



D-12023



333.7913
L 966

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Mecánica

**"INVESTIGACION EXPERIMENTAL DE LA
ESTABILIDAD Y RHEOLOGIA
DE MEZCLAS BIOMASA-PETROLEO
COMO SUSTITUTO PARCIAL
DEL PETROLEO"**

TESIS DE GRADO

**Previa a la Obtención del Título de
INGENIERO EN MECANICA**

Presentado por:

GABRIEL OVIDIO LUQUE ARIZAGA

Guayaquil

Ecuador

AÑO

1992



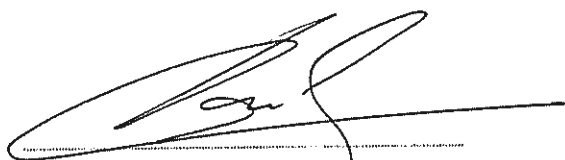
AGRADECIMIENTO

A todo el equipo de investigación
y de apoyo, institucional y
personal, que colaboró en la
elaboración de esta Tesis.

DEDICATORIA

A mis hermanos, tía, padre
y especialmente a mi madre
que tanto se esforzó por que
yo logre conseguir este
objetivo.

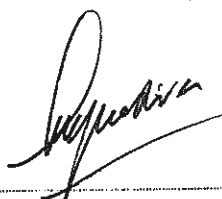




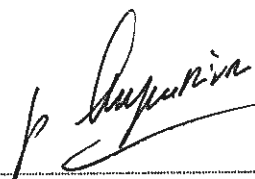
Ing. Nelson Cevallos B.
Decano FID



Ing. Mario Patiño A.
Director de Tesis



Ing. Jorge Duque R.
Miembro del Tribunal



Ing. Francisco Andrade
Miembro del Tribunal

DECLARACION EXPRESA

La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente, y el patrimonio intelectual de la misma, a la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

(Reglamento de Graduación)

Gabriel Luque Arízaga

RESUMEN

La utilización energética de biomasa residual se encuadra en los objetivos perseguidos por el Centro de Tecnología Energética de la Facultad de Ingeniería Mecánica de ESPOL.

Para lograr este objetivo, estos materiales se tienen que inicialmente preparar para lograr ciertas propiedades físicas que se adecúen a las operaciones a los que serán sometidos para luego lograr su combustión y obtención energética.

En este proyecto inicialmente se hará un estudio general de la demanda energética del país considerando los diferentes combustibles y fuentes energéticas, con el propósito de estimar la aplicabilidad que podría tener la biomasa residual como fuente de energía comparándola con las fuentes convencionales usadas actualmente.

A continuación se presentará una recopilación de información seleccionada y procesada convenientemente, que servirá de

sustento teórico a nuestro estudio y podrá ser aprovechada a futuro por otros investigadores que traten este tema.

Luego se entrará a considerar los materiales y equipos a utilizarse en los posteriores ensayos.

Se seleccionarán y se caracterizarán la biomasa, el bunker y los tensoactivos. Se hará una revista a los equipos a utilizarse, se analizará su selección y se indicarán sus características.

Se prepararán las mezclas considerando las operaciones previas a las que son sometidos sus componentes, para finalmente someterlas a los ensayos previstos.

Los principios que se aplican para ejecutar el estudio de estabilidad y reológico de las mezclas biomasa-petróleo, son analizados en detalle, así mismo se hace una descripción de los métodos utilizados para coleccionar los datos de viscosidad y velocidad de sedimentación, del bunker puro y de las mezclas.

Finalmente se analizan los resultados obtenidos en las pruebas de estabilidad y reológicas de las mezclas a diferentes proporciones de peso y se dan las recomendaciones sobre los resultados obtenidos en esta investigación. Se hacen comparaciones entre los resultados obtenidos para las

mezclas y para el petróleo puro.

También se evalúan las limitaciones en el desarrollo del proyecto y en los resultados obtenidos en consideración al desarrollo que se requiere para poner en práctica esta tecnología, que actualmente es usada en países desarrollados con éxito.

INDICE GENERAL

	Página
RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	IX
INDICE DE TABLAS	VIII
INDICE DE FIGURAS	XIX
LISTA DE SIMBOLOS	XX
INTRODUCCION	23



CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 Demanda energética del país	26
1.2 Disponibilidad de biomasa	27
1.3 Mezclas carbón-petróleo, generalidades	28
1.4 Alcance del presente proyecto.	31

CAPITULO II

COMBUSTIBLES PREMEZCLADOS

2.1 Generalidades	32
2.2 Materiales para la preparación	34
2.2.1 Carbón	35
2.2.1.1 Tipo de Carbón	35
2.2.1.2 Cantidad de Carbón	36
2.2.1.3 Características granulométricas	37

2.2.2	Petróleo	42
2.2.3	Estabilizador	43
2.3	Métodos de preparación	46
2.3.1	Mezcla simple carbón - petróleo	47
2.3.2	Molienda ultrafina del carbón	48
2.3.3	Molienda húmeda	49
2.3.4	Mezclado de alta energía	49
2.3.5	Preparación de emulsiones	49
2.3.6	Preparación de geles	50
2.3.7	Estabilización con tensoactivos	51
2.4	Estabilidad	52
2.4.1	Teoría de la estabilidad	52
2.4.2	Características de las mezclas	56
2.4.3	Sedimentación	58
2.4.4	Métodos de evaluación de la estabilidad	60
2.5	Viscosidad	66
2.6	Ventajas y desventajas de su utilización	68
2.6.1	Ventajas en comparación con el petróleo puro	68
2.6.2	Ventajas en comparación con el carbón	69
2.6.3	Desventajas	71

CAPITULO III

MATERIALES Y EQUIPOS

3.1	Materiales utilizados	73
3.1.1	Bunker	73

3.1.1.1 Características físicas	74
3.1.2 Carbón	75
3.1.2.1 Preparación de los carbones	77
3.1.2.2 Características físico-químicas	78
3.1.3 Estabilizadores	79
3.1.3.1 Preparación	79
3.2 Equipos	81
3.2.1 Viscosímetro.	81
3.2.2 Tubos sedimentadores	83
3.2.3 Péndulo de sedimentación	83
3.2.4 Tina de calentamiento	85
3.3 Preparación de las mezclas carbón-bunker	85

CAPITULO IV

METODOS DE EVALUACION

4.1 Evaluación de estabilidad de las mezclas carbón-bunker.	89
4.1.1 Principio aplicado.	89
4.1.2 Procedimiento de ensayo.	93
4.1.3 Resultados obtenidos.	94
4.2 Pruebas reológicas.	102
4.2.1 Principio aplicado.	102
4.2.2 Procedimiento de ensayo.	104
4.2.3 Resultados obtenidos	105

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Pruebas de estabilidad.	109
5.2 Pruebas reológicas.	11
5.3 Recomendaciones	112

APENDICE A: TABLAS Y GRAFICOS DE LAS PRUEBAS DE

ESTABILIDAD	115
-------------	-----

APENDICE B: TABLAS Y GRAFICOS DE LAS PRUEBAS

RHEOLOGICAS	139
-------------	-----

APENDICE C: FOTOGRAFIAS DE EQUIPOS

169

BIBLIOGRAFIA

174

INDICE DE TABLAS

No.	TITULO	Página
I	Disponibilidad de residuos agrícolas ...	27
II	Análisis del bunker.....	75
III	Escala granulométrica Tyler.....	77
IV	Análisis de los carbones.....	79
V	Preparación de estabilizadores.....	80
VI	Materiales utilizados en la elaboración de las mezclas	87
VII	Muestras de mezclas carbón-bunker para los ensayos de estabilidad.....	88
VIII	Datos de sedimentación para el tubo 5...	116
IX	Datos de sedimentación para el tubo 6...	117
X	Datos de sedimentación para el tubo 7...	118
XI	Datos de sedimentación para el tubo 9...	119
XII	Datos de sedimentación para el tubo 10..	120
XIII	Datos de sedimentación para el tubo 12..	121
XIV	Datos de sedimentación para el tubo 13..	122
XV	Datos de sedimentación para el tubo 14..	123
XVI	Datos de sedimentación para el tubo 15..	124
XVII	Datos de sedimentación para el tubo 16..	125
XVIII	Datos de sedimentación para el tubo 17..	126

XIX	Cálculos para el holder vacío	127
XX	Valores de constantes rheológicas para el bunker	106
XXI	Valores de constantes rheológicas para mezclas cascarrilla-bunker 20-80.....	106
XXII	Viscosidad del bunker a diferentes temperaturas.....	140
XXIII	Viscosidad de las mezclas a diferentes temperaturas.....	141
XXIV	Datos de esfuerzo y velocidad de corte para bunker.....	142
XXV	Datos de esfuerzo y velocidad de corte para las mezclas.....	143

INDICE DE FIGURAS

No.	TITULO	Página
1	Diagrama esquemático de elaboración de combustibles premezclados carbón-petróleo	30
2	Efecto opuesto del tamaño de las partículas en la viscosidad y estabilidad de las suspensiones.....	40
3	Diagrama esquemático del viscosímetro Brookfield.....	82
4	Diagrama esquemático del banco de sedimentación.....	84
5	Diagrama esquemático de la tina de calentamiento de las mezclas.....	86
6	Diagrama esquemático del péndulo mostrando las distancias importantes.....	90
7	Curvas de sedimentación para mezclas bunker-aserrín.....	97
8	Curvas de sedimentación para mezclas bunker-cascarilla.....	98
9	Curvas de sedimentación para mezclas bunker-madera.....	99

10	Curvas de sedimentación para mezclas carbón-bunker 20-80.....	100
11	Curvas de sedimentación para mezclas carbón-bunker 30-70.....	101
12	Curvas de sedimentación para tubo 5.....	128
13	Curvas de sedimentación para tubo 6.....	129
14	Curvas de sedimentación para tubo 7.....	130
15	Curvas de sedimentación para tubo 9.....	131
16	Curvas de sedimentación para tubo 10.....	132
17	Curvas de sedimentación para tubo 12.....	133
18	Curvas de sedimentación para tubo 13.....	134
19	Curvas de sedimentación para tubo 14.....	135
20	Curvas de sedimentación para tubo 15.....	136
21	Curvas de sedimentación para tubo 16.....	137
22	Curvas de sedimentación para tubo 17.....	138
23	Variación de la viscosidad con la temperatura del bunker a diferentes esfuerzos de corte.....	107
24	Variación de la viscosidad con la temperatura de la mezclas a diferentes esfuerzos de corte.....	108
25	Comparación de la viscosidad entre el bunker y las mezclas a 60 RPM con el spindle 2.....	144
26	Comparación de la viscosidad entre el bunker y las mezclas a 60 RPM con el spindle 3.....	145

27	Comparación de la viscosidad entre el bunker y las mezclas a 60 RPM con el splindle 4.....	146
28	Comparación de la viscosidad entre el bunker y las mezclas a 30 RPM con el splindle 2.....	147
29	Comparación de la viscosidad entre el bunker y las mezclas a 30 RPM con el splindle 3.....	148
30	Comparación de la viscosidad entre el bunker y las mezclas a 30 RPM con el splindle 4.....	149
31	Curvas de viscosidad vs esfuerzo de corte para bunker a diferentes temperaturas....	150
32	Curvas de viscosidad vs esfuerzo de corte para mezclas a diferentes temperaturas...	151
33	Curvas viscosidad vs velocidad de corte para bunker a 60°C.....	152
34	Curvas viscosidad vs velocidad de corte para bunker a 70°C.....	153
35	Curvas viscosidad vs velocidad de corte para bunker a 80°C.....	154
36	Curvas viscosidad vs velocidad de corte para bunker a 90°C.....	155
37	Curvas viscosidad vs velocidad de corte para bunker a 100°C.....	156

11	Curvas viscosidad vs velocidad de corte para bunker a 110°C.....	157
39	Curvas viscosidad vs velocidad de corte para mezclas a 70°C.....	158
40	Curvas viscosidad vs velocidad de corte para mezclas a 80°C.....	159
41	Curvas viscosidad vs velocidad de corte para mezclas a 90°C.....	160
42	Curvas esfuerzo de corte vs velocidad de corte para bunker a 70°C.....	161
43	Curvas esfuerzo de corte vs velocidad de corte para bunker a 80°C.....	162
44	Curvas esfuerzo de corte vs velocidad de corte para bunker a 90°C.....	163
45	Curvas esfuerzo de corte vs velocidad de corte para bunker a 100°C.....	164
46	Curvas esfuerzo de corte vs velocidad de corte para bunker a 110°C.....	165
47	Curvas esfuerzo de corte vs velocidad de corte para mezclas a 70°C.....	166
48	Curvas esfuerzo de corte vs velocidad de corte para mezclas a 80°C.....	167
49	Curvas esfuerzo de corte vs velocidad de corte para mezclas a 90°C.....	168

INDICE DE FOTOGRAFIAS

No.	TITULO	Página
1	Banco de tubos de sedimentación.....	170
2	Péndulo y tubo de sementación.....	171
3	Tina de calentamiento y viscosímetro para ensayos de rheología.....	172

LISTA DE SIMBOLOS

SIMBOLO	DESCRIPCION
API	American Petroleum Institute
BTU	Unidad térmica Británica
°C	Grado centigrado
Cps	Centipoises
cal	Caloría
cm	Centimetro
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
°F	Grado Fahrenheit
Fig.	Figura
F	Fracción de torque
g	Aceleración de la gravedad
gr	Gramo
H	Distancia desde el eje de suspensión inferior al centro de gravedad
h	Distancia entre ejes del soporte
I	Momento de inercia con respecto a cualquier eje
I_o	Momento de inercia con respecto al centro de gravedad

K	Coeficiente de consistencia del fluido
L	Largo del spindle
Lb	Libra
MW	Megavatios
MMb	Millones de barriles
MMpc	Millones de pies cúbicos
MMtep	Millones de toneladas equivalentes de petróleo
MJ	Megajoule
ml	Mililitro
mm	Milímetro
M	Masa
M_1	Masa del holder con la mezcla
M_2	Masa del holder vacío
m_1	Masa de las partículas suspendidas
m	Masa del bunker
N	Índice de comportamiento del fluido
No.	Número
RPM	Revoluciones por minuto
R	Radio del spindle
r	Radio de partículas
SP2	Spindle #2
SP3	Spindle #3
SP4	Spindle #4
SSU	Segundos Saybolt Universales
tep	Toneladas equivalentes de petróleo

ton	Toneladas
T	Periodo
T_1	Período con respecto al eje superior
T_2	Período con respecto al eje inferior
vs	Versus
V	Velocidad terminal de partículas
X	Distancia desde la superficie al centro de gravedad de la mezcla
X_a	Distancia desde la superficie de la mezcla hasta el centro de gravedad del holder vacío
X_b	Distancia entre la superficie de la mezcla y el centro de gravedad del holder con la mezcla
Y	Distancia desde la superficie de la mezcla hasta el eje inferior
@	A
δ	Densidad de sólidos
δ'	Densidad de líquidos
σ	Esfuerzo de corte
π	Constante Pi Universal
Γ	Torque
μ	Viscosidad
τ	Velocidad de corte

INTRODUCCION

Desde que el hombre comenzó hace unos 10.000 años (hombre neolítico) a utilizar racionalmente la energía hasta finales del siglo pasado, fue la Agricultura la que cubrió la mayor parte de las necesidades energéticas de la humanidad. La energía fue tomada partir de los alimentos, que a su vez producían la energía mecánica que procedía del trabajo muscular del hombre y animales, además la calefacción se lograba por la combustión de la leña y desechos de la cosechas.

La actividad agrícola es la forma más antigua de utilización de la energía solar almacenada en los vegetales a través del fenómeno fotosintético en forma de energía química en los enlaces de las moléculas orgánicas que forman la biomasa del vegetal.

Las necesidades energéticas de la humanidad fueron satisfechas adecuadamente por la producción agrícola hasta mediados del siglo anterior, sin embargo, al producirse el desarrollo industrial se hizo necesario apelar a otras fuentes de energía, utilizándose el carbón y el petróleo para mover la maquinaria industrial y para la

transportación, quedando la Agricultura para proveer de alimentos al hombre.

La expansión industrial global trajo consigo un uso irracional de estos combustibles y el agotamiento de las reservas de los mismos, especialmente el petróleo, lo que ha causado el aumento de los precios de éstos.

Esta situación ha hecho que la humanidad se plante seriamente el problema energético y busque soluciones a esta crisis. Es por esta razón que actualmente existe la tendencia a usar las fuentes alternas de energía especialmente las renovables, de las que nos ocuparemos principalmente en este documento a través de la biomasa.

Se entiende como biomasa a todo tipo de materia orgánica generada como resultado de un proceso biológico. La energía acumulada en las moléculas orgánicas, es liberada en el proceso de combustión. Existe cuatro clases de biomasa, a saber: biomasa primaria, secundaria, residual y fósil.

Por ser de nuestro interés entraremos a tratar la biomasa residual la misma que es producida a partir de la biomasa primaria o secundaria sometida a alguna actividad humana. Ejemplos de biomazas residuales son la paja, el aserrín y la cascarilla de arroz.

Generalmente la biomasa residual se constituye en un problema de tipo ambiental cuando no es aprovechada de alguna manera. En nuestro estudio trataremos de aprovechar la abundante producción de residuos biomásicos, especialmente de cascarilla proveniente del pilado del arroz y aserrín proveniente del procesamiento de madera, subproductos que casi no se los utiliza y que podrían ser utilizados para generar energía, principalmente en los sitios cercanos a los lugares de producción, ésto es la provincias de Guayas y Los Ríos.

La utilización de estos productos con fines energéticos debería ser en sus mismos lugares de producción, que como conocemos tienen un alto desarrollo industrial y por lo tanto usan combustibles intensivamente, para así minimizar los costos de transporte. Además los costos de producción de energía a partir de estos subproductos son muy reducidos, ya que están cargados en el costo de los productos principales, que son el arroz y la madera. Nuestro estudio se basa en la utilización de la energía almacenada en la cascarilla de arroz, aserrín de madera y el carbón artesanal de madera, materiales que, antes de ser sometidos a la combustión, son tratados previamente y luego mezclados con bunker. El tratamiento previo comprende operaciones tales como: pirólisis para obtener carbón con alta concentración de carbón fijo, molienda para lograr la granulometría adecuada y tamizado final.



BIBLIOTECA

CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 DEMANDA ENERGETICA DEL PAIS.-

El Ecuador tiene abundantes recursos energéticos, la energía hidroeléctrica (21.000 MW) ha sido escasamente explotada en su potencial total (alrededor del 5%). Los recursos hidrocarburíferos están constituidos por 1.500 MMb de petróleo y alrededor de 550.000 MMpc de gas natural, existiendo además abundantes recursos forestales en la Región Oriental.

Considerando el consumo final, los productos derivados de petróleo representan alrededor del 72% de la demanda total de energía, en tanto que a la biomasa le corresponde un 22% y a la electricidad el 6%.

En el análisis de costos, la biomasa usada en el sector familiar es la fuente de energía más barata, sin embargo, cuando se toma en cuenta el factor de corrección de la eficiencia energética, las opciones más económicas son el querosene y la gasolina de bajo índice octano, siendo la leña casi dos veces más cara que el

querosene. En el sector industrial, la fuente de energía más económica es el petróleo residual, seguido por el combustible diesel y el querosene, mientras que la electricidad es dos veces y media más cara que el bunker

El consumo anual de energía de biomasa en el Ecuador es de 1 Mktep, representado por leña en un 85% y bagazo en un 15%.

1.2 DISPONIBILIDAD DE BIOMASA.-

El sector agrícola del país produce importantes cantidades de residuos que en condiciones diferentes, es decir con precios mayores de la energía convencional, podrían considerarse como fuentes preciosas de combustibles. La tabla I presenta la disponibilidad relativa de residuos agrícolas.

TABLA I. DISPONIBILIDAD DE RESIDUOS AGRICOLAS

CULTIVO	RESIDUO (ton/año)
Arroz	428,000
Cebada	123,000
Trigo	106,000
Maiz	2,205,000
Cacao	82,000
Café	62,000
Total	5,006,000

Estimándose que la mitad, es decir 2.5 millones de toneladas, se debería dedicar como protección de suelo y forraje animal, la otra mitad se la podría usar como fuente de energía, lo que tendría un valor calorífico de 13,500 MJ/DC, siendo su aporte total de energía de aproximadamente 500,000 tep.

Se ha estimado que el costo de recolección, molienda y compresión en briquetas, necesario para poner a estos residuos en condiciones de uso, costaría por lo menos 30 dólares por tonelada, lo que haría a este combustible muy costoso en comparación con los actualmente disponibles.

Además hay que considerar como agravante a esta situación, que la producción agrícola en general se encuentra muy dispersa, siendo el arroz el único producto que presenta como particularidad una alta concentración de su producción en un solo sector (Provincia del Guayas y sectores aledaños de la Provincia de Los Ríos), por lo que este sería el primer producto a considerar como fuente energética.

1.3 MEZCLAS CARBON-PETROLEO. GENERALIDADES.-

Los combustibles premezclados pueden ser definidos como mezclas de un combustible sólido (biomasa) finamente dividido y un combustible líquido (petróleo), en

condición tal que las partículas sólidas de las mezclas se mantengan en suspensión durante el período en el cual sean transportados, almacenados y quemados, formando una mezcla combustionable con características líquidas.

Además dependiendo del procedimiento y condiciones de preparación utilizado y del criterio de estabilidad aplicado, las mezclas pueden o no necesitar estabilizadores químicos. Esto también dependerá de propiedades físicas de los materiales utilizados en su elaboración.

En la Figura No. 1 se puede apreciar un diagrama esquemático de elaboración de los combustibles premezclados carbón-petróleo.

El objetivo del desarrollo de esta tecnología es sustituir parcialmente (en algunos casos hasta el 50 %) el petróleo puro por mezclas carbón-petróleo que puedan ser manipuladas y quemadas, ya sea por atomización en quemadores o en máquinas de combustión interna, sin que las instalaciones existentes tengan que ser sometidas a cambios mayores, con la finalidad de reducir el consumo de petróleo y reducir los costos energéticos, en la misma proporción.

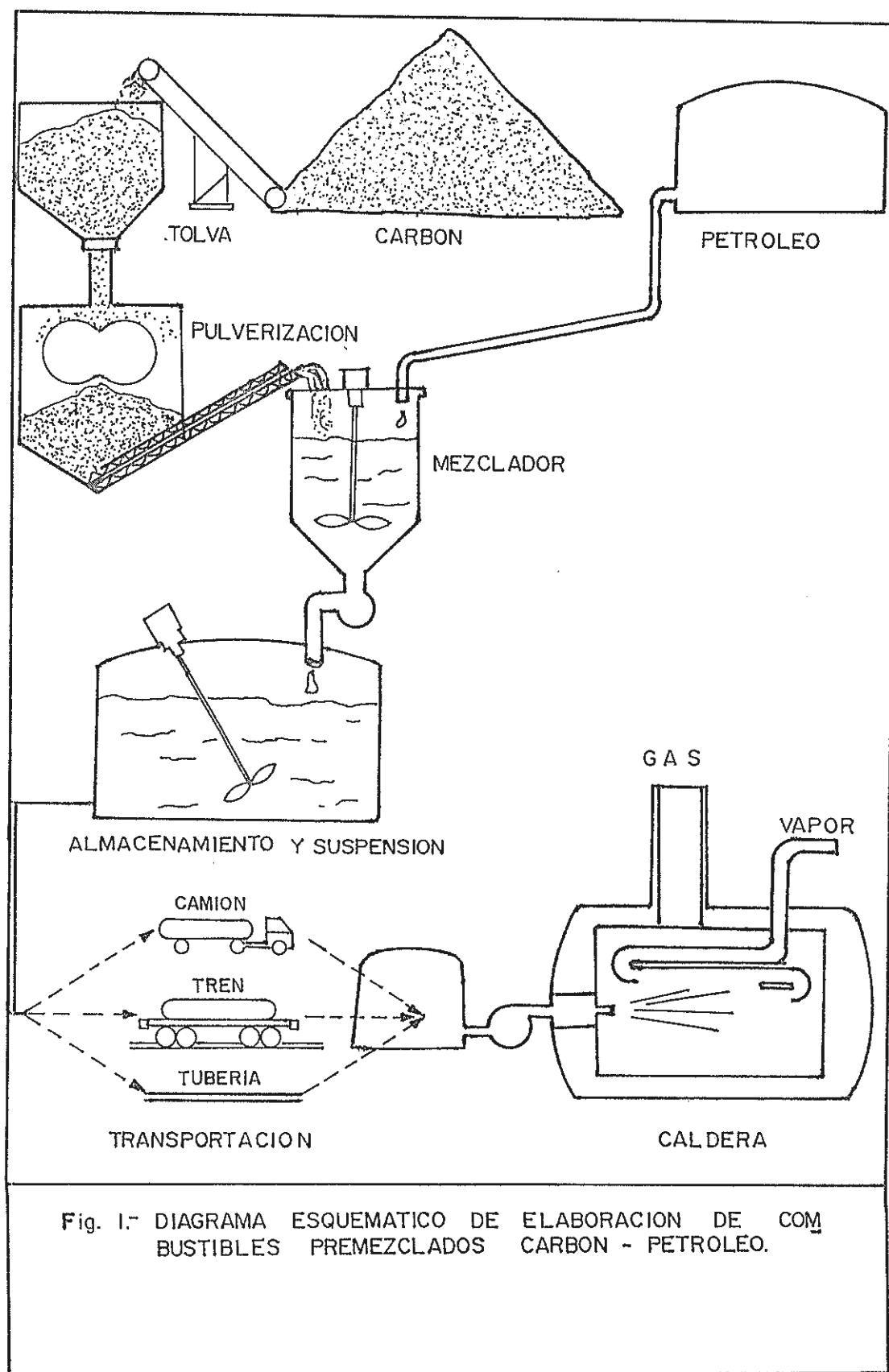


Fig. 1.- DIAGRAMA ESQUEMATICO DE ELABORACION DE COMBUSTIBLES PREMEZCLADOS CARBON - PETROLEO.

Uno de los criterios más importante para el desarrollo exitoso de estos combustibles, es la obtención de una buena estabilidad de la mezcla. En la literatura se presentan varios métodos para desarrollarla.

Muchas veces se habla de las mezcla carbón-petróleo como "combustibles coloidales" aunque este término es inapropiado, ya que el combustible no se encuentra enteramente en forma coloidal, también se los suele denominar "combustibles premezclados", "slurry fuels", "composite fuels" y "COM fuels", siglas en inglés de "coal-oil mixture fuels".

1.4 ALCANCE DEL PRESENTE PROYECTO.-

El principal objetivo de este proyecto es la elaboración de mezclas combustibles, a partir de los recursos disponibles, utilizando para el efecto carbón proveniente de cascarilla de arroz, aserrín pirolizado y madera con bunker, en proporciones desde 10 hasta 30% de carbón. También se harán caracterizaciones físico-químicas de los diferentes productos a ser usado en el proyecto.

Definir la estabilidad de las suspensiones elaboradas y determinar el comportamiento reológico de las mezclas y compararlo con el del bunker puro. Para esto se necesitará realizar ensayos de sedimentación y de viscosidad a la serie de muestras preparadas.

CAPITULO II

COMBUSTIBLES PREMEZCLADOS

2.1 GENERALIDADES.—

El combustible premezclado puede definirse como una mezcla de combustible sólido finamente pulverizado y un combustible líquido, en una condición tal que las partículas sólidas no se puedan separar por gravedad durante un largo período, formando una mezcla combustionable y con características líquidas.

Los combustibles premezclados son mezclas líquidas de carbón y petróleo y, aunque algunas veces son llamadas "combustibles coloidales", este término es inapropiado, ya que el combustible no está en una condición enteramente coloidal. Cuando se mezcla carbón pulverizado con petróleo, el resultado es una pequeña proporción de solución verdadera, algo de solución coloidal y la mayoría de simple suspensión. Además, dependiendo de los materiales, del procedimiento de preparación utilizado y/o del criterio de estabilidad aplicado, las mezclas combustibles pueden o no necesitar estabilizadores químicos.

El uso de mezclas carbón - petróleo como combustibles es una idea que data de hace aproximadamente 100 años. La motivación para la investigación de combustibles carbón -petróleo se originó en la industria del carbón mineral en un esfuerzo por encontrar salidas adicionales a los finos de carbón y a los carbones de baja calidad.

Más recientemente ha sido la industria del petróleo la que se ha interesado mayormente debido al paulatino decrecimiento de las reservas naturales y la perspectiva de un futuro agotamiento del petróleo. Esto es evidenciado en el hecho de que mucha investigación se haya desarrollado en períodos de tiempo y en países donde las reservas petrolíferas eran muy escasas. En el presente, es en todo el planeta que las reservas petrolíferas han disminuido, lo que ha motivado que la investigación se reanude con mucho ímpetu y se extienda a todos los países del mundo.

El objetivo del desarrollo de esta tecnología es substituir el petróleo puro por una mezcla petróleo-carbón que pueda ser manipulada y combustionada, ya sea por atomización en quemadores o en máquinas de combustión interna, sin alteraciones significativas en los equipos existentes, con la finalidad de reducir el consumo de petróleo y gas natural, y/o reducir los

costos energéticos.

Uno de los criterios más importantes para el desarrollo exitoso de estos combustibles ha sido la atención a la buena estabilidad de las mezclas. Varios métodos de estabilización han sido desarrollados basados en la velocidad de sedimentación, la redispersibilidad de los sedimentos, la viscosidad (bombeabilidad) de la mezcla resultante, y el costo del tratamiento al usuario.

Manteniendo los costos de los materiales y de la preparación de los combustibles premezclados al mínimo, así como también una operación simple de los equipos que lo utilizan, obtendremos combustibles muy competitivos que nos ayudarán a comenzar a ahorrar nuestro precioso petróleo más prontamente que cualquiera de las demás alternativas energéticas.

2.2 MATERIALES PARA LA PREPARACION.-

La preparación de las mezclas carbón - petróleo debe apuntar hacia la consecución de características satisfactorias de estabilidad y manipuleo de las mezclas carbón - petróleo. Para conseguir estos objetivos se debe hacer una selección minuciosa de los materiales a utilizarse en la preparación de las mezclas carbón - petróleo, tomando en consideración también el método de elaboración a emplearse.

Dicho estudio y estabilización se hablará detenidamente de cada uno de los componentes y indicarán algunos criterios para su selección.

2.2.1 CARBÓN.-

Para hacer una selección apropiada del componente sólido de las mezclas es necesario tener en cuenta tres aspectos principales:

- 1.- Tipo de carbón
- 2.- Cantidad de carbón en la mezcla
- 3.- Características granulométricas

2.2.1.1 TIPO DE CARBÓN.-

El carbón utilizado en la preparación de combustibles premezclados podría ser mineral o vegetal.

En lo que se refiere a los carbones minerales, la antracita tiene varias características que la hacen menos deseable que el carbón bituminoso, tiene un mayor porcentaje de cenizas, es difícil de moler y es lenta para quemarse.

La estabilización de una mezcla petróleo - antracita puede ser más difícil que una

mezcla petróleo -carbón bituminoso, porque el carbón bituminoso contiene materia orgánica la cual tiende a disolverse o ser humedecida por el petróleo o el agente estabilizante, mientras que la antracita es carbón puro.

En países agrícolas, la gran cantidad de desechos agroforestales, pueden ser utilizados luego de un proceso de carbonización apropiado (carbón vegetal), como el componente sólido de las mezclas carbón -petróleo.

2.2.1.2 CANTIDAD DE CARBÓN.-

Las mezclas carbón -petróleo desarrollan mejores características de estabilidad con el incremento del contenido de carbón. Sin embargo, la cantidad de polvo de carbón en la mezcla influye grandemente en la viscosidad de la mezcla carbón -petróleo resultante. Esto es, a medida que se incrementa este parámetro la viscosidad también aumenta.

Por otro lado un mayor porcentaje de carbón permite una mayor utilización de este recurso, con el consecuente ahorro

proporcional de petróleo.

La literatura reporta que la proporción máxima utilizable de carbón en las mezclas es 50% de porcentaje en peso con respecto al peso de la mezcla final, para poder conseguir que la mezcla conserve la fluidez y pueda ser manipulada con sistemas de bombeo convencionales con costos energéticos aceptables. Más allá de este valor, sin lugar a dudas, la viscosidad sobrepasaría los límites prácticos de bombeo.

2.2.1.3 CARACTERISTICAS GRANULOMETRICAS.-

Para poder interpretar los resultados se debe tener alguna medida de la distribución y de la forma de las partículas. Se distinguen tres niveles de caracterización de partículas:

a) Industrial

b) Análisis Gravimétrico

c) Microscópico

a) El estándar más simple de caracterización es la especificación industrial que indica el porcentaje de

muestra atravezando una malla dada; por ejemplo: 80% a través de una malla 200. Este presenta algunos problemas desde el punto de vista de control porque no indica el tamaño del porcentaje restante lo cual podría provocar dificultades en la interpretación de resultados.

b) Otro tipo de caracterización de las muestras es el análisis gravimétrico el cual es muy conocido. En este método se utilizan una serie de mallas en diferentes tamaños y luego se pesan justamente las cantidades de material que han sido retenidas a través de cada una de ellas.

c) Un tercer tipo de caracterización de la distribución de tamaños en una muestra de carbón pulverizado es la microfotografía de la muestra. Este método tiene la ventaja de que, además de permitirnos conocer la distribución de los tamaños, permite también conocer la forma de las partículas.

En la preparación del polvo de carbón es

muy importante el efecto de las partículas mayores en la estabilidad, pues la presencia de aún pequeñas cantidades de partículas sobredimensionadas podrían causar grandes alteraciones.

Los factores a considerar en la selección de la granulometría apropiada son:

- i) El aspecto técnico
- ii) El aspecto económico

i) En el aspecto técnico debe analizarse el efecto del tamaño del carbón sobre las propiedades de la mezcla final, principalmente sobre la estabilidad y la viscosidad. La Figura No. 2 combina la curva estabilidad - tamaño de partículas con la curva viscosidad - tamaño de partículas, para muestras preparadas con granulometrías diferentes manteniendo constante el contenido de carbón, para mostrar la relación que existe entre la estabilidad y la viscosidad.



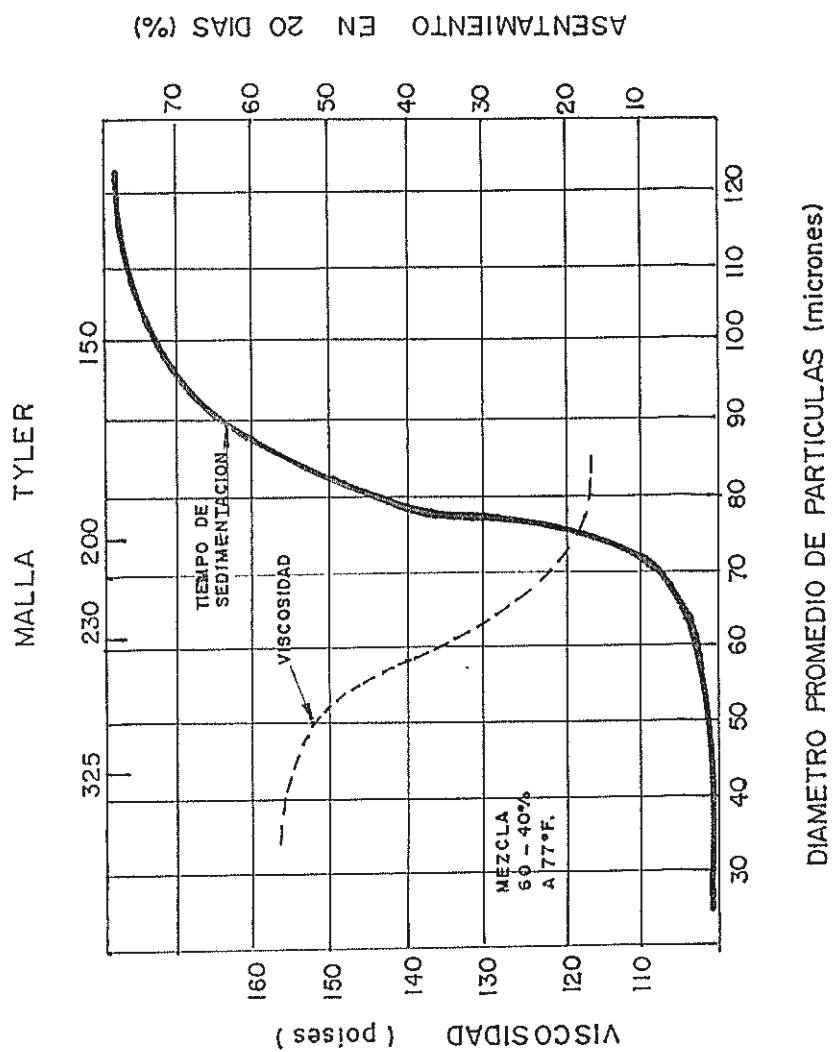


Fig. 2 -EFECTO OPUESTO DEL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS EN LA VISCOSIDAD Y ESTABILIDAD DE LAS SUSPENSIONES.

Se puede ver que mientras el tamaño de partículas disminuye la estabilidad y la viscosidad se incrementan. Así, a medida que el tamaño de las partículas aumenta, los estabilizadores se vuelven más necesarios o la mezcla debe utilizarse más pronto después de haber sido preparada. Mientras el tamaño de las partículas sea más pequeño, las instalaciones de bombeo deben ser expandidas o deben usarse aditivos para incrementar la fluidez de la mezcla.

- ii) El costo de la molienda del carbón es una de las consideraciones más importantes en la economía del combustible premezclado. Este costo es una función de tantas variables que es difícil predecir cual sería para una operación dada. Sin embargo se ha llegado a concluir que el costo de moler carbón crece rápidamente con el grado de finura que se quiera alcanzar, esto es, los costos de molienda son directamente

proporcionales al incremento del área superficial creada.

Valdría la pena realizar una investigación de costos de molienda antes de la preparación de las mezclas, sin embargo la mayoría de los investigadores han coincidido que la granulometría óptima desde el punto de vista del costo de preparación y de las características de la mezcla es la malla Tyler 200.

2.2.2 PETROLEO.-

El uso de un petróleo con alta gravedad específica incrementa la estabilidad. El uso de petróleos de alta viscosidad también incrementa la estabilidad, pero existe un límite sobre el cual los costos de bombeo se vuelven prohibitivos, con más razón si se considera que la adición de carbón incrementará la viscosidad aún más. Los combustibles premezclados elaborados con fuel-oil No.6 pueden ser manipulados en equipos ordinarios de manipuleo de petróleo; petróleos más viscosos requerirán otros cambios como incremento en la temperatura del combustible o en el diámetro de las tuberías.

2.2.3 ESTABILIZADOR.-

La función de los estabilizadores en las mezclas carbon-petróleo es retardar la sedimentación de las partículas de carbón suspendidas en el medio líquido para prevenir la separación del petróleo y el carbón y mantener el sistema en estado uniforme.

Existen tres razones principales para el uso de estabilizadores:

1.- La razón más importante es el hecho de que a partir de determinada concentración en peso de carbón en la mezcla, dependiendo de la naturaleza de los componentes, el incremento de viscosidad comienza a causar problemas. Sin embargo, si se desea que el proceso sea económicamente justificable, deben utilizarse concentraciones más altas y, en consecuencia estabilizadores.

2.- Sin estabilizadores, las partículas, si es que no tienen tamaño coloidal, se asentarán luego de que el bombeo o la agitación cesen formando sedimentos densamente empaquetados, redispersables, sin la posibilidad de recuperar la homogeneidad de la mezcla.

Los aditivos son deseables si ellos pueden controlar la razón y el tipo de asentamiento.

3.- Uno de los fenómenos que ocurre con las mezclas carbón - petróleo, debido a la combinación de calor y almacenamiento por cortos períodos de tiempo, es la precipitación de geles tixotrópicos. Este fenómeno es evitado por los estabilizadores.

El mecanismo de la estabilización no es entendido muy claramente, pero se conoce que un agente tensoactivo es selectivamente absorbido en la superficie de las partículas de carbón y causa un descenso de la tensión interfacial entre el carbón y el petróleo y que ellos causan una mayor uniformidad en las cargas electrostáticas de las partículas de carbón. Además al adherirse las moléculas de tensoactivo a la superficie de las moléculas de carbón crean una especie de red que mantiene las partículas en suspensión. Es razonable concluir que la estabilidad mediante tensoactivos es debido a ambos efectos, eléctricos y mecánicos.

Las cargas en las partículas de carbón son presumiblemente causadas por la fricción durante

la molienda. Ya que el carbón no es un material homogéneo, existen cargas positivas y negativas, aún en diferentes sectores de una misma partícula. El petróleo es tan pobre conductor que estas cargas son neutralizadas muy lentamente. Esto significa que se producirá la aglomeración lenta de las partículas y el consecuente asentamiento. La adición de tensoactivos produce cargas uniformes en todas las partículas y minimiza las fuerzas de interacción entre las partículas en suspensión. Además, los tensoactivos no incrementan apreciablemente la viscosidad de las suspensiones y son efectivos sobre un amplio rango de temperaturas.

Las estructuras químicas de los estabilizadores se extiende sobre una gran variedad de tipos. Existen tres tipos generales de estabilizadores:

- a) Emulsificadores,
- b) Gelificadores, y
- c) Tensoactivos.

Los estabilizadores más utilizados han sido ácidos grasos y productos saponificados (jabones) de todas las clases: oleatos, estearatos y palmitatos.

El porcentaje de estabilizador en la mezcla depende de varios factores, tales como su composición química, el tamaño y la porosidad de las partículas, y el tipo de carbón y petróleo utilizados.

La determinación del tipo y porcentaje óptimos de estabilizador debe hacerse experimentalmente, en base a los recursos existentes localmente. Es posible que en la búsqueda se encuentren tensoactivos con diferentes propiedades, algunos serán muy efectivos en prevenir la sedimentación, otros pueden contribuir a una buena reología, mientras que otros pueden proveer buena redispersibilidad de los sedimentos.

En cualquier caso, el costo de los agentes estabilizadores debe ser comparado entre ellos y con el costo de las otras técnicas de preparación, para así seleccionar el estabilizador y/o el proceso más económico.

2.3 METODOS DE PREPARACION.-

Las técnicas de preparación de combustibles premezclados difieren principalmente en el método de la molienda del carbón y en el método de estabilizar la mezcla carbón - petróleo, de acuerdo a las características deseadas. A

continuación, se indican las técnicas que generalmente han sido utilizadas en la manufactura de combustible premezclado:

- 1.- Mezcla simple carbón - petróleo
- 2.- Molienda ultrafina del carbón
- 3.- Molienda húmeda
- 4.- Mezclado de alta energía
- 5.- Preparación de emulsiones
- 6.- Preparación de geles
- 7.- Estabilización con tensoactivos

2.3.1 MEZCLA SIMPLE CARBON - PETROLEO.-

Se puede definir como simple mezcla a la obtenida luego del proceso convencional de mezclado de petróleo y carbón pulverizado obtenido de una molienda seca. Este es un proceso de preparación in situ para la utilización inmediata con muy buenos resultados. Utilizando esta técnica el tiempo de almacenamiento puede ser llevado al mínimo, de manera que la sedimentación no sea un problema.

Cuando la utilización no va a ser inmediata, el problema de la sedimentación puede ser obviado -- los tanques de almacenamiento son provistos de bombas de recirculación o de agitadores de

operación continua o intermitente. Tales métodos requieren de una cantidad considerable de potencia, siendo posible la utilización de los mismos motores tanto para agitación, como para transporte por bombeo.

Ciertos investigadores prefieren mantener la mezcla en movimiento antes que usar estabilizadores, porque es un método más barato y se evitan ciertos problemas que podrían ocasionar los estabilizadores al reaccionar con otros productos.

2.3.2 MOLIENDA ULTRAFINA DEL CARBON.-

El segundo método es moler el carbón bajo ciertas condiciones, por ejemplo con un molino coloidal, de tal manera que el carbón sea convertido a una condición verdaderamente coloidal y por esto no se pueda separar por gravedad. Este método, sin embargo, no es económico comercialmente debido al alto costo y la dificultades generales de la molienda coloidal para la voluminosa producción que sería necesaria.

Otro problema que ocurre con la molienda fina que ésta tiende a incrementar excesivamente la viscosidad de la mezcla final.



2.3.3 MOLIENDA HUMEDA.-

Algunos investigadores han recomendado moler el carbón junto con el petróleo para asegurar una mezcla más íntima y posiblemente un mejor humedecimiento del carbón. Otros sugieren volver a moler el carbón ya pulverizado junto con el petróleo en un molino de bolas para conseguir un mezclado eficiente.

Este método posiblemente tenga la desventaja de incrementar el costo de molienda.

2.3.4 MEZCLADO DE ALTA ENERGIA.-

Con el fin de obtener estabilidad de las mezclas carbón - petróleo ciertos investigadores han utilizado mezclado de alta energía, mediante mezcladores mecánicos, homogenizadores y mezcladores por ultrasonido.

2.3.5 PREPARACION DE EMULSIONES.-

Ciertos investigadores han logrado mezclas estables mediante dispersión de agua en el seno de ellas, sin o con la adición de emulsificadores. En las emulsiones de agua en petróleo las partículas son mantenidas en suspensión en la interfase agua - petróleo.

El agua actúa para flocular las partículas de carbón, incrementando la sedimentación inicial para formar un asentamiento de partículas débilmente enlazadas y de gran volumen. Esta estructura floculada es fácilmente redispersada con agitación mecánica y la suspensión es rápidamente reestablecida. Los sedimentos floculados formados con agua presentan bajas viscosidades en comparación con los sedimentos no floculados formados en ausencia de agua.

Sin embargo, estas emulsiones agua - petróleo algunas veces presentan el problema de evaporación de las gotículas de agua a las temperaturas de combustión, con la consecuente pérdida de estabilidad. Además, las emulsiones son fáciles de romper por calentamiento o agitación mecánica y la presencia de agua significa una disminución del valor calorífico del combustible.

2.3.6 PREPARACION DE GELES.-

La adición de determinados compuestos químicos gelificadores a las mezclas carbón - petróleo dan como resultado la formación de redes de moléculas en la fase fluida para el mantenimiento de las partículas de carbón en suspensión. Aparentemente, las largas moléculas fibrosas del

gel dispuestas en arreglos desordenados enmarañan a las partículas de carbón y las mantienen suspendidas. Aquí la estabilización es enteramente mecánica y no tiene relación con la carga eléctrica de las partículas.

Los geles son muy estables pero difíciles de bombear, requiriendo de grandes cantidades de energía para su manipulación. Otras desventajas de los geles son su tendencia a la coagulación y su gran sensibilidad a los cambios de temperatura.

2.3.7 ESTABILIZACION CON TENSOACTIVOS.-

El carbón en la condición ordinaria de pulverización es mezclado con el bunker y con un estabilizador, en pequeñas cantidades para retrasar la separación de las partículas sólidas por gravedad bajo condiciones normales.

Debe hacerse una selección local entre los métodos de preparación descritos, o cualquier combinación entre ellos, que permita la mejor utilización de los recursos económicos y tecnológicos existentes.

2.4 ESTABILIDAD. -

2.4.1 TEORIA DE LA ESTABILIDAD. -

El problema de la medición y la interpretación de la estabilidad en un sistema tan complejo como el que encontramos en las mezclas carbón petróleo es algo complicado. Es por esta razón que en esta parte se resumirán dos criterios sobre la estabilidad de las mezclas:

El primer criterio establece que existen dos puntos de vista desde los cuales se puede interpretar la estabilidad:

- 1.- el punto de vista práctico
- 2.- el punto de vista teórico

1.- Desde el punto de vista práctico, el complicado sistema carbón - petróleo es considerado únicamente en términos generales sin intentar involucrarse en los detalles moleculares de la estabilización ni en el entendimiento de las propiedades medidas.

Este punto de vista denominado también macroscópico permite observar la influencia de los varios campos actuando sobre un sistema. Esto lleva inmediatamente a tres lógicas subclasificaciones de la estabilidad y ubica

el problema global en tres simples perspectivas:

- a) Estabilidad estática ———> Campo gravitacional
- b) Estabilidad dinámica ———> Campo mecánico
- c) Estabilidad reactiva ———> Campo químico

a) Estabilidad estática.— Se define como la capacidad de los sólidos para permanecer suspendidos uniformemente a través de la dispersión cuando la mezcla está en reposo. Un sistema inestable bajo la influencia del campo gravitacional debe asentarse y mientras se consiga sistemas gradualmente más estables se tendrá grados proporcionalmente decrecientes de sedimentación.

b) Estabilidad dinámica.— La estabilidad dinámica involucra la superposición campos mecánicos adicionales sobre el campo gravitacional.

c) Estabilidad reactiva.— Finalmente debe considerarse la reacción química de los componentes como un campo químico al cual es sometida la mezcla carbón -petróleo.

Las fuerzas involucradas podrían ser expresadas mediante la formulación de la función química potencial, aunque con mucha dificultad para los sistemas carbón - petróleo tratados.

2.- Desde el punto de vista teórico, la estabilidad es considerada en un sentido microscópico. Para efectivamente hacer esto se debe imaginar como si se estuviera observando una molécula y todas las fuerzas e interacciones involucradas en la estabilidad en el dominio molecular.

Este punto de vista permite definir tres categorías generales de estabilidad:

- a) Electrostática
- b) Estérica
- c) Matricial

a) Estabilidad electrostática. - Bajo estabilidad electrostática se clasifican todas las interacciones que se derivan de las cargas eléctricas. Este tema es muy complejo y para mejor entendimiento se consultar literatura de coloides que discute el tema con mucho detalle, lo cual

no es nuestro objetivo.

b) Estabilidad estérica.— En esta clasificación se trata la estabilidad de los sistema mediante el recubrimiento de las partículas mediante otra substancia para prevenir el asentamiento de ellas.

c) Estabilidad matricial.— Esta estabilidad de refiere a las propiedades características del medio actuando como una malla o estructura interconectada para prevenir la desestabilización de las partículas. Manifestaciones de este tipo de estabilidad son la alta viscosidad de algunos materiales y el desarrollo de estructuras fibrosas.

Es posible que en algún momento en la investigación estos criterios aparentemente se contradigan entre sí, es por ésto que, para tener un entendimiento amplio acerca de la estabilización, es necesario considerarla desde los dos puntos de vista indicados anteriormente.

El segundo criterio establece que la estabilidad debe enfocarse de dos maneras diferentes:

- a) Estabilidad sedimentativa
- b) Estabilidad agregativa

a) Estabilidad sedimentativa.— Se refiere a la velocidad de sedimentación de las partículas de carbón.

b) Estabilidad agregativa.— Se refiere a la facilidad con que los sedimentos puedan ser redispersados.

2.4.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS.—

Las características que determinan las propiedades de las mezclas carbón-petróleo son las siguientes:

I.— Características de estabilidad

(sedimentación):

- estabilidad en almacenamiento
- estabilidad en bombeo
- estabilidad a elevadas temperaturas



Una mezcla carbón - petróleo puede ser una emulsión, un gel o una dispersión. Las características de estabilidad de la mezcla pueden ser expresados, en el primer caso, en

términos de estabilidad de la emulsión y/o la suspensión de partículas y, en el segundo, en términos de la estabilidad del gel y su capacidad para recuperar la fluidez al ser sometido a pequeños esfuerzos. En el caso de la dispersión, en ciertas ocasiones es permitida la sedimentación limitada de partículas con la condición de que los sedimentos de carbón no se compacten y puedan redispersarse. En este caso las características de estabilidad pueden ser expresados en términos de la sedimentación, aglomeración de las partículas y/o compactación de los sedimentos.

La estabilidad en condiciones de agitación, vibraciones y cambios de temperatura durante el almacenamiento, bombeo o transportación en tanqueros, son también características deseadas para las mezclas carbón-petróleo.

II.- Características de flujo:

- reología de la suspensión (viscosidad y bombeabilidad)
- redispersión de los sedimentos
- potencial de erosión

III.- Características de combustión:

- valor calorífico
- atomización en quemadores
- emisiones atmosféricas

IV.- Características de variabilidad:

- Cambio en las propiedades del carbón y el petróleo.

El envejecimiento de las mezclas tiene mucha influencia en la estabilidad de la atomización del combustible y de la llama, en la combustión del carbón aglomerado y en el taponamiento de las boquillas.

En general, todas las tecnologías de elaboración deberían ser capaces de producir mezclas carbón - petróleo de calidad aceptable con respecto a estas características.

2.4.3 SEDIMENTACION.-

La velocidad de sedimentación de una partícula es una medida de un sólido en un líquido esta dada por la siguiente ecuación la cual es una expresión de la Ley de Stokes:

$$V = \frac{2gr^2(\delta - \delta')}{9\mu}$$

En la ecuación V es la velocidad terminal de la partícula, g es la aceleración de la gravedad, r es el radio de la partícula, δ y δ' son las densidades de las fases sólida y líquida respectivamente y μ es la viscosidad del fluido.

Se puede apreciar en la ecuación que en el caso ideal la velocidad de sedimentación de la partícula es proporcional a la diferencia de densidades entre las fases sólida y líquida, e inversamente proporcional a la viscosidad de la fase fluida.

Sin embargo, no debe esperar que la ley de Stokes se cumpla con las mezclas carbón - petróleo a las concentraciones de nuestro interés, ya que éstas están lejos de ser ideales debido a las interacciones entre las partículas y la aglomeración. Todo lo contrario, las condiciones para la sedimentación de las partículas de carbón suspensiones son muy complejas a causa de la existencia de los muchos factores que intervienen en el proceso.

A continuación se señalan los factores mas importantes que influyen sobre la sedimentación.

La tendencia a la sedimentación es directamente proporcional a:

- a) El tamaño de las partículas de carbón
- b) La diferencia de densidades entre el carbón y el petróleo.
- c) La temperatura del combustible premezclado.

La tendencia a la sedimentación es inversamente proporcional a:

- d) La viscosidad del petróleo
- e) La concentración de carbón

Existen otros factores que influyen en la estabilidad de las mezclas como:

- f) La presencia de cargas electrostáticas en las partículas sólidas
- g) La distribución, forma y porosidad de las partículas, y
- h) Las propiedades físicas del carbón y el petróleo.

2.4.4 MÉTODOS DE EVALUACION DE LA ESTABILIDAD.-

Existen varios métodos de evaluación de la estabilidad que han sido desarrollados a través de

los años, según reporta la literatura. Estos métodos pueden ser ampliamente clasificados como:

- 1.- Métodos de sedimentación
- 2.- Métodos viscosimétricos
- 3.- Métodos de muestreo
- 4.- Métodos combinados.

De éstos, los métodos de sedimentación han sido los prevalentes ya que la estabilidad es más frecuentemente definida en términos de la sedimentación del carbón.

- 1.- Métodos de sedimentación. Varios métodos de sedimentación han sido desarrollados.

Quando son usados petróleos refinados los cuales transmiten luz visible, la sedimentación del carbón puede fácilmente ser observada por visualización del nivel de carbón en una columna de vidrio. Este es el método más efectivo, más fácil y más barato de todos los métodos de evaluación de la estabilidad. La examinación de las muestras mediante microfotografía a través de microscopio electrónico es un ensayo muy útil para determinar la aglomeración de las

partículas sólidas.

Los petróleos pesados residuales no transmiten luz visible, por lo que deben usarse otros métodos para determinar el nivel de carbón en la columna de sedimentación de la mezcla. Uno de estos otros métodos es el de transmitancia de radiación X y gamma a través de probetas conteniendo las mezclas. Este método correlaciona la intensidad de la radiación transmitida con la densidad del medio.

La transmitancia de ondas sonoras por las mezclas en diferentes puntos de una columna de sedimentación, también ha sido reportada.

Otro método de determinar la razón de sedimentación del carbón, es el péndulo de sedimentación, desarrollado por McMillen, en el cual una columna de sedimentación llena con mezclas carbón - petróleo es montada sobre pivotes en un soporte. A medida que el carbón se asienta, el centro de gravedad de la columna desciende y el periodo de oscilación del péndulo se vuelve más corto. Midiendo cambio en el tiempo de oscilación, la razón de sedimentación puede ser calculada.

Las razones de sedimentación también han sido medidas usando la balanza de sedimentación. Esta técnica utiliza una pequeña bandeja inmersa en la mezcla carbón-petróleo, que es suspendida de una pequeña balanza analítica. La razón de sedimentación puede ser determinada por el peso del carbón asentada sobre la bandeja.

Estos métodos de medición de la sedimentación solamente dan información acerca de la razón de sedimentación del carbón, pero no determinan ninguna otra propiedad, tal como viscosidad, aglomeración o compactación.

2.- Métodos viscosimétricos. Las propiedades reológicas de las mezclas carbón - petróleo, importantes para los requerimientos de bombeabilidad y redispersibilidad, pueden ser determinadas por una variedad de métodos viscosimétricos. Un método sencillo de medición de la compactación y fluidez de los sedimentos es el ensayo de penetración en el cual la variable es el tiempo en que barrita pesada demora en caer a través del seno de la mezcla. Los resultados de estas

pruebas dan valores relativos de la compactación de los sedimentos y de la viscosidad de las mezclas muy útiles para la comparación de varias técnicas de estabilización. Estas pruebas tienen la ventaja de ser simples, directas y baratas, ello permite la realización de una gran cantidad de pruebas en períodos cortos de tiempo.

Otras mediciones mas cuantitativas de viscosidad pueden ser realizadas utilizando técnicas viscosimétricas estándares. Estas técnicas utilizan los viscosímetros comercialmente disponibles de aguja rotativa descendente, los cuales tienen rangos que incluyen los rangos de viscosidades presentados por las mezclas. La ventaja principal de estos ensayos es que la razón de sedimentación y la viscosidad de los sedimentos pueden ser medidas simultáneamente.

3.- Métodos de muestreo.- Un tercer método de ensayar la estabilidad de las mezclas involucra muestreo de mezcla en varios puntos en el tiempo y/o a varios niveles de la columna de sedimentación. En consecuencia a

las muestras se les puede analizar el porcentaje de carbón, la viscosidad de los sedimentos o el grado de aglomeración y compactación.

Un ensayo de muestreo es la columna de sedimentación, cuyo principio es el simple hecho de que la densidad de la muestra tomada directamente desde el fondo de la columna conlleva directamente al porcentaje en peso de carbón en la mezcla. La ventaja de este método es que la muestra es tomada de la mezcla sedimentada a la temperatura a la cual ocurrió la sedimentación, ya que las columnas poseen a su alrededor una camisa de agua caliente a temperatura controlada.

Los métodos de muestreo son directos y útiles para obtener la información relativa a la estabilidad de las mezclas. El único inconveniente serio es que ellos, al igual que los métodos viscosimétricos, perturban el proceso de sedimentación. Este inconveniente debe considerarse si se desean valores seguros de la razón de sedimentación de las mezclas.

4.- Métodos combinados.- Para extraer la máxima información de cada prueba de estabilidad de

mezcla, se han empleado métodos combinados de dos o más de los métodos indicados arriba. Esto es particularmente ventajoso cuando, para la mezcla carbón-petróleo, existen múltiples requerimientos de estabilidad. Varios métodos diferentes de ensayos pueden ser realizados sobre cada muestra para cubrir con todos los requerimientos de estabilidad, sin embargo debe tenerse mucho cuidado para asegurar que ninguno de los ensayos interfiera con los resultados de otro ensayo, y que las condiciones experimentales de todos los ensayos sea compatible. Entendiendo estas precauciones, la información requerida puede ser obtenida para cada prueba de estabilidad.

2.5 VISCOSIDAD. -

Los combustibles líquido se han caracterizado tradicionalmente en función de su viscosidad. La viscosidad de los combustibles premezclados es mayor que la del petróleo puro, sin embargo, debe ser tal que éstos puedan ser bombeados y atomizados satisfactoriamente.

La viscosidad de las mezclas carbón-petróleo aumenta con:

- el contenido de carbón

- la finura del carbón
- la viscosidad del petróleo base
- la adición de agua al combustible

A medida que las concentraciones de carbón aumentan se requiere mayores temperaturas para la manipulación de las mezclas, sin embargo este incremento de temperatura tiene efectos limitados para concentraciones cercanas al 50% de carbón en peso; además, de experimentaciones hechas por muchos científicos, se ha concluido que la viscosidad crece rápidamente por encima de este valor, por lo que la concentración de 50% de carbón ha sido tomado como el límite operacional práctico.

Aunque la mayoría de las mezclas carbón-petróleo presentan un comportamiento reológico no-newtoniano, algunas formulaciones muestran características dependientes del tiempo como la pseudoplasticidad, mientras que otras formulaciones presentan también características dependientes del tiempo (tixotropía).

Los datos de viscosidad son importantes para examinar el papel de la viscosidad en el establecimiento de las velocidades de sedimentación en las mezclas estabilizadas y podrían ser utilizadas, en conjunción con las curvas de estabilidad, para comparar modelos

simples de sedimentación e identificar los mecanismos de asentamiento en las mezclas carbón - petróleo.

Desde el punto de vista práctico, los datos de viscosidad son útiles para predecir las caídas de presión en el flujo del combustible a través de tuberías y para el diseño mismo de las tuberías de transporte. Además existe una relación estrecha entre la viscosidad y las condiciones de atomización para una buena combustión.

2.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE SU UTILIZACION.-

2.6.1 VENTAJAS EN COMPARACION CON EL PETROLEO EURO.-

- 1.- La principal ventaja es que se obtiene un combustible líquido de igual poder calorífico que el petróleo, pero con mucho menos petróleo.
- 2.- Los combustibles premezclados pueden ser más baratos que el petróleo en muchas localidades.
- 3.- La difusión de su uso ayudaría a la conservación de los recursos petrolíferos y en directa proporción al porcentaje de carbón utilizado.

- 4.- Son más pesados que el petróleo y por eso permite extinguir los incendios más fácilmente con equipos contraincendios ordinarios.
- 5.- Su valor calorífico en una base de volumen es más alto que ambos, el carbón o el petróleo, solos.
- 6.- Su eficiencia de combustión debería igualar o exceder a la del petróleo.

2.6.2 VENTAJAS EN COMPARACION CON EL CARBON.-

- 1.- Los premezclados pueden ser manipulados como petróleo con bombas a través de tuberías (con consideraciones de incremento en la potencia y de sedimentación).
- 2.- Ellos permiten un mejor aprovechamiento de los espacios para almacenamiento.
- 3.- Su uso elimina el peligro de la combustión espontánea del carbón.
- 4.- Tienen menos cenizas y humedad que el carbón



- 5.- Su uso permitiría la mejor utilización de los carbones de baja calidad y de los finos de carbón.
- 6.- En el caso de combustibles premezclados carbón vegetal-petróleo permite la utilización de los desechos agrícolas y forestales, que de otra manera se desperdiciarían o se subutilizarían.
- 7.- Pueden ser quemados automáticamente en equipos sencillos de combustión de petróleo.
- 8.- (En uso marino) El carbón está más universalmente distribuido, y las dificultades de transporte marítimo que presenta el petróleo, podrían reducirse.
- 9.- (En uso marino) El mayor contenido calórico en una base de volumen sobre el petróleo puro (1 a 4 en el caso de carbón mineral en bunker) permite un ahorro proporcional en el espacio de almacenamiento.
- 10.- (En uso marino) El combustible premezclado al ser más pesado que el agua, no flotará en la superficie poniendo en peligro a los sobrevivientes de naufragios.

2.6.3 DESVENTAJAS.-

- 1.- (En uso marino) Las conecciones de los tanques están diseñadas para combustibles más ligeros que el agua; la substitución por otro combustible más pesado que el agua requeriría algunos cambios en tuberías como las de drenaje, limpieza, etc.
- 2.- (En uso marino) Durante la guerra cualquier incremento en el contenido de cenizas del combustible utilizado en embarcaciones es indeseable ya que ésta ocasiona huellas borrosas en la superficie del agua. Mientras más alto sea el contenido de cenizas, más visible será la huella dejada y más fácilmente la embarcación podrá ser rastreada por las naves enemigas.
- 3.- (En uso marino) Hay la posibilidad que la adición accidental de agua salada, debido a la contaminación del combustible en la embarcación de transporte, produzca un efecto floculante sobre las suspensiones de carbón en petróleo.

- 4.- El uso de combustible premezclado podría causar un gran deterioro en las paredes refractarias de los hornos, siendo necesario el uso de paredes de agua.
- 5.- El incremento en el contenido de cenizas, en comparación con el petróleo puro, podría ocasionar problemas en ciertas aplicaciones. En los hornos y las calderas deben hacerse modificaciones que permitan la remoción de la ceniza acumulada .

CAPITULO III

MATERIALES Y EQUIPOS

3.1 MATERIALES UTILIZADOS.-

El propósito principal de esta tecnología es el desarrollo satisfactorio de mezclas combustibles que mantengan una buena estabilidad durante el proceso de manufactura, almacenaje, transporte hasta finalmente ser quemado. La calidad de estas mezclas dependerá de la calidad de los materiales utilizados en la elaboración, los cuales deberán presentar características uniformes, dependiendo ésto del tratamiento previo al que son sometidos.

3.1.1 BUNKER.-

En las refinерías de petróleo, luego del tratamiento de refinación al que es sometido el crudo, se obtienen una lista de productos, cuya principal característica física de diferenciación es su presión de vapor. Entre estos productos, los residuales y más viscosos son los fuel-oils, los cuales a su vez se dividen generalmente en categorías: ligeros y pesados. El fuel-oil #6 es el más pesado de los combustibles residuales y es

el que utilizaremos en nuestra experiencia.

En el presente proyecto se ha utilizado el fuel-oil residual #6 (bunker) producido por las refineries de petróleo de PETROECUADOR, por ser el combustible más barato y de mayor utilización a nivel industrial, tanto en hornos como en calderos.

Segun la bibliografía consultada, las mezclas elaboradas con fuel-oil # 6 presentan una estabilidad aceptable, sin embargo por ser un producto altamente viscoso, para ser bombeado debe se sometido a un precalentamiento sobre los 70 °C para poder ser transportado utilizando los metodos convencionales de bombeo.

3.1.1.1 CARACTERISTICAS FISICAS.-

Las propiedades físicas más importantes del bunker se detallan a continuación, las mismas que fueron reportadas por el Laboratorio de la Empresa Eléctrica del Ecuador Inc.

TABLA II. ANALISIS DEL BUNKER

GRADO API @ 60°F	19.3
GRAVEDAD ESPECIFICA @ 60°F	0.9383
FLASH POINT	230 °F
AGUAS Y SEDIMENTO	0.4 %
AZUFRE	1.77 %
PODER CALORIFICO	18.781 BTU/Lb
VISCOSIDAD SSU @ 122°F	753
VISCOSIDAD SSU @ 210°F	108
POUR POINT	+ 45

3.1.2 CARBÓN.-

Para seleccionar apropiadamente el componente sólido de las mezclas combustibles, se deben considerar 3 aspectos principales:

- a) Tipo de carbón
- b) Cantidad de carbón en la mezcla
- c) Características granulométricas

a) Considerando que existe una alta producción de biomasa de desecho generada a partir de las actividades agro-industriales y forestales en el País, hemos escogido dos clases de biomasa residual para producir por pirolización número igual de carbones.

Las biomasas residuales seleccionadas son la cascarilla de arroz y el aserrín de madera. El criterio principal para haber escogido a estas biomasas es la gran producción que existe (ver 1.2) y por estar su producción concentrada en un solo sector y muy cercano a la zona industrial de Guayaquil. Adicionalmente hemos utilizado carbón vegetal fabricado artesanalmente a partir de la madera y de fácil adquisición en el mercado local.

- b) En el presente proyecto se han preparado mezclas de bunker con carbón en proporciones de 10, 20 y 30 % en peso de mezcla como proporción límite, ya que al prepararlas con 40 % éstas perdieron su condición de fluido, presentando características de pasta durante el proceso de elaboración.
- c) Luego de muchas experimentaciones se ha llegado a establecer que la granulometría óptima del carbón es la malla 200 (caracterización industrial), siendo esta granulometría y este método de caracterización los que se han aplicado universalmente en la práctica por los diferentes investigadores que se han interesado en este tema y los que adoptaremos en este

proyecto.

El componente sólido en la elaboración del combustible en este proyecto será carbón, en una granulometría tal, que el 100% del polvo resultante atraviese la malla Tyler 200 (ver Tabla III).

TABLA III. ESCALA GRANULOMETRICA TYLER

Mallas por pulgada	10	20	35	48	65	100	150	200	325
Micrones	1650	830	420	300	220	150	110	74	44

3.1.2.1 PREPARACION DE LOS CARBONES.-

a) Carbonización de la biomasa.- La cascarilla de arroz y el aserrín fueron inicialmente tratados en la Planta Piloto de Carbón Activado de la ESPOL; éstos materiales fueron primeramente briqueteados en caliente para luego ser pirolizados a 700 °C en la retorta del horno de pirolización.

b) Molienda y tamizado de los carbones

El carbón de madera recibió un tratamiento inicial de molienda y

tamizado gruesos, con el molino de martillos y la zaranda respectivamente, de la Planta de Carbón Activado de la ESPOL.

Posteriormente, las tres clases de carbón fueron finamente molidos, utilizando para el efecto el molino de bolas del Laboratorio de Mineralogía de la Facultad de Ingeniería de Ciencias de la Tierra y tamizados a través de la malla 200 (74 micras) en un tamiz rotacional. Esta malla había sido previamente definida de acuerdo a las referencias, como la malla más eficiente en términos económicos.

Se obtuvieron muestras de 3 kilogramos para cada tipo de carbón, para con estas elaborar las mezclas carbón-petróleo.

3.1.2.2 CARACTERISTICAS FISICO-QUIMICAS.-

Las principales características físico-químicas de estos carbones se detallan en la tabla siguiente, las mismas que fueron reportados por el Laboratorio de

Hidrocarburos del Instituto de Química de la ESPOL.

TABLA IV. ANALISIS DE LOS CARBONES

PARAMETROS	CARBON DE CASCARILLA DE ARROZ	CARBON MADERA	CARBON ASERRIN
Humedad(%)	4.40	4.0	4.10
Cenizas(%)	3.79	4.8	3.85
Azufre(%)	0.83	0.83	1.40
Poder Cal. (cal/gr.)	2924.00	6464.00	940.00
Carbón Fijo	27.60		

3.1.3 ESTABILIZADORES.—

El porcentaje de estabilizador que se usa en las mezclas dependen de varios factores, tales como su composición química, el tamaño y porosidad de las partículas y el tipo de carbón y petróleo utilizado. Sin embargo, luego de las muchas investigaciones realizadas se ha logrado establecer que estas proporciones están en el orden de 0.05 hasta 1 % con respecto al peso del carbón.

3.1.3.1 PREPARACION.—

Para ser aplicados en las muestras carbón-petróleo como estabilizadores de las

suspensiones, se desarrollaron cuatro tensoactivos, basándose en la literatura disponible y utilizando productos químicos de fácil adquisición en el mercado local, estos se listan a continuación:

TABLA V. PREPARACION DE ESTABILIZADORES

ESTABILIZADOR # 1

COMPONENTE	PORCENTAJE
Acido Esteárico	60
Carbonato Calcio	30
Cola	10

ESTABILIZADOR # 2

COMPONENTE	PORCENTAJE
Jabón de sodio	80
Goma Arábica	10
Agua	10

Jabón de sodio = Acido Esteárico+Hidróxido Sodio

ESTABILIZADOR # 3

COMPONENTE	PORCENTAJE
Diluyente de laca	80
Alcohol	10
Goma laca	10



BIBLIOTECA

ESTABILIZADOR # 4

COMPONENTE	PORCENTAJE
Jabon de sodio	80
Goma laca	10
Agua	10

3.2 EQUIPOS.-3.2.1 VISCOSIMETRO.-

El viscosímetro utilizado para hacer el estudio reológico es de tipo rotacional marca Brookfield modelo LVT, el cual usa ejes cilíndricos (spindles) para aplicar el esfuerzo de corte al fluido. Este tipo de viscosímetro es el indicado para ser usado en fluidos altamente viscosos.

Se usaron los spindles # 2, 3 y 4 y se operó a velocidad de spindles de 6, 12, 30 y 60 RPM, condiciones a las cuales la aguja producía lecturas en el dial.

La Figura No.3 presenta un diagrama esquemático del viscosímetro Brookfield LVT que utilizaremos en nuestras experiencias reológicas, y las partes que lo conforman.

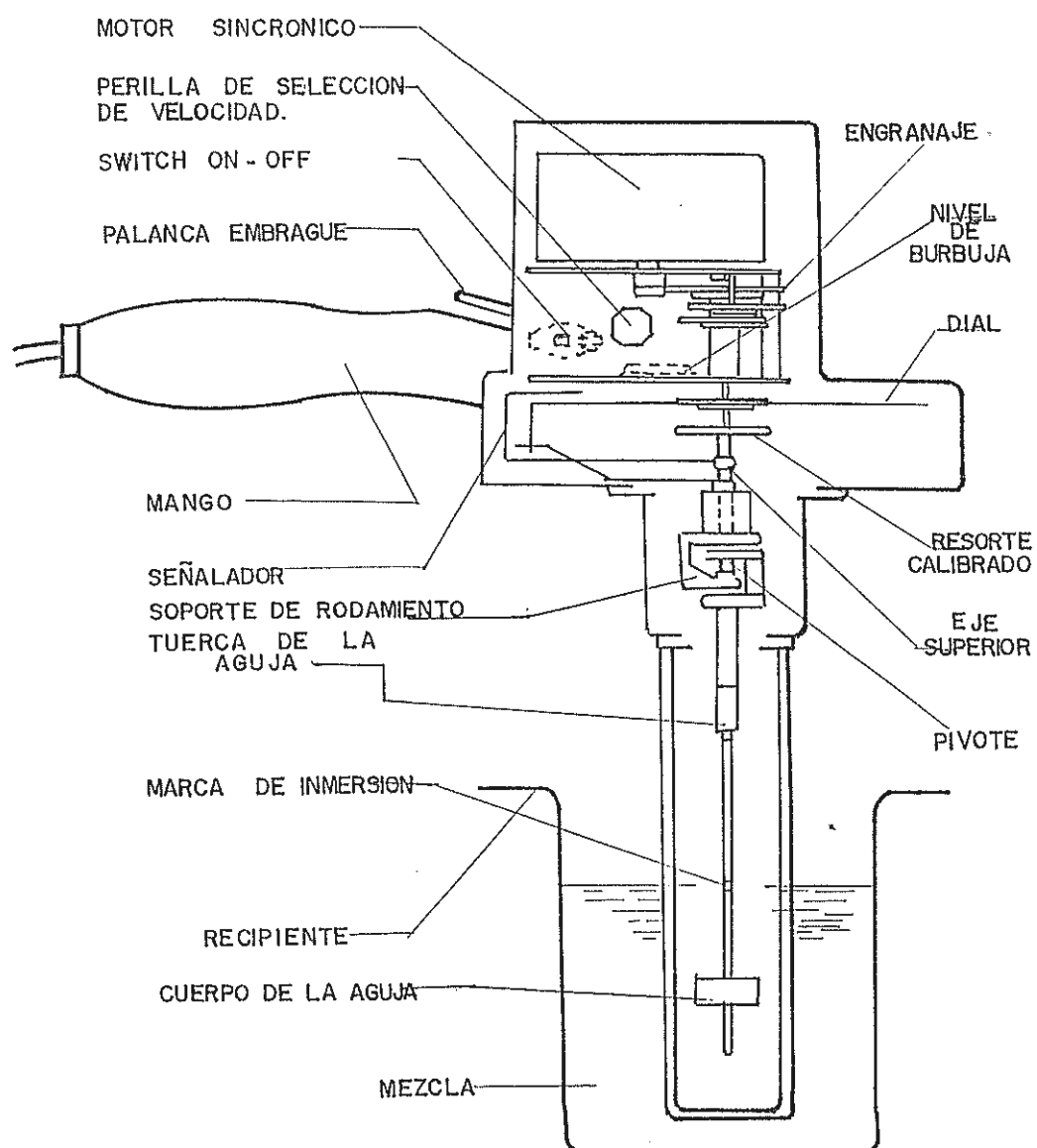


Fig. 3 - DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL VISCOSIMETRO BROOKFIELD.

3.2.2 TUBOS SEDIMENTADORES.-

Las mezclas líquidas de bunker con las partículas de carbón suspendidas fueron colocadas en tubos de vidrio de 30 centímetros de longitud y 2 de diámetro aproximadamente. A la vez, éstos fueron ubicados en un banco de tubos, para ser sometidos al proceso de sedimentación en reposo y a los ensayos de estabilidad en el péndulo. En la Figura No.4 se esquematiza los tubos con las muestras en el banco de sedimentación.

3.2.3 PENDULO DE SEDIMENTACION.-

Para realizar los ensayos de sedimentación se construyó localmente un péndulo, de acuerdo al diseño cuya fotografía se puede apreciar en el apéndice C, el mismo que consta de una base soporte y un balancín en el cual se ubican los tubos de vidrio con las mezclas combustibles. Al conjunto balancín-tubo sedimentador, se le ha dado el nombre de retenedor o holder. Una característica importante del péndulo son los puntos de apoyo del balancín, los cuales son unas agujas de acero inoxidable que pivotean sobre las placas planas de la base lubricadas en el punto de contacto para minimizar las fuerzas de fricción, durante los ensayos y conseguir así lecturas precisas de los periodos de oscilación.

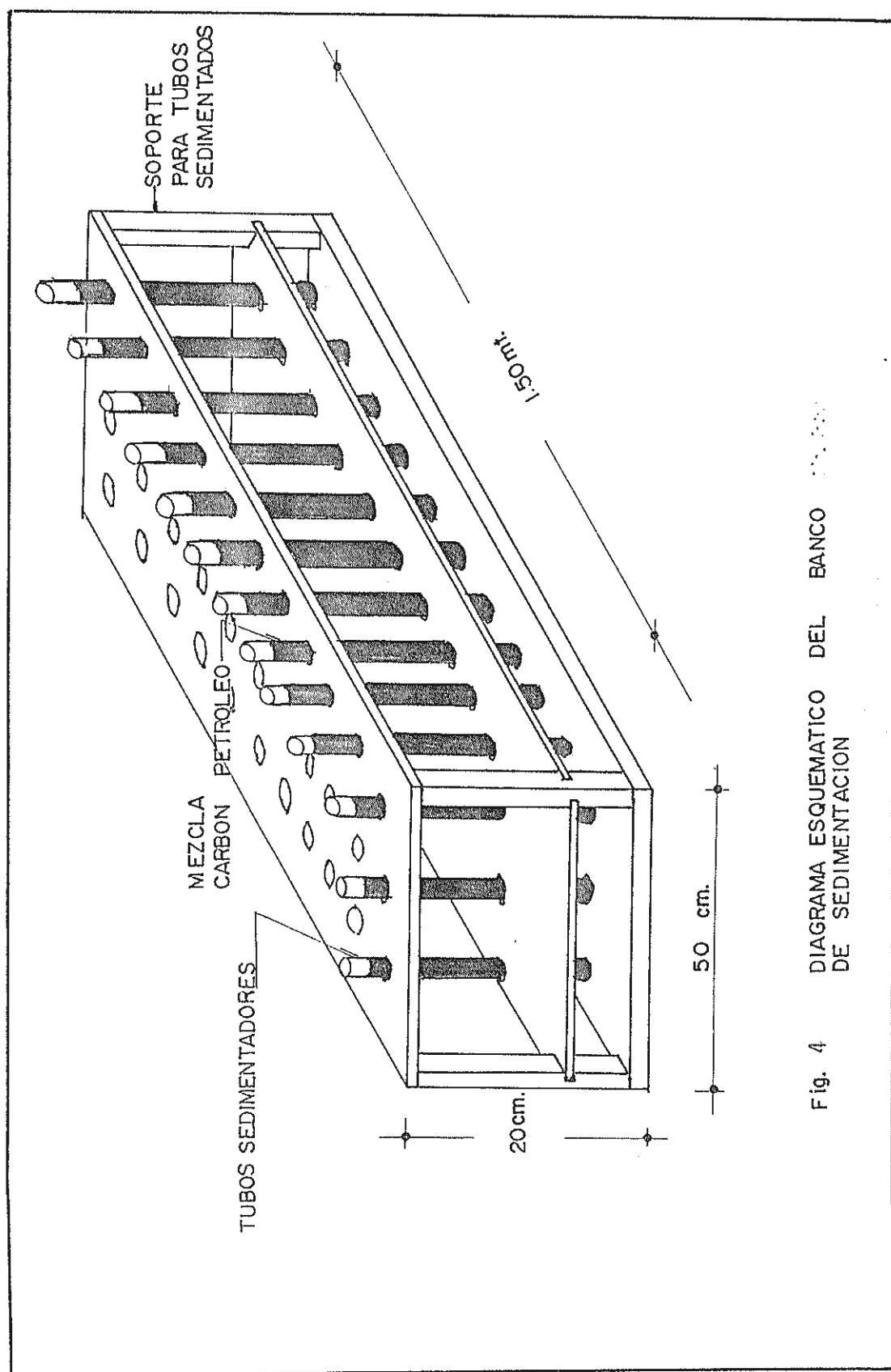


Fig. 4 DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL BANCO DE SEDIMENTACION

3.2.4 TINA DE CALENTAMIENTO.-

Para realizar las pruebas rheológicas del bunker y de las mezclas a diferentes temperatura fue necesaria la construcción de una tina de calentamiento del líquido combustible, usando como fluido transmisor aceite térmico GULFTHERM y como generador de calor una resistencia eléctrica.

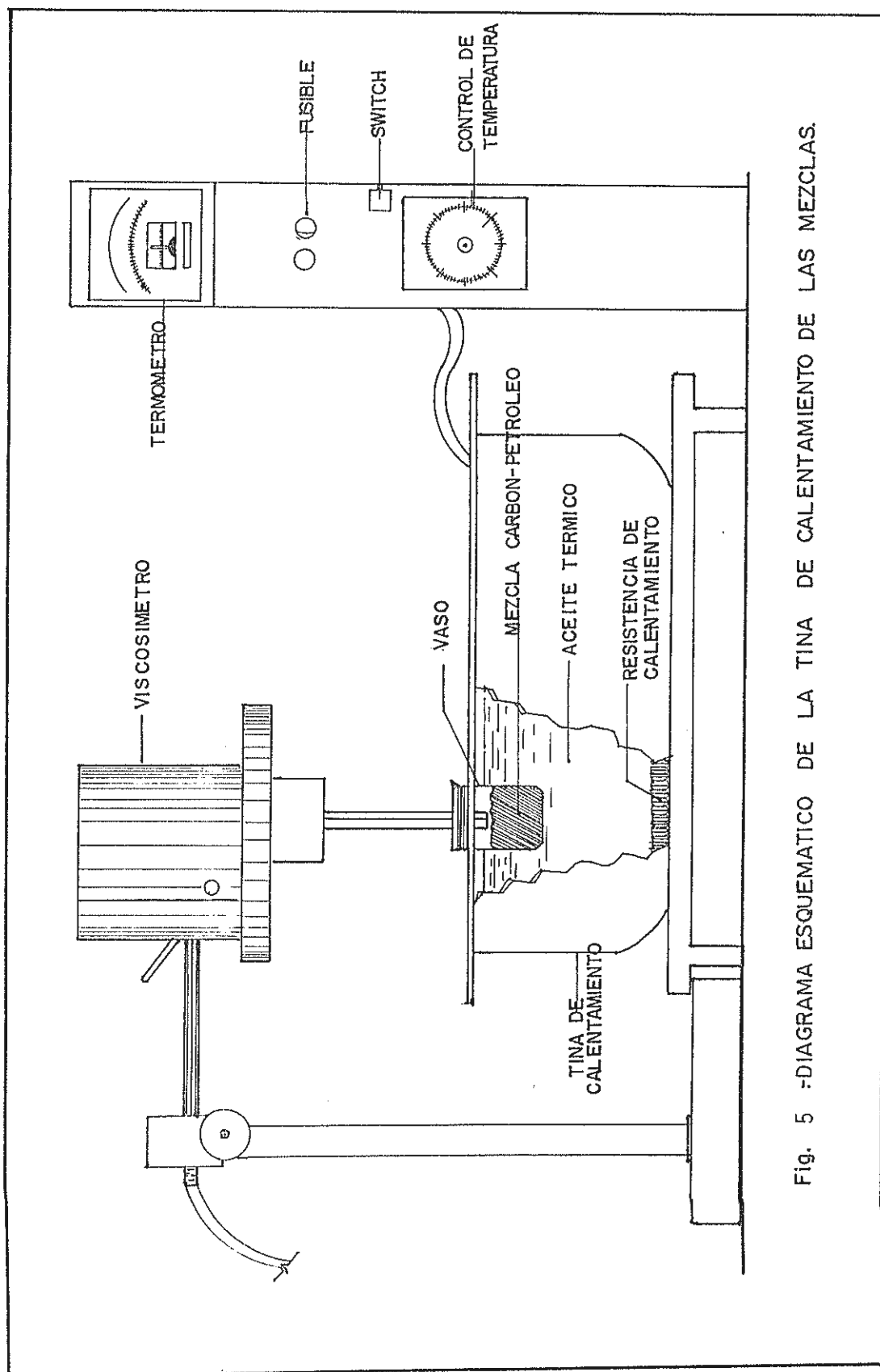
La tina de calentamiento fue y construida localmente, de acuerdo al diagrama esquemático que se presenta en la Figura No.5.

3.3 PREPARACION DE LAS MEZCLAS CARBON-BUNKER.-

Las mezclas de carbón-bunker fueron preparadas con los materiales indicados en los párrafos anteriores siguiendo el siguiente procedimiento:

En vasos de precipitación se procedió a la mezcla del bunker con los tres diferentes tipos de carbones y en tres diferentes proporciones, a temperatura ambiental constante y a velocidad de mezclado constante, obteniendo así las muestras para los ensayos.

El equipo de mezclado fue un mezclador improvisado, consistente de un taladro sujetando en el mandril hélice y apoyado en un soporte fijo.



Una fracción de cada muestra, fue vertido en los tubos de sedimentación y puesta a reposar en el banco de tubos durante 28 días, tiempo durante el cual se realizaron ensayos de estabilidad en el péndulo de sedimentación. Los tubos fueron numerados ordenadamente para poder llevar correctamente la secuencia de los ensayos.

La fracción de las muestras combustibles sobrantes en los vasos de precipitación fue inmersa en la tina de calentamiento y sometidas a ensayos rheológicas.

En la Tabla VI se indican los materiales y las proporciones utilizadas en la elaboración de las muestras combustibles.

TABLA VI. MATERIALES UTILIZADOS EN LA ELABORACION DE LAS MEZCLAS

LIQUIDO	FUEL - OIL # 6
VOLUMEN LIQUIDO	240 - 250 ml.
PORCENTAJE EN PESO DE CARBONES	10, 20 Y 30
CLASES DE CARBONES	CASCARILLA DE ARROZ ASERRIN VEGETAL (DE MADERA)

En la Tabla VII se indican las muestras seleccionadas, de entre las preparadas, para ser sometidas a los ensayos de estabilidad.

TABLA VII MUESTRAS CARBON-BUNKER PARA LOS
ENSAYOS DE ESTABILIDAD

MUESTRA	TIPO DE CARBON	PORCENTAJE DE CARBON	PORCENTAJE DE BUNKER
5	Aserrín	20	80
6	Aserrín	20	80
7	Cascarilla	20	80
8			
9	Aserrín	20	80
10	Vegetal	20	80
11			
12	Vegetal	20	80
13	Aserrín	30	70
14	Aserrín	30	70
15	Cascarilla	30	70
16	Cascarilla	30	70
17	Vegetal	30	70

Para los ensayos reológicos solo fueron consideradas las muestras bunker-carbón de cascarilla de arroz en concentraciones 80-20% en peso de mezcla. Es importante indicar que durante los ensayos preliminares no se logró observar un asentamiento significativo de las partículas de carbón, es decir se comprobó a priori lo esperado, las muestras bunker-carbón vegetal eran muy estables, por lo que se decidió no utilizar los tensoactivos preparados y que servirían de estabilizadores, por no ser necesarios en este proyecto.

CAPITULO IV

4.1 EVALUACION DE LA ESTABILIDAD EN LAS MEZCLAS CARBON - BUNKER.-

El método aquí empleado es el del péndulo, usado inicialmente por Manning y Taylor, mediante el cual detectaba el asentamiento de las partículas, este fue más tarde desarrollado por investigadores del Kansas State College y corresponde a la versión utilizada en este trabajo (5).

4.1.1 PRINCIPIO APLICADO.-

Para entender el principio aplicado debemos referirnos a la Figura No.6 y se basa en el concepto de que el período de oscilación de un péndulo varía con la posición de su centro de gravedad. Analíticamente:

El período de oscilación T , para un péndulo está dado por:

$$T^2 = \frac{4 * \pi^2 * I}{M * g * H}$$

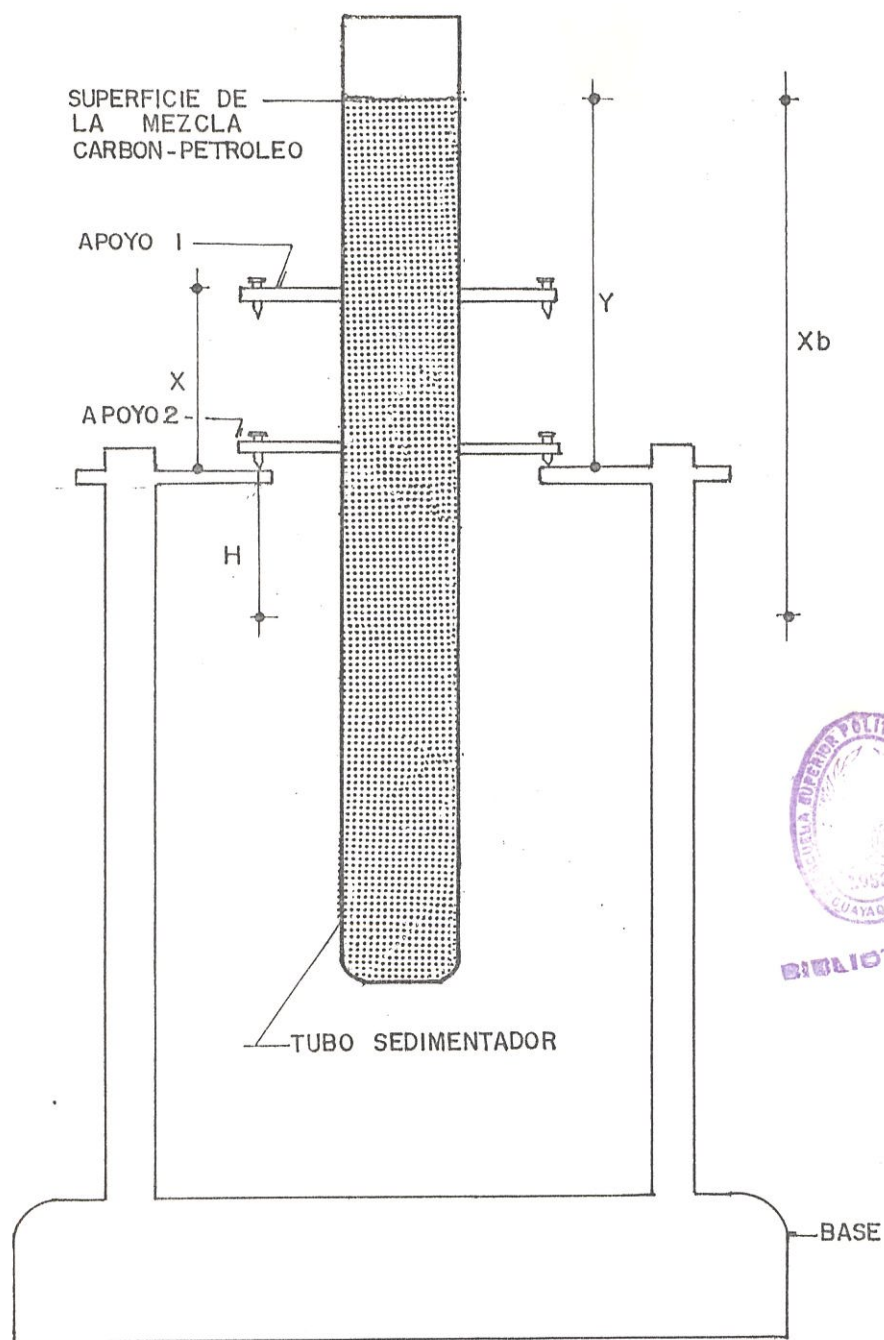


Fig. 6.-DIAGRAMA ESQUEMATICA DEL PENDULO MOSTRANDO LAS DISTANCIAS IMPORTANTES.

donde:

I: momento de inercia

M: masa

g: aceleración de la gravedad

H: distancia desde el eje de suspensión al centro de gravedad.

El momento de inercia sobre cualquier eje I, está relacionado al momento de inercia sobre el centro de gravedad I_o , por la expresión:

$$I = I_o + M * H^2$$

Por lo tanto, el período sobre el eje inferior T_2 puede expresarse como:

$$T_2^2 = \frac{4 * \pi^2 * (I_o + M * H^2)}{M * g * H}$$

Y sobre el eje superior T_1 :

$$T_1^2 = \frac{4 * \pi^2 * (I_o + M * (H + h)^2)}{M * g * (H + h)}$$

donde:

h: distancia entre los ejes de soporte.

Restando estas dos expresiones y resolviendo para H:

$$H = \frac{4 * \pi^2 * h^2 - g * h * T^2}{-8 * \pi^2 * h - g * (T_2^2 - T_1^2)}$$

El período para el eje inferior T_2 es mayor que T_1 , y decrece más rápidamente que T_1 a medida que la sedimentación prosigue. H crece con el asentamiento a un razón proporcional al descenso del centro de gravedad de la suspensión.

Para encontrar como el centro de gravedad de la mezcla X esta relacionada con H , decimos que: X es la distancia desde la superficie de la mezcla hasta el centro de gravedad de ésta, X_a la distancia desde la superficie de la mezcla hasta el centro de gravedad del retenedor (holder) y X_b la distancia entre la superficie y el centro de gravedad del retenedor con la mezcla líquida. M_1 es la masa del retenedor y la mezcla líquida, M_2 la masa del retenedor, m_1 la masa de las partículas suspendidas y m la masa del bunker. Tomando momentos alrededor de la superficie a manera de eje, tenemos:

$$M_1 * X_b = M_2 * X_a + (m_1 + m) * X = M_1 (H + Y)$$

donde Y es la distancia desde el eje inferior al tope del líquido. Combinando las dos últimas ecuaciones, tenemos:

$$X * (m_1 + m) = H * M_1 + M_1 * Y - M_2 * X_a$$

Esta ecuación nos proporciona inmediatamente el

centro de gravedad de la mezcla en término de la medida de los períodos de oscilación.

El centro de gravedad del retenedor vacío X_0 puede ser determinado en un experimento separado con retenedor vacío, en la misma forma que X determinado para el retenedor con la mezcla líquida.

4.1.2 PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO.-

Las mezclas carbón-petróleo, ya elaboradas de acuerdo al parágrafo 3.3, fueron vertidas en los tubos de sedimentación, hasta que el nivel de la superficie líquida estuviese aproximadamente a la misma distancia sobre el eje de suspensión más bajo, tal como el eje estuviera sobre el fondo del tubo.

En este momento se hicieron las primeras lecturas, a cada uno de los tubos, que luego de procesadas darían el cero referencial de la posición del centro de gravedad de las diferentes muestras.

Enseguida las mezclas fueron colocadas en el banco de tubos y sometidas a reposo en condiciones de temperatura lo más constantes posibles.

Mientras el tiempo fue transcurriendo las partículas se fueron asentando, y se fueron tomando lecturas de los periodos de oscilación con respecto a ambos ejes. Inicialmente se tomaron lecturas de cada media hora y luego cada hora durante dos días, para luego cambiar a una periodicidad diaria en vista de que no se apreciaban cambios significativos en las lecturas para estos periodos de tiempo cortos. Se decidió terminar con las mediciones al vigésimo octavo día, cuando los periodos (T_1 y T_2) no mostraron más cambios.

Los periodos de oscilación fueron medidos con un cronómetro, tomando la lectura para cada cinco oscilaciones del péndulo y dividiéndola luego para el mismo número. Este procedimiento fue repetido tres veces para cada muestra, con lo que se pudo conseguir un buen valor promedio para cada periodo de oscilación.

4.1.3 RESULTADOS OBTENIDOS.-

A continuación se presentan las curvas de sedimentación comparativas para las mezclas en concentraciones 20-80 y 30-70, y para los tres carbones tratados.

En el apéndice A se presentan las tablas con las lecturas de los períodos y las curvas que grafican la distancia recorrida por el centro de gravedad de todas las mezclas durante el tiempo de sedimentación.

Las mezclas presentan un primer período de asentamiento que se extiende durante los 7 u 8 primeros días, en el cual se presenta un descenso acelerado de partículas; luego se observa un período que va desde el octavo hasta el decimonoveno ó vigésimo día, caracterizado por una velocidad menor de descenso de las partículas con relación al período anterior, y finalmente se aprecia un período de velocidad de descenso lento de partículas, llegando finalmente a observarse al día 27-28 de prueba que las curvas tienen un comportamiento asintótico con el eje X o, dicho de otra manera, las mezclas no experimentan un asentamiento adicional, señal clara que las mezclas se han estabilizado.

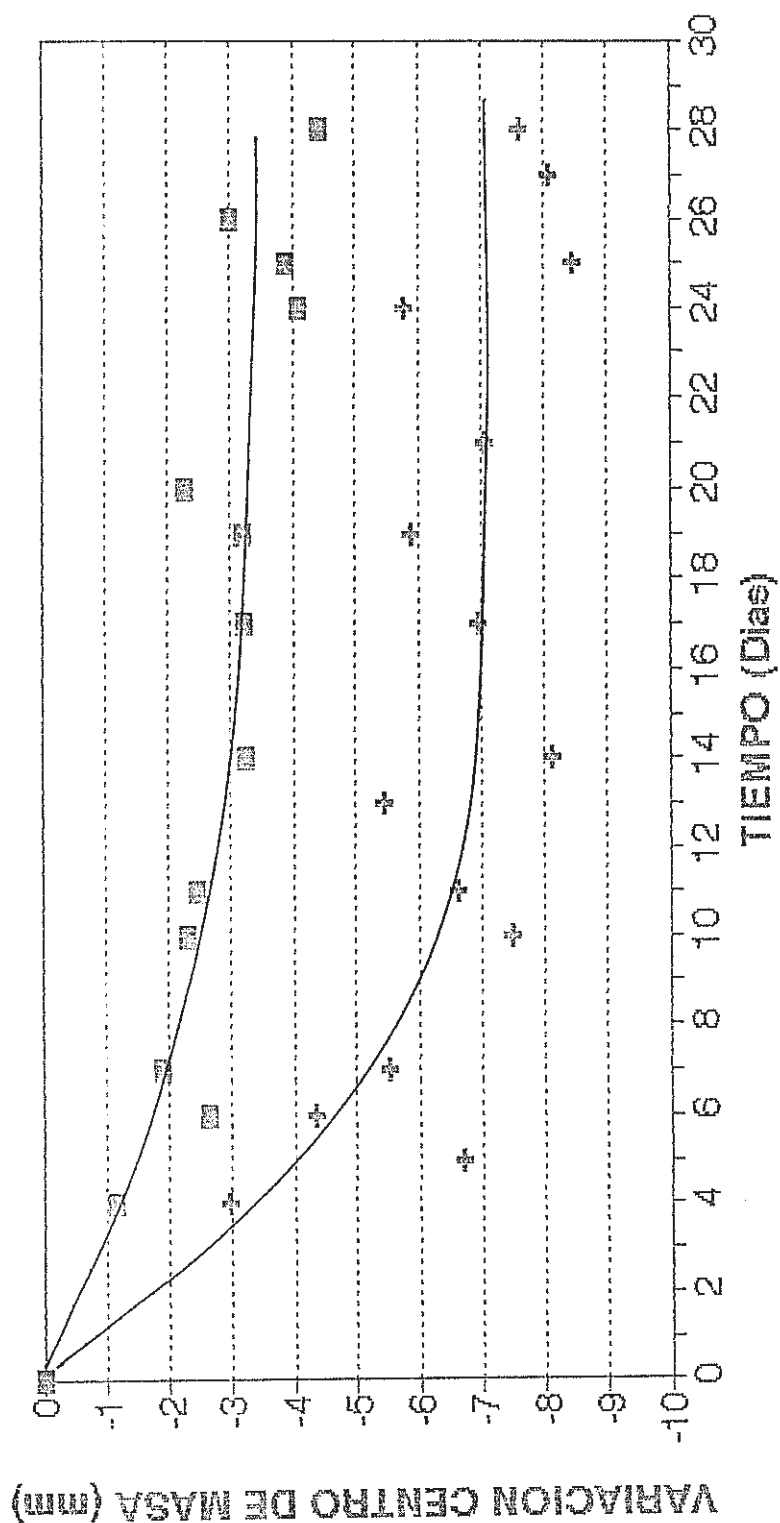
Las distancias recorridas por los centros de gravedad de las mezclas tienen un valor máximo de 2.5 milímetros y, si consideramos que la columna líquida tiene una altura promedio de 23 cm, se evidencia la muy buena estabilidad de las mezclas.

Además, si se estima que el almacenamiento de las mezclas no va a ser prolongado, podemos asegurar que la sedimentación de las partículas no representará ningún problema, aún sin usar estabilizadores químicos.

Si se comparan las curvas, para un mismo carbón, en concentraciones diferentes (Figuras 7,8 y 9) se nota claramente que en los tres tipos, la concentración 30-70 se sedimenta más y a mayor velocidad inicial que la 20-80. Esto es fácilmente explicable, ya que al haber más partículas en suspensión habrá una mayor interacción entre ellas y consecuentemente mayor aglomeración y asentamiento.

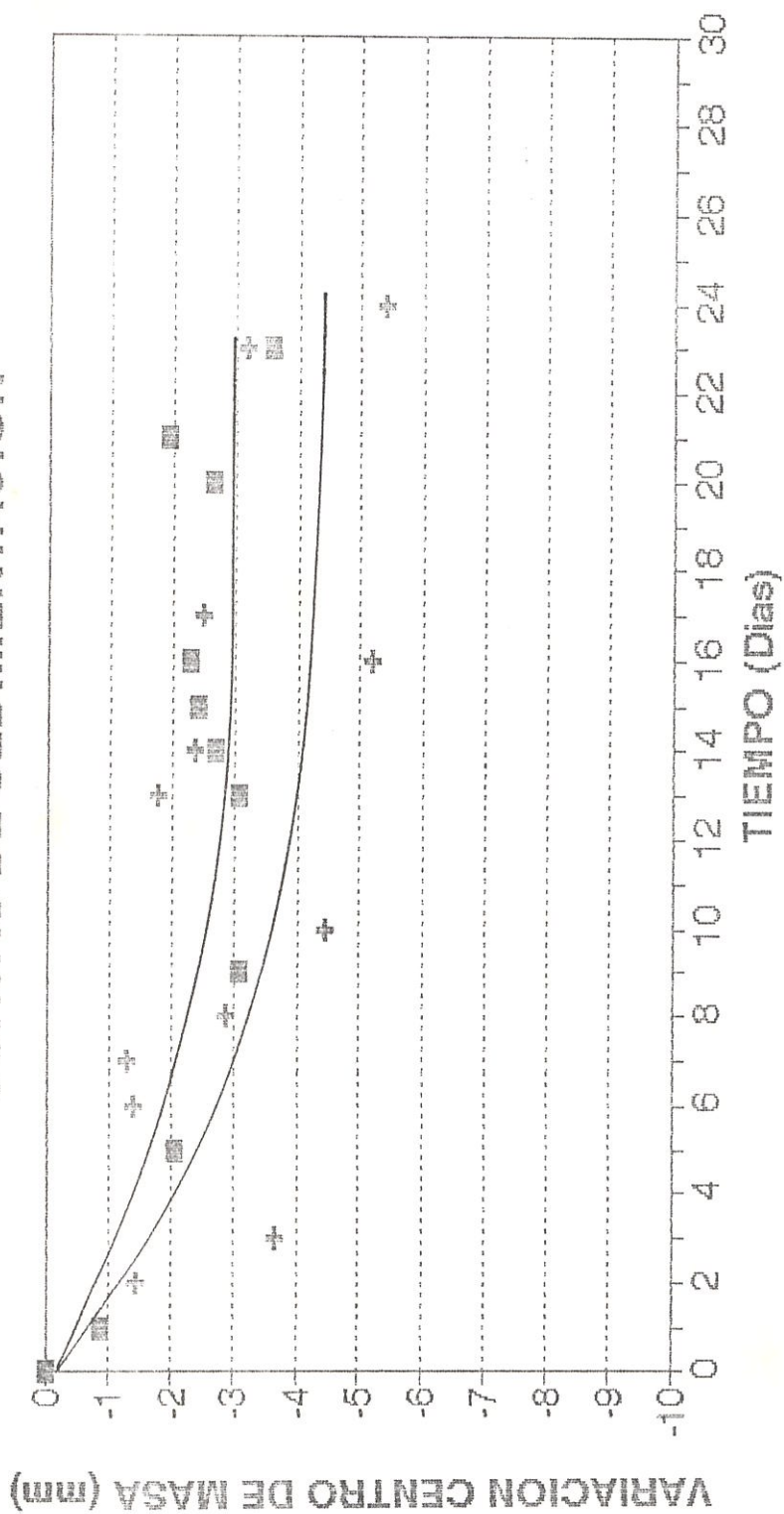
Al observar las curvas para una misma concentración con diferentes carbones (Figuras 10 y 11), se aprecia que a bajo porcentaje (20%) todas las mezclas presentan un comportamiento similar, pero a mayor porcentaje (30%) presentan gran variedad de comportamientos, lo que seguramente ocurre debido a la constitución y características físico-químicas propias de cada carbón.

FIGURA 7. ASEPPIN
CURVAS DE SEDIMENTACION



■ 20-30 + 30-70

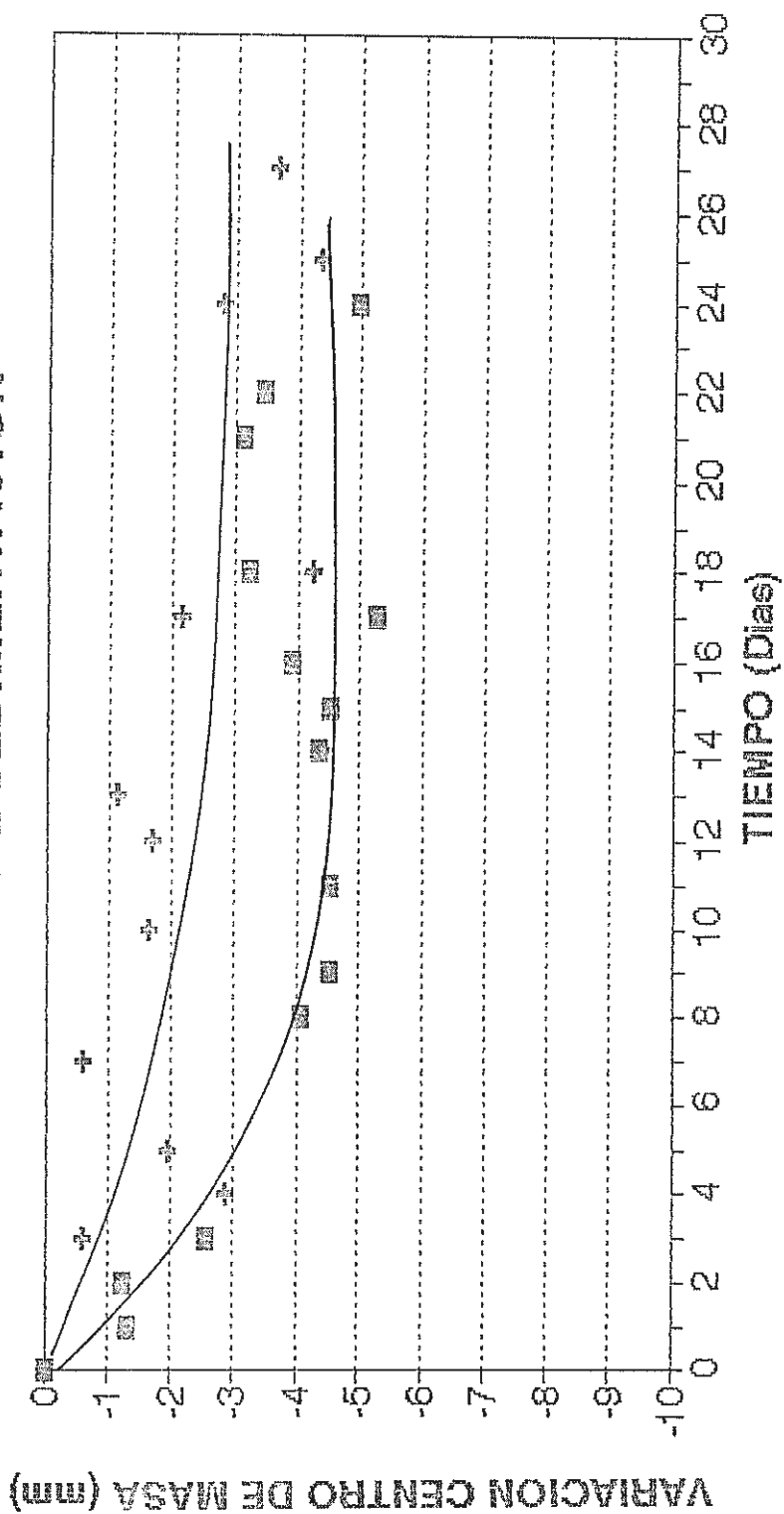
FIGURA 8. CASCARILLA
CURVAS DE SEDIMENTACION



BIBLIOTECA

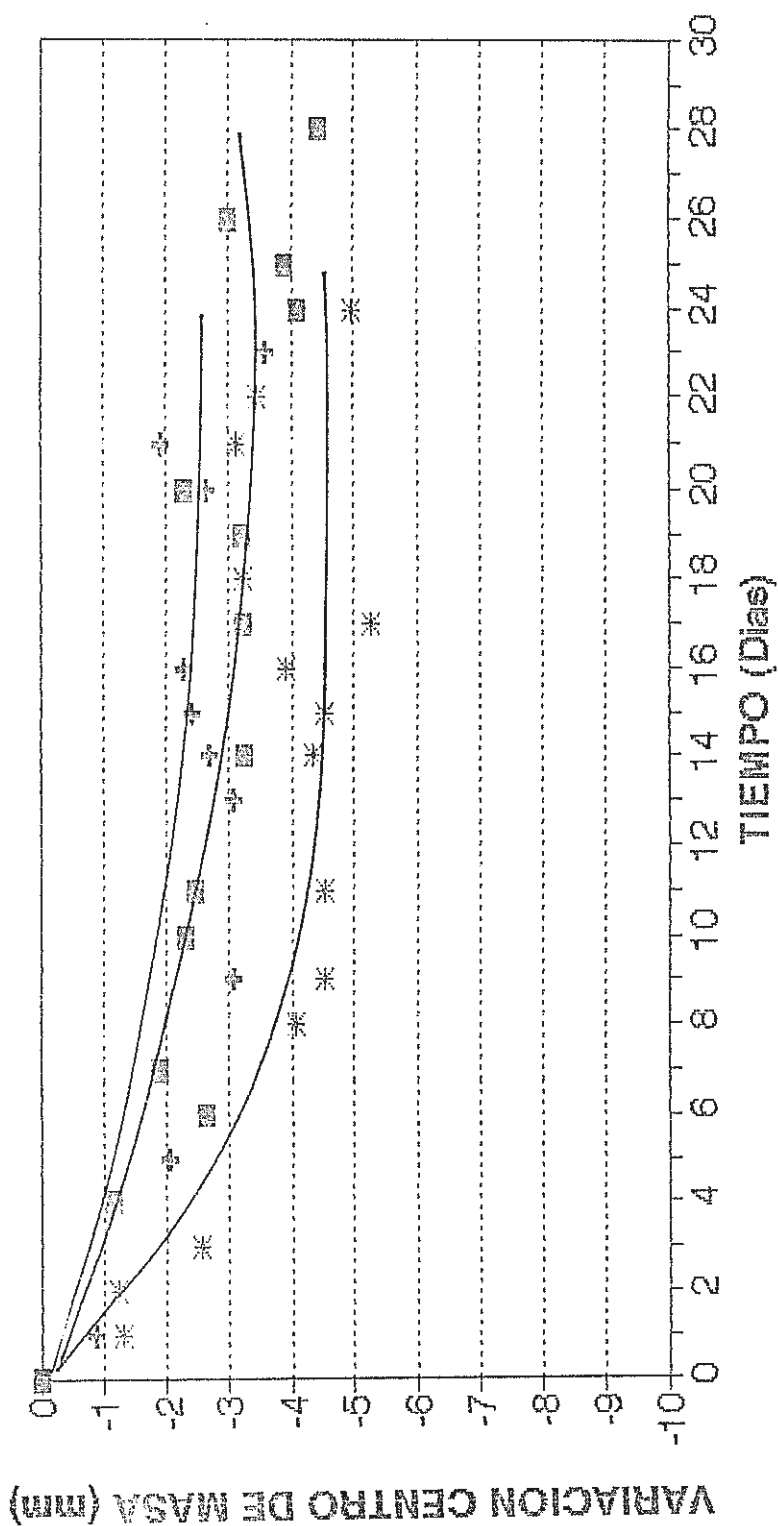
20-80 + 30-70

**FIGURA 9. VEGETAL
CURVAS DE SEDIMENTACION**



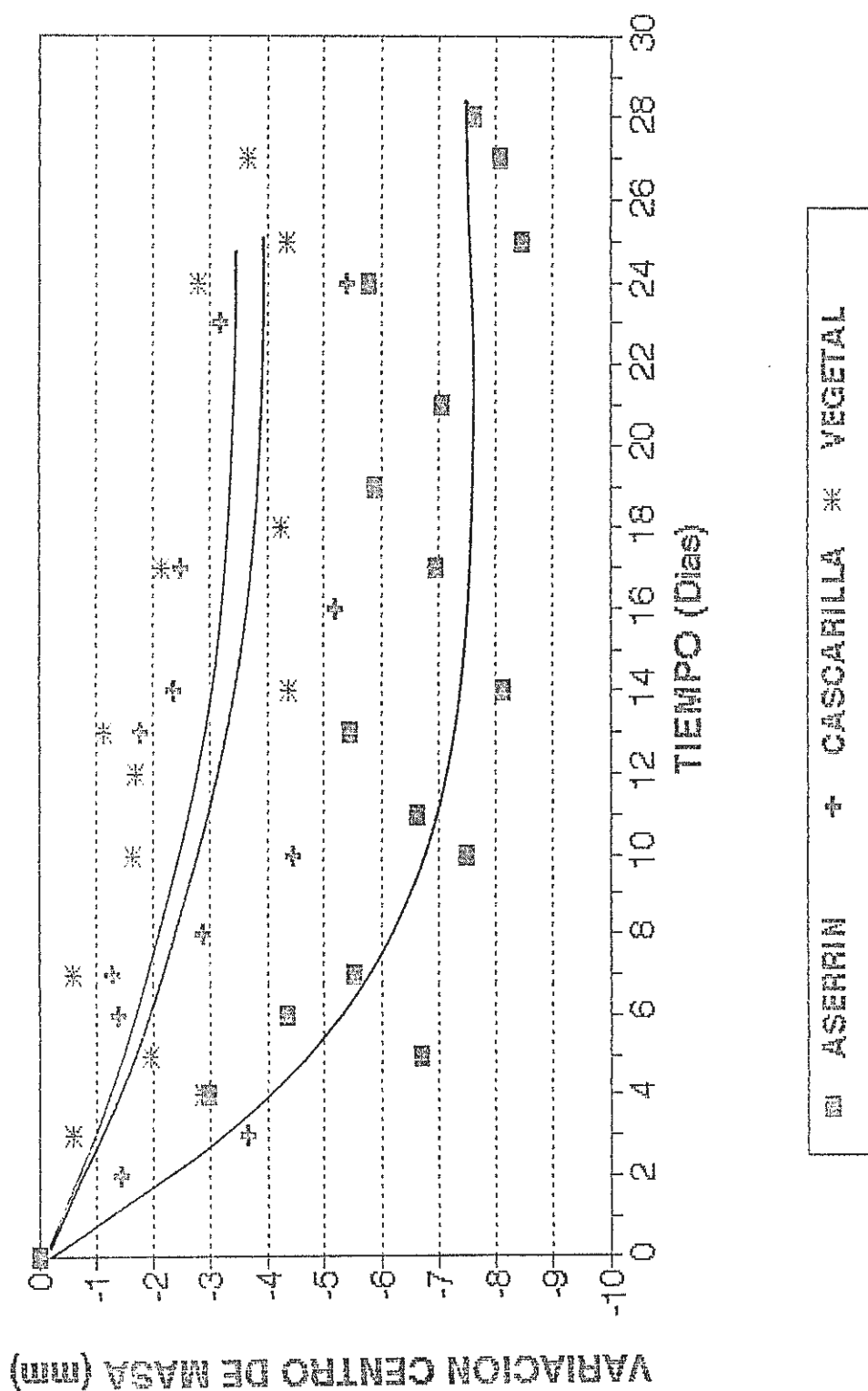
■ 20-80 + 30-70

FIGURA 10. CARBON 20-80
CURVAS DE SEDIMENTACION



■ ASERRIN + CASCARILLA * VEGETAL

FIGURA 11. CARBON 30-70
CURVAS DE SEDIMENTACION



4.2 PRUEBAS RHEOLOGICAS.-

Obviamente una de las características físicas que deben ser evaluadas en un fluido, como en este caso el fuel-oil # 6 y las mezclas carbón-petróleo, son sus propiedades rheológicas, ya que estos datos son indispensables para un apropiado manejo del combustible.

Adicionalmente la viscosidad puede reflejar un cambio fundamental en el grado de homogenización y también puede ser una medida indirecta del contenido de sólidos, el cual afecta la estabilidad de las mezclas carbón-petróleo. Se estudió la rheología del fuel-oil # 6 y de las mezclas, para luego poder realizar análisis comparativos del comportamiento de ambos.

4.2.1 PRINCIPIO APLICADO.-

Las características de estos materiales pueden ser descritos por las siguientes ecuaciones.

$$\sigma = K * \tau^N$$

$$\mu = K * \tau^{N-1}$$

donde:

σ : esfuerzo de corte

τ : velocidad de corte

μ : viscosidad aparente

N: índice de comportamiento del fluido.

K: coeficiente de consistencia del fluido.



Valores de N se encuentran experimentalmente y varían desde 0 hasta $N < 1$, para fluidos pseudoplásticos, cuando $N = 1$ son newtonianos y cuando $N > 1$ son fluidos dilatantes. Los fluidos de interés en este proyecto están caracterizados por valores de $N < 1$, es decir son fluidos pseudoplásticos. Los valores de K y N encontrados, pueden ser usados con las ecuaciones para calcular la viscosidad aparente μ , dentro de los rangos de la experimentación, no siendo recomendable extrapolar estos datos.

Los rheogramas fueron contruidos a partir de datos de esfuerzo de corte y velocidad de corte, obtenidos con el viscosímetro rotacional Brookfield.

El esfuerzo de corte calculado es calculado como:

$$\sigma = \frac{F * \Gamma}{2 * \pi * R^2 * L}$$

donde:

F : fracción de torque a escala completa

Γ : torque del instrumento a escala completa

R : radio del spindle

L : largo del spindle

Para el viscosímetro empleado $\Gamma = 637.6$ dyna-cm.

4.2.2 PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO.-

Los ensayos de rheología fueron aplicados a las muestras combustibles, utilizando el viscosímetro Brookfield y la tina de calentamiento.

Los combustibles ensayados fueron bunker y meclas bunker-cascarilla de arroz en proporción 80-20%.

Los rangos de temperatura en los ensayos estuvieron entre 60°C y 110°C, que son las temperaturas a las cuales las mezclas deben ser transportadas y almacenadas para mantener una buena fluidez y estabilidad. Las temperaturas utilizadas para los ensayos rheológicos con bunker puro fueron 60, 70, 80, 90, 100 y 110 °C y para los ensayos con mezclas bunker-carbón 70, 80, 90 y 100 °C.

Con los datos obtenidos se plantearon curvas que grafican el cambio de la viscosidad con la temperatura, tanto para bunker puro como para las mezclas.

Se graficaron los valores de esfuerzo de corte contra velocidad de corte para determinar gráficamente los valores de las constantes rheológicas que caracterizan al tipo de fluido al

que corresponde tanto el bunker puro como las mezclas tomando como parámetro fijo la temperatura.

4.2.3 RESULTADOS OBTENIDOS.—

De la graficación de los datos experimentales (Figuras No.23 y 24) y a partir de las constantes K y N obtenidas para el bunker y mezcla de carbón cascarrilla-bunker 20-80 (Tablas No.20 y 21), se comprueba la característica no newtoniana de estos fluidos. Además, los valores de N obtenidos para los dos fluidos son valores típicos para fluidos pseudoplásticos.

Para el bunker los valores de N son inversamente proporcionales a la temperatura, es decir que a mayor temperatura se aleja de la condición newtoniana, mientras que la mezcla a mayor temperatura presenta la tendencia de acercarse a un valor de $N = 1$.

La viscosidad aparente presenta una dependencia muy sensible a la temperatura, con cada incremento de 100%, esta disminuye en algunos casos a la mitad de su valor, viéndose esta conducta en los dos fluidos, es decir en el bunker y en las mezclas.

Los valores de K disminuyen con las temperaturas para todos los casos, lo que nos dice que a mayor temperatura estos fluidos disminuyen su viscosidad aparente, lo que lógicamente se esperaba.

TABLA XX. VALORES DE CONSTANTES RHEOLOGICAS PARA MEZCLAS CARBON CASCARILLA-BUNKER 20-80%

T °C	K	N
70	151.50	0.812
80	122.10	0.898
90	82.80	0.902

TABLA XXI. VALORES DE CONSTANTES RHEOLOGICAS PARA FUEL - OIL # 6

T °C	K	N
60	252.94	0.956
70	185.42	0.859
80	152.80	0.852
90	163.94	0.927
100	128.34	0.764
110	82.64	0.772



BIBLIOTECA

FIGURA 23. BUNKER
CURVAS VISCOSIDAD vs TEMPERATURA

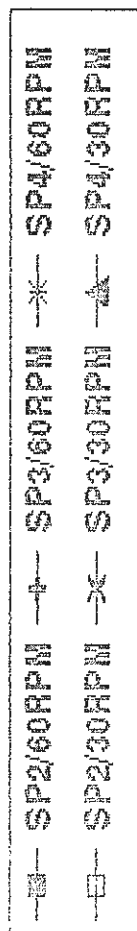
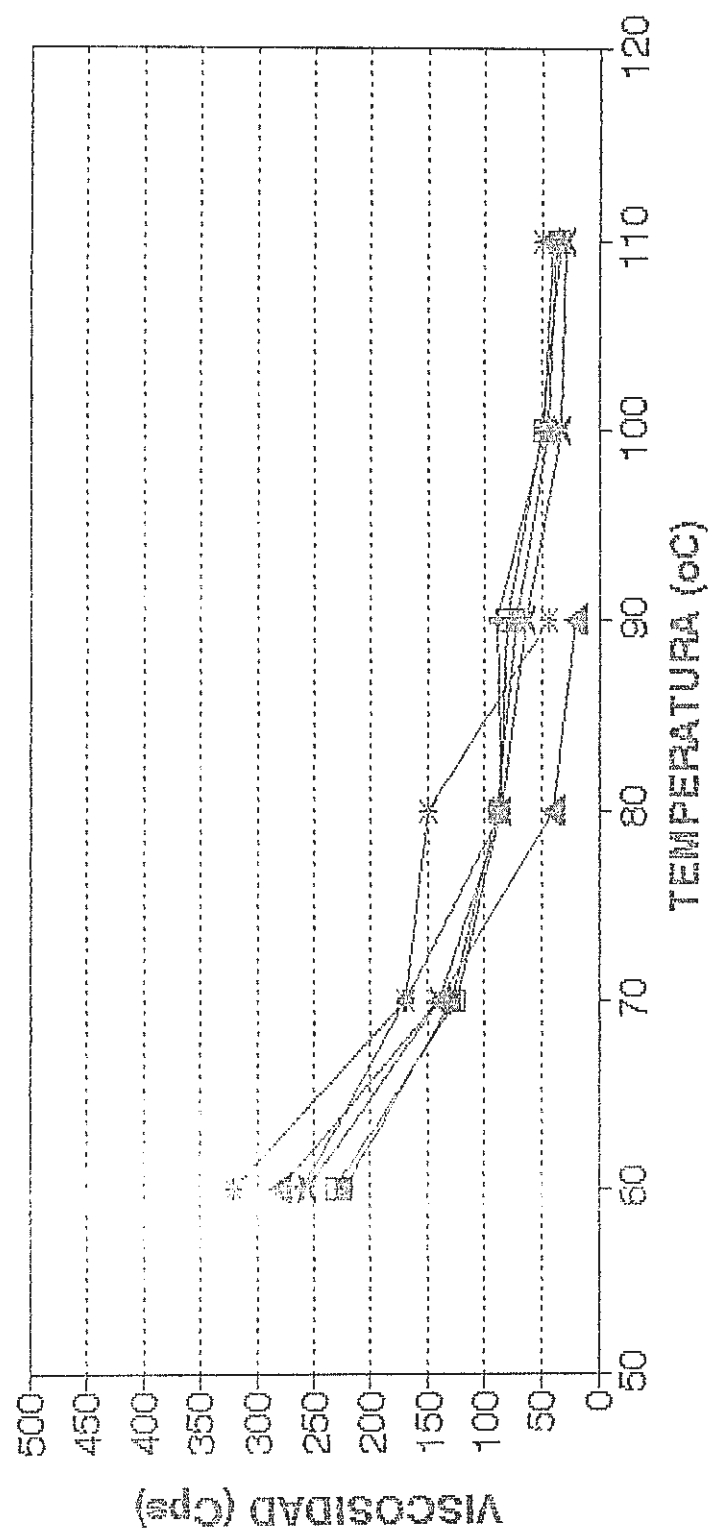
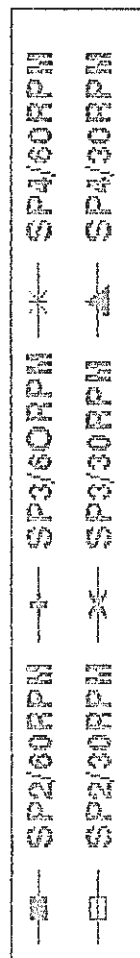
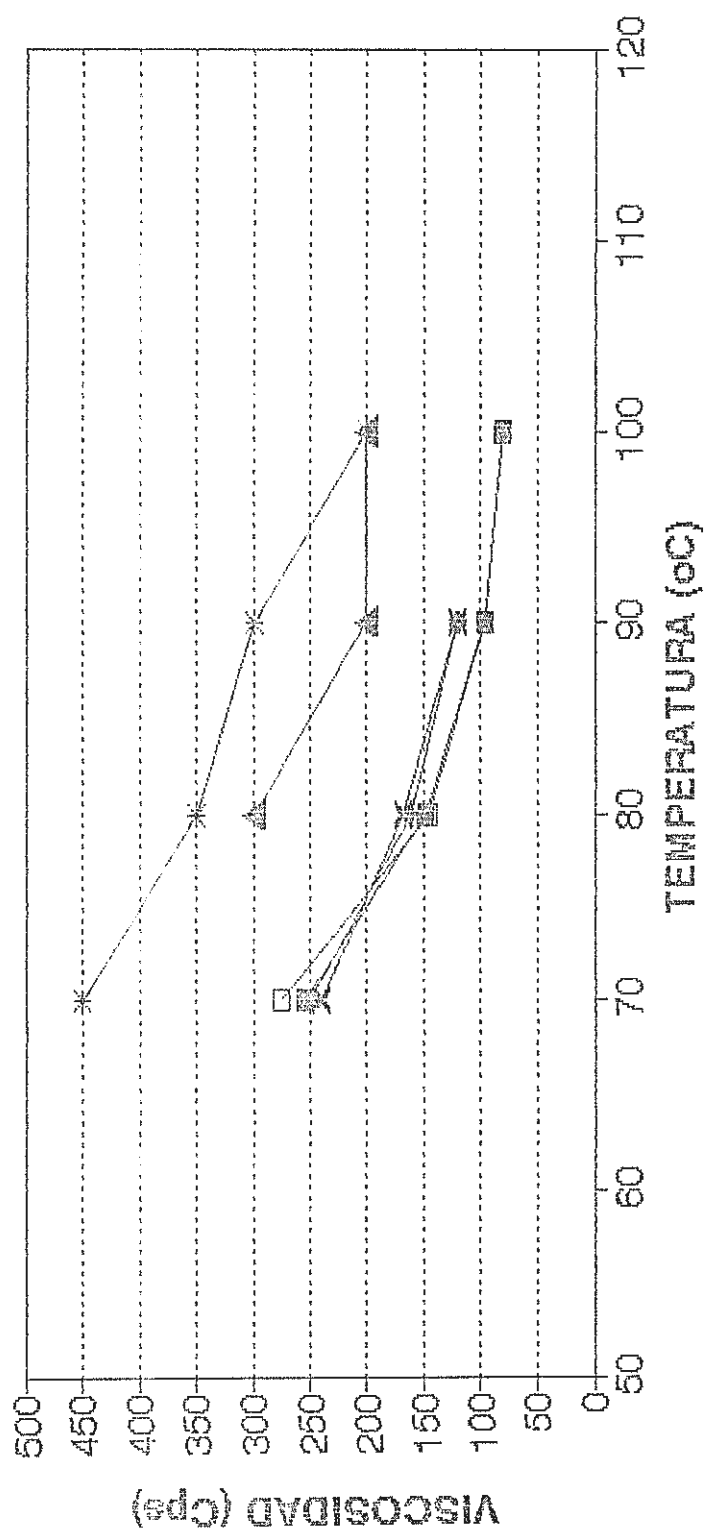


FIGURA 24. MEZCLAS
CURVAS VISCOSIDAD vs TEMPERATURA



CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 PRUEBAS DE ESTABILIDAD.-

- La sedimentación completa de los carbones en el fluido se cumple en el lapso de 24 a 28 días, tiempo en el cual la velocidad de descenso del centro de masas se hace cero, formando a este tiempo una recta asintótica con el eje.
- Existe para todas las mezclas analizadas un primer período de 7 a 8 días, en el cual se alcanza la mayor velocidad de sedimentación.
- La distancia que desciende el centro de gravedad para las mezclas carbón-bunker 20-80, es de 4 a 5 milímetros, mientras que para las mezclas 30-70 esta distancia es de 6 a 8.5 milímetros, lo que nos dice que al tener mayor concentración las mezclas el centro de gravedad tiende a ser más bajo en el tiempo final de sedimentación, lo cual tiene un sentido muy lógico ya que al haber una mayor concentración de la mezcla en las secciones inferiores de la columna el peso por altura de esta será mayor que las partes superiores.

- Al comparar las curvas de sedimentación las mezclas de los tres tipos de carbón a una misma concentración (20-30) vemos que el centro de gravedad de la mezcla con carbón vegetal en cualquier tiempo alcanza una mayor distancia que las otras dos mezclas, alcanzando al tiempo final una distancia de 1 mm mayor que las mezclas de carbón de aserrín y cascarilla, lo cual debe estar asociado con las características físicas de los carbones, tales como su densidad y porosidad.

Sin embargo a mayor concentración (30-70%), las mezclas con carbón vegetal presentan al tiempo final de su sedimentación una profundidad menor (5 mm) que las mezclas de carbón, aserrín y cascarilla (8 y 6 mm respectivamente). Igualmente, las velocidades de sedimentación a lo largo del recorrido del descenso, siempre fueron mayores para las mezclas con carbón de aserrín y cascarilla que para aquellas mezclas con carbón vegetal. Este comportamiento que presentan las mezclas con carbón vegetal en la sedimentación, no puede ser explicado por ahora por falta de pruebas que den respuestas a este comportamiento no esperado.

- La velocidad de sedimentación y la distancia del centro de gravedad al tiempo final de sedimentación para las mezclas de aserrín, a la concentración 30-70% son el doble en comparación con los valores

correspondientes a la concentración 20-80%. Para las mezclas con cascarilla de arroz y carbón vegetal estos valores son una vez y media mayores a mayor concentración.

- En general, la estabilidad de las mezclas carbón-petróleo puede ser considerada como muy buena, ya que la máxima velocidad de descenso del centro de masa registrada es de 0.5 mm/día, y la máxima distancia del centro de gravedad es de 8.5 milímetros al tiempo final de sedimentación. Lo que evidencia el hecho de que una fracción de las masas de carbón permanecen en suspensión estable a lo largo de la columna líquida.
- El tiempo final de sedimentación (24 a 28 días), es un lapso aceptado para el tratamiento, almacenamiento y uso de las mezclas.

5.2 PRUEBAS RHEOLÓGICAS.-

- La viscosidad del bunker es inversamente proporcional con la temperatura, es decir a mayor temperatura los valores de viscosidad son menores. A 60 °C este combustible tiene una viscosidad de aproximadamente 200 cps y a 110 °C, 40 cps.
- Las mezclas carbón-petróleo tienen valores de viscosidad mayores que las del bunker a las mismas

condiciones de temperatura. Las diferencias de viscosidades entre estos dos fluidos son mayores a menor temperatura (60 °C) y mantienen un decrecimiento de estas diferencias con un incremento de temperatura, llegando a un valor despreciable a 110 °C. Es decir que a esta última temperatura las características físicas de viscosidad tienden a igualarse para estos dos fluidos, lo que nos permite decir que al igual que el bunker, la temperatura de operación, bombeo e inyección a los quemadores, podría ser también de 110°C para las mezclas.

- Las mezclas presentan conductas no-newtonianas análogas al bunker. Los valores del índice de comportamiento del fluido N indican que son fluidos pseudoplásticos, tendiendo a condiciones newtonianas a altas temperaturas (110°C).
- Las curvas de viscosidad versus esfuerzo de corte para bunker y mezclas de carbón-bunker presentan características análogas, demandando un menor esfuerzo de corte a menor viscosidad, a altas temperaturas.

5.3 RECOMENDACIONES.-

- Para complementar el presente trabajo se debería continuar con las pruebas de sedimentación para determinar el descenso de las partículas en periodos

mayores de tiempo.

- Es necesario hacer un análisis experimental de los parámetros de mezclado, tales como velocidad de mezclado, tipo de mezclador, condiciones de mezclado, dimensiones de recipiente para establecer las condiciones óptimas de mezclado.
- De igual manera se podría hacer un análisis experimental para el caso del proceso de molienda para lograr la optimización técnica-económica de esta operación.
- La optimización de estos parámetros permitiría la instalación de una planta piloto de producción de este nuevo combustible.
- Se recomienda utilizar las constantes rheológicas K y N en los cálculos de diseño para sistemas de transporte y bombeo de estos fluidos.
- Sería interesante profundizar más en la investigación y realizar estudios de bombeo, sedimentación en tuberías, combustión, emisión de gases a la atmósfera, etc.
- Es indispensable el desarrollo de las pruebas de

combustión para las mezclas biomasa-petróleo a nivel de laboratorio y piloto para determinar las características de combustión de este nuevo combustible.



BIBLIOTECA

APENDICE A

TABLAS Y GRAFICOS DE LAS PRUEBAS DE ESTABILIDAD

MUESTRA:	ASERRIN 20-80
TUBO:	5

$(m+m1)=$	92.9 gm.	MASA DE LA MEZCLA
$Mt=$	95.3 gm.	MASA DEL TUBO
$Ms=$	122.4 gm.	MASA DEL SOPORTE
$M2=$	217.7 gm.	MASA DEL HOLDER ($Mt+Me$)
$Xa=$	95.7867 mm	CENTRO DE GRAVEDAD DEL HOLDER VACIO
$h=$	4.9 mm.	DISTANCIA ENTRE APOYOS
$g=$	9,800 mm/seg ²	ACELERACION DE LA GRAVEDAD
$y=$	94.84 mm	DISTANCIA SUPERFICIE - APOYO INFERIOR

DIA	T1	T2	H	X	VARIACION
0	7.62	9.66	8.0593	119.5669	0.00
1	7.65	9.67	8.1843	119.9849	-0.42
3	7.76	9.71	8.6486	121.5371	-1.97
4	7.75	9.66	8.8371	122.1673	-2.60
9	7.71	9.57	9.0484	122.8737	-3.31
10	7.77	9.69	8.8113	122.0810	-2.51
11	7.70	9.61	8.7737	121.9554	-2.39
14	7.74	9.71	8.5266	121.1291	-1.56
15	7.73	9.66	8.7105	121.7441	-2.18
17	7.76	9.65	8.9536	122.5567	-2.99
21	7.68	9.57	8.8511	122.2141	-2.65
22	7.69	9.62	8.6604	121.5764	-2.01
23	7.63	9.47	9.0519	122.8854	-3.32
24	7.69	9.6	8.7611	121.9131	-2.35

TABLA VIII DATOS DE SEDIMENTACION PARA EL TUBO 5

MUESTRA:	ASERRIN 20 - 80
TUBO:	6

$(m+m1)=$	94.3 gm.	MASA DE LA MEZCLA
$Mt=$	95.5 gm.	MASA DEL TUBO
$Ms=$	122.4 gm.	MASA DEL SOPORTE METALICO
$M2=$	217.9 gm.	MASA DEL HOLDER ($Mt+Me$)
$Xa=$	100.6263 mm	CENTRO DE GRAVEDAD DEL HOLDER VACIO
$h=$	4.9 mm.	DISTANCIA ENTRE APOYOS
$g=$	9,800 mm/seg ²	ACELERACION DE LA GRAVEDAD
$y=$	99.8 mm	DISTANCIA SUPERFICIE-APOYO INFERIOR

DIA	T1	T2	H	X	VARIACION
0	8.07	10.53	6.9661	120.9534	0.00
4	7.92	10.23	7.3217	122.1307	-1.18
6	7.98	10.19	7.7606	123.5836	-2.63
7	7.88	10.12	7.5364	122.8416	-1.89
10	7.85	10.05	7.6575	123.2423	-2.29
11	7.90	10.10	7.7123	123.4239	-2.47
14	7.90	10.04	7.9548	124.2268	-3.27
17	7.82	9.94	7.9476	124.2028	-3.25
19	7.88	10.02	7.9322	124.1520	-3.20
20	7.81	10.00	7.6526	123.2263	-2.27
24	7.86	9.93	8.2090	125.0683	-4.11
25	7.84	9.92	8.1418	124.8457	-3.89
26	7.86	10.01	7.8685	123.9411	-2.99
28	7.86	9.91	8.2983	125.3640	-4.41

TABLA IX. DATOS DE SEDIMENTACION PARA EL TUBO 6

MUESTRA:	CASCARILLA 20-80
TUBO:	7

$(m+m1)=$	97.9 gm.	MASA DE LA MEZCLA
$Mt=$	95.5 gm.	MASA DEL TUBO
$Ms=$	122.4 gm.	MASA DEL SOPORTE METALICO
$M2=$	217.9 gm.	MASA DEL HOLDER ($Mt+Ms$)
$Xa=$	104.5257 mm	CENTRO DE GRAVEDAD DEL HOLDER VACIO
$h=$	4.9 mm.	DISTANCIA ENTRE APOYOS
$g=$	9,800 mm/seg ²	ACELERACION DE LA GRAVEDAD
$y=$	103.42 mm	DISTANCIA SUPERFICIE-APOYO INFERIOR

DIA	T1	T2	H	X	VARIACION
0	8.21	10.68	7.0706	123.7671	0.00
1	7.94	10.25	7.3426	124.6442	-0.88
5	7.93	10.14	7.7060	125.8164	-2.05
9	8.00	10.15	8.0258	126.8481	-3.08
13	7.85	9.96	8.0241	126.8425	-3.08
14	7.82	9.95	7.9059	126.4613	-2.69
15	7.89	10.06	7.8207	126.1867	-2.42
16	7.85	10.02	7.7762	126.0432	-2.28
20	7.83	10.03	7.8910	126.4133	-2.65
21	7.89	10.10	7.6623	125.6755	-1.91
23	7.91	10.00	8.1792	127.3431	-3.58

TABLA X. DATOS DE SEDIMENTACION PARA EL TUBO 7

MUESTRA: ASERRIN 20-80
TUBO: 9

$(m+m1)=$	92.5 gm.	MASA DE LA MEZCLA
$Mt=$	95.2 gm.	MASA DEL TUBO
$Ms=$	122.4 gm.	MASA DEL SOPORTE METALICO
$M2=$	217.6 gm.	MASA DEL HOLDER ($Mt+Ms$)
$Xa=$	90.2622 mm	CENTRO DE GRAVEDAD DEL HOLDER VACIO
$h=$	4.9 mm.	DISTANCIA ENTRE APOYOS
$g=$	9,800 mm/seg ²	ACELERACION DE LA GRAVEDAD
$y=$	89.04 mm	DISTANCIA SUPERFICIE-APOYO INFERIOR

DIA	T1	T2	H	X	VARIACION
0	7.68	9.55	8.9560	116.1893	0.00
5	7.50	9.22	9.5677	118.2398	-2.05
6	7.53	9.21	9.8619	119.2262	-3.04
10	7.44	9.19	9.3040	117.3558	-1.17
11	7.49	9.22	9.4927	117.9886	-1.80
12	7.44	9.11	9.7961	119.0056	-2.82
13	7.57	9.35	9.3078	117.3688	-1.18
17	7.43	9.12	9.6543	118.5303	-2.34
18	7.46	9.12	9.8902	119.3210	-3.13
19	7.38	9.06	9.6454	118.5004	-2.31
20	7.43	9.06	10.0455	119.8418	-3.65
21	7.49	9.18	9.7404	118.8189	-2.63
24	7.35	9.05	9.4777	117.9383	-1.75
27	7.46	9.12	9.8902	119.3210	-3.13

TABLA XI. DATOS DE SEDIMENTACION PARA EL TUBO 9

MUESTRA: VEGETAL 20-80

TUBO: 10

$(m+m1)=$	93.7 gm.	MASA DE LA MEZCLA
$Mt=$	95.8 gm.	MASA DEL TUBO
$Ms=$	122.4 gm.	MASA DEL SOPORTE METALICO
$M2=$	218.2 gm.	MASA DEL HOLDER ($Mt+Ms$)
$Xa=$	94.8555 mm	CENTRO DE GRAVEDAD DEL HOLDER VACIO
$h=$	4.9 mm.	DISTANCIA ENTRE APOYOS
$g=$	9,800 mm/seg ²	ACELERACION DE LA GRAVEDAD
$y=$	93.84 mm	DISTANCIA SUPERFICIE-APOYO INFERIOR

DIA	T1	T2	H	X	VARIACION
0	7.54	9.60	7.8782	117.6993	0.00
1	7.65	9.65	8.2756	119.0224	-1.32
2	7.67	9.68	8.2538	118.9497	-1.25
3	7.68	9.61	8.6478	120.2613	-2.56
8	7.58	9.40	9.0954	121.7511	-4.05
9	7.77	9.61	9.2431	122.2426	-4.54
11	7.60	9.40	9.2341	122.2127	-4.51
14	7.73	9.57	9.1835	122.0445	-4.35
15	7.69	9.51	9.2418	122.2385	-4.54
16	7.63	9.47	9.0519	121.6063	-3.91
17	7.64	9.41	9.4617	122.9705	-5.27
18	7.60	9.47	8.8524	120.9424	-3.24
21	7.53	9.39	8.8141	120.8147	-3.12
22	7.69	9.57	8.9161	121.1544	-3.46
24	7.66	9.45	9.3723	122.6728	-4.97

TABLA XII. DATOS DE SEDIMENTACION PARA TUBO 10



MUESTRA	VEGETAL 20-80
TUBO:	12

(m+m1)	87.7 gm.	MASA DE LA MEZCLA
Mt=	95.3 gm.	MASA DEL TUBO
Ms=	122.4 gm.	MASA DEL SOPORTE METALICO
M2=	217.7 gm.	MASA DEL HOLDER (Mt+Me)
Xa=	78.3905 mm	CENTRO DE GRAVEDAD DEL HOLDER VACIO
h=	4.9 mm.	DISTANCIA ENTRE APOYOS
g=	9,800 mm/seg	ACELERACION DE LA GRAVEDAD
y=	77.48 mm	DISTANCIA SUPERFICIE-APOYO INFERIOR

DIA	T1	T2	H	X	VARIACION
0	7.16	8.7	10.2643	110.9635	0.00
4	7.09	8.50	11.1808	114.1551	-3.19
5	7.17	8.63	10.8972	113.1675	-2.20
7	7.18	8.55	11.6959	115.9489	-4.99
13	7.19	8.52	12.0960	117.3419	-6.38
14	7.22	8.58	11.8608	116.5229	-5.56
17	7.26	8.62	11.9323	116.7720	-5.81
18	7.22	8.63	11.4049	114.9354	-3.97
21	7.08	8.45	11.5185	115.3309	-4.37
27	7.19	8.58	11.5308	115.3739	-4.41
28	7.17	8.54	11.6782	115.8871	-4.92

TABLA XIII. DATOS DE SEDIMENTACION PARA EL TUBO 12

MUESTRA: ASERRIN 30-70

TUBO: 13

(m+m1)=	98.0 gm.	MASA DE LA MEZCLA
Mt=	95.5 gm.	MASA DEL TUBO
Ms=	122.4 gm.	MASA DEL SOPORTE METALICO
M2=	217.9 gm.	MASA DEL HOLDER (Mt+Me)
Xa=	94.6943 mm	CENTRO DE GRAVEDAD DEL HOLDER VACIO
h=	4.9 mm.	DISTANCIA ENTRE APOYOS
g=	9,800 min/seg ²	ACELERACION DE LA GRAVEDAD
y=	93.74 mm	DISTANCIA SUPERFICIE-APOYO INFERIOR

DIA	T1	T2	H	X	VARIACION
0	7.90	10.23	7.2303	114.9246	0.00
4	7.40	9.36	8.1555	117.9072	-2.98
5	7.49	9.25	9.3144	121.6430	-6.72
6	7.51	9.41	8.5830	119.2850	-4.36
7	7.47	9.29	8.9490	120.4651	-5.54
10	7.53	9.26	9.5488	122.3984	-7.47
11	7.51	9.28	9.2837	121.5440	-6.62
13	7.49	9.32	8.9214	120.3759	-5.45
14	7.50	9.19	9.7547	123.0622	-8.14
17	7.46	9.20	9.3908	121.8892	-6.96
19	7.47	9.27	9.0591	120.8200	-5.90
21	7.52	9.27	9.4147	121.9663	-7.04
24	7.48	9.29	9.0172	120.6847	-5.76
25	7.53	9.21	9.8619	123.4077	-8.48
27	7.49	9.18	9.7404	123.0160	-8.09
28	7.52	9.24	9.5958	122.5501	-7.00

TABLA XIV. DATOS DE SEDIMENTACION PARA EL TUBO 13

MUESTRA: ASERRIN 30-70
TUBO: 14

(m+m1)=	92.2 gm.	MASA DE LA MEZCLA
Mt=	95.5 gm.	MASA DEL TUBO
Ms=	122.4 gm.	MASA DEL SOPORTE METALICO
M2=	217.9 gm.	MASA DEL HOLDER (Mt+Me)
Xa=	81.8792 mm	CENTRO DE GRAVEDAD DEL HOLDER VACIO
h=	4.9 mm.	DISTANCIA ENTRE APOYOS
g=	9,800 mm/seg ²	ACELERACION DE LA GRAVEDAD
y=	80.96 mm	DISTANCIA SUPERFICIE-APOYO INFERIOR

DIA	T1	T2	H	X	VARIACION
0	7.59	9.39	9.2206	109.7997	0.00
3	7.31	8.86	10.4267	113.8560	-4.06
4	7.34	8.80	11.1801	116.3901	-6.59
5	7.28	8.74	11.0802	116.0542	-6.25
6	7.34	8.84	10.8556	115.2987	-5.50
7	7.19	8.80	9.8208	111.8184	-2.02
10	7.28	8.81	10.5282	114.1975	-4.40
12	7.25	8.64	11.6358	117.9226	-8.12
13	7.27	8.76	10.8210	115.1822	-5.38
14	7.22	8.82	9.9338	112.1983	-2.40
17	7.22	8.69	10.8990	115.4446	-5.64
24	7.30	8.70	11.6324	117.9112	-8.11
26	7.20	8.66	10.9471	115.6065	-5.81
28	7.25	8.73	10.8679	115.3401	-5.54

TABLA XV. DATOS DE SEDIMENTACION PARA TUBO 14

MUESTRA:	CASCARILLA 30-70
TUBO:	15

$(m+m1)=$	90.0 gm.	MASA DE LA MEZCLA
$Mt=$	95.5 gm.	MASA DEL TUBO
$Ms=$	122.4 gm.	MASA DEL SOPORTE METALICO
$M2=$	217.9 gm.	MASA DEL HOLDER ($Mt+Ms$)
$Xa=$	70.3600 mm	CENTRO DE GRAVEDAD DEL HOLDER VACIO
$h=$	4.9 mm.	DISTANCIA ENTRE APOYOS
$g=$	9,800 mm/seg ²	ACELERACION DE LA GRAVEDAD
$y=$	69.38 mm	DISTANCIA SUPERFICIE-APOYO INFERIOR

DIA	T1	T2	H	X	VARIACION
0	6.93	8.33	10.9900	104.6055	0.00
2	6.94	8.29	11.4517	106.1849	-1.58
6	6.88	8.21	11.5292	106.4498	-1.84
7	7.00	8.32	11.8451	107.5306	-2.93
9	6.93	8.16	12.6464	110.2720	-5.67
14	6.92	8.14	12.7383	110.5865	-5.98
15	6.88	8.12	12.4382	109.5598	-4.95
16	6.90	8.19	11.9552	107.9072	-3.30
21	6.86	8.12	12.1863	108.6980	-4.09
22	6.96	8.19	12.7058	110.4751	-5.87
23	6.89	8.16	12.1400	108.5395	-3.93
24	6.89	8.14	12.3502	109.2586	-4.65

TABLA XVI. DATOS DE SEDIMENTACION PARA EL TUBO 15

MUESTRA:	CASCARILLA 30-70
TUBO:	16

$(m+m_1)=$	92.6 gm.	MASA DE LA MEZCLA
$M_t=$	95.2 gm.	MASA DEL TUBO
$M_s=$	122.4 gm.	MASA DEL SOPORTE METALICO
$M_2=$	217.6 gm.	MASA DEL HOLDER (M_t+M_s)
$X_a=$	78.4553 mm	CENTRO DE GRAVEDAD DEL HOLDER VACIO
$h=$	4.9 mm.	DISTANCIA ENTRE APOYOS
$g=$	9,800 mm/seg ²	ACELERACION DE LA GRAVEDAD
$y=$	77.6 mm	DISTANCIA SUPERFICIE-APOYO INFERIOR

DIA	T1	T2	H	X	VARIACION
0	7.17	8.70	10.3537	110.2738	0.00
2	7.15	8.62	10.7833	111.7131	-1.44
3	7.09	8.47	11.4454	113.9310	-3.66
6	7.19	8.67	10.7694	111.6666	-1.39
7	7.17	8.65	10.7366	111.5567	-1.28
8	7.11	8.52	11.2153	113.1601	-2.89
10	7.17	8.54	11.6782	114.7108	-4.44
13	7.11	8.56	10.8786	112.0324	-1.76
14	7.07	8.49	11.0609	112.6429	-2.37
16	7.19	8.54	11.9020	115.4605	-5.19
17	7.14	8.57	11.0956	112.7591	-2.49
23	7.11	8.51	11.3025	113.4522	-3.18
24	7.12	8.45	11.9679	115.6815	-5.41

TABLA XVII. DATOS DE SEDIMENTACION PARA EL TUBO 16

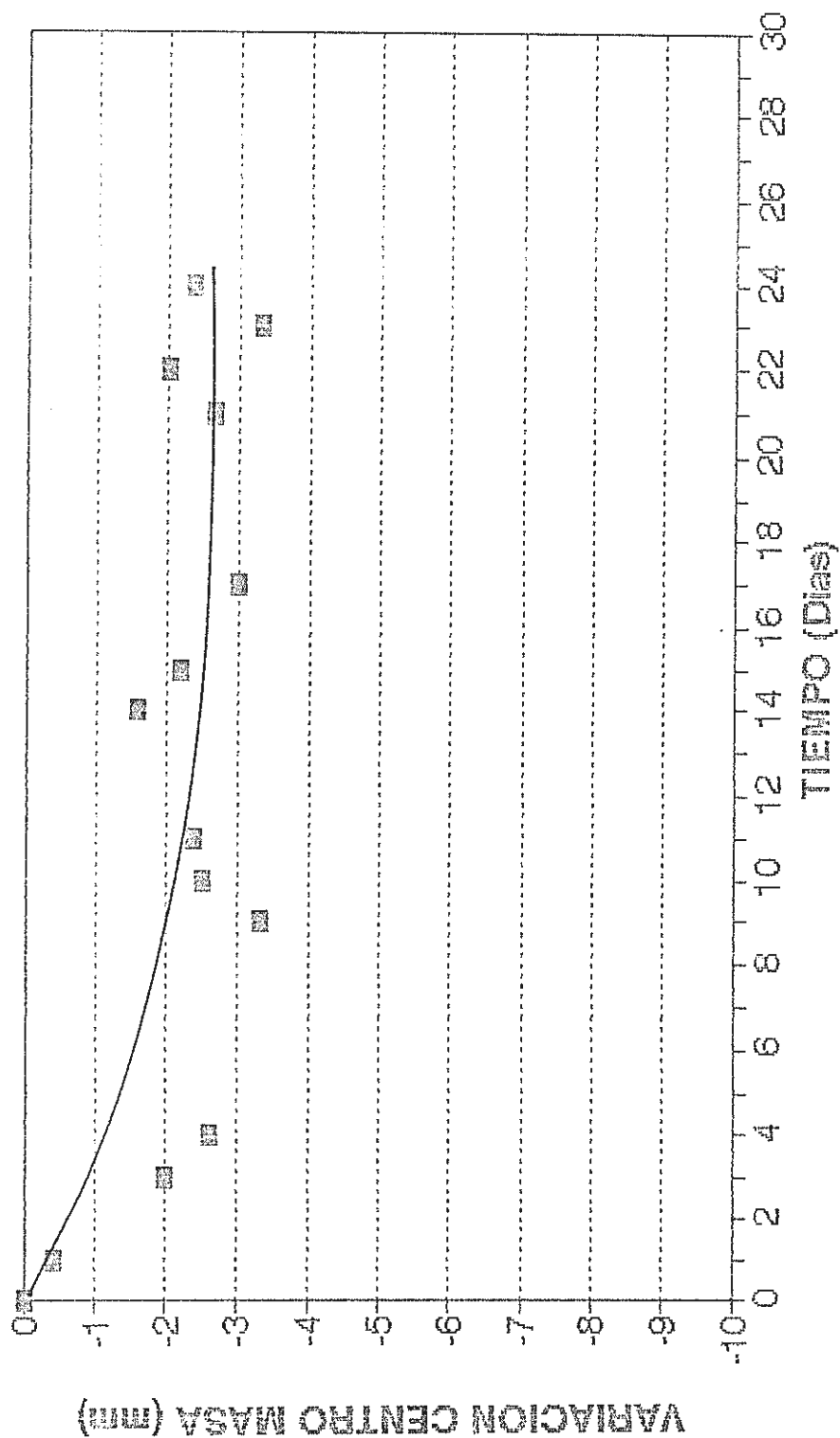
MUESTRA:	VEGETAL 30-70
TUBO:	17

$(m+m_1)=$	89.5 gm.	MASA DE LA MEZCLA
$M_t=$	94.7 gm.	MASA DEL TUBO
$M_s=$	122.4 gm.	MASA DEL SOPORTE METALICO
$M_2=$	217.1 gm.	MASA DEL HOLDER (M_t+M_e)
$X_a=$	72.5209 mm	CENTRO DE GRAVEDAD DEL HOLDER VACIO
$h=$	4.9 mm.	DISTANCIA ENTRE APOYOS
$g=$	9,800 mm/seg ²	ACELERACION DE LA GRAVEDAD
$y=$	71.5 mm	DISTANCIA SUPERFICIE-APOYO INFERIOR

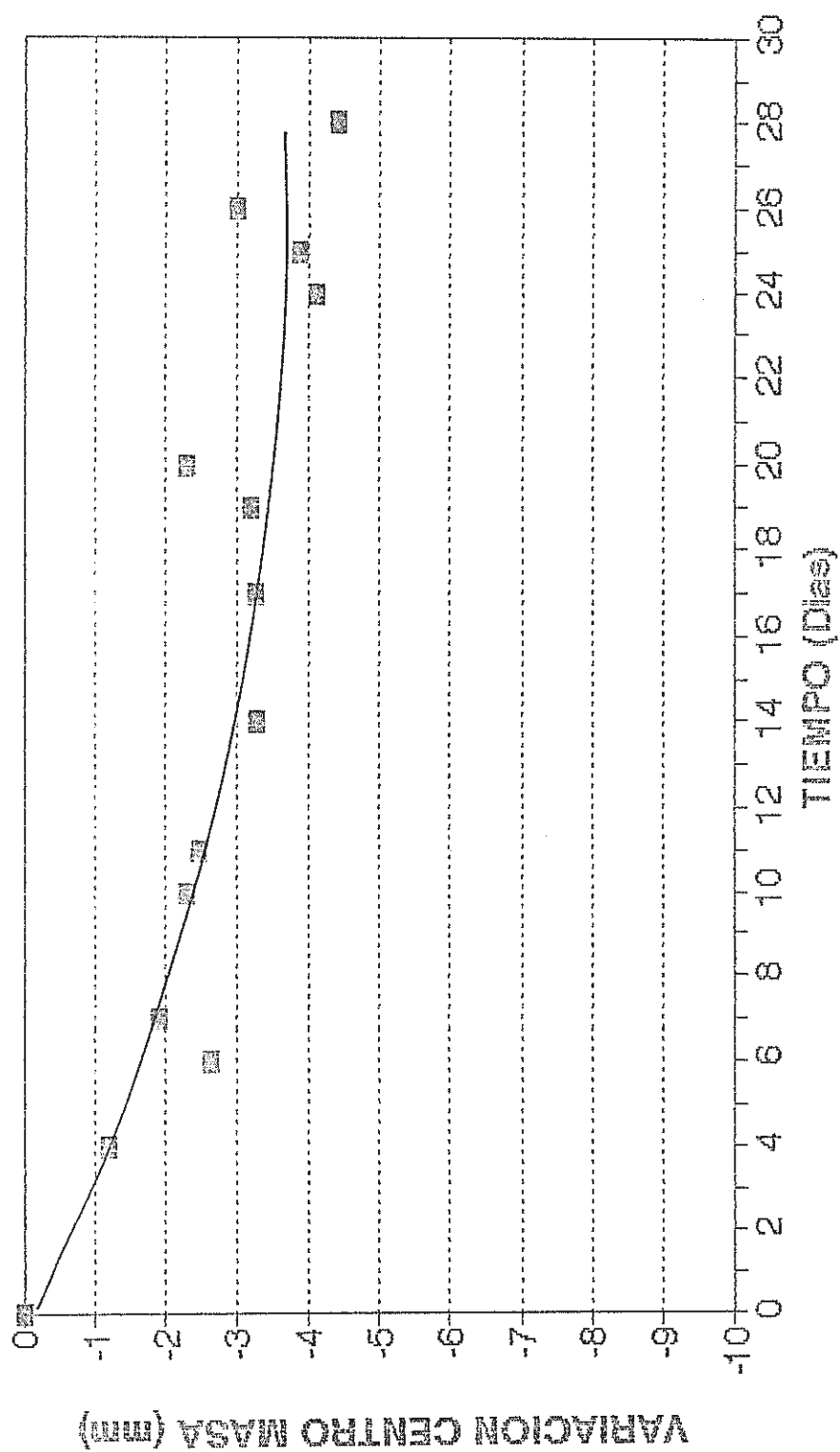
DIA	T1	T2	H	X	VARIACION
0	7.06	8.48	11.0438	106.8563	0.00
3	7.01	8.40	11.2161	107.4465	-0.59
4	6.97	8.28	11.8874	109.7462	-2.89
5	6.98	8.32	11.6171	108.8204	-1.96
7	7.01	8.40	11.2161	107.4465	-0.59
10	7.03	8.39	11.5211	108.4913	-1.64
12	6.99	8.34	11.5417	108.5621	-1.71
13	7.00	8.37	11.3765	107.9961	-1.14
14	7.04	8.32	12.3224	111.2365	-4.38
17	7.01	8.35	11.6716	109.0069	-2.15
18	7.02	8.30	12.2844	111.1063	-4.25
24	7.06	8.39	11.8582	109.6463	-2.79
25	6.98	8.25	12.3124	111.2021	-4.35
27	7.04	8.34	12.1175	110.5344	-3.68

TABLA XVIII. DATOS DE SEDIMENTACION PARA EL TUBO 17

FIGURA 12. CURVAS DE SEDIMENTACION
ASERRIN 20-20/ TUBO 5



**FIGURA 13. CURVA DE SEDIMENTACION
ASEPRIN 20-80/TUBO 6**



**FIGURA 14. CURVA DE SEDIMENTACION
CASCARILLA 20-80/TUBO 7**

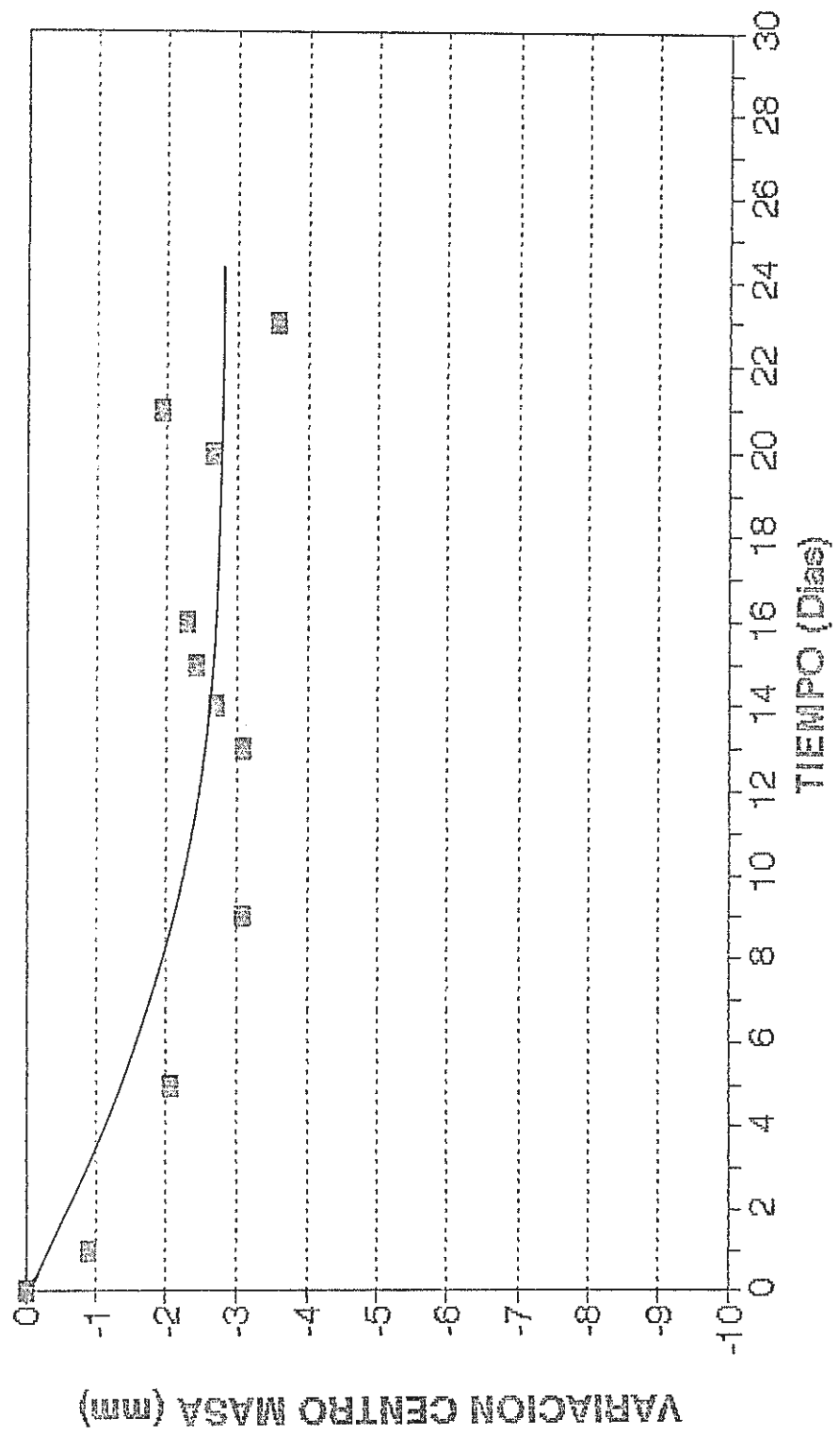
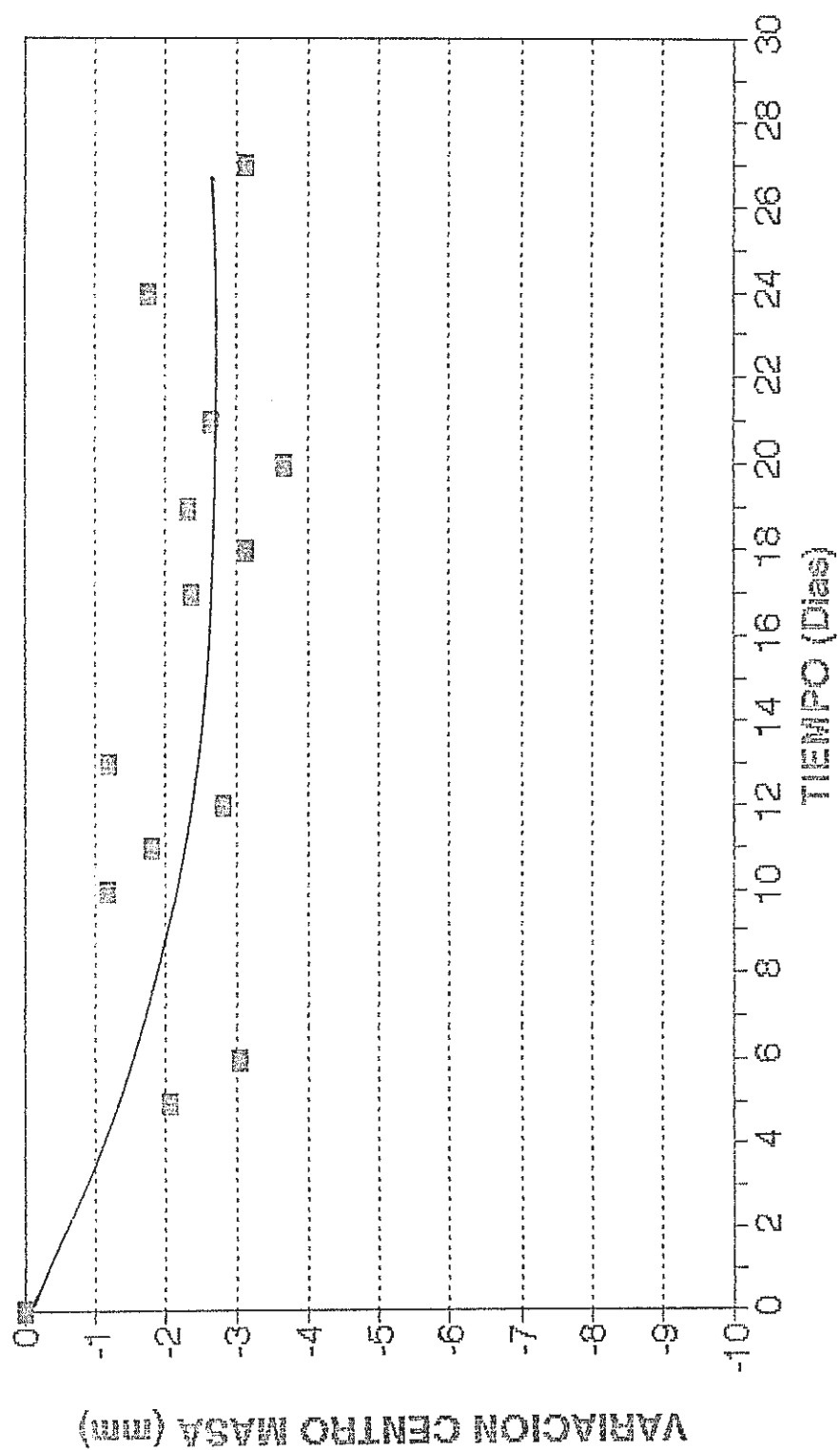
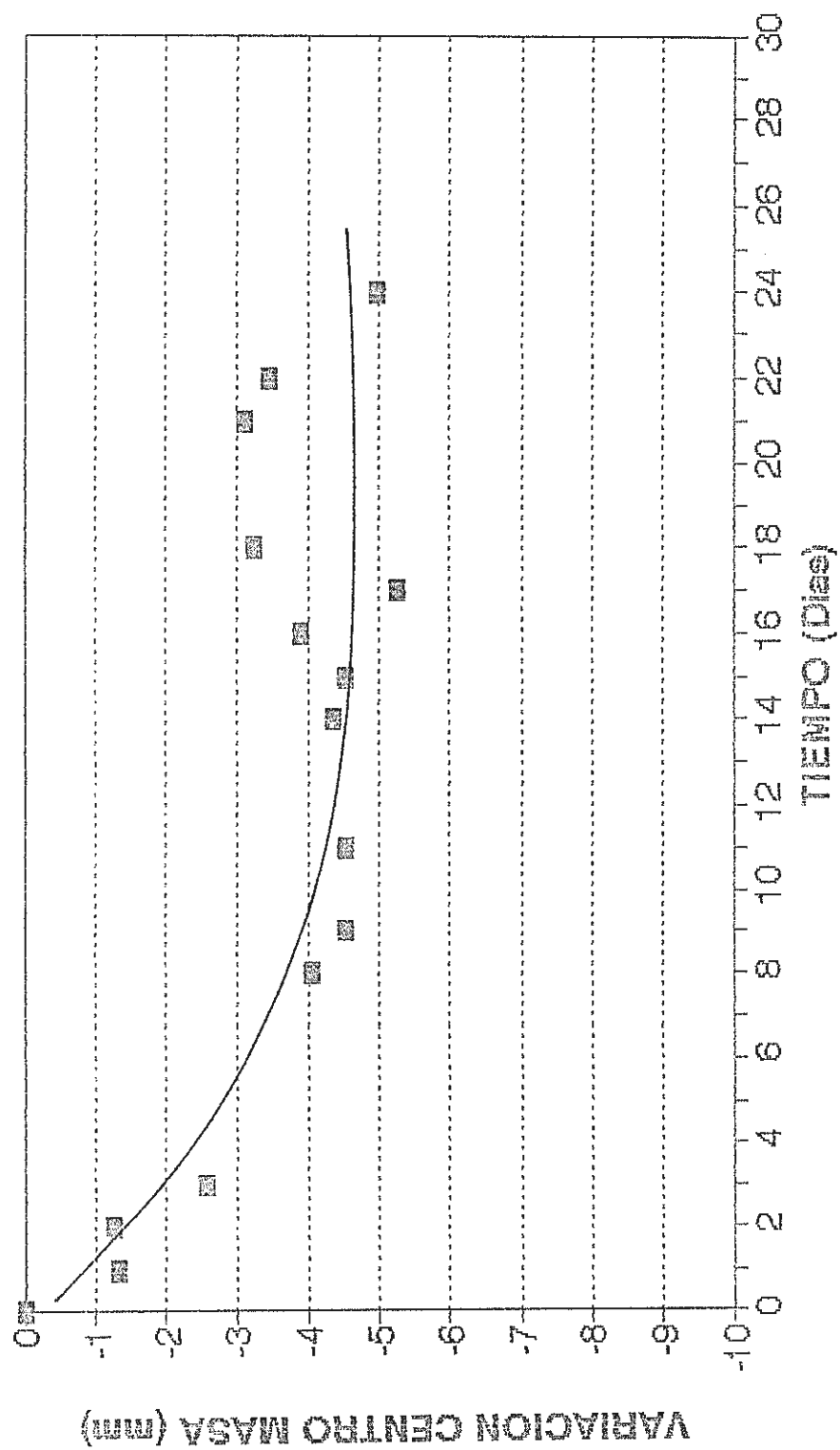


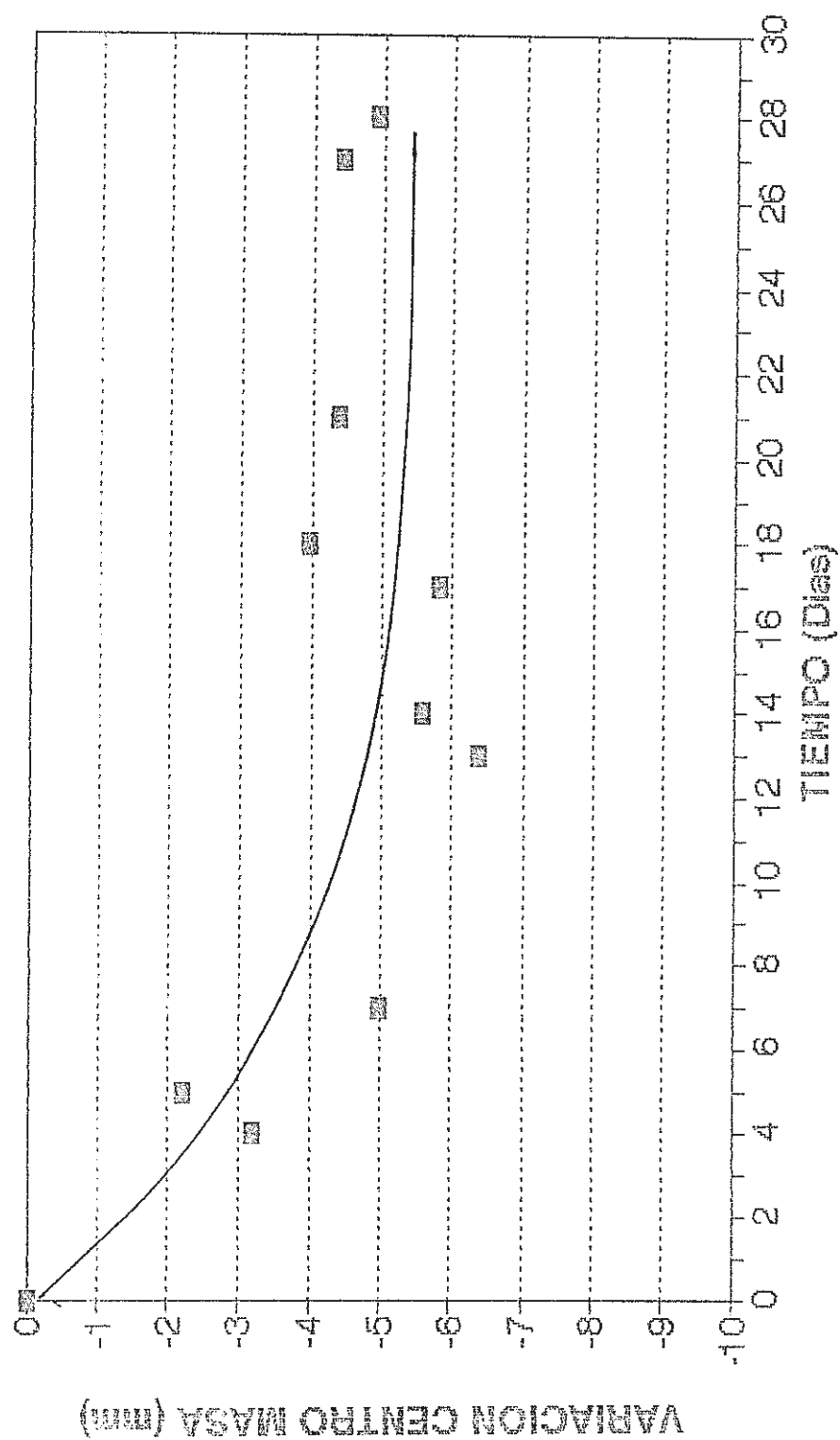
FIGURA 15. CURVA DE SEDIMENTACION
ASEPRIN 20-80/TUBO 9



**FIGURA 16. CURVA DE SEDIMENTACION
VEGETAL 20-80/TUBO 10**



**FIGURA 17. CURVA DE SEDIMENTACION
VEGETAL 20-80/TUBO 12**



**FIGURA 18. CURVA DE SEDIMENTACION
ASEPRIN 30-70/TUBO 13**

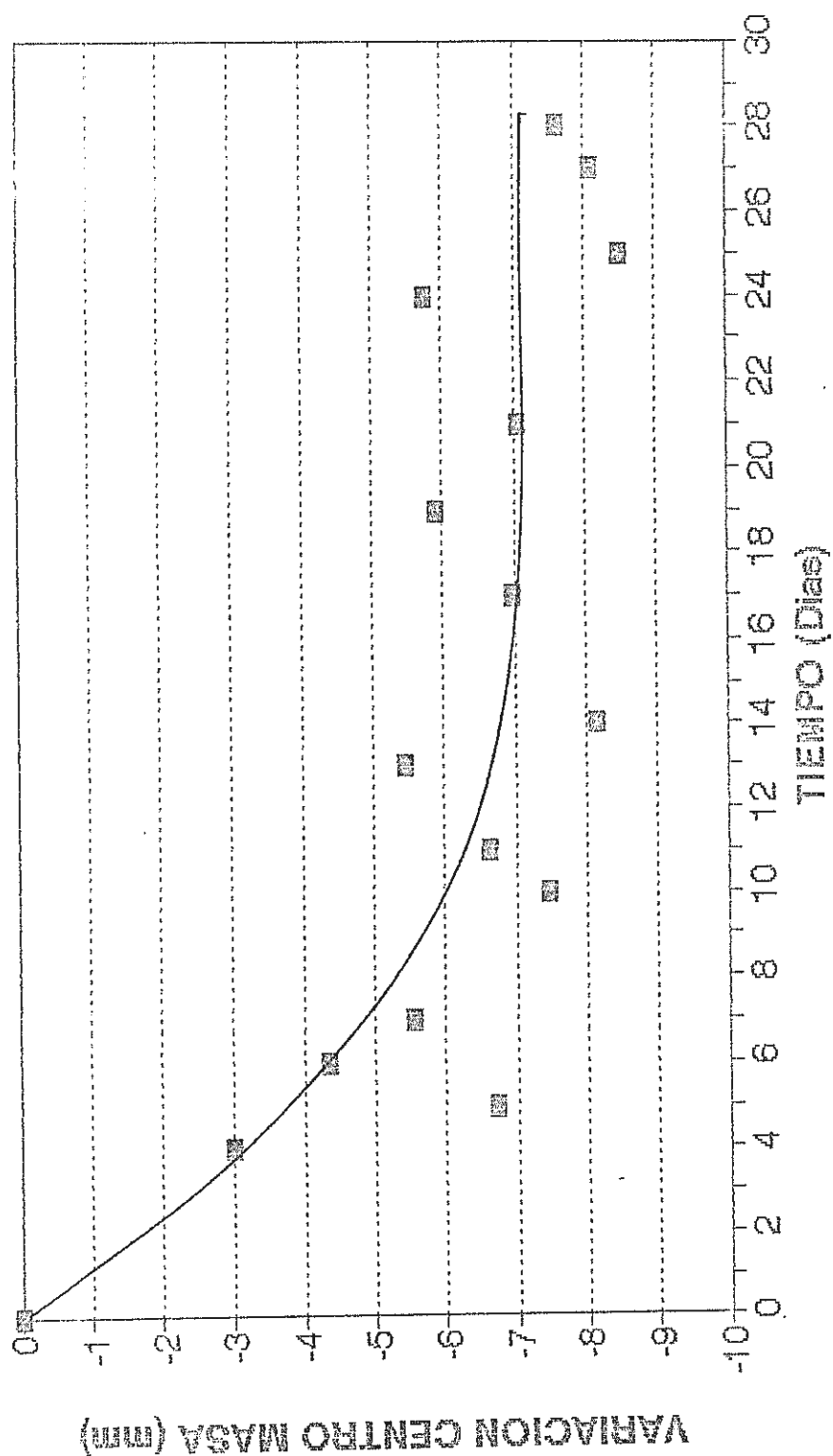
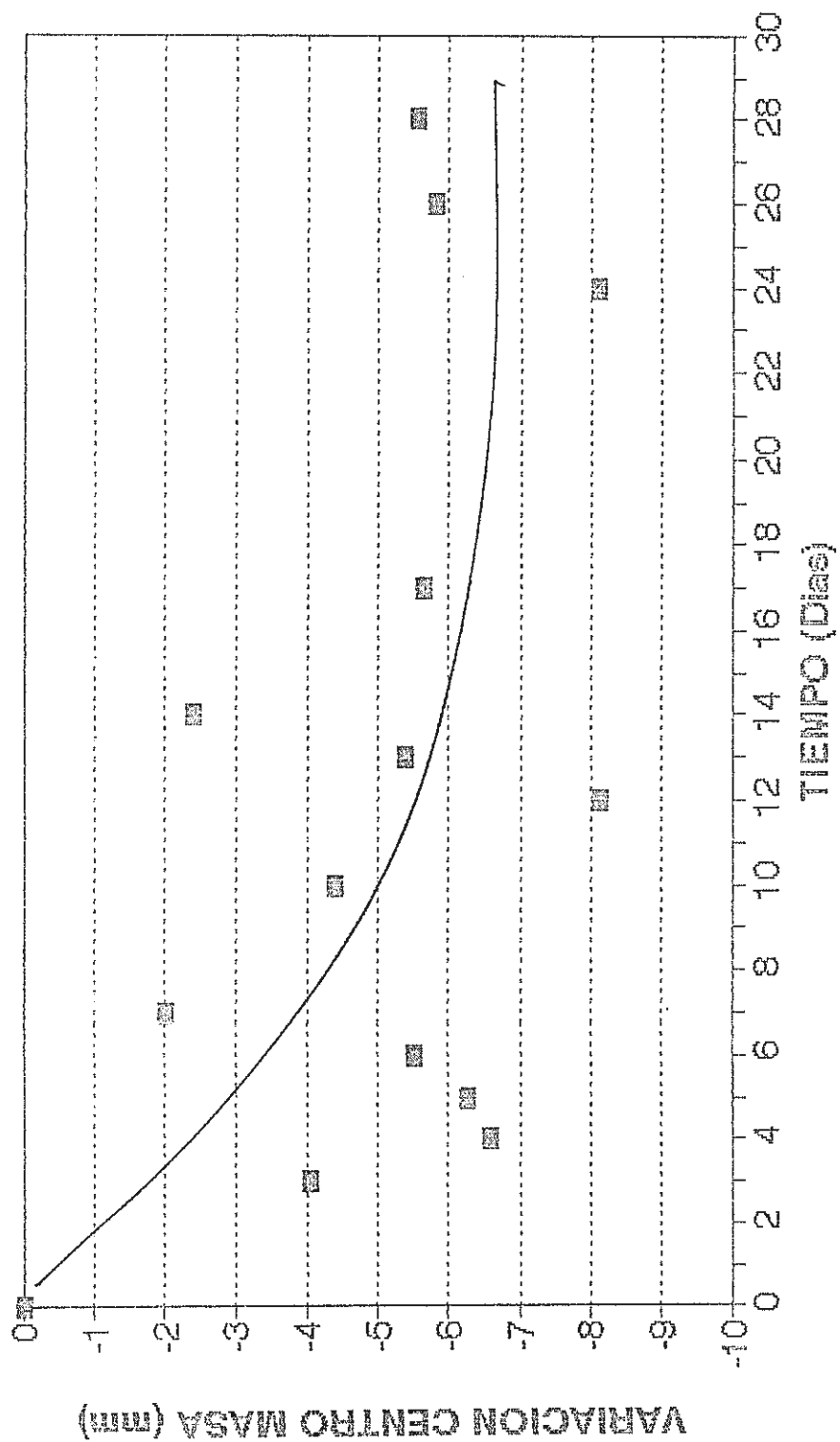


FIGURA 19. CURVA DE SEDIMENTACION
ASERRIN 30-70/TUBO 14



**FIGURA 20. CURVA DE SEDIMENTACION
CASCAFRILLA 30-70/TUBO 15**

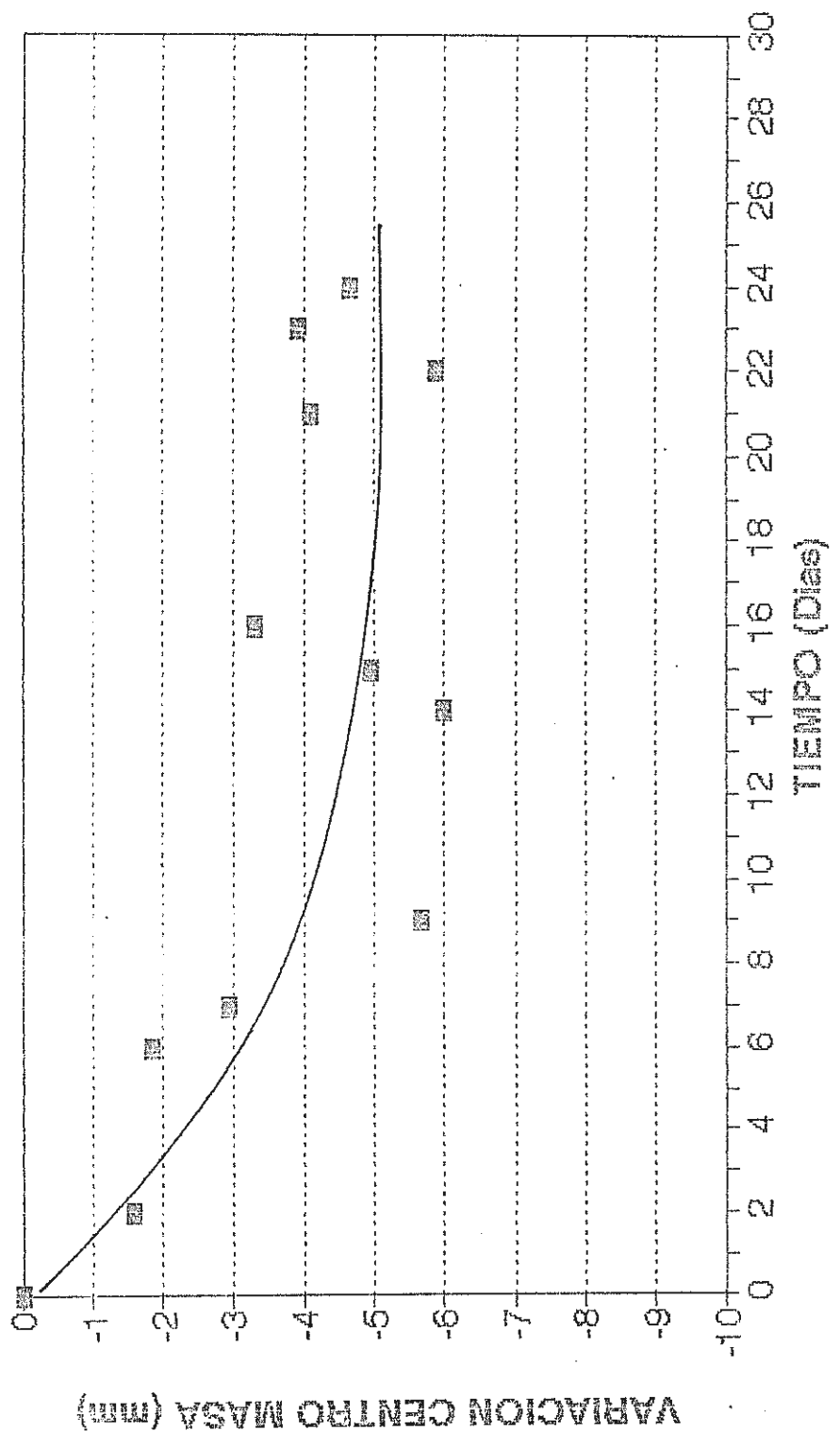
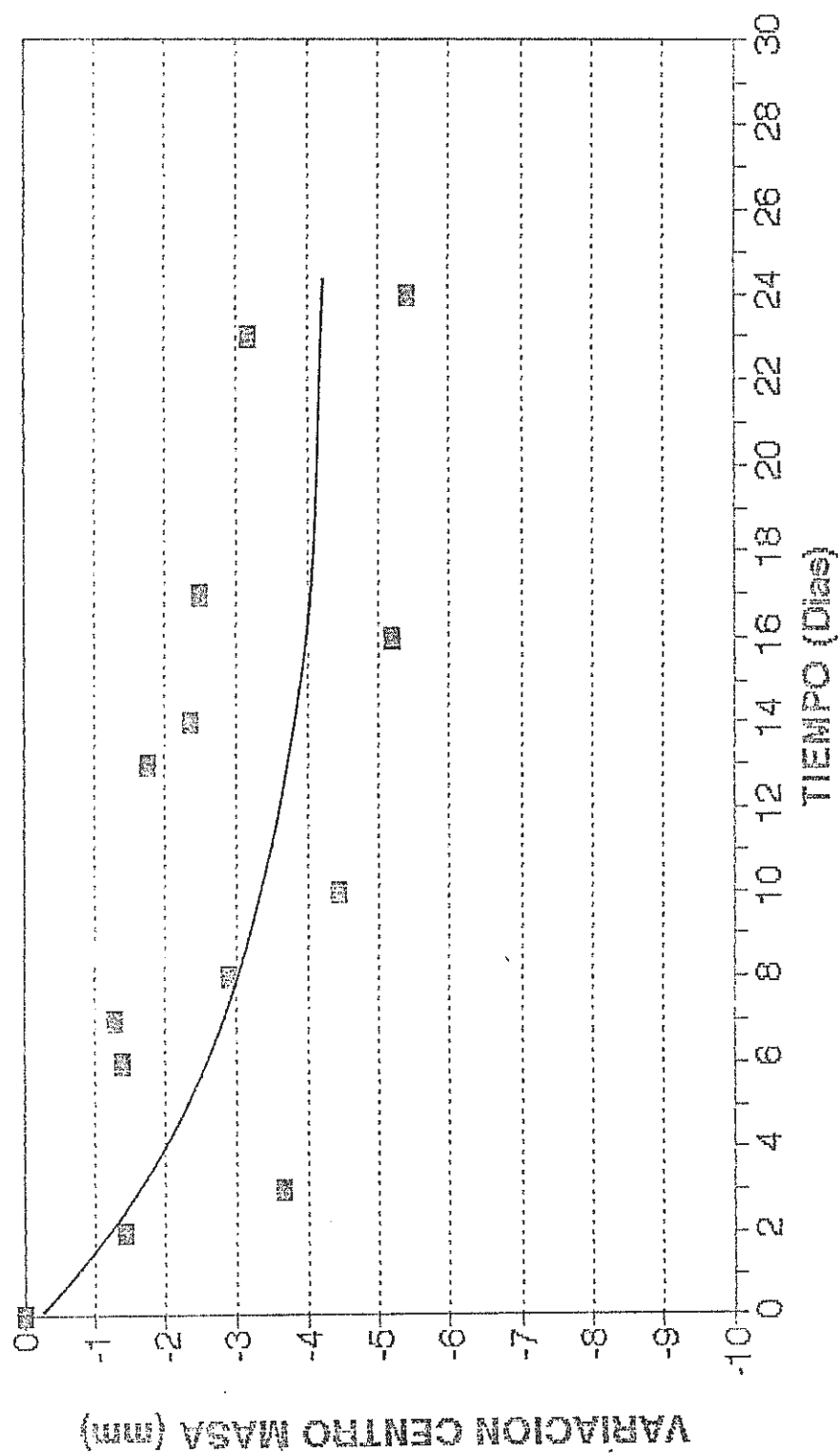
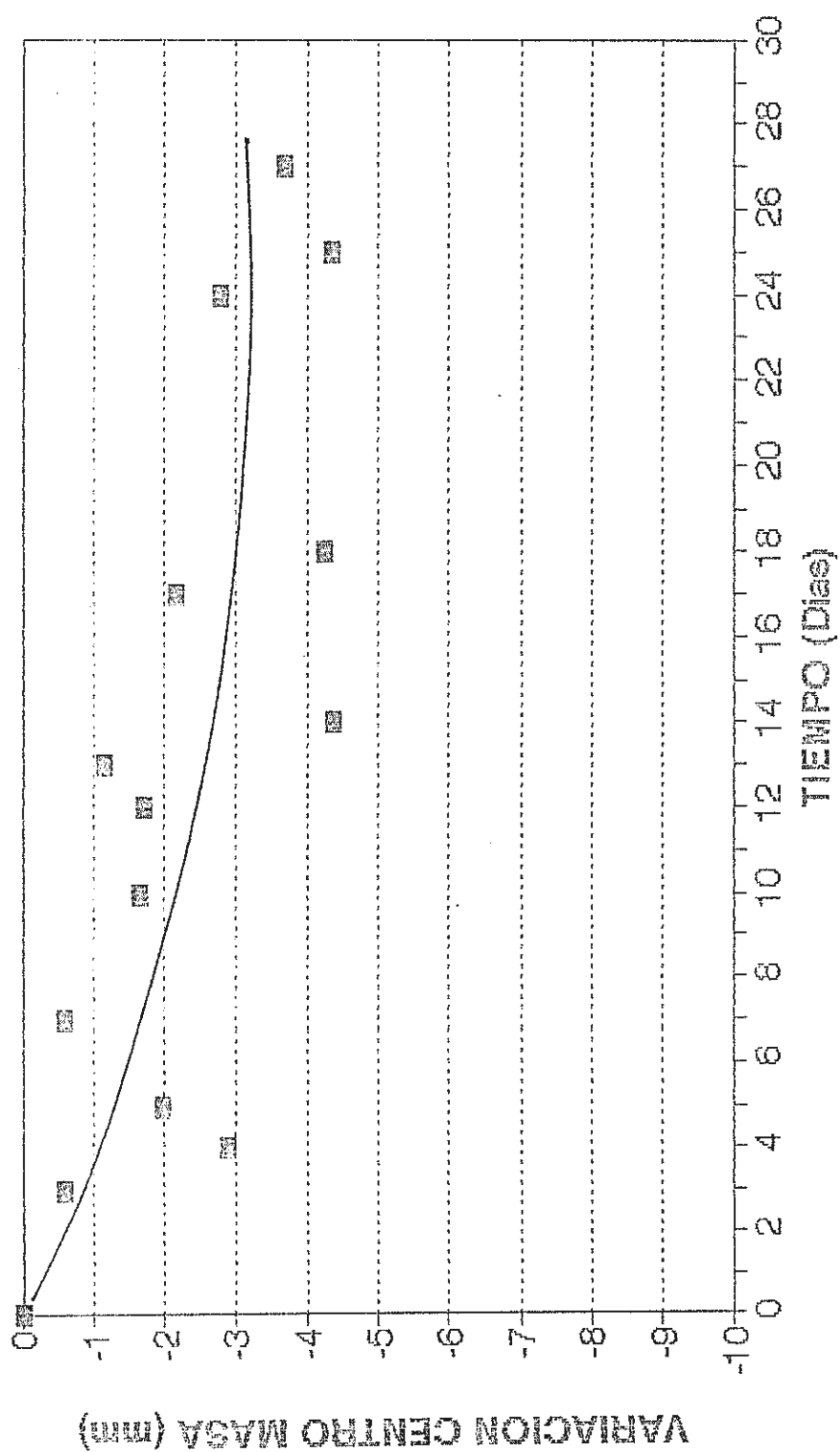


FIGURA 21. CURVA DE SEDIMENTACION
CASCAPILLA 30-70/TUBO 16



**FIGURA 22. CURVA DE SEDIMENTACION
VEGETAL 30-70/TUBO 17**



APENDICE B

TABLAS Y GRAFICOS DE LAS PRUEBAS RHEOLOGICAS

RPM	TEMPERATURA (°C)							
	90				100			
	SP2	SP3	SP4	SP5	SP2	SP3	SP4	SP5
60	2	2	2	2	12	13	13	13
30	3	3	3	3	12	12	12	12
12	3	3	3	3	12	12	12	12
6	3	3	3	3	12	12	12	12
3	3	3	3	3	12	12	12	12
15	3	3	3	3	12	12	12	12

RPM	TEMPERATURA (°C)							
	90				100			
	SP2	SP3	SP4	SP5	SP2	SP3	SP4	SP5
60	2	2	2	2	12	13	13	13
30	3	3	3	3	12	12	12	12
12	3	3	3	3	12	12	12	12
6	3	3	3	3	12	12	12	12
3	3	3	3	3	12	12	12	12
15	3	3	3	3	12	12	12	12

TABLA XXII. VISCOSIDAD DEL BUNKER (Cps)
A DIFERENTES TEMPERATURAS

RPM	TEMPERATURA (°C)											
	70				80				90			
	SP 2	SP 3	SP 4		SP 2	SP 3	SP 4		SP 2	SP 3	SP 4	
60	255	250	450		148	162	350		96	120	300	
30	276	240	240		146	168	300		96	120	200	
12	250	210	210		140	150	100		102	100		
6	225	140	140		130	100			100	100		
3	200	80	80		110	40			100			
1.5	140				100				40			

TABLA XXIII VISCOSIDAD DE LAS MEZCLAS (Cps)
A DIFERENTES TEMPERATURAS



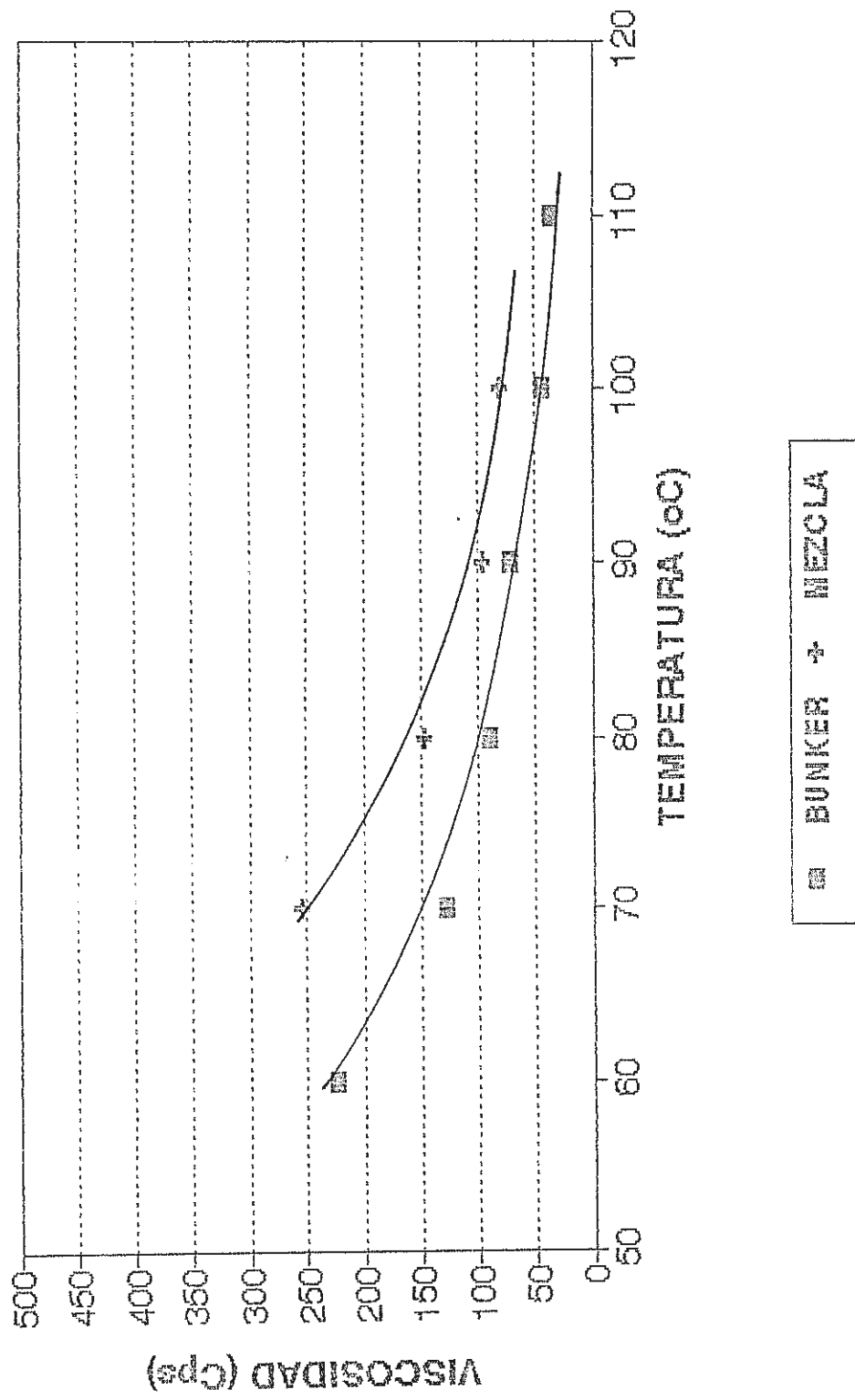
SPRUE 2

RADIO =	CM	CM
1/2 INCHES	1.27	3.18

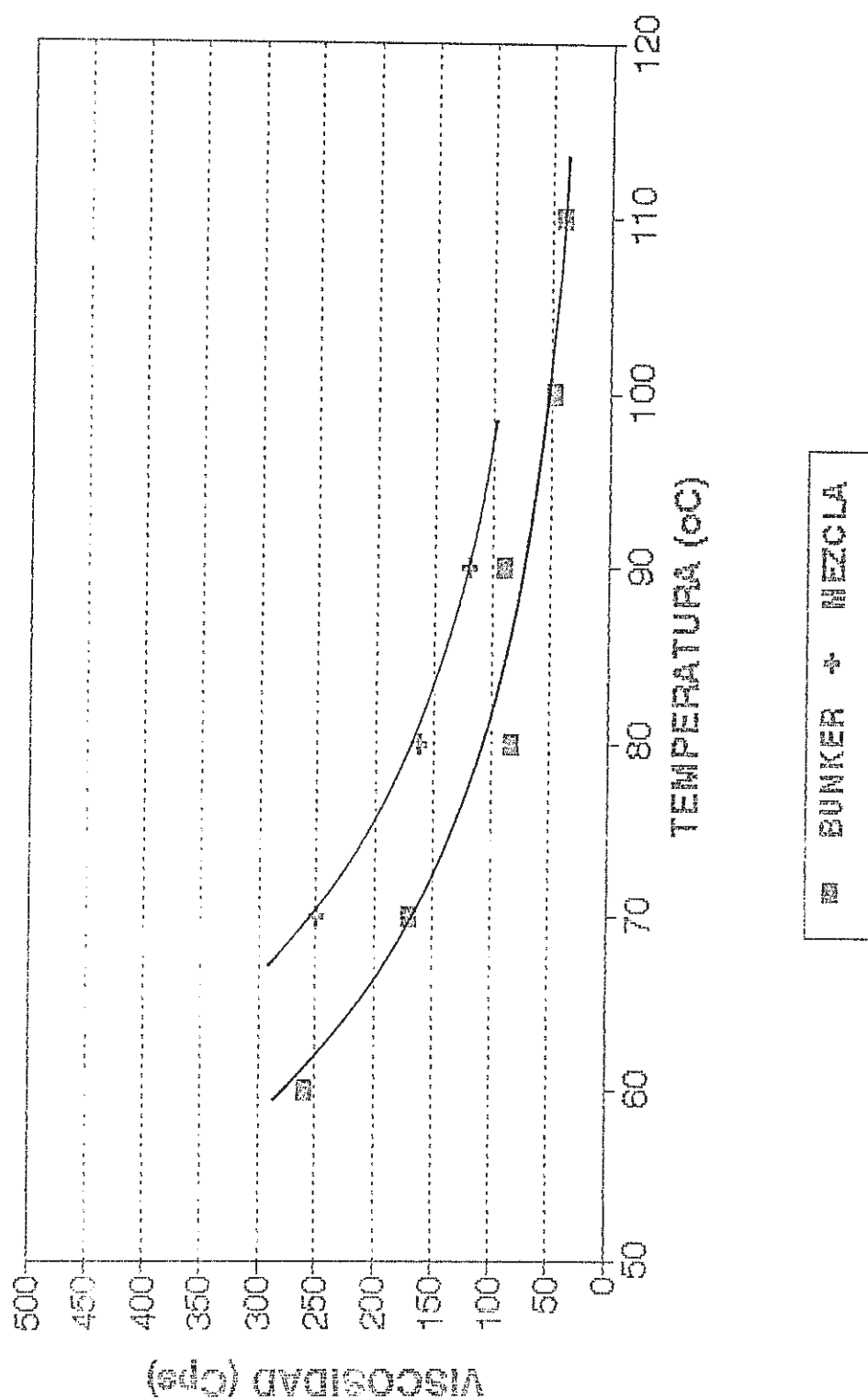
RPM	ESFUERZO		VELOCIDAD		VELOCIDAD		VELOCIDAD		VELOCIDAD		VELOCIDAD	
	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM
60	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
30	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
12	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62
6	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
3	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
1.5	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95
0.6	12.25	12.25	12.25	12.25	12.25	12.25	12.25	12.25	12.25	12.25	12.25	12.25
0.3	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5

TABLA XXV. DATOS DE ESFUERZO Y VELOCIDAD DE CORTE PARA LAS MEZCLAS

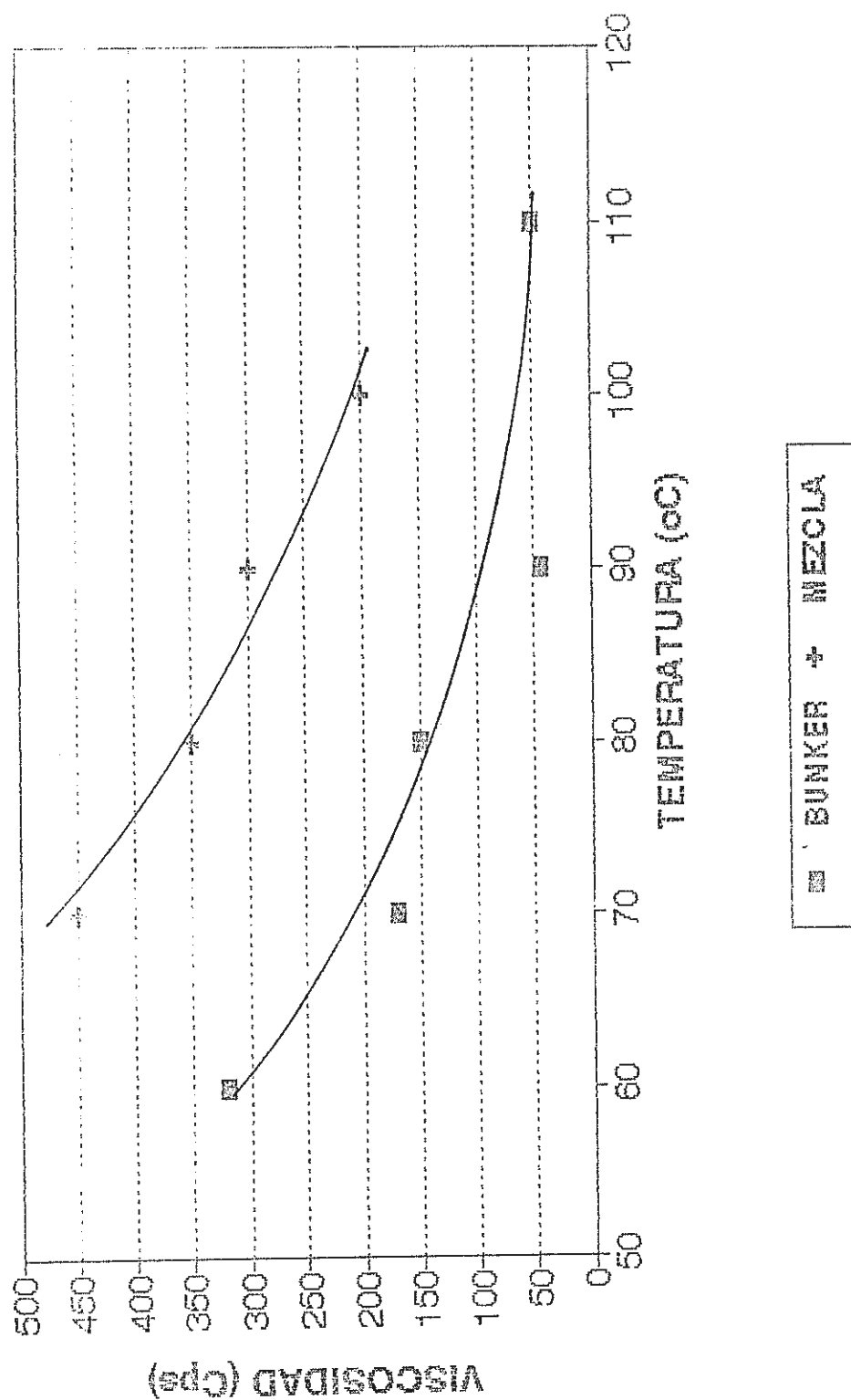
**FIGURA 25. COMPARACION BUNKER - MEZCLA
VISCOSIDAD A 60 RPM/SPINDLE 2**



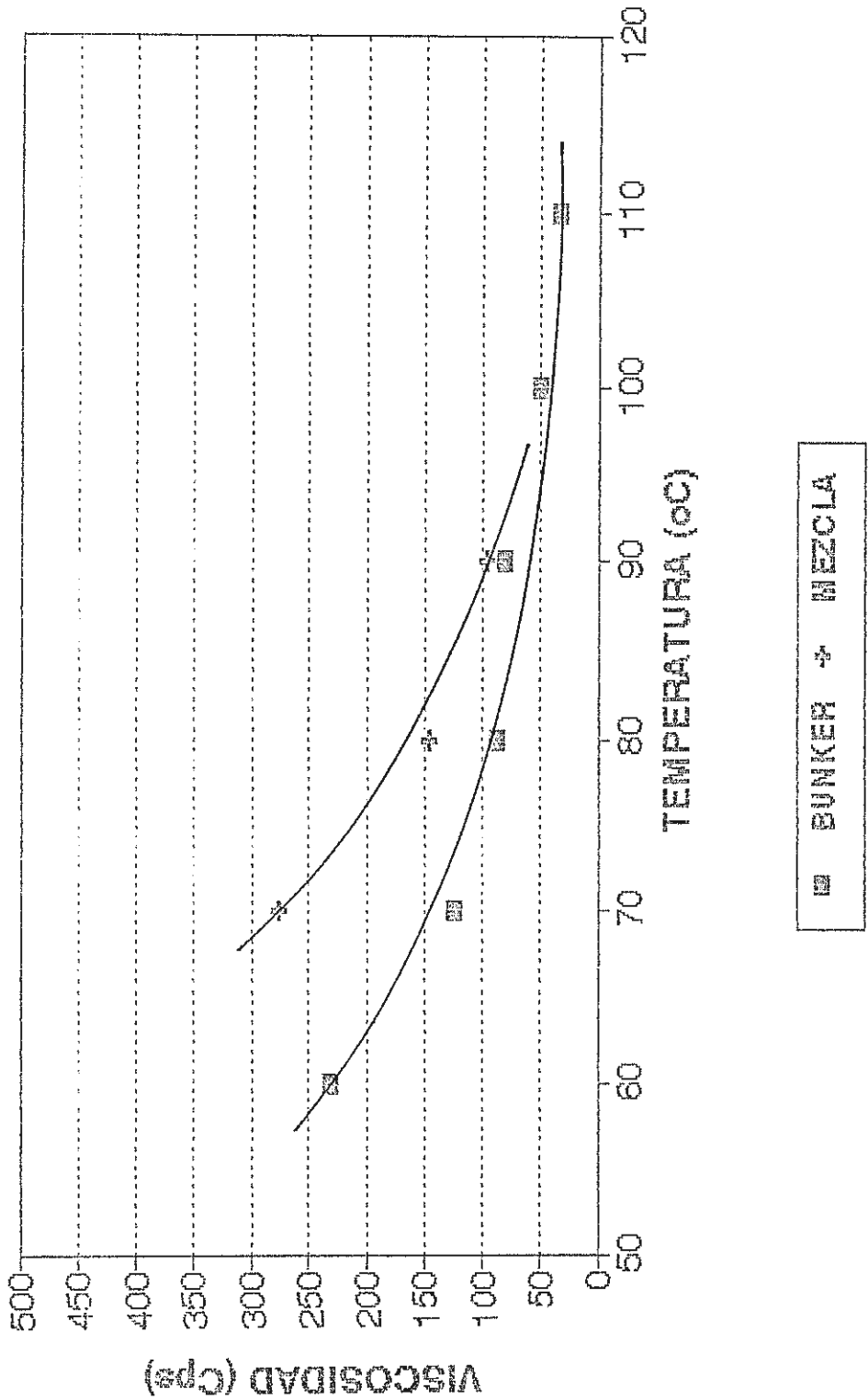
**FIGURA 26. COMPARACION BUNKER-MEZCLA
VISCOSIDAD A 60 RPM/SPINDLE 3**



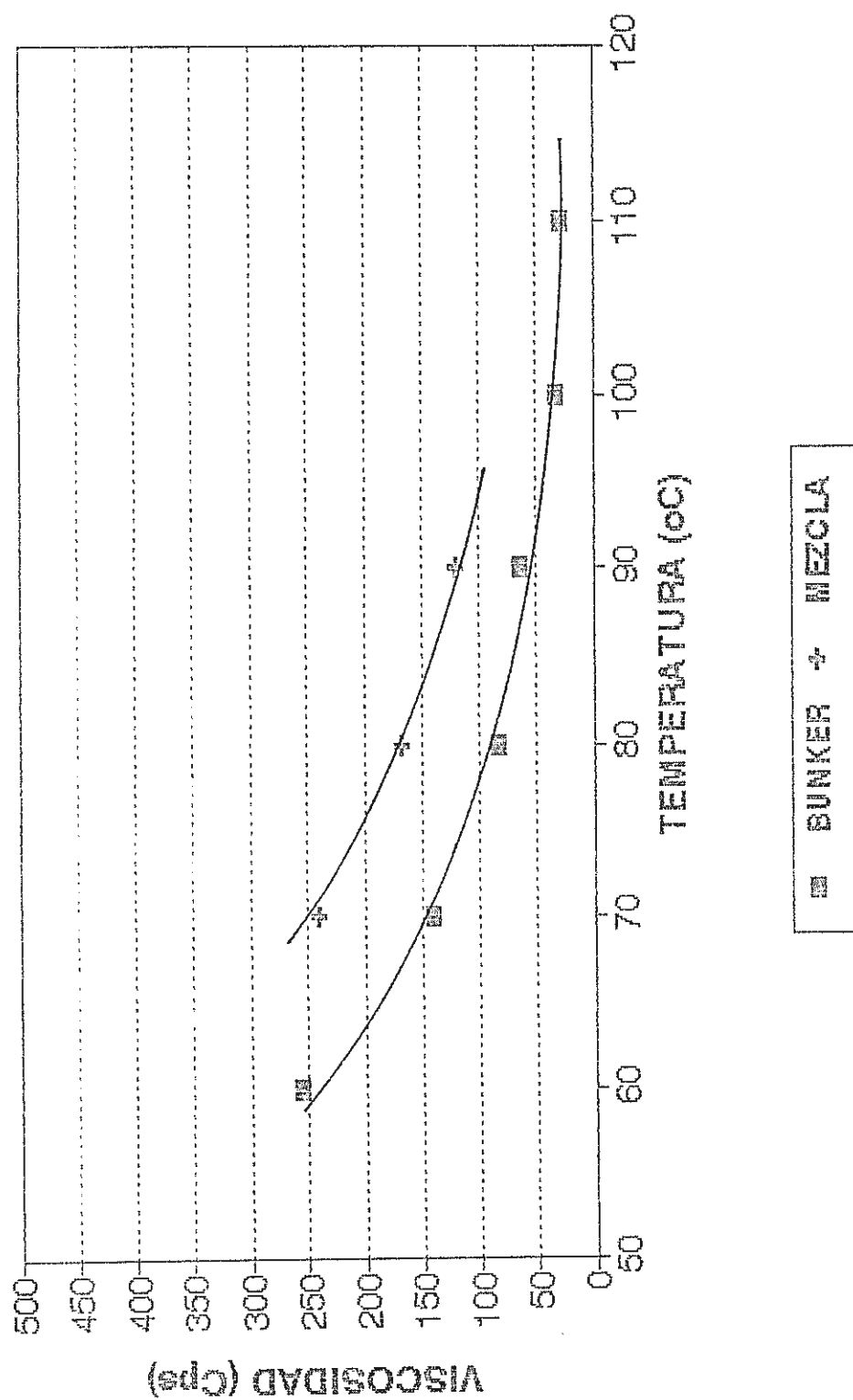
**FIGURA 27. COMPARACION BUNKER-MEZCLA
VISCOSIDAD A 60 RPM/SPINDLE 4**



**FIGURA 28. COMPARACION BUNKER - MEZCLA
VISCOSIDAD A 30 RPM/SPINDLE 2**



**FIGURA 29. COMPARACION BUNKER-MEZCLA
VISCOSIDAD A 30 RPM/SPINDLE 3**



**FIGURA 30. COMPARACION BUNKER-MEZCLA
VISCOSIDAD A 30 RPM/SPINDLE 4**

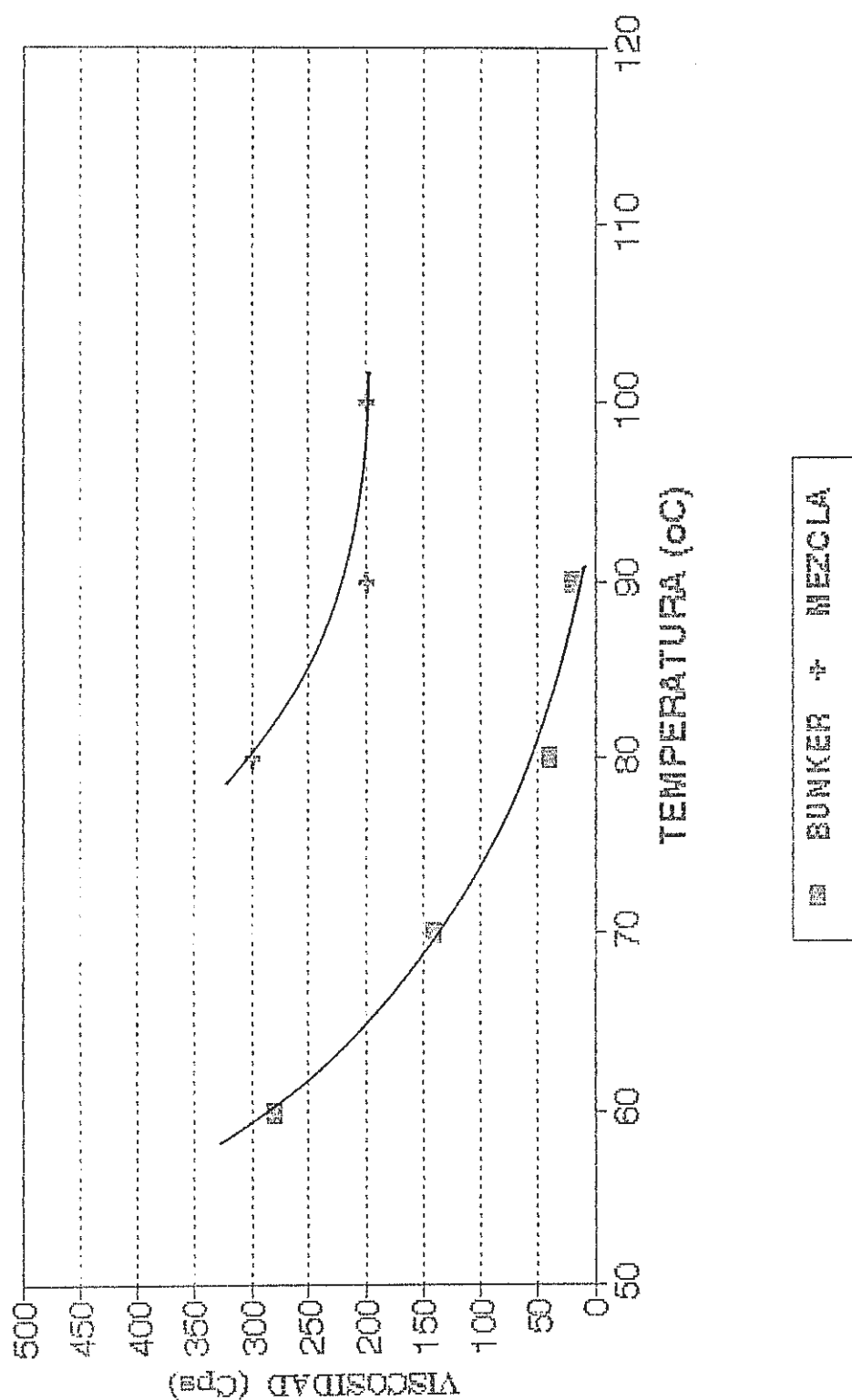


FIGURA 31. VISCOSIDAD-ESFUERZO DE CORTE
BUNKER

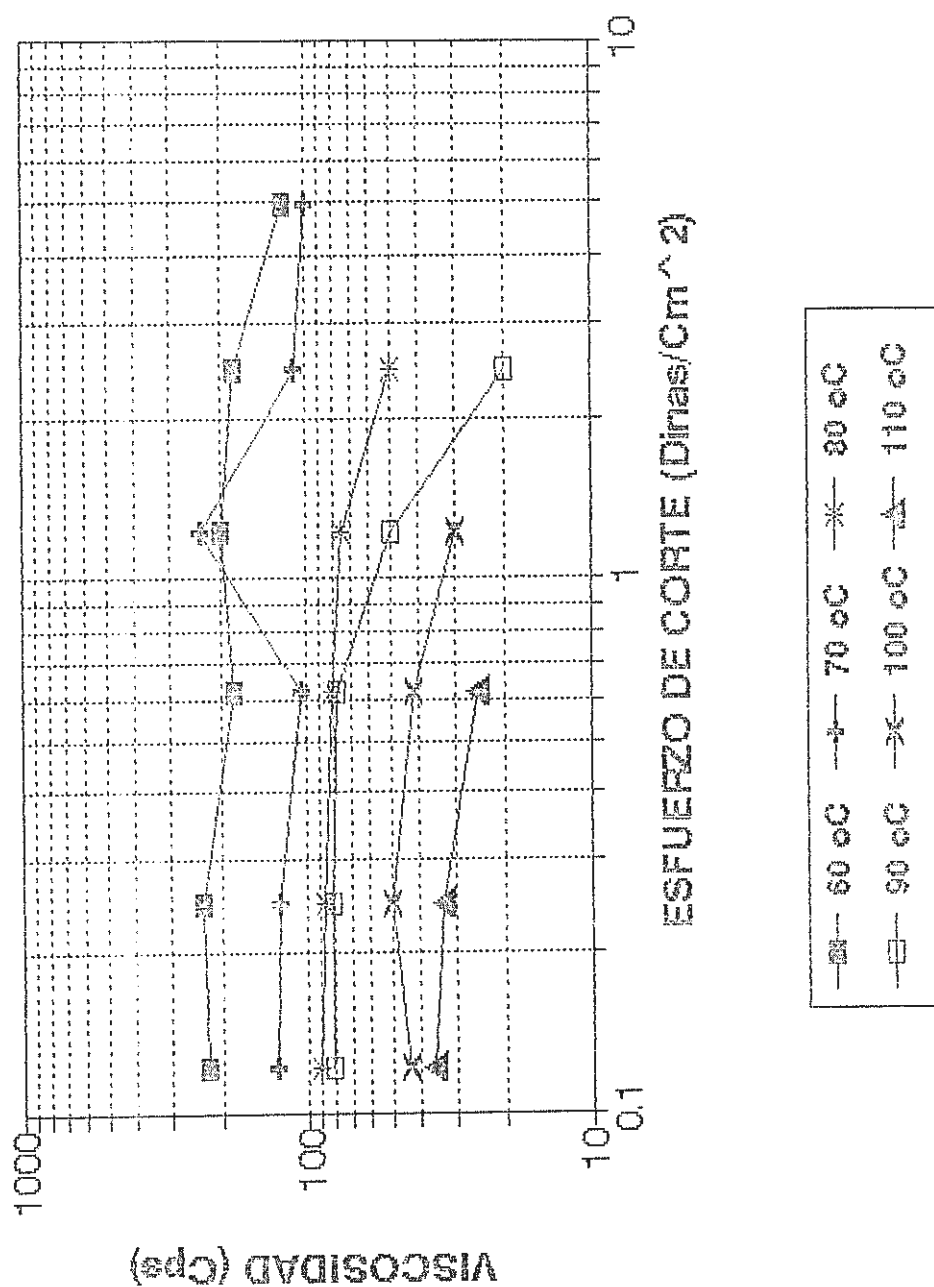
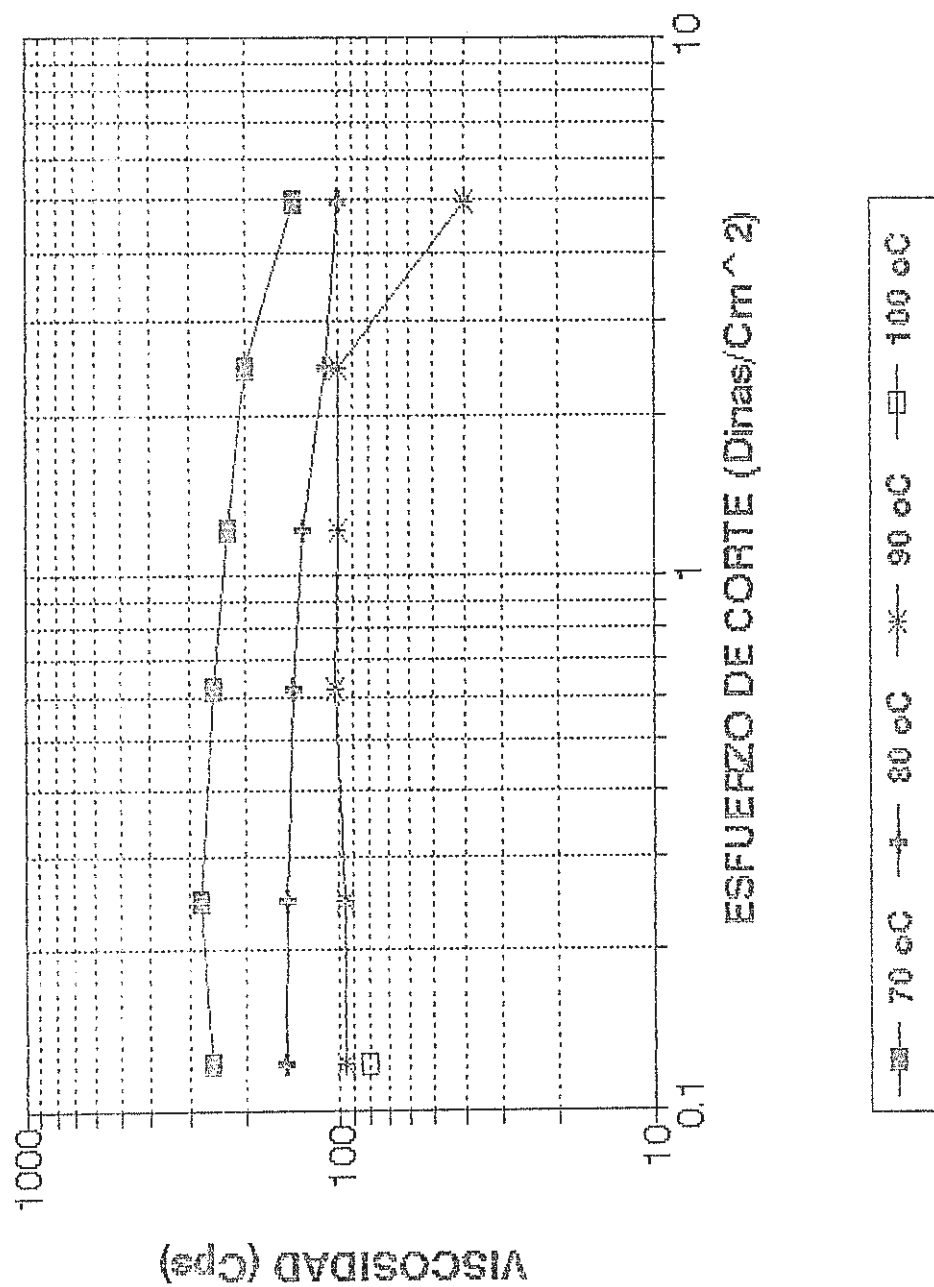


FIGURA 32. VISCOSIDAD-ESFUERZO DE CORTE
MEZCLAS



**FIGURA 33. VISCOSIDAD-VELOCIDAD DE CORTE
BUNKER @ 60 °C**

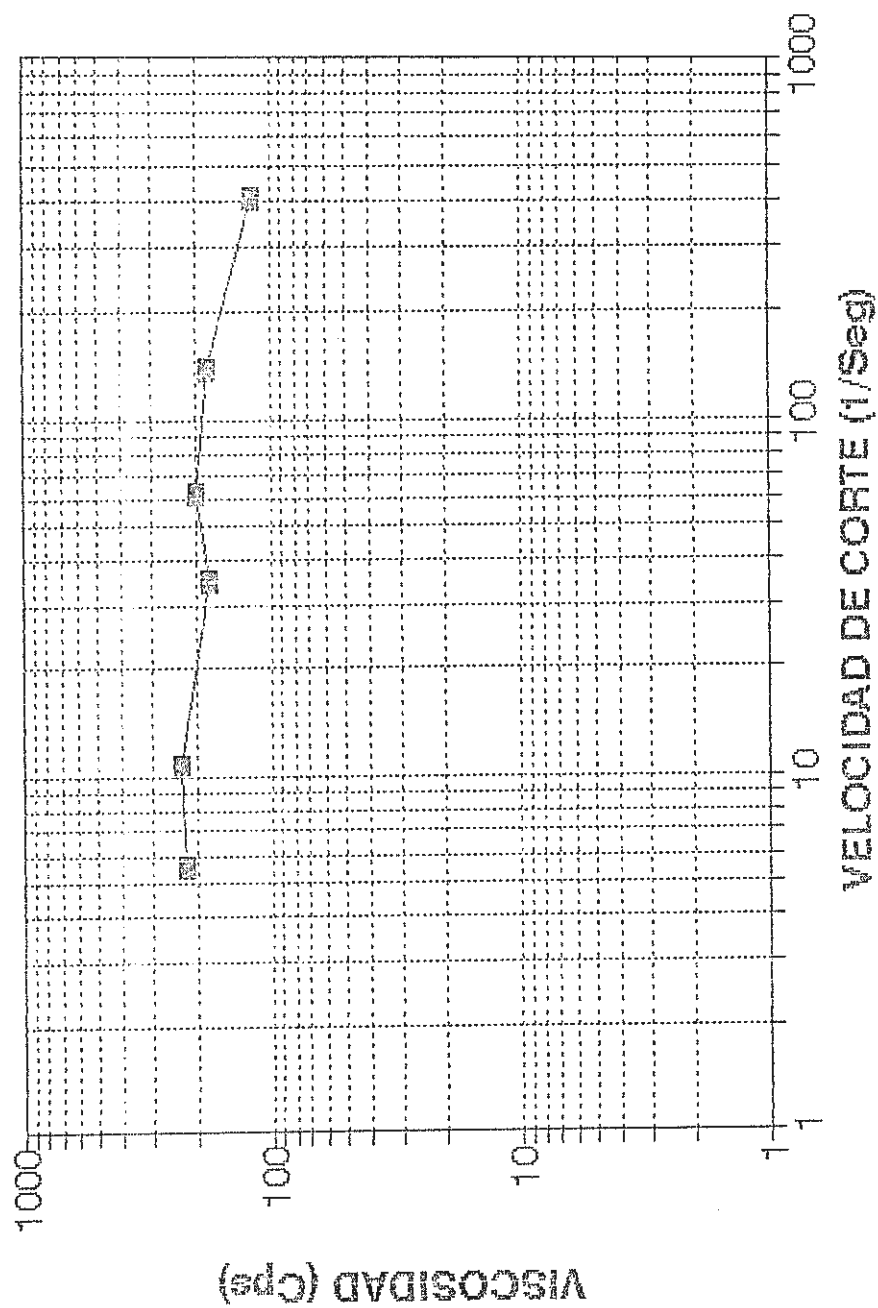


FIGURA 34. VISCOSIDAD-VELOCIDAD DE CORTE
BUNKER @ 70 °C

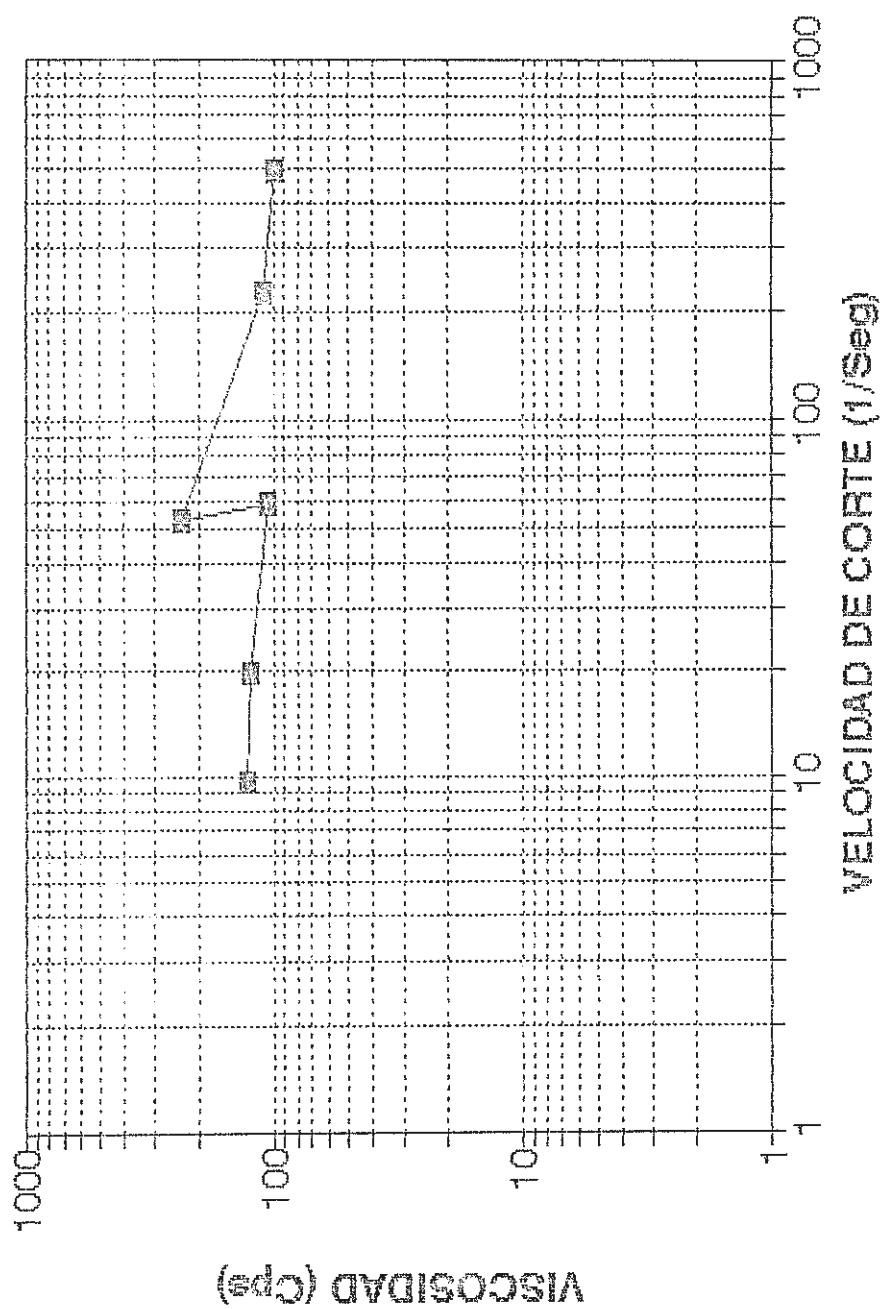


FIGURA 35. VISCOSIDAD-VELOCIDAD DE CORTE
BUNKER @ 80 °C

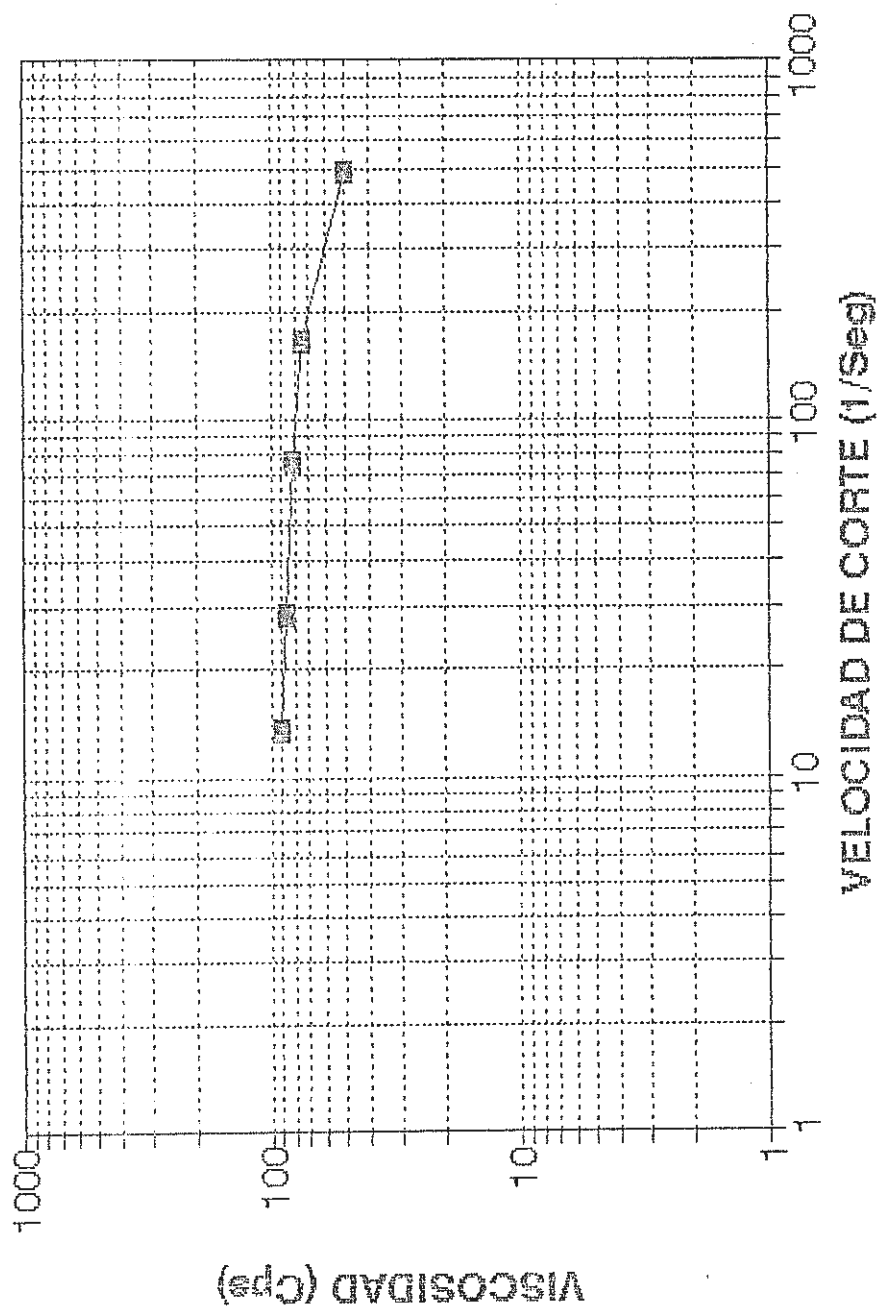


FIGURA 36. VISCOSIDAD-VELOCIDAD DE CORTE
BUNKER @ 90 °C

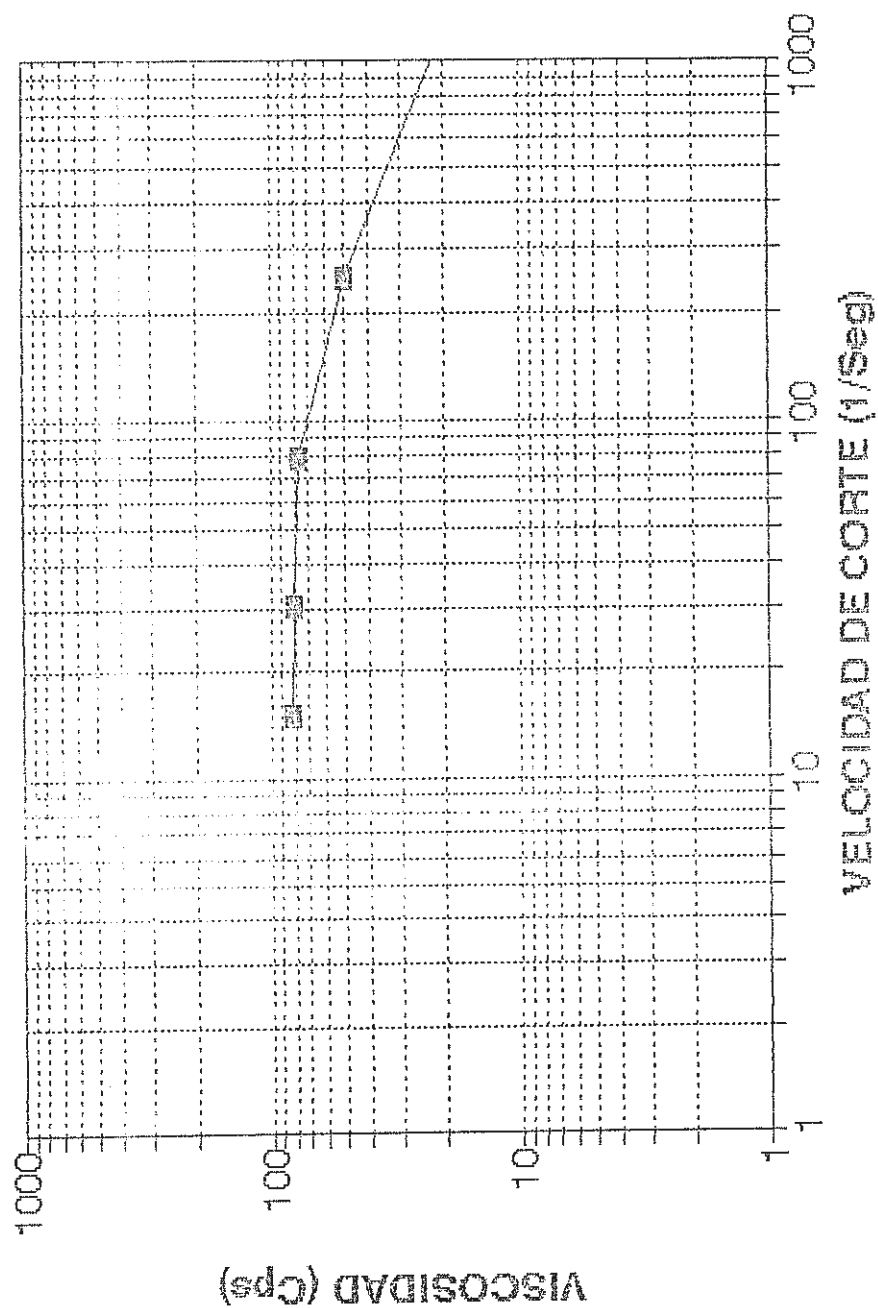


FIGURA 37. VISCOSIDAD-VELOCIDAD DE CORTE
BUNKER @ 100 oC

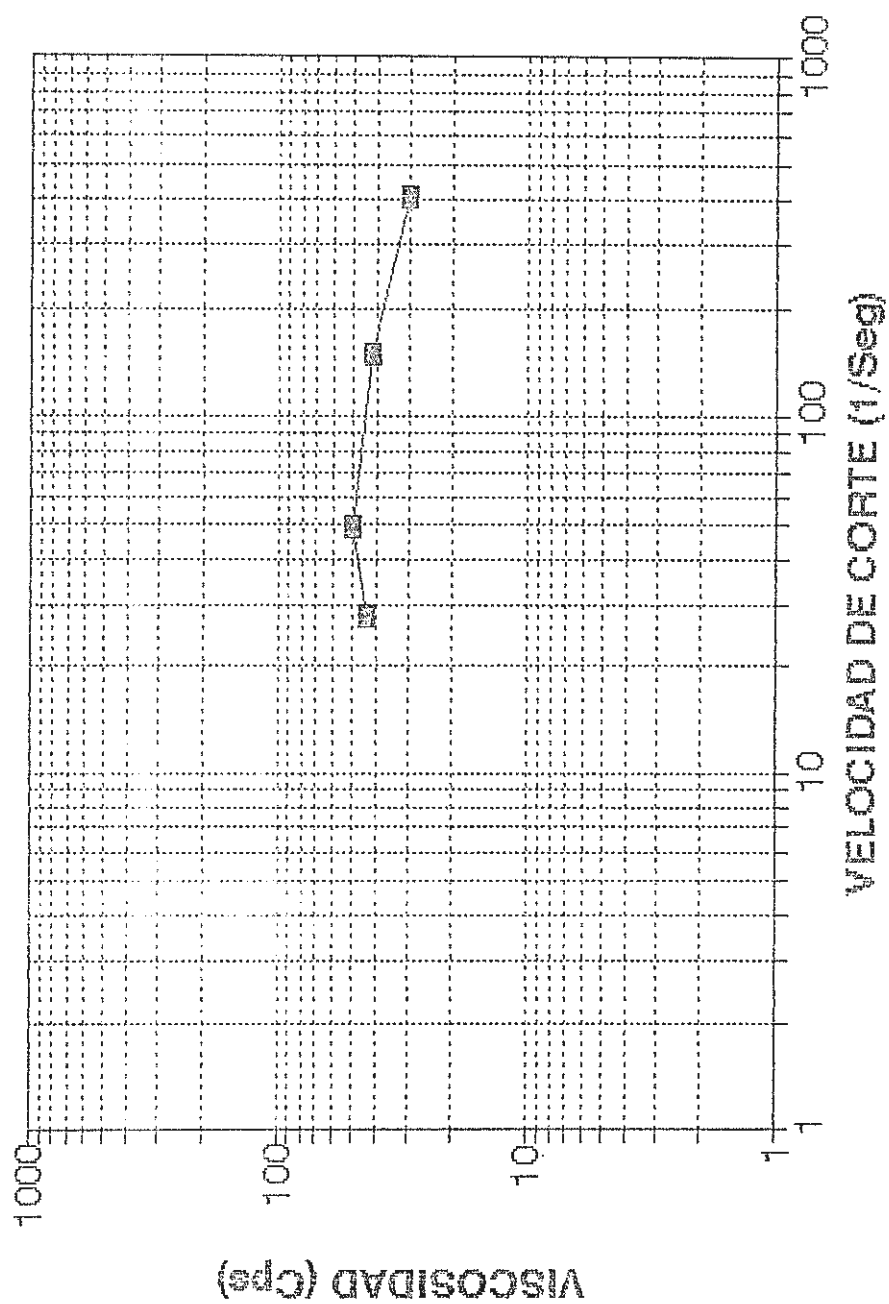


FIGURA 38. VISCOSIDAD-VELOCIDAD DE CORTE
BUNKER @ 110 °C

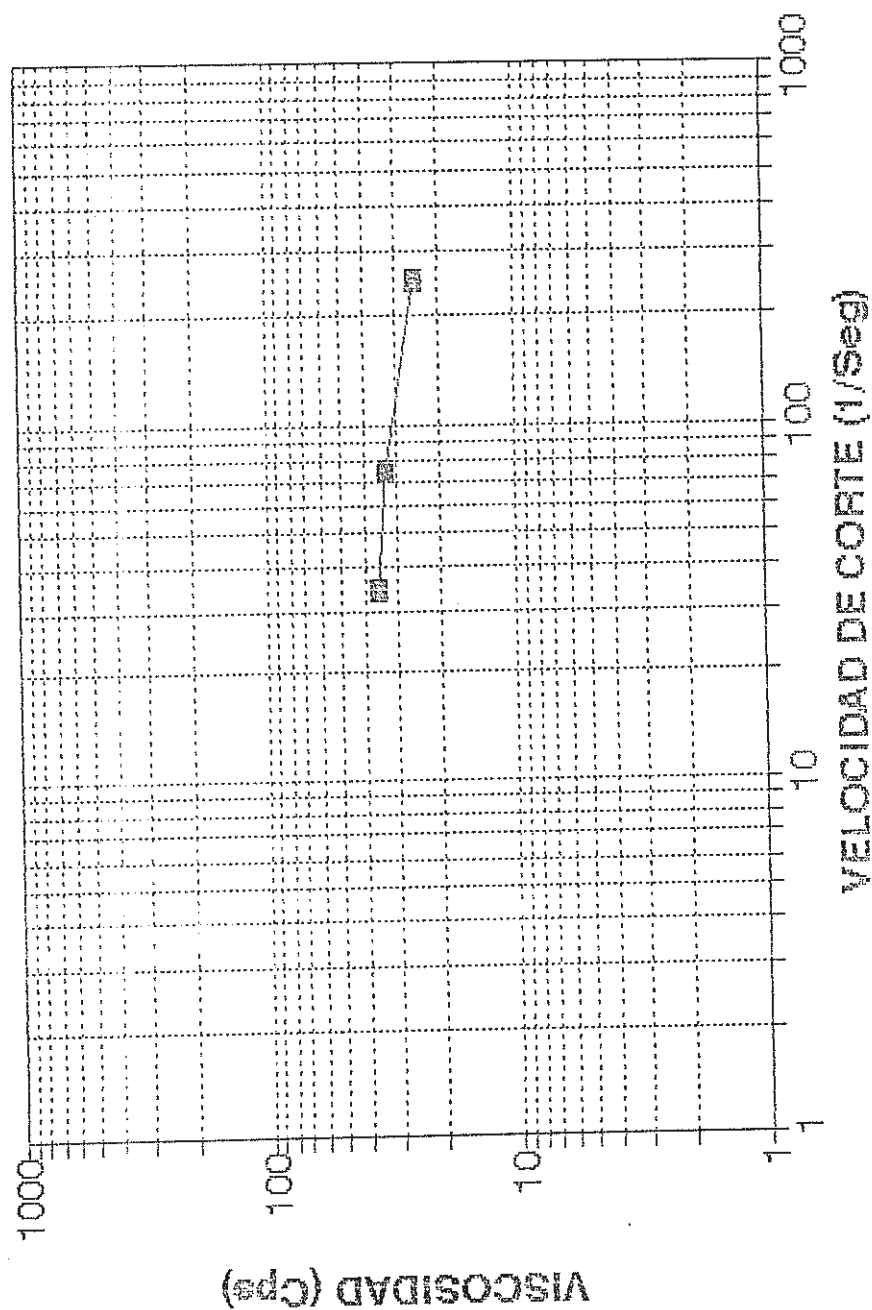
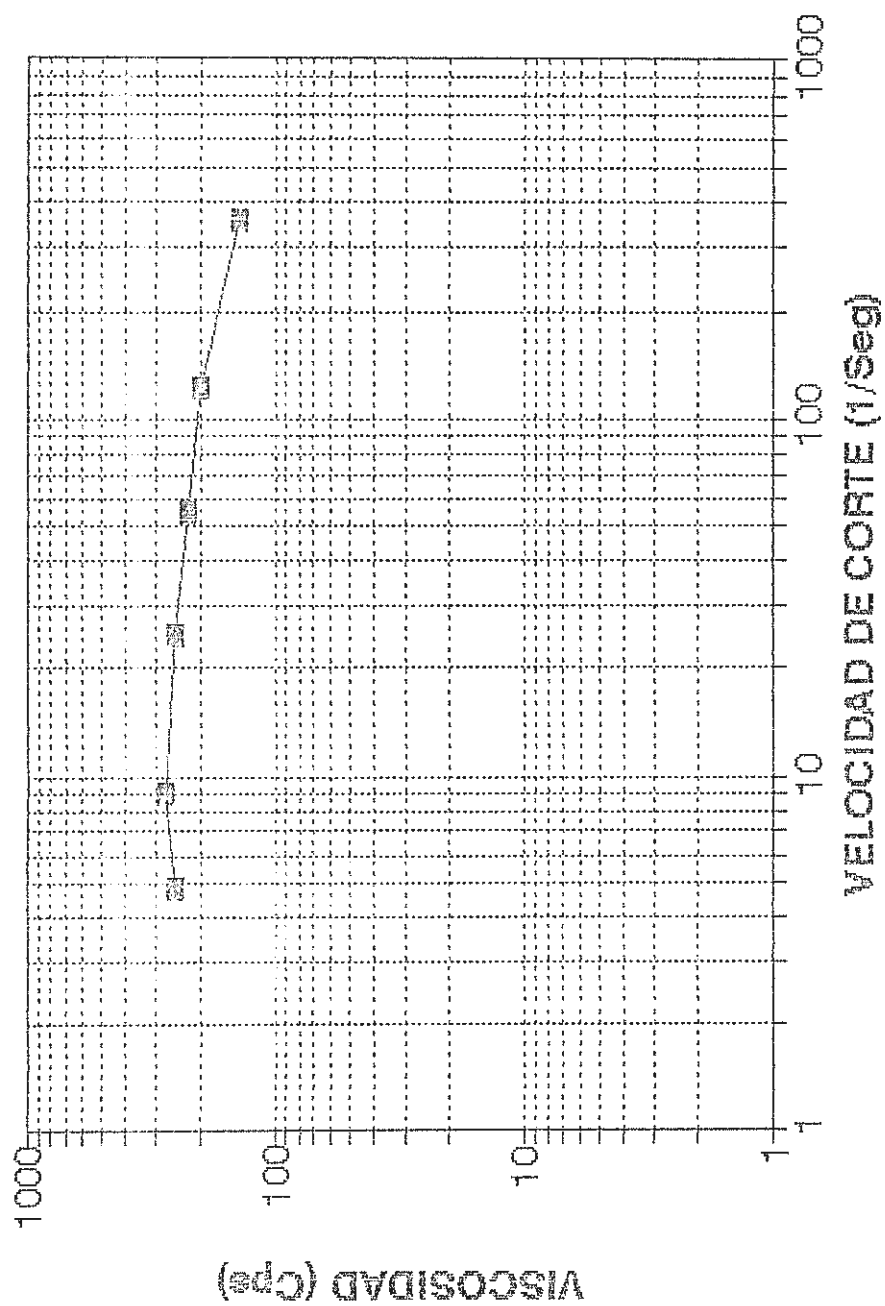


FIGURA 39. VISCOSIDAD-VELOCIDAD DE CORTE
MEZCLA-BUNKER @ 70 °C



ELASTICIDAD-VELOCIDAD DE CORTE
HEXCLAS @ 80 oC

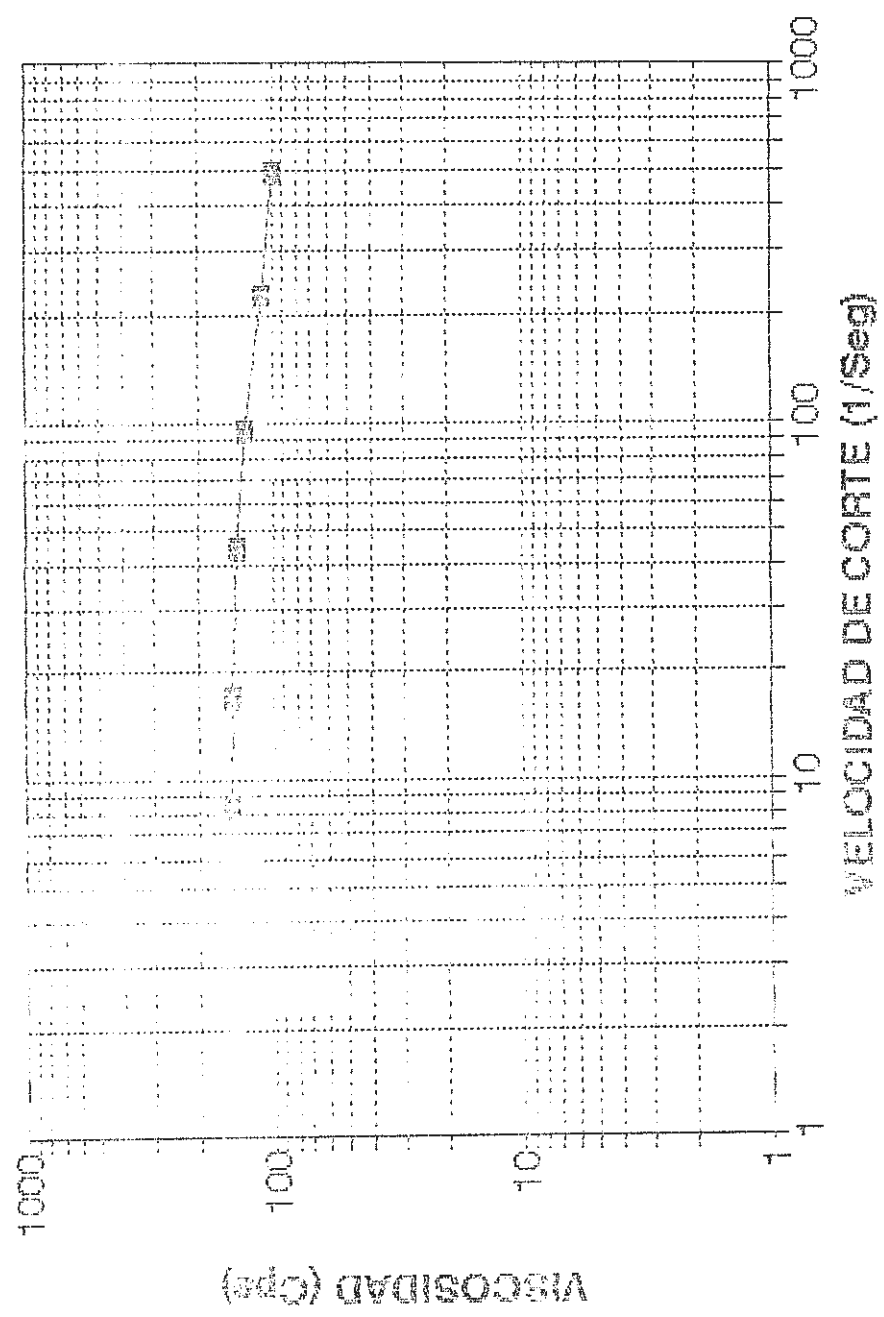


FIGURA 41. VISCOSIDAD-VELOCIDAD DE CORTE
MEZCLAS @ 90 °C

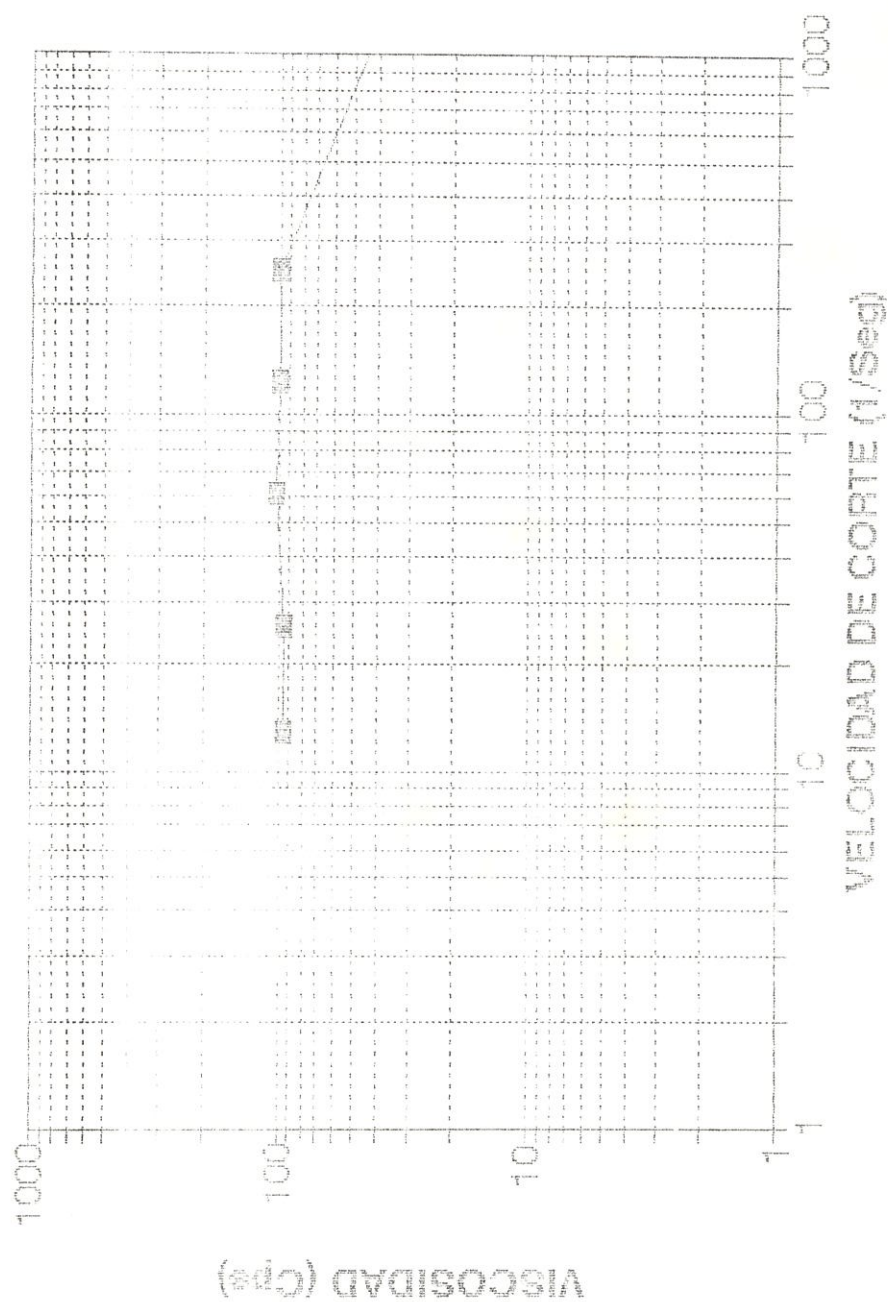
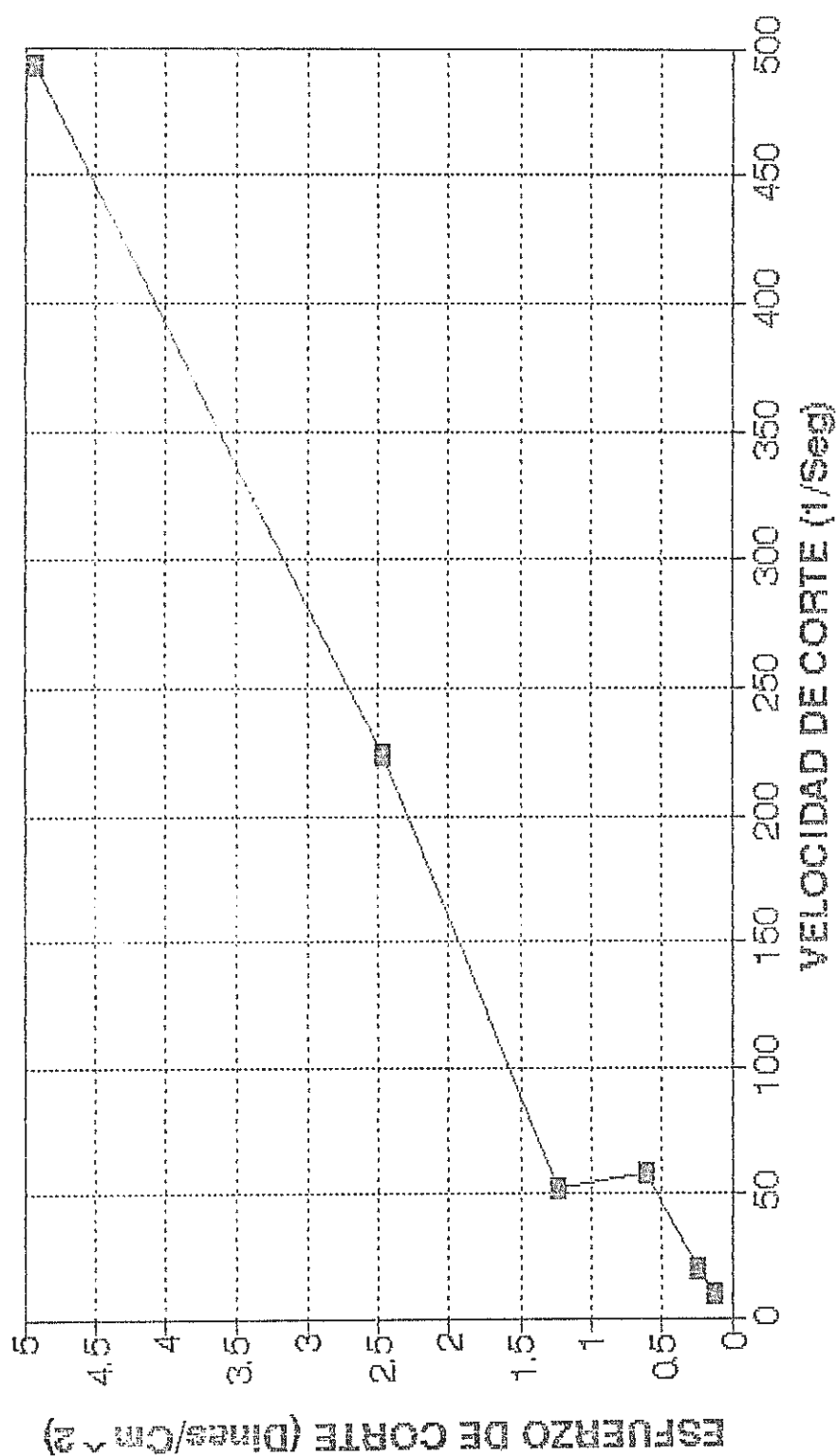


FIGURA 42. ESFUERZO-VELOCIDAD DE CORTE
BUNKER @ 70 °C



**FIGURA 43. ESFUERZO-VELOCIDAD DE CORTE
BUNKER @ 80 °C**

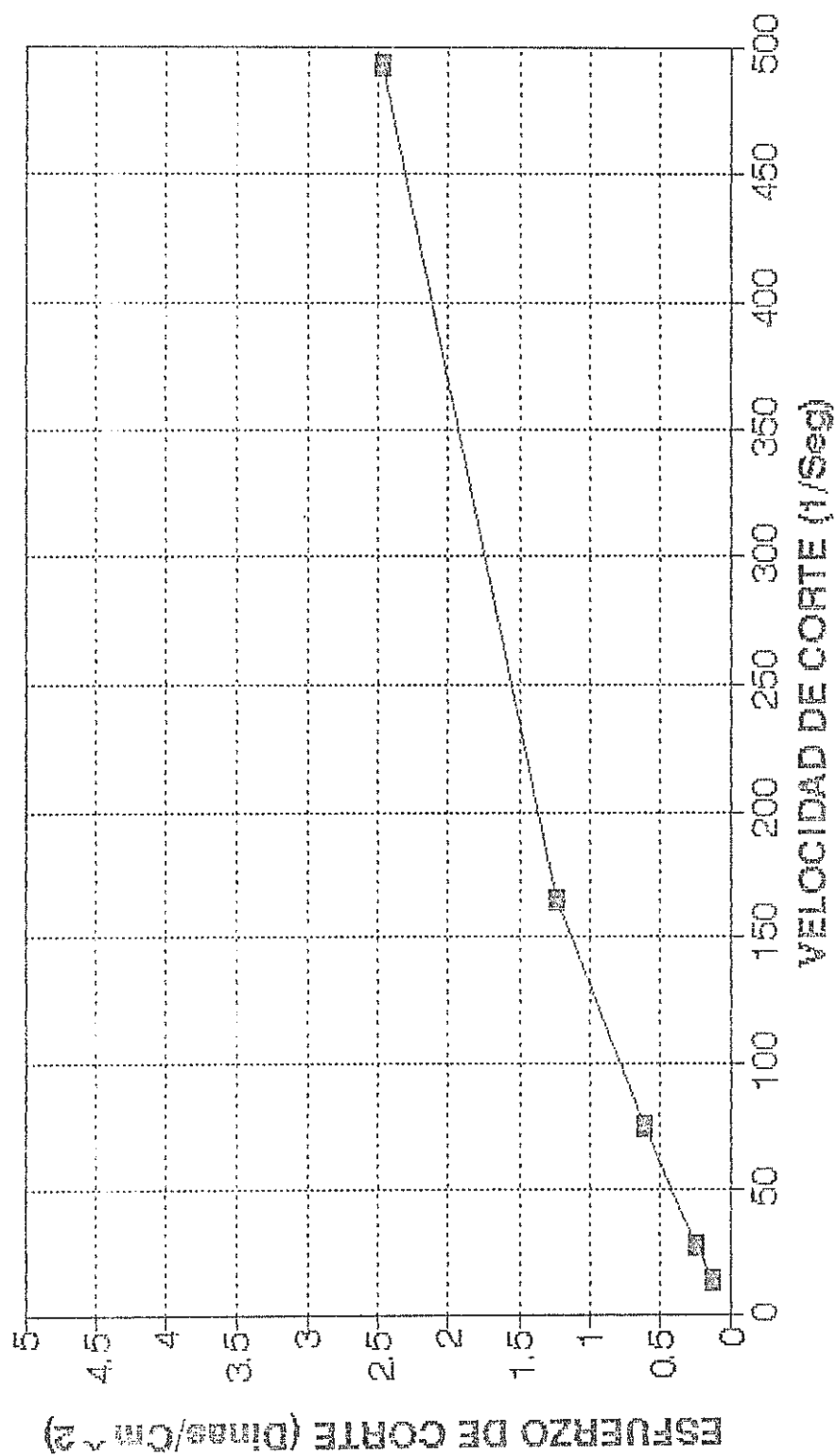
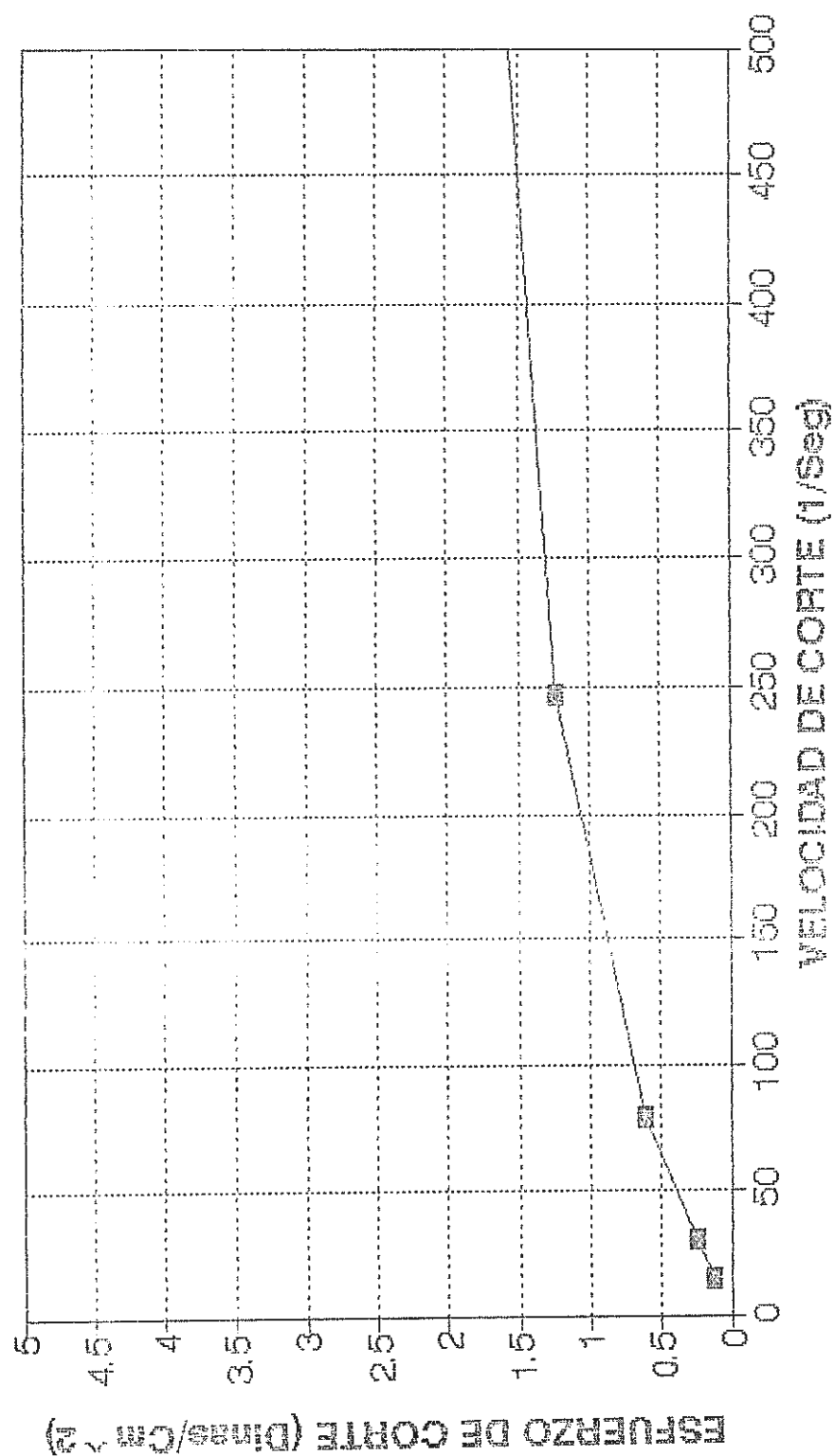
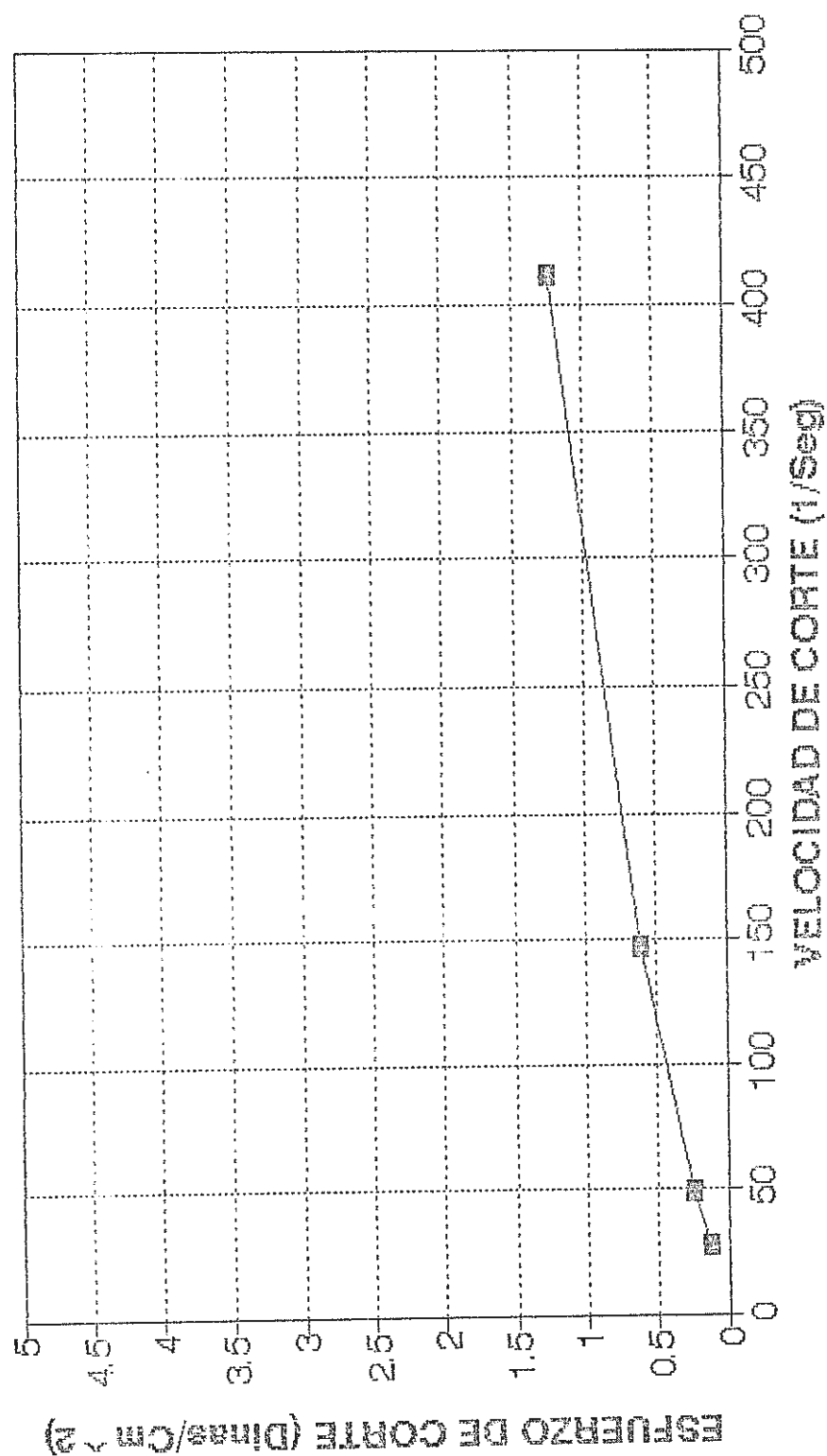


FIGURA 44. ESFUERZO-VELOCIDAD DE CORTE
BUNKER @ 90 °C



**FIGURA 45. ESFUERZO-VELOCIDAD DE CORTE
BUNKER @ 100 cc**



**FIGURA 46. ESFUERZO-VELOCIDAD DE CORTE
BUNKER @ 110 OC**

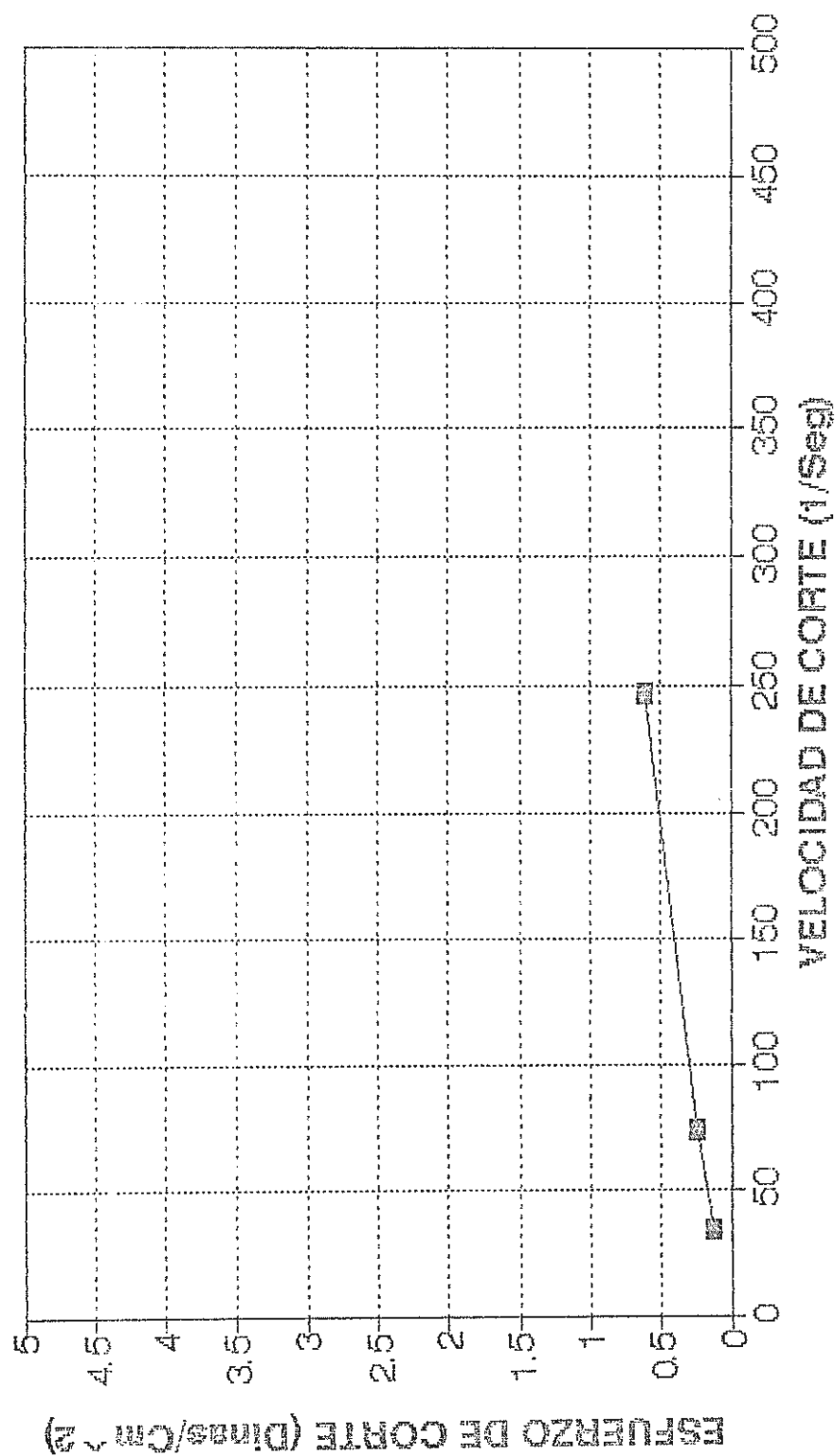


FIGURA 47. ESFUERZO-VELOCIDAD DE CORTE
MEZCLA @ 70 °C

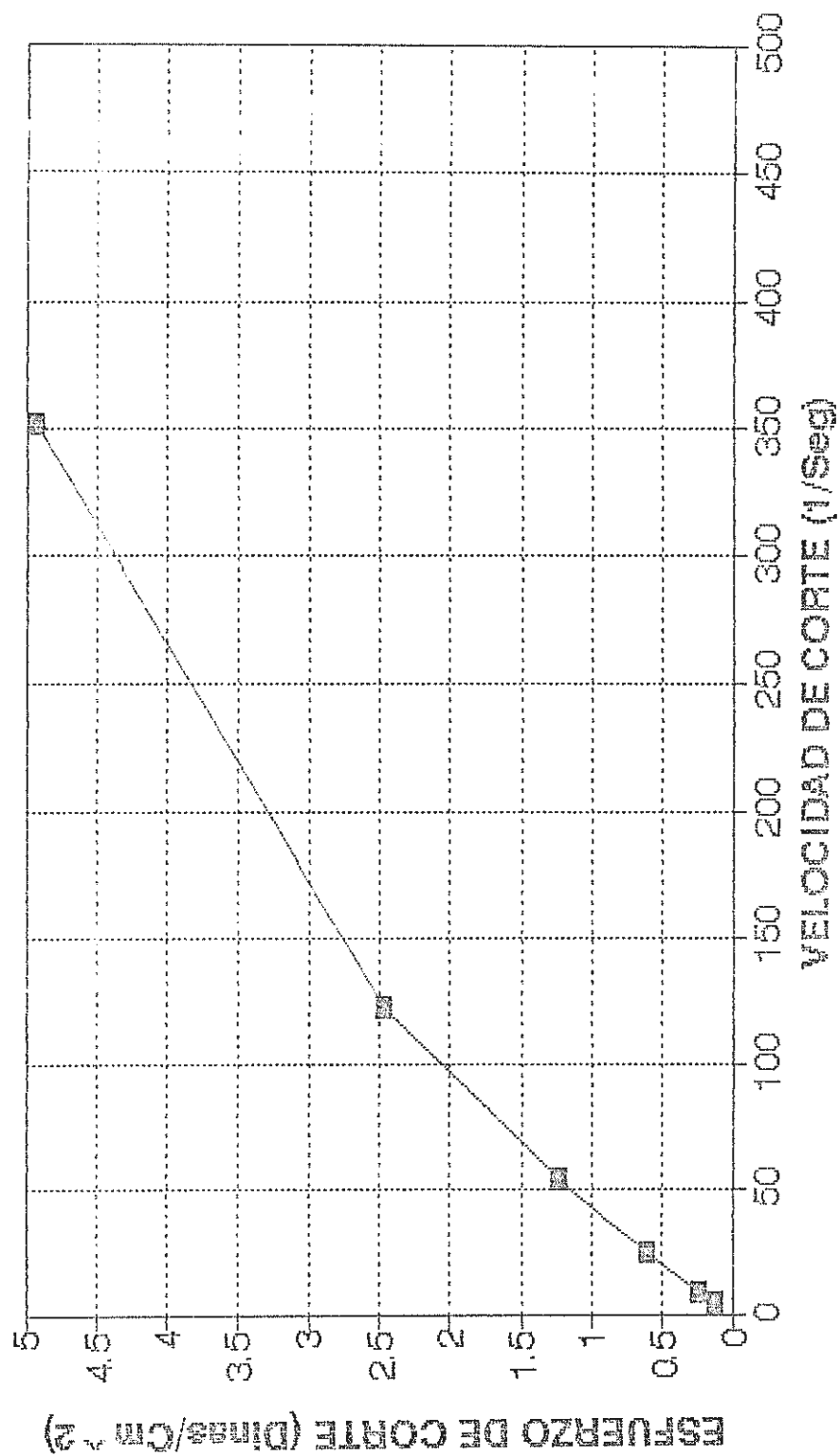


FIGURA 48. ESFUERZO-VELOCIDAD DE CORTE
MEZCLAS @ 80 °C

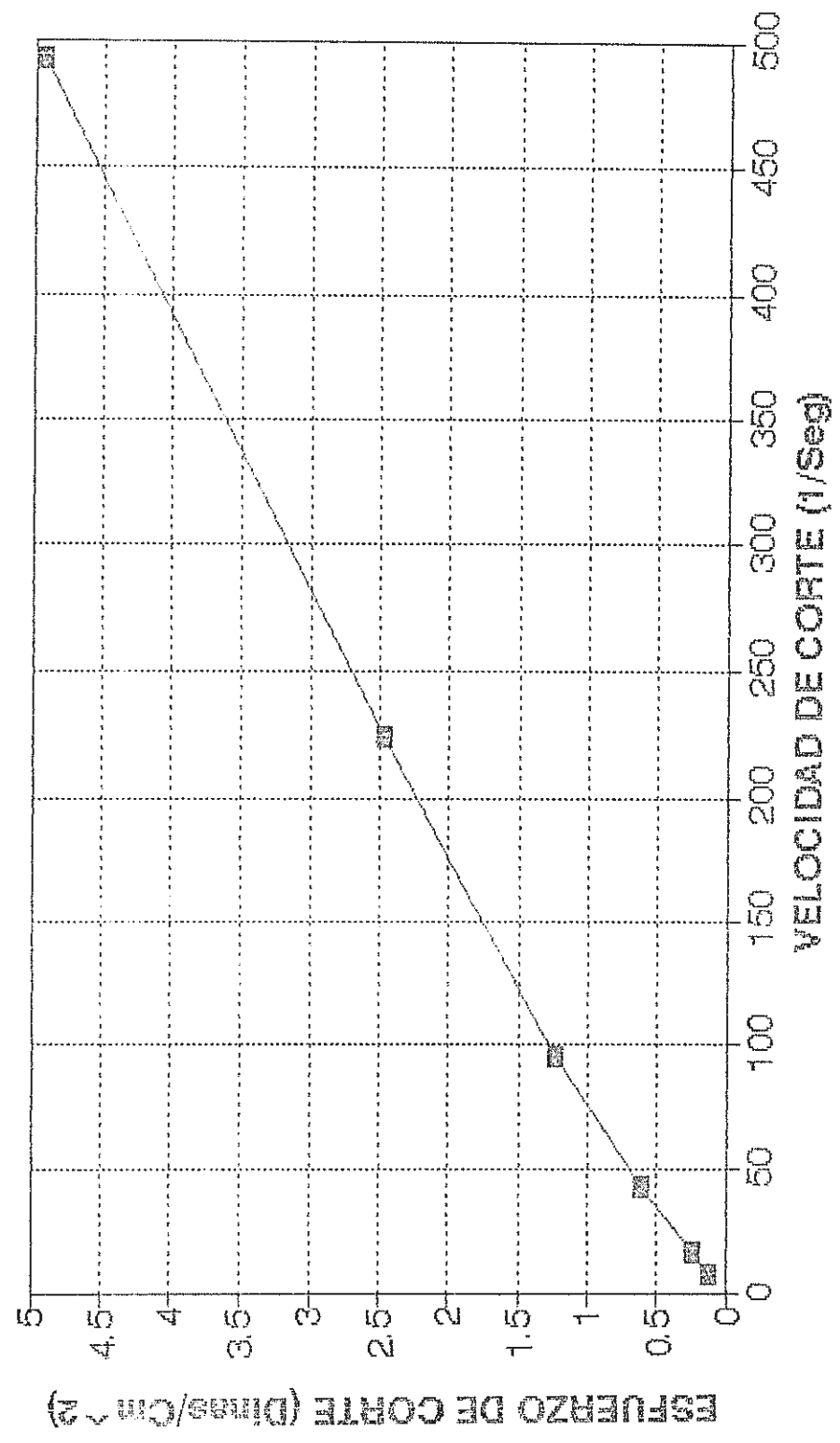
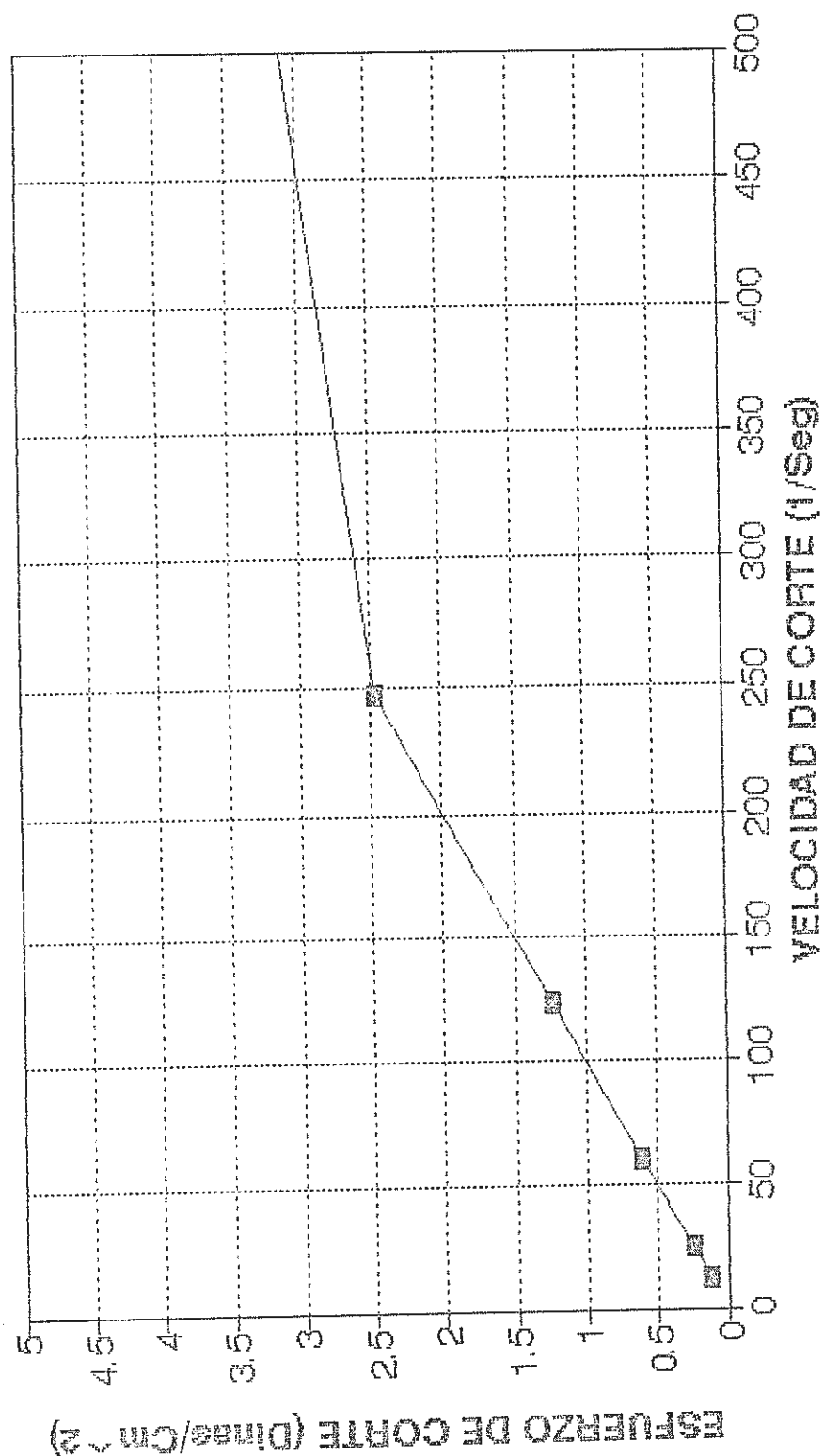
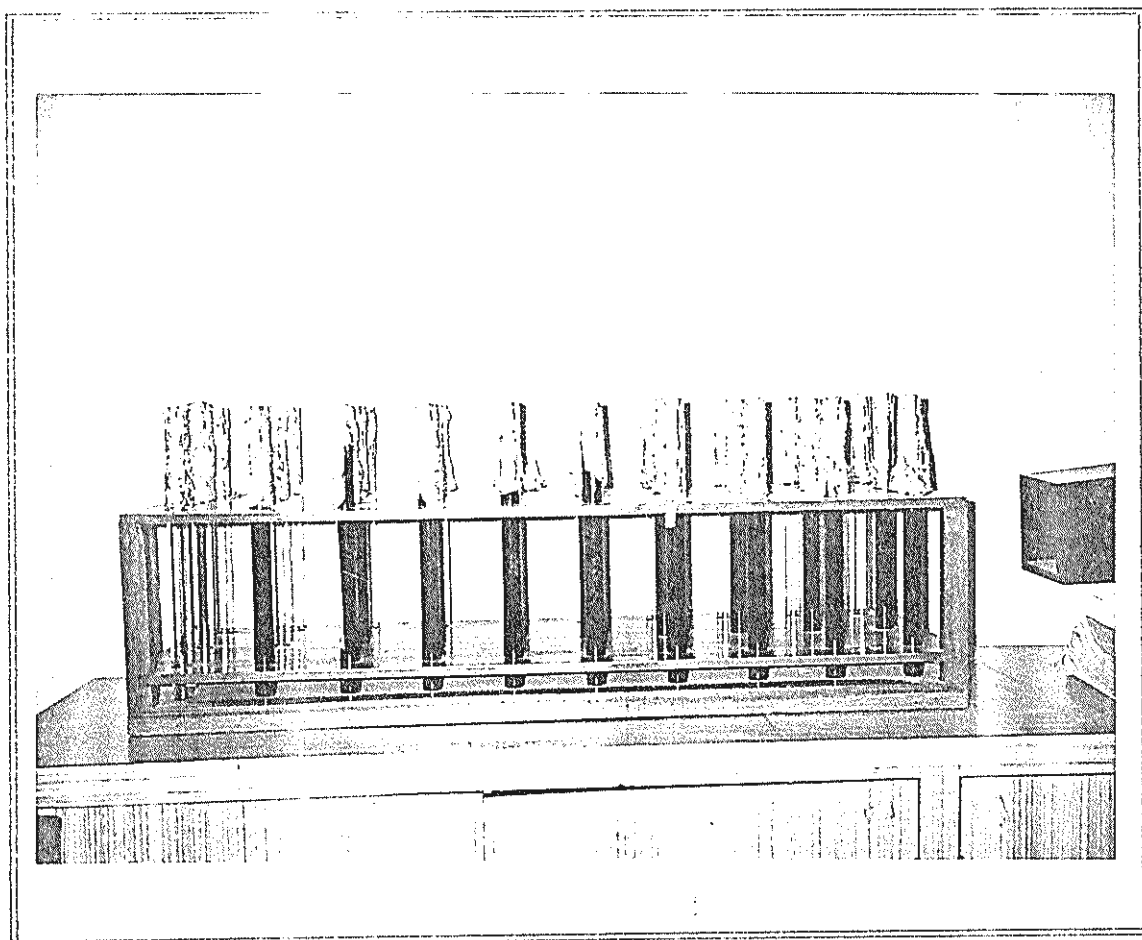


FIGURA 49. ESFUERZO-VELOCIDAD DE CORTE
MEZCLAS @ 90 °C

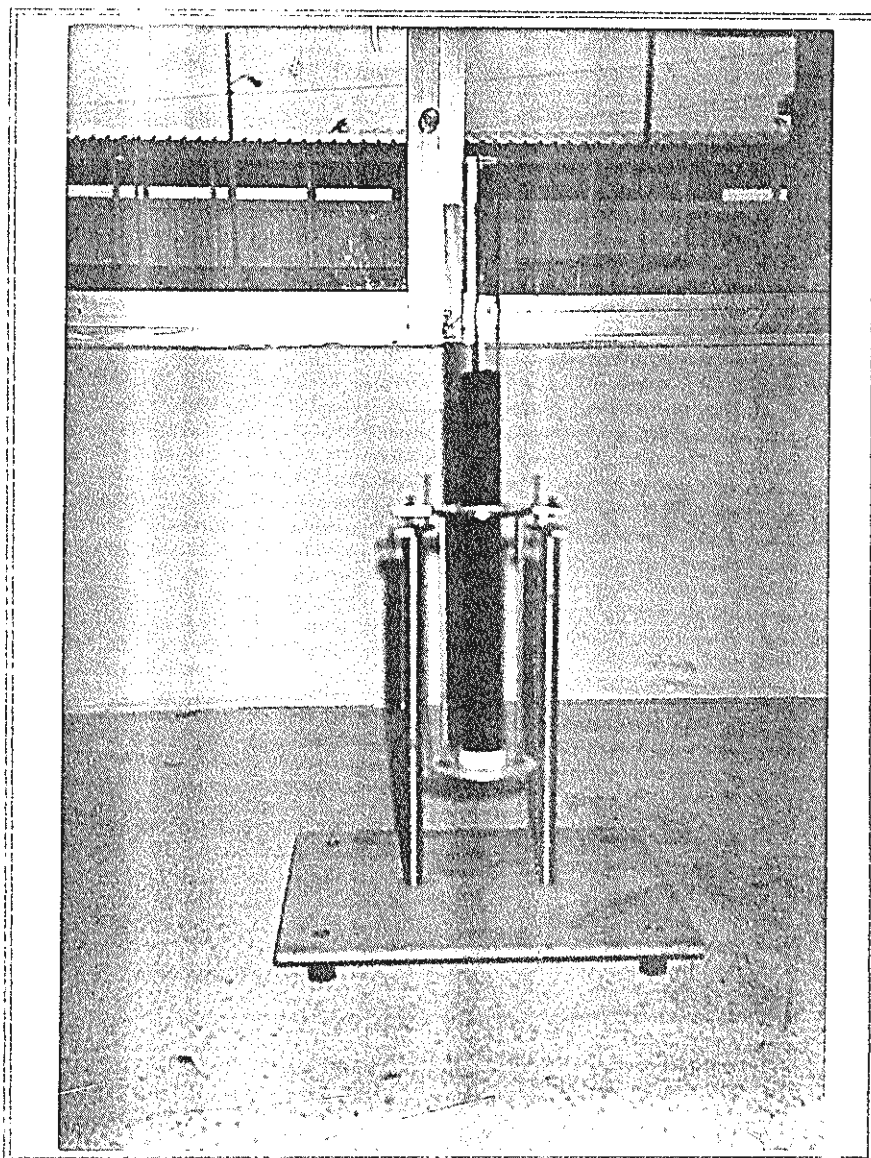


APENDICE C

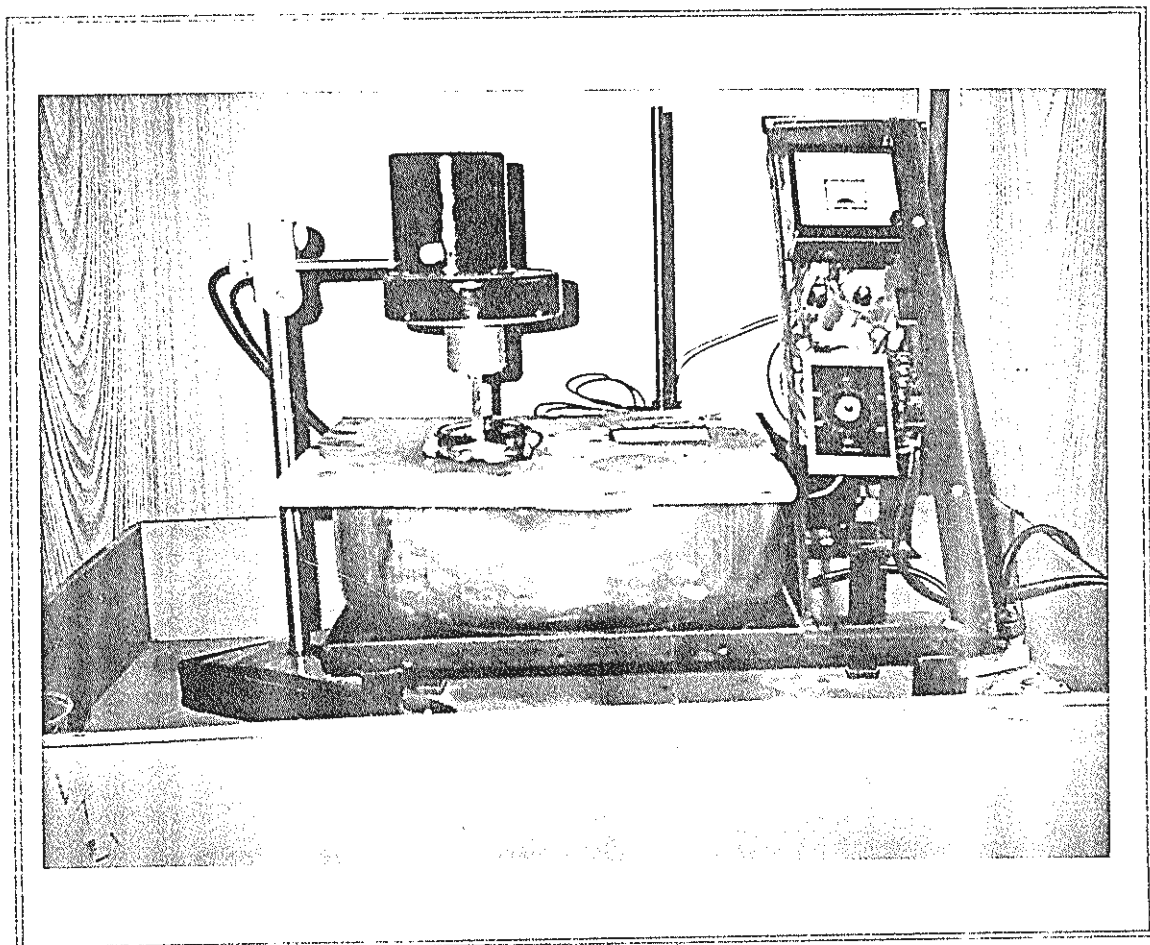
FOTOGRAFIAS DE EQUIPOS



FOTOGRAFIA 1. BANCO DE TUBOS



FOTOGRAFIA 2. PENDULO Y TUBO DE SEDIMENTACION



FOTOGRAFIA 3. TINA DE CALENTAMIENTO Y VISCOSÍMETRO
PARA ENSAYOS DE RHEOLOGIA

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Brown, A. Final Report of the General Motor Corporation
Pondered Coal-Oil Mixture Program. Agosto 1977.
- 2.- Ekman, J. H., et. al. Stability of Coal-Oil Mixture.
U.S. Department of Energy. First International
Symposium on COM. 1979.
- 3.- Hatano, M., Laboratory Tests and Pilot Plant. Electric
Power Development Company, Japan. First International
Symposium on COAL. 1979.
- 4.- Leffert, C.B., Properties and Behavior of Some Coal-Oil
Mixture. Wayne State University. First International
Symposium on COM. 1979.
- 5.- McMillen, J.H., et. al. Pendulum Method for Mesuring
Settling Velocities. Ind. & Eng. Che. Vol. 13, # 7.
July 15, 1940.
- 6.- Sabadell, A. J., Survey of Commercial Instrumentation
for the Continuous Measurement of Viscosity and Coal
Content of Coal-Oil Mixture. The Mitre Corporation,
Metrek Division 1st International Symposium COM, 1979.

- 7.- Scheffe, R. L. Development and evaluation of highly loaded Coal Slurry. Atlantic Research Corporation. First International Symposium on CDM. 1979.
- 8.- Veal, C. J., Well, D. R., Groszek, A. J., Stable Coal/Fuel oil Dispersions. Research Centre, Sunbury-on-Thames, England. First International Symposium on COAL, 1979.
- 9.- Patiño H., Pincay G., Investigación Experimental de la Estabilidad y Rheología de Mezclas biomasa-petróleo como sustituto parcial del Petróleo en aplicaciones térmicas, Proyecto 340-11 ESPOL-CONUEP, 1992.