	5.2	2314
80	89	22	3.24	2	10.4	190	5.4	2779
85	93	22	3.31	2	10.3	190	5.3	2935
90	94	22	3.32	2	10.2	189	5.3	2986
95	95	22	3.34	2	10.2	188	5.3	3028
100	97	22	3.37	2	10.2	188	5.3	3122
105	98	22	3.49	2	10.2	188	5.4	3207
110	99	22	3.4	2	10.1	188	5.4	3253
115	100	22	3.43	2	10.1	188	5.4	3306

BIBLIOGRAFIA

- 1.- OLADE/ Organización Latinoamericana de Energía, revista energética, Departamento de Información y RR PP de OLADE. Quito, noviembre-diciembre de 1987.
- 2.- ARMENDARIZ, JUAN. Evolución de las artes de la panificación. México 1945.
- 3.- REYES, MEDARDO. Tesis de Grado: "Estudio de hornos apropiados para producción de carbón vegetal con aplicación al uso racional de leña. ESPOL, 1985.
- 4.- THIRINGS, M. W. The Science of Flames and Furnaces, Chapman & Hall, 1962.
- 5.- FRANK KREITH. Principio de transferencia de calor. Herrero Hermanos, sucesores, S.A. 1970.
- 6.- FIGUEROA, KLEBER. Investigación.
- 7.- BARRIGA, ALFREDO, Dr. Apuntes de clase.
- 8.- FERNANDEZ, NARCISA. Tesis de Grado: "Determinación de eficiencia térmica de un horno experimental usando diesel como combustible. ESPOL, 1985.
- 9.- HOLMAN J. P. Transferencia de Calor. Mc Graw-Hill. 1986.
- 10.- PATINO, MARIO. Tesis de Grado: "Diseño, construcción y pruebas de un termogasificador experimental para residuos forestales y agrícolas. ESPOL, 1985.
- 11.- THIRINGS, W. Industrial Furnaces, Vol. 1.

- 12.- HERRANS ARRIVAS, JUAN. Procesos de transmisión de calor. España, 1979.