

**UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA-**

**UNIDAD IZTAPALAPA**

152135

---

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA EN PROCESOS E HIDRAULICA**

---

CASA ABIERTA AL TIEMPO



**"ESTUDIO DE MEZCLADO EN UN TANQUE AGITADO  
Y SU EFECTO EN LA TRANSFERENCIA DE CALOR  
EN FLUIDOS NEWTONIANOS Y NO-NEWTONIANOS".**

**T E S I S**

QUE PRESENTA EL INGENIERO QUIMICO:  
LUIS MEDINA TORRES

PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRIA EN INGENIERIA QUIMICA

ASESOR:  
DR. FELIPE LOPEZ ISUNZA.

MEXICO, D.F.

1994.

---

---

## DEDICATORIAS

A MI PADRE LUIS  
POR SU EJEMPLO....  
MI GRATITUD Y CARÍÑO,  
YA QUE SUS PALABRAS DE ESTIMULO Y  
SOSTEN EN LOS MOMENTOS DIFICILES,  
HICIERON QUE CRECIERA LA INQUIETUD  
DE LA SUPERACION PERSONAL.

A GABY .....  
POR SU CARÍÑO, COMPRENSION Y  
APOYO, SOBRE TODO EN  
LOS TIEMPOS DIFICILES EN EL  
TRANSCURSO DE LA MAESTRIA.

A MIS HERMANOS  
GUILLERMO, JUAN, ROSA, FABY.  
Y  
FAMILIARES CERCANOS  
TIA FAY, CATA, MA. LUISA, ENRIQUE,  
JUAN, LALO, SOFIA, RAMON.....  
PRIMA PATI, DIANA, GABY, JUAN LUIS, ISRAEL,  
GERMAN, ALEX.....

QUE CON SU VALIOSO APOYO Y CARÍÑO  
CONTRIBUYERON A LA CULMINACION  
DE ESTA ETAPA DE MI VIDA.

A MIS AMIGOS

SERGIO, MARIO, BERNAL,  
LETY, OSCAR, ESTEBAN...

POR SU AMISTAD SIEMPRE COORDIAL  
Y SINCERA.

---

---

## **AGRADECIMIENTOS**

EXISTEN PERSONAS A LAS CUALES  
NO SOLO HAY QUE AGRADECERLES  
SINO ADMIRARLAS:  
AL DR. EDMUNDO BRITO DE LA FUENTE.....  
Y  
AL M.C. HUGO JIMENEZ ISLAS.....

POR SU GRAN CALIDAD HUMANA Y AMISTAD  
DESINTERESADA.

POR EL VALIOSO APOYO E INTERES  
EN LA REALIZACION DE LA MAESTRIA

AL DR. ENRICO MARTINEZ S.  
INDUSTRIAS NEGROMEX, S.A.

DE MANERA ESPECIAL:  
A LA UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA  
UNIDAD IZTAPALAPA.  
POR HABER CONTRIBUIDO EN MI FORMACION  
PROFESIONAL Y EN PARTICULAR:  
A MIS MAESTROS: DR. FELIPE LOPEZ ISUNZA,  
Y DR. TOMAS VIVEROS.  
POR SU VALIOSA ASESORIA Y AMISTAD EN EL  
DESARROLLO DEL PRESENTE TRABAJO.

A INDUSTRIAS NEGROMEX S.A.,  
POR LAS FACILIDADES BRINDADAS EN LA  
REALIZACION DE ESTE PROYECTO DE  
INVESTIGACION.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.  
FACULTAD DE QUIMICA EN ALIMENTOS  
POR EL APOYO EN EL TRABAJO  
EN PARTICULAR AL  
DR. EDUARDO BARZANA.

AL CONACyT POR EL APOYO ECONOMICO  
BRINDADO.

**A TODOS USTEDES:**  
**GRACIAS....**

---



| INDICE                   |                                                                                                                          | PAG |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| SIMBOLOGIA.              |                                                                                                                          |     |
| LISTA DE TABLAS.         |                                                                                                                          |     |
| LISTA DE FIGURAS.        |                                                                                                                          |     |
| RESUMEN                  |                                                                                                                          |     |
| <u>INTRODUCCION.</u>     |                                                                                                                          | i   |
| DEFINICION DEL PROBLEMA. |                                                                                                                          | iv  |
| Objetivo general.        |                                                                                                                          |     |
| Objetivos particulares.  |                                                                                                                          |     |
| CAPITULO I.-             | <u>PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO</u>                                                                  | 1   |
|                          | 1.1.-DETERMINACION DE LA VISCOSIDAD.                                                                                     | 2   |
|                          | 1.2.-TEORIA DE MEZCLADO.                                                                                                 | 14  |
|                          | 1.2.1.-Antecedentes.                                                                                                     |     |
|                          | 1.2.2.-Consumo de potencia en régimen Laminar.                                                                           |     |
|                          | 1.2.3.-Tiempo de mezclado y de circulación.                                                                              |     |
|                          | 1.3.-MODELOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN TANQUES AGITADOS.                                                              | 27  |
| CAPITULO II.-            | <u>DESARROLLO DE MODELOS DE TRANSPORTE DE CALOR Y MEZCLADO.</u>                                                          | 33  |
|                          | 2.1.-MODELOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MOMENTO.                                                                        | 34  |
|                          | 2.1.1.-Modelado de los patrones de flujo con fluidos de reología compleja.                                               |     |
|                          | 2.1.2.-Estrategias empleadas en la elaboración del modelo matemático.                                                    |     |
|                          | 2.2.-PLANTEAMIENTO DEL MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MOMENTO EN FORMA GENERAL.                                      | 37  |
|                          | 2.3.-DESARROLLO DEL MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MOMENTO.                                                          | 40  |
|                          | 2.3.1.-Desarrollo del modelo de transferencia de calor y momento para un perfil de velocidad angular.                    |     |
|                          | 2.3.2.-Desarrollo del modelo de transferencia de calor y momento para un perfil de velocidad angular y axial.            |     |
|                          | 2.3.3.-Desarrollo del modelo de transporte con perfiles de velocidad angular y axial para estimar los patrones de flujo. |     |
|                          | 2.4.-METODO DE SOLUCION DE LOS MODELOS DE TRANSPORTE EN FORMA NUMERICA.                                                  | 44  |

## INDICE

---

|                |                                                                                                                     |     |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| CAPITULO III.- | <u>METODOS Y MATERIALES.</u>                                                                                        | 47  |
|                | 3.1.-MONTAJE EXPERIMENTAL Y SUS ACCESORIOS.                                                                         | 48  |
|                | 3.2.-PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES.                                                                                 | 53  |
|                | 3.3.-CONDICIONES EXPERIMENTALES.                                                                                    | 54  |
|                | 3.3.1.-El procedimiento experimental.                                                                               |     |
| CAPITULO IV.-  | <u>ANALISIS DE RESULTADOS.</u>                                                                                      | 58  |
|                | 4.1.-RESULTADOS EXPERIMENTALES EN FLUIDOS NEWTONIANOS.                                                              | 59  |
|                | 4.2.-ANALISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES EN FLUIDOS NEWTONIANOS.                                                  | 76  |
|                | 4.3.-RESULTADOS EXPERIMENTALES EN FLUIDOS NO NEWTONIANOS.                                                           | 80  |
|                | 4.4.-ANALISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES EN FLUIDOS NO NEWTONIANOS.                                               | 97  |
|                | 4.5.-RESULTADOS DE LA SOLUCION NUMERICA EN FLUIDOS NEWTONIANOS.                                                     | 102 |
|                | 4.6.-ANALISIS DE LOS RESULTADOS PARA LA SOLUCION NUMERICA EN FLUIDOS NEWTONIANOS.                                   | 115 |
|                | 4.7.-RESULTADOS DE LA SOLUCION NUMERICA EN FLUIDOS NO NEWTONIANOS.                                                  | 119 |
|                | 4.8.-ANALISIS DE LOS RESULTADOS PARA LA SOLUCION NUMERICA EN FLUIDOS NO NEWTONIANOS.                                | 136 |
|                | 4.9.-RESULTADOS DE LA SOLUCION NUMERICA EN FLUIDOS NO NEWTONIANOS Y NO NEWTONIANOS EN FORMA DE LINEAS DE CORRIENTE. | 140 |
|                | 4.10.-ANALISIS DE RESULTADOS EN FLUIDOS NEWTONIANOS Y NO NEWTONIANOS EN FORMA DE LINEAS DE CORRIENTE.               | 143 |
|                | 4.11.-RESULTADOS DE LOS MODELOS EN FORMA DE LINEAS DE CORRIENTE PARA LOS PATRONES DE FLUJO.                         | 147 |
|                | 4.12.-ANALISIS DE RESULTADOS EN FORMA DE LINEAS DE CORRIENTE PARA LOS PATRONES DE FLUJO.                            | 152 |
| CAPITULO V.-   | <u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</u>                                                                              | 154 |
|                | REFERENCIAS.                                                                                                        | 158 |
|                | APENDICES.                                                                                                          | i   |

---

SIMBOLOGIA.

- A. Area del tanque,  $m^2$ .  
a, b, c, d, e, g. Constantes de correlación de patrones de flujo. Tabla [2.5]  
b. Ancho de una aleta, m.  
b. Constante de proporcionalidad.  
B. Densidad de la energía de interacción molecular.  
c. Espacio entre el extremo del impulsor y el diámetro interior del tanque, m.  
CTE. Constante geométrica del impulsor.  
Cp. Calor específico, J/Kg K.  
D. Diámetro del tanque, m.  
d. Diámetro del impulsor, m.  
d<sub>c</sub>. Diámetro de los tubos de enfriamiento, m.  
F<sub>i</sub> Fracción volumen del componente i.  
f. Coeficiente de régimen de flujo (laminar o turbulento).  
H. Altura del líquido en el tanque, m.  
h<sub>c</sub>. Coeficiente de transporte de calor en la película de fluidos en la pared de los tubos de enfriamiento,  $w/m^2 K$ .  
h<sub>j</sub>. Coeficiente de película de fluidos en la pared del tanque  $w/m^2 K$ .  
K. Conductividad térmica,  $w/m^2 K$ .  
K<sub>s</sub>. Constante de rapidez de corte del impulsor.  
K<sub>p</sub>. Constante de proporcionalidad en la correlación de potencia.  
L. Longitud del agitador, m.  
m. Parámetro del modelo de la ley de la potencia.  
M. Torque, N m.  
m. Masa, Kg.  
M<sub>w</sub>= Peso molecular del polímero.  
N. Rotación del impulsor, [1/seg].  
n. Parámetro de la Ley de la potencia, que indica el comportamiento pseudoplástico del fluido.  
n<sub>b</sub>. Número de paletas o impulsores.  
N. Rotación del impulsor, [rps].  
N<sub>i</sub>. Número de moles.  
R. Cte. universal de los gases.  
Ro. Radio del impulsor, m.  
R1. Radio interior del tanque, m.  
S. Relación de radio(Ro-R1) a Altura en el tanque(Z), adimensional.  
T. Temperatura, K.  
T<sub>f</sub>. Temperatura de fluido, °C.  
Ta. Temperatura del medio de enfriamiento °C.  
T. Temperatura del fluido a mezclar °C.  
V<sub>i</sub>. Los volúmenes de los componentes individuales.  
V. Volumen molar del los componentes.

---

## SIMBOLOGIA.

---

- w. Ancho de la hélice o del impulsor, m.  
Wp. Fracción peso del polímero.  
z. Altura de la base del tanque al nivel del liquido, m.

## SIMBOLOS GRIEGOS.

- n. Viscosidad aparente del modelo, kg/m\*s.  
 $\gamma$ . Velocidad de corte 1/seg.  
 $\theta$ . Angulo de inclinación de las paletas.  
 $\Theta$ . Temperatura adimensional,  $(T-T_a)/(T_f-T_a)$ .  
 $\mu$ . Viscosidad de fluidos Newtonianos, kg/m\*s.  
 $\mu_a$ . Viscosidad de fluidos no Newtonianos, kg/m\*s.  
 $\mu_w$ . Viscosidad a la temperatura de la pared, kg/m\*s.  
 $\nu_a$ . Viscosidad cinemática, m<sup>2</sup>/s.  
 $\rho$ . Densidad, Kg./m<sup>3</sup>.  
 $\mu_{sol}$ . Viscosidad del solvente, kg/m\*s.  
 $\theta$ . Relación adimensional de radios entre el impulsor y el tanque,  $(r_o)/(r_1-r_o)$ .  
 $\epsilon$ . Relación adimensional de la coordenada radial,  $(r-r_o)/(r_1-r_o)$ .  
 $\zeta$ . Relación de nivel del tanque y del impulsor,  $(z)/(z_{max})$ .  
 $\alpha$ . Relación adimensional entre los perfiles de velocidad máximos.  
 $\Gamma$ . Relación adimensional entre el angulo de giro de la hélice y la altura del tanque.  
 $v_\phi$ . Velocidad angular, (m/seg).  
 $v_z$ . Velocidad axial, (m/seg).

## NUMEROS ADIMENSIONALES.

- B. Número adimensional, relación geométrica del impulsor y el tanque,  $(c/D), (d/D), (w/D), (s/D)$ , etc.  
Bi. Número de Biot,  $(h_j \cdot D)/(K)$ .  
Br. Número de Brinkman adimensional,  $(n_a \cdot v_e^2 \max)/(k \cdot (T_a \cdot T_f))$ .  
De. Número de Deborah adimensional, (tiempo característico del material/tiempo de deformación)  
Nu. Número de Nusselt adimensional,  $(h \cdot L/K)$ .  
Pr. Número de Prandtl adimensional,  $(C_p \cdot \mu/K)$ .  
Re. Número de Reynolds adimensional,  $(\rho \cdot N \cdot D/\mu_a)$ .
-

## LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

---

### LISTA DE TABLAS:

PAG .

|                                                                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TABLA 1.0.-MODELOS DE VISCOSIDAD PARA FLUIDOS NEWTONIANOS<br>GENERALIZADOS (FGN).....                                                                                                                     | 7   |
| TABLA 1.1.-DATOS DE LOS VALORES DE LA CONSTANTE $K_s$ PARA<br>EL CALCULO DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACION<br>CON IMPULSORES HELICOIDALES(HS) EN TANQUES<br>AGITADOS.....                                    | 12  |
| TABLA 1.2.-CORRELACIONES EMPLEADAS EN EL CALCULO DEL CONSUMO<br>DE POTENCIA EN REGIMEN LAMINAR EN TANQUE<br>AGITADOS.....                                                                                 | 17  |
| TABLA 1.3.-DATOS DE TIEMPO DE MEZCLADO PARA IMPULSORES<br>HELICOIDALES (HRS) PREVIAMENTE PUBLICADOS.....                                                                                                  | 24  |
| TABLA 1.4.-CORRELACIONES EMPLEADAS EN EL CALCULO DEL<br>COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....                                                                                                        | 30  |
| TABLA 2.0.-CONDICIONES FRONTERA EMPLEADAS EN EL MODELO EN<br>DIRECCION ANGULAR.....                                                                                                                       | 41  |
| TABLA 2.1.-CONDICIONES FRONTERA EMPLEADAS EN EL MODELO<br>EN DIRECCION ANGULAR Y AXIAL.....                                                                                                               | 42  |
| TABLA 2.2.-CONDICIONES FRONTERA EMPLEADAS EN EL MODELO<br>EN DIRECCION ANGULAR Y AXIAL DE FLUJO.....                                                                                                      | 43  |
| TABLA 3.0.-CONDICIONES EXPERIMENTALES EN EL SISTEMA<br>DEMEZCLADO.....                                                                                                                                    | 55  |
| TABLA 4.0.-LOS GRADIENTES DE TEMPERATURA ALCANZADOS CON<br>DIFERENTE IMPULSOR EN DIFERENTES FLUIDOS.....                                                                                                  | 79  |
| TABLA 4.1.-LOS GRADIENTES DE TEMPERATURA ALCANZADOS CON<br>DIFERENTE IMPULSOR EN FLUIDOS NO NEWTONIANOS.....                                                                                              | 101 |
| TABLA 4.2.-LOS GRADIENTES DE TEMPERATURA ESTIMADOS CON<br>DIFERENTES FLUIDOS NEWTONIANOS A DIFERENTES<br>TEMPERATURAS A UNA POSICION AXIAL EN EL<br>TANQUE DE MEZCLADO CON UN IMPULSOR HELICOIDAL.....    | 118 |
| TABLA 4.3.-LOS GRADIENTES DE TEMPERATURA ESTIMADOS CON<br>DIFERENTES FLUIDOS NO NEWTONIANOS A DIFERENTES<br>TEMPERATURAS A UNA POSICION AXIAL EN EL<br>TANQUE DE MEZCLADO CON UN IMPULSOR HELICOIDAL..... | 139 |

---

## LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

---

|                                                                                                |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| TABLA III.1.-PARAMETROS DE OPERACION DEL MODELO ANGULAR.....                                   | ix   |
| TABLA III.2.-PARAMETROS DE OPERACION DEL MODELO ANGULAR .....                                  | x    |
| TABLA III.3.-PARAMETROS DE OPERACION DEL MODELO ANGULAR Y<br>AXIAL.....                        | xi   |
| TABLA III.4.-PARAMETROS DE OPERACION DEL MODELO ANGULAR<br>Y AXIAL.....                        | xii  |
| TABLA III.5.-PARAMETROS DE OPERACION DEL MODELO ANGULAR Y<br>AXIAL PARA PATRONES DE FLUJO..... | xiii |
| TABLA III.6.-PARAMETROS DE OPERACION DEL MODELO ANGULAR<br>Y AXIAL PARA PATRONES DE FLUJO..... | xiv  |

---

## LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

---

### LISTA DE FIGURAS:

|                                                                                                                                 | PAG. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| FIGURA i.0.- CURVA QUE REPRESENTA LOS CAMBIOS DE VISCOSIDAD EN DIFERENTES TIPOS DE POLIMERIZACIONES CON TRANSFERENCIA DE CALOR. | iii  |
| FIGURA 1.0.- COMPORTAMIENTO DE UN MATERIAL A UNA DEFORMACION DE CORTE SIMPLE.                                                   | 3    |
| FIGURA 1.1.- REPRESENTACION DEL COMPORTAMIENTO PSEUDOPLASTICO.                                                                  | 5    |
| FIGURA 1.2.- PATRONES DE FLUJO REPORTADOS PARA IMPULSORES HELICOIDALES.                                                         | 11   |
| FIGURA 1.3.- CONSUMO DE POTENCIA VS. NUMERO DE REYNOLDS.                                                                        | 19   |
| FIGURA 1.4.- EFECTO DEL CONSUMO DE POTENCIA EN EL ESPACIO ANULAR.                                                               | 21   |
| FIGURA 1.5.- EFECTO DEL TIEMPO DE MEZCLADO EN FUNCION DEL NUMERO DE REYNOLDS.                                                   | 23   |
| FIGURA 1.6.- DATOS REPORTADOS DE LA ENERGIA DE MEZCLADO CON DIFERENTES IMPULSORES.                                              | 26   |
| FIGURA 2.0.- PRESENTACION DEL MALLEO REQUERIDO PARA UN ESTUDIO DE SIMULACION NUMERICA DE MEZCLADO EN TRES DIMENSIONES.          | 36   |
| FIGURA 3.0.- EQUIPO DE MEZCLADO EXPERIMENTAL EMPLEADO.                                                                          | 49   |
| FIGURA 3.1.- TIPO DE IMPULSORES EMPLEADOS EN EL SISTEMA.                                                                        | 51   |
| FIGURA 3.2.- DIMENSIONES DEL IMPULSOR HELICOIDAL EMPLEADO.                                                                      | 52   |
| FIGURA 3.3.- REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL ARREGLO EXPERIMENTAL.                                                               | 57   |

---

---

---

## LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

---

---

### LISTA DE GRAFICAS:

|                                                                                                             | PAG |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| GRAFICA 4.1.- CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO SILICON OIL<br>IMPULSOR TIPO PALETA A 60 RPM.                     | 60  |
| GRAFICA 4.2.- CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO SILICON OIL<br>IMPULSOR TIPO PALETA A 70 RPM.                     | 61  |
| GRAFICA 4.3.- CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO SILICON OIL<br>IMPULSOR TIPO PALETA A 80 RPM.                     | 62  |
| GRAFICA 4.4.- CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO SILICON OIL<br>IMPULSOR TIPO PALETA A 100 RPM.                    | 63  |
| GRAFICA 4.5.- CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO SILICON OIL<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 60 RPM.                 | 64  |
| GRAFICA 4.6.- CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO SILICON OIL<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 70 RPM.                 | 65  |
| GRAFICA 4.7.- CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO SILICON OIL<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 80 RPM.                 | 66  |
| GRAFICA 4.8.- CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO SILICON OIL<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 100 RPM.                | 67  |
| GRAFICA 4.9.- CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO GLICEROL<br>IMPULSOR TIPO PALETA A 60 RPM.                        | 68  |
| GRAFICA 4.10.- CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO GLICEROL<br>IMPULSOR TIPO PALETA A 70 RPM.                       | 69  |
| GRAFICA 4.11.- CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO GLICEROL<br>IMPULSOR TIPO PALETA A 80 RPM.                       | 70  |
| GRAFICA 4.12.- CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO GLICEROL<br>IMPULSOR TIPO PALETA A 100 RPM.                      | 71  |
| GRAFICA 4.13.- CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO GLICEROL<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 60 RPM.                   | 72  |
| GRAFICA 4.14.- CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO GLICEROL<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 70 RPM.                   | 73  |
| GRAFICA 4.15.- CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO GLICEROL<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 80 RPM.                   | 74  |
| GRAFICA 4.16.- CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO GLICEROL<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 100 RPM.                  | 75  |
| GRAFICA 4.17.- CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 11.5 %<br>IMPULSOR TIPO PALETA A 60 RPM. | 81  |
| GRAFICA 4.18.- CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 11.5 %<br>IMPULSOR TIPO PALETA A 70 RPM. | 82  |
| GRAFICA 4.19.- CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 11.5 %<br>IMPULSOR TIPO PALETA A 80 RPM. | 83  |

---

---

---

---

**LISTA DE TABLAS Y FIGURAS**

---

---

|                |                                                                                                   |     |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| GRAFICA 4.20.- | CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 11.5 %<br>IMPULSOR TIPO PALETA A 100 RPM.     | 84  |
| GRAFICA 4.21.- | CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 11.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 60 RPM.  | 85  |
| GRAFICA 4.22.- | CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 11.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 70 RPM.  | 86  |
| GRAFICA 4.23.- | CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 11.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 80 RPM.  | 87  |
| GRAFICA 4.24.- | CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 11.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 100 RPM. | 88  |
| GRAFICA 4.25.- | CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 14.5 %<br>IMPULSOR TIPO PALETA A 60 RPM.      | 89  |
| GRAFICA 4.26.- | CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 14.5 %<br>IMPULSOR TIPO PALETA A 70 RPM.      | 90  |
| GRAFICA 4.27.- | CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 14.5 %<br>IMPULSOR TIPO PALETA A 80 RPM.      | 91  |
| GRAFICA 4.28.- | CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 14.5 %<br>IMPULSOR TIPO PALETA A 100 RPM.     | 92  |
| GRAFICA 4.29.- | CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 14.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 60 RPM.  | 93  |
| GRAFICA 4.30.- | CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 14.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 70 RPM.  | 94  |
| GRAFICA 4.31.- | CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 14.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 80 RPM.  | 95  |
| GRAFICA 4.32.- | CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 14.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 100 RPM. | 96  |
| GRAFICA 4.33.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO SILICON OIL<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 60 RPM Y 80 C.               | 103 |

---

---

## LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

|                |                                                                                                        |     |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| GRAFICA 4.34.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO SILICON OIL<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 70 RPM Y 80 C.                    | 104 |
| GRAFICA 4.35.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO SILICON OIL<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 80 RPM Y 80 C.                    | 105 |
| GRAFICA 4.36.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO SILICON OIL<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 60 RPM Y 25 C.                    | 106 |
| GRAFICA 4.37.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO SILICON OIL<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 70 RPM Y 25 C.                    | 107 |
| GRAFICA 4.38.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO SILICON OIL<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 80 RPM Y 25 C.                    | 108 |
| GRAFICA 4.39.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO GLICEROL<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 60 RPM Y 80 C.                       | 109 |
| GRAFICA 4.40.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO GLICEROL<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 70 RPM Y 80 C.                       | 110 |
| GRAFICA 4.41.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO GLICEROL<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 80 RPM Y 80 C.                       | 111 |
| GRAFICA 4.42.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO GLICEROL<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 60 RPM Y 25 C.                       | 112 |
| GRAFICA 4.43.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO GLICEROL<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 70 RPM Y 25 C.                       | 113 |
| GRAFICA 4.44.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO GLICEROL<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 80 RPM Y 25 C.                       | 114 |
| GRAFICA 4.45.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 11.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 30 RPM Y 75 C. | 120 |
| GRAFICA 4.46.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 11.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 60 RPM Y 75 C. | 121 |
| GRAFICA 4.47.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 11.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 70 RPM Y 75 C. | 122 |
| GRAFICA 4.48.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 11.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 80 RPM Y 75 C. | 123 |
| GRAFICA 4.49.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 11.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 30 RPM Y 25 C. | 124 |
| GRAFICA 4.50.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 11.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 60 RPM Y 25 C. | 125 |
| GRAFICA 4.51.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 11.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 70 RPM Y 25 C. | 126 |

---

---

**LISTA DE TABLAS Y FIGURAS**

---

---

|                |                                                                                                        |     |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| GRAFICA 4.52.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 11.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 80 RPM Y 25 C. | 127 |
| GRAFICA 4.53.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 14.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 30 RPM Y 75 C. | 128 |
| GRAFICA 4.54.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 14.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 60 RPM Y 75 C. | 129 |
| GRAFICA 4.55.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 14.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 70 RPM Y 75 C. | 130 |
| GRAFICA 4.56.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 14.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 80 RPM Y 75 C. | 131 |
| GRAFICA 4.57.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 14.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 30 RPM Y 25 C. | 132 |
| GRAFICA 4.58.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 14.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 60 RPM Y 25 C. | 133 |
| GRAFICA 4.59.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 14.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 70 RPM Y 25 C. | 134 |
| GRAFICA 4.60.- | SIMULACION NUMERICA FLUIDO<br>POLIBUTADIENO 1,4 AL 14.5 %<br>IMPULSOR TIPO HELICOIDAL A 80 RPM Y 25 C. | 135 |
| GRAFICA 4.61.- | PERFILES DE TEMPERATURA CON GLICEROL<br>A 60 RPM Y 80 C.                                               | 140 |
| GRAFICA 4.62.- | PERFILES DE TEMPERATURA CON GLICEROL<br>A 60 RPM Y 80 C.                                               |     |
| GRAFICA 4.63.- | PERFILES DE TEMPERATURA CON GLICEROL<br>A 60 RPM Y 80 C.                                               |     |
| GRAFICA 4.64.- | PERFILES DE TEMPERATURA CON GLICEROL<br>A 60 RPM Y 80 C.                                               |     |
| GRAFICA 4.65.- | PERFILES DE TEMPERATURA CON PBD AL 11.5%<br>A 30 RPM Y 80 C.                                           | 141 |
| GRAFICA 4.66.- | PERFILES DE TEMPERATURA CON PBD AL 11.5%<br>A 80 RPM Y 80 C.                                           |     |
| GRAFICA 4.67.- | PERFILES DE TEMPERATURA CON PBD AL 11.5%<br>A 30 RPM Y 25 C.                                           |     |
| GRAFICA 4.68.- | PERFILES DE TEMPERATURA CON PBD AL 11.5%<br>A 80 RPM Y 25 C.                                           |     |

---

---

## LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

|                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| GRAFICA 4.69.- PERFILES DE TEMPERATURA CON PBD AL 14.5%<br>A 30 RPM Y 80 C. | 142 |
| GRAFICA 4.70.- PERFILES DE TEMPERATURA CON PBD AL 14.5%<br>A 80 RPM Y 80 C. |     |
| GRAFICA 4.71.- PERFILES DE TEMPERATURA CON PBD AL 14.5%<br>A 30 RPM Y 25 C. |     |
| GRAFICA 4.72.- PERFILES DE TEMPERATURA CON PBD AL 14.5%<br>A 80 RPM Y 25 C. |     |
| GRAFICA 4.73.- PERFILES DE FLUJO CON GLICEROL<br>A 60 RPM Y 80 C.           | 147 |
| GRAFICA 4.74.- PERFILES DE FLUJO CON GLICEROL<br>A 80 RPM Y 80 C.           |     |
| GRAFICA 4.75.- PERFILES DE FLUJO CON GLICEROL<br>A 60 RPM Y 25 C.           |     |
| GRAFICA 4.76.- PERFILES DE FLUJO CON GLICEROL<br>A 80 RPM Y 25 C.           |     |
| GRAFICA 4.77.- PERFILES DE FLUJO CON PBD AL 11.5%<br>A 30 RPM Y 80 C.       | 148 |
| GRAFICA 4.78.- PERFILES DE FLUJO CON PBD AL 11.5%<br>A 60 RPM Y 80 C.       |     |
| GRAFICA 4.79.- PERFILES DE FLUJO CON PBD AL 11.5%<br>A 70 RPM Y 80 C.       |     |
| GRAFICA 4.80.- PERFILES DE FLUJO CON PBD AL 11.5%<br>A 80 RPM Y 80 C.       |     |
| GRAFICA 4.81.- PERFILES DE FLUJO CON PBD AL 11.5%<br>A 30 RPM Y 25 C.       | 149 |
| GRAFICA 4.82.- PERFILES DE FLUJO CON PBD AL 11.5%<br>A 60 RPM Y 25 C.       |     |
| GRAFICA 4.83.- PERFILES DE FLUJO CON PBD AL 11.5%<br>A 70 RPM Y 25 C.       |     |
| GRAFICA 4.84.- PERFILES DE FLUJO CON PBD AL 11.5%<br>A 80 RPM Y 25 C.       |     |
| GRAFICA 4.85.- PERFILES DE FLUJO CON PBD AL 14.5%<br>A 30 RPM Y 80 C.       | 150 |
| GRAFICA 4.86.- PERFILES DE FLUJO CON PBD AL 14.5%<br>A 60 RPM Y 80 C.       |     |
| GRAFICA 4.87.- PERFILES DE FLUJO CON PBD AL 14.5%<br>A 70 RPM Y 80 C.       |     |
| GRAFICA 4.88.- PERFILES DE FLUJO CON PBD AL 14.5%<br>A 80 RPM Y 80 C.       |     |

## LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

---

|                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| GRAFICA 4.89.- PERFILES DE FLUJO CON PBD AL 14.5%<br>A 30 RPM Y 25 C. | 151 |
| GRAFICA 4.90.- PERFILES DE FLUJO CON PBD AL 14.5%<br>A 60 RPM Y 25 C. |     |
| GRAFICA 4.91.- PERFILES DE FLUJO CON PBD AL 14.5%<br>A 70 RPM Y 25 C. |     |
| GRAFICA 4.92.- PERFILES DE FLUJO CON PBD AL 14.5%<br>A 80 RPM Y 25 C. |     |

---

---

---

### RESUMEN.

Se presenta un estudio teórico experimental de los fenómenos de transporte en el proceso de mezclado de fluidos Newtonianos y no Newtonianos. Se proponen modelos matemáticos bidimensionales (2-D) para predecir los patrones de flujo y su efecto en la transferencia de calor en el mezclado de fluidos de reología compleja. Los modelos desarrollados son validados con datos experimentales empleando mediciones de temperatura a diferentes posiciones axiales en el interior de un tanque agitado. Las predicciones de los modelos a diferentes condiciones de operación con respecto a los datos experimentales se aproximan adecuadamente.

Adicionalmente, se emplean las variables experimentales de consumo de potencia, tiempos de mezclado y de circulación; para la predicción del grado de homogeneidad alcanzado con diferentes tipos de impulsores.

Esté estudio sugiere utilizar impulsores helicoidales para el mezclado de fluidos poliméricos.

---

---

---

## **INTRODUCCION**

---

### INTRODUCCION.

El proceso de mezclado en tanques agitados es una de las operaciones más comunes en la industria química. Por lo que la necesidad de entender y mejorar los sistemas de mezclado con fluidos de reología compleja ha cobrado mayor importancia cada día.

A fin de satisfacer el objetivo fundamental en un proceso de mezclado a nivel industrial, que es la obtención de un determinado grado de homogeneización de las propiedades o características del producto.

Específicamente, en el mezclado de fluidos poliméricos se recomienda el uso de impulsores de proximidad, p.ej. agitadores tipo Helicoidal(HR), a fin de lograr una mayor uniformidad en las propiedades o características del producto terminado.

En procesos de polimerización de Polibutadieno 1,3 en solución(PBD 1,3) por ejemplo, se conoce que después de la reacción durante el mezclado la viscosidad es una de las propiedades que más afectan los mecanismos de transporte de calor y/o masa y a los patrones de flujo existentes.

Adicionalmente, éste tipo de polímeros presentan la tendencia de adherirse en la pared interior del tanque y a las superficies del medio de enfriamiento<sup>[1,2,45]</sup>; lo cual repercute en la calidad del producto terminado. Esté efecto se observa en la Figura i.

A pesar de lo anterior y de que se ha demostrado que los agitadores de proximidad son más eficientes que los agitadores tradicionales(turbinas Rusthon) en el proceso de mezclado de fluidos poliméricos, pocas son las industrias que los utilizan. Esto ha originado la necesidad de realizar estudios de mezclado con transferencia de calor en base a los fenómenos de transporte de momento y de energía y a la aplicación de modelos basados en el análisis dimensional de las variables de macromezclado(tiempo de mezclado y circulación, consumo de potencia), para su posterior implementación a nivel industrial.

## REPRESENTACION DEL COMPORTAMIENTO DE DIFERENTES SISTEMAS POLIMERICOS.

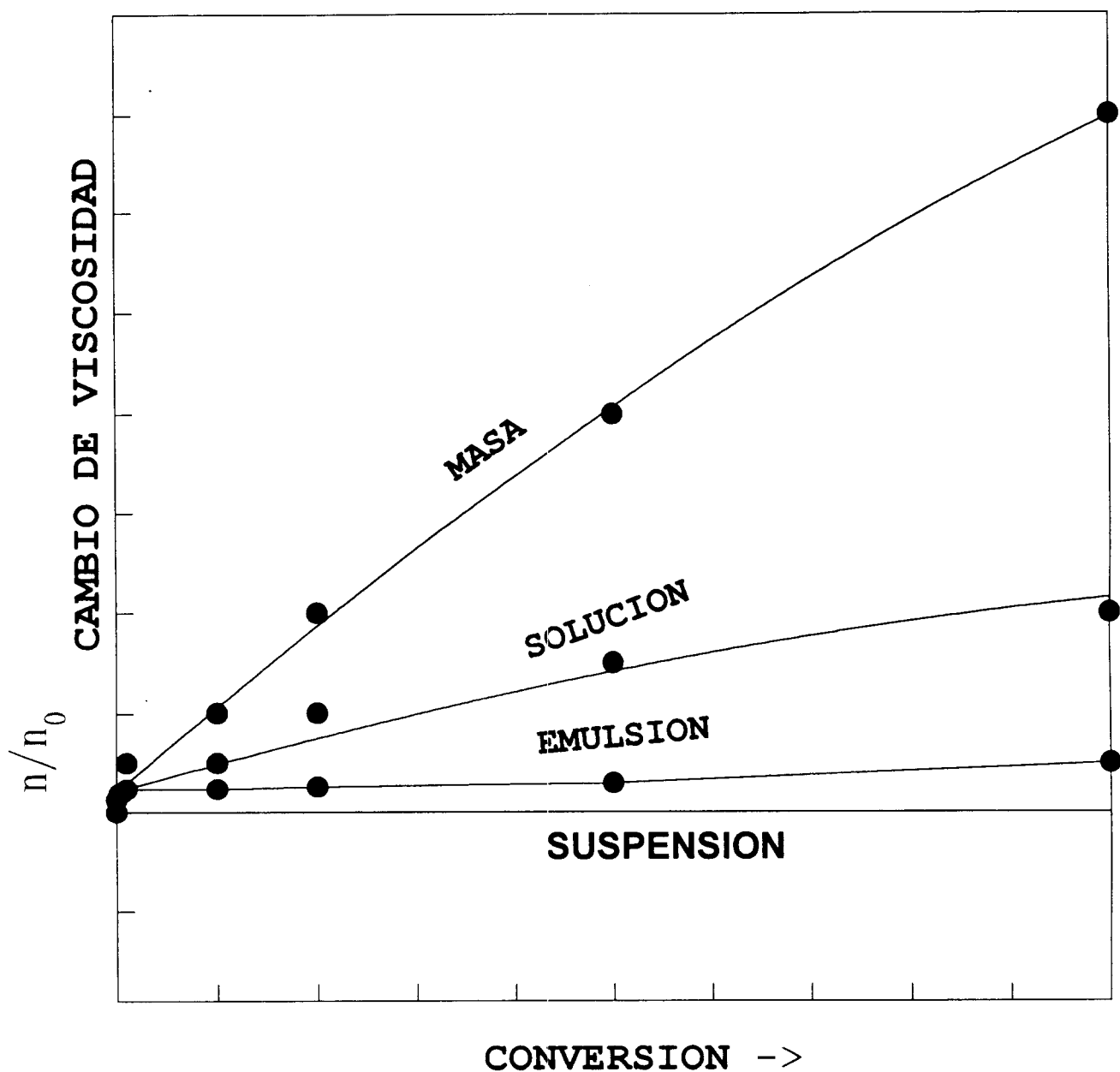


FIGURA i.-CURVAS TIPICAS DEL CAMBIO DE VISCOSIDAD EN DIFERENTES SISTEMAS POLIMERICOS CON TRANSFERENCIA DE CALOR [28,43].

### DEFINICION DEL PROBLEMA.

Conforme aumentan los requerimientos de calidad de producto terminado se incrementa la necesidad de mejorar el uso de sistemas de mezclado, algunos autores<sup>[6,8,11,30,31,35,36,42]</sup> recomiendan los agitadores de proximidad (Helicoidales, HR o HRS) ya que parecen ser una opción atractiva para lograr una mejor homogeneización de las propiedades (viscosidad, concentración, temperatura, distribución de pesos moleculares, etc.).

En esté trabajo se realiza un estudio de las condiciones de operación presentes en el sistema, que permitan determinar si el mezclado con este tipo de impulsores es factible de aplicar.

Además de avanzar en el conocimiento de procesos de mezclado y su efecto en el transporte de calor durante la eliminación de gradientes apreciables de temperatura.

### **OBJETIVO GENERAL.**

En este estudio se investigan los fenómenos de transferencia de calor y los patrones de flujo en procesos de mezclado con fluidos Newtonianos y no Newtonianos.

### **OBJETIVOS PARTICULARES.**

- 1) En base a correlaciones existentes y con datos experimentales de potencia, tiempos de mezclado y de circulación en un sistema de mezclado, comparar el grado de homogeneidad alcanzado con los impulsores de tipo helicoidal propuesto y el convencional de paletas.
- 2) Desarrollar modelos de mezclado y transferencia de calor, validados con datos experimentales.

---

**I.- PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.**

## **CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.**

---

### **1.1.-DETERMINACION DE LA VISCOSIDAD.**

En numerosos procesos industriales la viscosidad es la propiedad reológica más importante durante el mezclado de fluidos no Newtonianos, sobre todo en la determinación de la calidad del producto terminado.

Los fluidos pueden clasificarse de acuerdo a su comportamiento reológico como Newtonianos y no Newtonianos<sup>[3,4,43,45]</sup>:

Los fluidos Newtonianos son aquellos en los que el esfuerzo varia en forma lineal con la rapidez de deformación. Es decir, presenta un viscosidad constante.

Por otro lado, los fluidos no Newtonianos son aquellos en los cuales el esfuerzo varia en forma no lineal con respecto a la rapidez de deformación.

Los fluidos no Newtonianos, se pueden clasificar en:

- a) Inelásticos, independientes del tiempo.
- b) Inelásticos, dependientes del tiempo.
- c) Viscoelásticos.

Los fluidos inelásticos son aquellos que no presentan carácter elástico, pero sin embargo no siguen la ley de Newton y son independientes del tiempo, debido a que la viscosidad depende de la rapidez de deformación únicamente.

En base a datos experimentales, la respuesta de un material a una deformación dada, esta representada en la Figura 1.0, en la cual se aprecia que para un fluido Newtoniano la relación entre esfuerzo y rapidez de deformación es lineal.

Para un fluido pseudoplástico la viscosidad disminuye al aumentar la rapidez de deformación; sin embargo, para un fluido dilatante la viscosidad aumenta al aumentar la rapidez de deformación.

Por último, un fluido de Bingham, presenta un esfuerzo limite ( $\tau_0$ ), a valores de  $\tau < \tau_0$  el material se comporta como un sólido y cuando  $\tau > \tau_0$  el material se comporta como un fluido Newtoniano.

## **CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.**

---

### **1.1.-DETERMINACION DE LA VISCOSIDAD.**

En numerosos procesos industriales la viscosidad es la propiedad reológica más importante durante el mezclado de fluidos no Newtonianos, sobre todo en la determinación de la calidad del producto terminado.

Los fluidos pueden clasificarse de acuerdo a su comportamiento reológico como Newtonianos y no Newtonianos<sup>[3,4,43,45]</sup>:

Los fluidos Newtonianos son aquellos en los que el esfuerzo varia en forma lineal con la rapidez de deformación. Es decir, presenta un viscosidad constante.

Por otro lado, los fluidos no Newtonianos son aquellos en los cuales el esfuerzo varia en forma no lineal con respecto a la rapidez de deformación.

Los fluidos no Newtonianos, se pueden clasificar en:

- a) Inelásticos, independientes del tiempo.
- b) Inelásticos, dependientes del tiempo.
- c) Viscoelásticos.

Los fluidos inelásticos son aquellos que no presentan carácter elástico, pero sin embargo no siguen la ley de Newton y son independientes del tiempo, debido a que la viscosidad depende de la rapidez de deformación únicamente.

En base a datos experimentales, la respuesta de un material a una deformación dada, esta representada en la Figura 1.0, en la cual se aprecia que para un fluido Newtoniano la relación entre esfuerzo y rapidez de deformación es lineal.

Para un fluido pseudoplástico la viscosidad disminuye al aumentar la rapidez de deformación; sin embargo, para un fluido dilatante la viscosidad aumenta al aumentar la rapidez de deformación.

Por último, un fluido de Bingham, presenta un esfuerzo limite ( $\tau_0$ ), a valores de  $\tau < \tau_0$  el material se comporta como un sólido y cuando  $\tau > \tau_0$  el material se comporta como un fluido.

## REPRESENTACION DEL COMPORTAMIENTO DE UN MATERIAL.

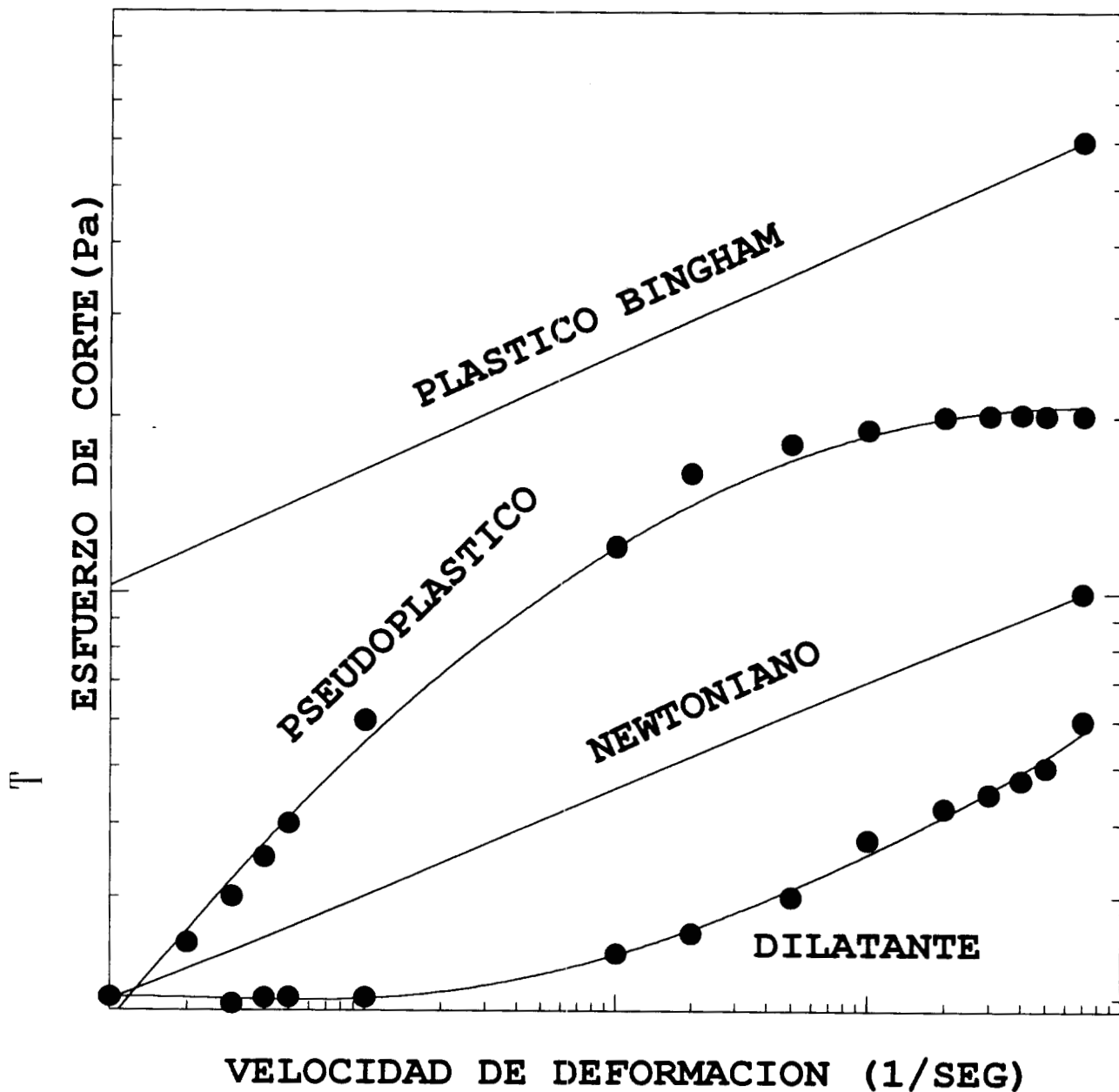


FIGURA 1.0.-COMPORTAMIENTO DE UN MATERIAL A UNA DEFORMACION.

## **CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.**

---

En la industria de polímeros sintéticos el comportamiento reológico de la gran mayoría de materiales termoplásticos corresponde al caso pseudoplástico.

En la Figura 1.1 se presenta el comportamiento pseudoplástico. En donde se aprecian tres regiones bien definidas:

- 1) A valores pequeños de rapidez de deformación( $\dot{\gamma}$ ), la viscosidad es independiente de la velocidad de deformación( $\dot{\gamma}$ ). Consecuentemente esta región se conoce como la región inferior Newtoniana.
- 2) Para un rango intermedio de valores de velocidad de deformación( $\dot{\gamma}$ ), la relación entre viscosidad y ( $\dot{\gamma}$ ) sigue una expresión del tipo de ley de la potencia (comportamiento pseudoplástico); y finalmente,
- 3) A altos valores de velocidad de deformación( $\dot{\gamma}$ ) la viscosidad vuelve a ser independiente de la velocidad de deformación( $\dot{\gamma}$ ). Esta zona se conoce como la región Newtoniana superior.

La necesidad de realizar una caracterización reológica para estimar el comportamiento del material es de suma importancia, sobre todo en el diseño eficiente de un sistema de mezclado.

La caracterización reológica de diferentes materiales ha sido estudiada de diferentes maneras:

- 1) Con un enfoque teórico, aplicando la teoría de volumen libre, y
- 2) Con enfoque empírico, con el cual es posible obtener correlaciones que permitan estimar la viscosidad en sistemas tanto Newtonianos como no Newtonianos.

## REPRESENTACION DEL COMPORTAMIENTO PSEUDOPLASTICO.

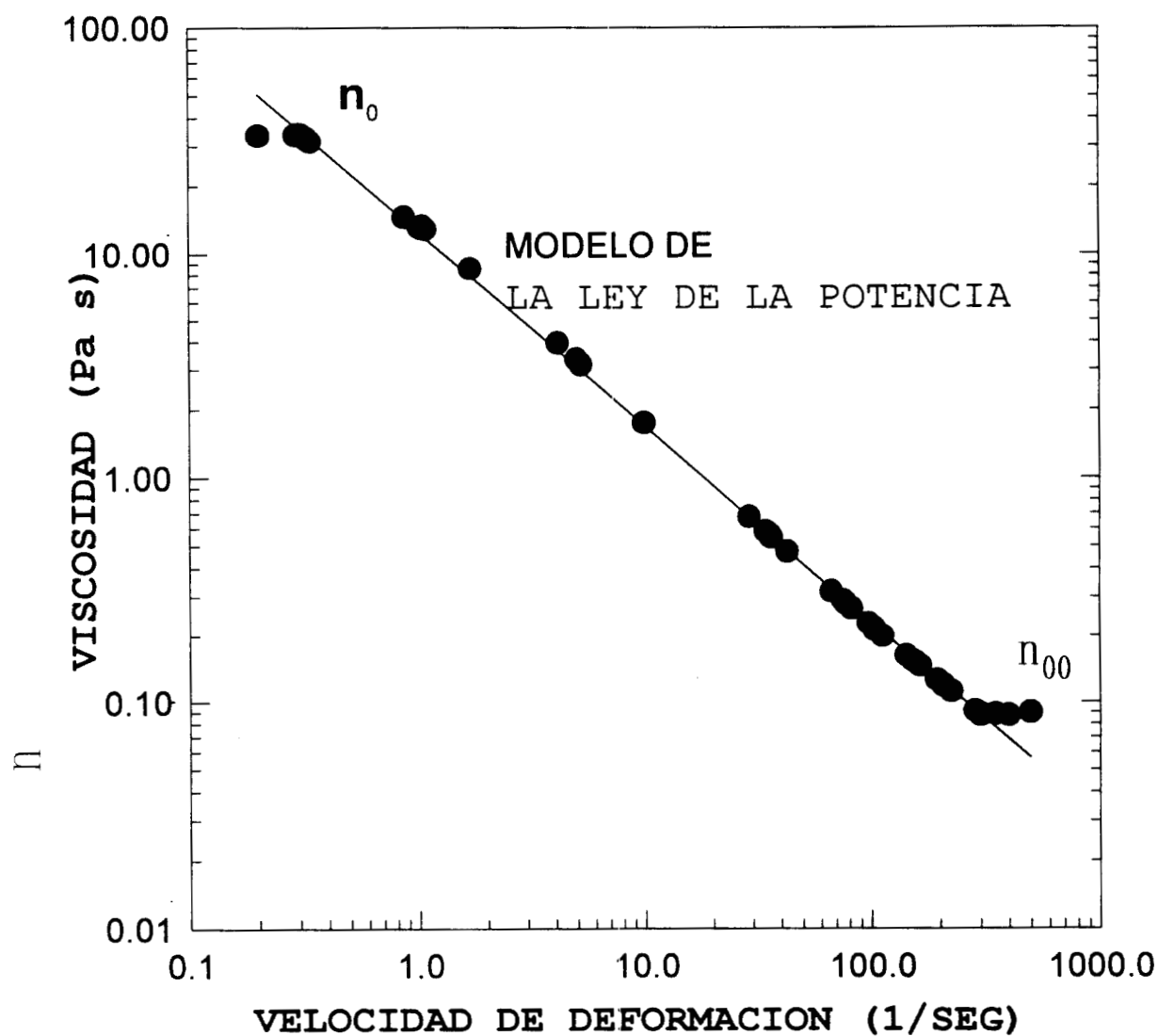


FIGURA 1.1.-COMPORTAMIENTO PSEUDOPLASTICO.

## **CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.**

---

Un resumen de las diferentes relaciones (Fluidos Newtonianos Generalizados, FNG) empleadas para estimar la viscosidad se presenta en la Tabla 1.0; donde se señalan las ventajas y desventajas de cada una, con la finalidad de tener una mejor referencia para poder decidir cual es factible de aplicar en procesos de mezclado con deformación de cizalla simple.

En base a lo anterior, el modelo que se utiliza en el presente trabajo para estimar la viscosidad en el sistema de mezclado es el de Ostwald de Waele, debido a que es practico de aplicar a fluidos poliméricos de peso molecular moderado, y sencillo en cálculos de ingeniería.

Por otra parte, en algunos fluidos poliméricos se pueden presentar elasticidad y tiempos de relajación muy grandes. Un criterio cuantitativo para detectar la aparición de efectos elásticos en una deformación dada, es el número de Deborah (relación entre el tiempo característico del material y el tiempo de deformación)<sup>[8]</sup>.

Sin embargo, en la investigación de las propiedades reológicas que determinan el comportamiento mecánico de los materiales ha sido poco tomada en cuenta en sistemas de mezclado y casi no existen estudios previos en los cuales se establezcan relaciones entre esfuerzos y deformaciones que modelen el comportamiento de materiales complejos como los polímeros sintéticos.

Además de la importancia y aplicación en el area de polímeros sintéticos, la reología tiene un gran campo de aplicación; tal es el caso de casi todas las ramas de la industria metalúrgica, del vidrio, concreto, alimentaria y otras, ya que se encuentran siempre con problemas de diseño de equipo para transportar, procesar o transformar sustancias que no se ajustan a los modelos clásicos del comportamiento de un material (bombas, mezcladores, reactores, etc).

# CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.

TABLA 1.0.-MODELOS DE VISCOSIDAD PARA FLUIDOS NEWTONIANOS GENERALIZADOS (FGN)<sup>[3]</sup>.

| TRABAJO                | MODELO                                                                                                                                                                   | COMENTARIOS                                                                                                                                                                             |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| OSTWALD<br>DE<br>WAELE | <p>Modelo de la ley de la potencia:</p> $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = m * \dot{\gamma}^{(n-1)}$ <p>-----</p> <p>n &lt; reofluidificación<br/>(pseudoplástico).</p> | Modelo muy sencillo de aplicar. Con la desventaja: sobreestima la viscosidad debido a que no puede describir la porción de la curva de viscosidad cuando $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ . |
| SPRIGGS                | <p>Ley de la potencia truncada:</p> $\eta = \eta_0 * \left( \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^{(n)}$                                                           | Modelo que tiene la ventaja de poder determinar el tiempo característico*.                                                                                                              |
| ELLIS                  | <p>Modelo de tres parámetros:</p> $\frac{\eta_0}{\eta} = 1 + \left[ \frac{\tau}{\tau_{1/2}} \right]^{(\alpha-1)}$                                                        | Modelo con buena representación del comportamiento viscoso.                                                                                                                             |
| METER                  | $\frac{\eta_0 - \eta_i}{\eta - \eta_i} = 1 + \left[ \frac{\tau}{\tau_{1/2}} \right]^{(\alpha-1)}$ $\lambda = \eta_0 / \tau_{1/2}$                                        | Para flujos de deformación simple, con buena representación.                                                                                                                            |

**CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.**

|                 |                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                    |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CARREAU         | $\frac{\eta}{\eta_0} = [1 + (\lambda * \dot{\gamma})^2]^{\frac{(n-1)}{2}}$ $\frac{\eta - \eta_i}{\eta_0 - \eta_i} = [1 + (\lambda * \dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad \lambda: \text{Tiempo}$ | Fluidos viscosos, modelo de cuatro parámetros, con limitaciones a altas velocidades de deformación.                                |
| ELLIS & CARREAU | $\frac{\eta - \eta_i}{\eta_0 - \eta_i} = [1 + (\lambda * \dot{\gamma})^p]^{-1}$                                                                                                                    | Sobre estimación de la viscosidad, para una transición mas suave y con buena representación en fluidos viscosos.                   |
| BINGHAM         | $\eta = \mu_0 + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \quad \tau > \tau_0$                                                                                                                                   | Fluidos viscoplásticos (pastas). Presentan un valor limite $\tau_0$ , si se rebasa este esfuerzo $\tau_0$ la viscosidad es finita. |
| HERSHEL BULKLEY | $\tau - \tau_0 = K_{ave} * \dot{\gamma}^m$                                                                                                                                                         | Para fluidos viscoplásticos.                                                                                                       |

**CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.**

|                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>MODELO<br/>CON<br/>ANALO-<br/>GIA</p> <p>TIPO<br/>COUETTE</p> | <p>EN COORDENADAS CILINDRICAS:<br/>I) Para fluidos cuyas propiedades no dependen del tiempo:<br/>a) Caso Fluido Newtonianos:</p> $\mu = \frac{(r_2^2 - r_1^2) * T}{(4 * \pi * r_1^2 * r_2^2 * \Omega)}$ <p>La viscosidad puede ser determinada midiendo el Torque(T) y la velocidad angular.<br/>b) Caso para fluidos No-Newtonianos (Modelo de la ley de la potencia):</p> $\mu = \frac{(\tau = m * \dot{\gamma}^n)}{\dot{\gamma}} = m * \dot{\gamma}^{(n-1)}$ $\dot{\gamma}(r) = \left( \frac{T}{2 * \pi * r^2 * m} \right)^{1/n}$ <p>Sustituyendo el valor del torque(T):</p> $\dot{\gamma}(r) = \frac{(2 * \Omega)}{n * \left[ \left( \frac{1}{r_1^{2/n}} \right) - \left( \frac{1}{r_2^{2/n}} \right) \right] r^{2/n}}$ <p>Donde, la viscosidad aparente <math>\mu_a</math> se obtiene considerando:</p> $\eta_a(r) = \frac{\tau(r)}{\dot{\gamma}(r)}$ <p>Resultando:</p> $\eta_a(r) = \frac{T * \left( \frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right)}{4 * \pi * \Omega} * \frac{n * \left[ 1 - \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^{2/n} \right]}{[1 - (r_1/r_2)^2]}$ $* (r/r_1)^{2/n-2}$ | <p><u>SUPOSICION EMPLEADA EN ESTE ESTUDIO:</u></p> <p>Considera:</p> <p>1) Que el agitador es un cilindro.</p> <p>2) Esta limitado a los esfuerzos normales y efectos de tiempo.</p> <p>3) La velocidad de deformación es función del espacio anular y del comportamiento reológico del fluido. Lo cual es muy significativo para el caso de valores de <math>n &lt; 0.5</math> de los fluidos poliméricos.</p> |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.

---

La cuantificación de los efectos elásticos en una deformación dada es función del número de Deborah y se determina en base a el criterio siguiente:

- a)  $De = 0$ , comportamiento puramente viscoso.
- b)  $0 < De < 1$ , Viscoelásticidad lineal.
- c)  $De = 1$ , Viscoelásticidad no lineal.
- d)  $De > 1$ , Elasticidad tipo solido.

Cabe resaltar que actualmente pocos autores consideran el impacto de la reología en la eficiencia de un sistema de mezclado; y los autores<sup>[6,11,27,30,31,35]</sup> que la consideran presentan a la viscosidad como función de una constante ( $K_s$ ), lo cual implicaría patrones de flujo homogéneos, lo que no es completamente valido; tal como se aprecia en lo patrones de flujo reportados<sup>[7,8]</sup> en la Figura 1.2.

Adicionalmente, la relación de proporcionalidad ( $K_s$ ) entre la velocidad de deformación y de agitación no es necesariamente una constante, ya que esta es función de la reología del fluido y la geometría del sistema. Por lo que el gran rango de valores de ( $K_s$ ) reportados en procesos de mezclado, son producto de la incertidumbre existente, debido a que no se considera a la velocidad de deformación función de la reología del fluido y/o la geometría del sistema; Esto se aprecia en la Tabla 1.1, y se muestra en la Figura 1.3.

Por lo general, la velocidad de deformación se representa como una función de la velocidad de agitación y la geometría del impulsor únicamente, por la ecuación siguiente:

$$\dot{\gamma} = K_s * N \quad (1)$$

donde,

$\dot{\gamma}$  = Velocidad de deformación en flujo de cizalla  
(1/seg) .

$K_s$  = Constante de proporcionalidad entre velocidad de  
deformación y velocidad de agitación en el sistema.

$N$  = Velocidad de agitación (1/seg) .

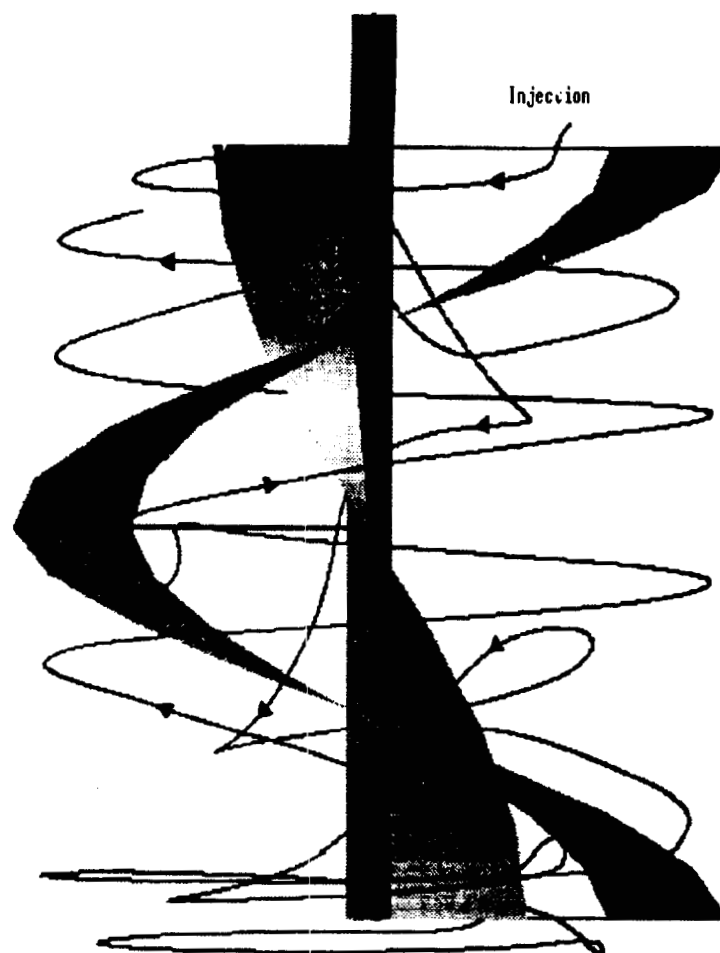


FIGURA 1.2.-PATRONES DE FLUJO REPORTADOS PARA IMPULSORES  
HELICOIDALES<sup>[8,41]</sup>.

# CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.

TABLA 1.1.-DATOS DE Ks. PARA IMPULSORES HELICOIDALES SIN TORNILLO CENTRAL(HR) y IMPULSORES HELICOIDALES CON TORNILLO CENTRAL(HRS)<sup>[8]</sup>.

| $\mu a = \dot{\gamma}^{(n-1)}$<br>TRABAJO | TIPO      | D/d               | n (grado de pseudo-plasticidad) | Ks    | COMENTARIOS Ks:                |
|-------------------------------------------|-----------|-------------------|---------------------------------|-------|--------------------------------|
| Bourne (1969)                             | HR        | 1.02-1.12         | 0.4-1.0                         | 66.06 | Función de la geometría.       |
| Coyle (1970)                              | HRS       | 1.059             | 0.2-1.0                         | 25    | Constante.                     |
| Hall & Godfrey (1970)                     | HR        | 1.1-1.11          | 0.35-1.0                        | 27    | Constante.                     |
| Chavan et al. (1972-73)                   | HR<br>HRS | 1.04-1.12<br>1.03 | 0.35-1.0<br>0.35-1.0            | 24.58 | Función de la geometría        |
| Rieger (1973)                             | HR        | 1.053             | 0.5-1.0                         | 36.73 | Constante                      |
| Nagata (1975)                             | HR        | 1.056             | 0.27-1.0                        | 30    | Constante                      |
| Sawinski (1976)                           | HR        | 1.04-1.19         | 0.5-1.0                         | 27.60 | Función de la geometría        |
| Chowdhury (1979)                          | HRS       | 1.06-1.12         | 0.26-1.0                        | 30.6  | Constante                      |
| Yap (1979)                                | HR        | 1.11-1.37         | 0.17-0.65                       | 79.85 | Función de n y de la geometría |
| Kuriyama (1983)                           | HR        | 1.05-1.16         | 0.35-0.75                       | 24.68 | Función de la geometría        |
| Takahashi (1984)                          | HR        | 1.05-1.24         | 0.44-0.77                       | 30.89 | Función de la geometría        |
| Shamlou et al. (1985)                     | HR        | 1.05-1.33         | -----                           | 26.8  | Función de la geometría        |
| Choplin (1988)                            | HRS       | 1.14              | 0.22-0.29                       | 60-95 | Función de la geometría        |
| Guerinik (1990)                           | HRS       | 1.14              | 0.28-0.57                       | 1.031 | Función de n                   |

Donde, los cálculos de viscosidad están sobre estimados.

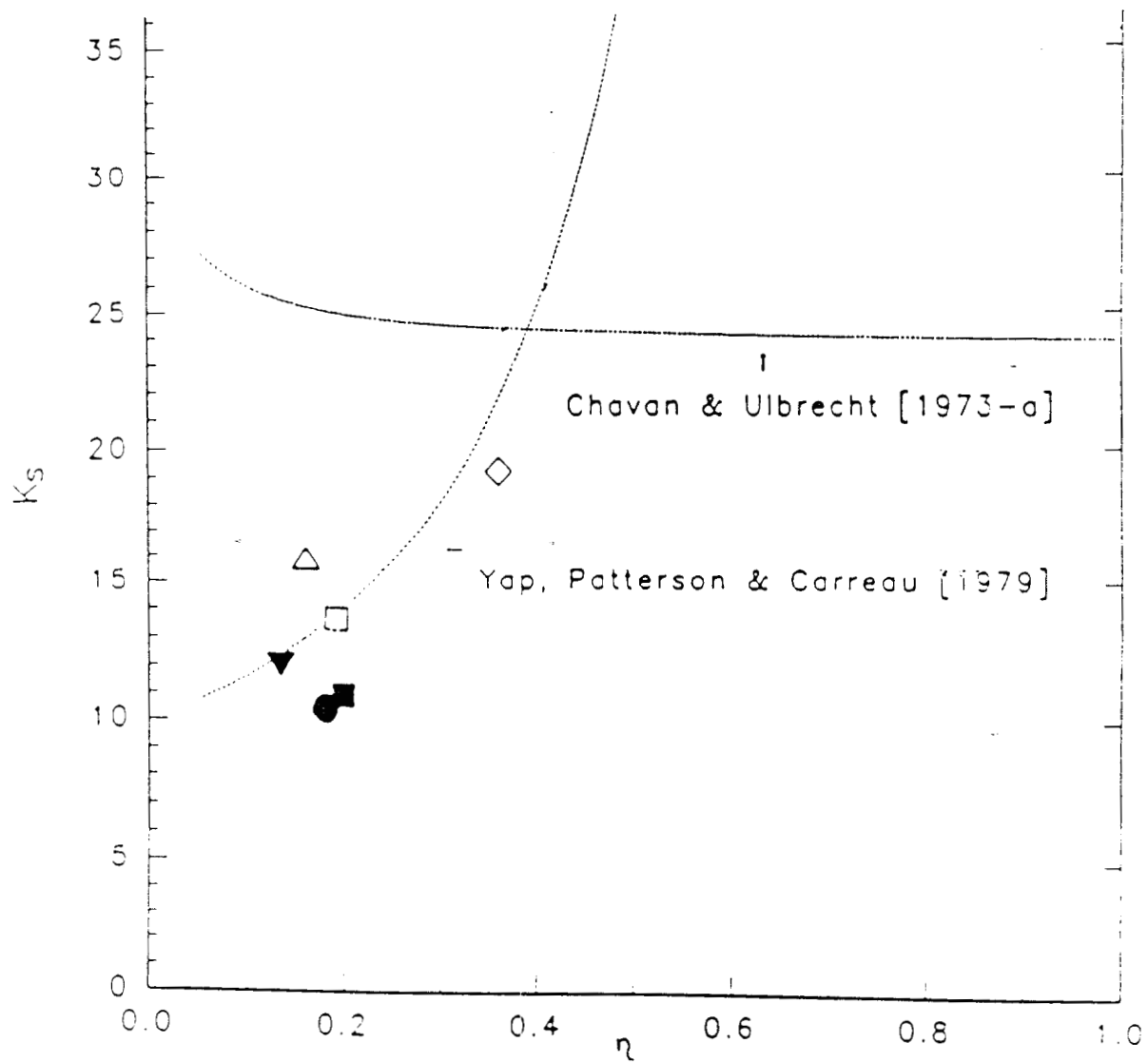


FIGURA 1.3.-EFECTO DE  $K_s$ . EN EL CALCULO DE LA VISCOSIDAD EN UN TANQUE DE MEZCLADO CON IMPULSOR HELICOIDAL.

## **CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.**

---

Para geometrías helicoidales con tornillo central(HRS); se puede apreciar en la Figura 1.3 y en la Tabla 1.1, el amplio rango de valores de las constantes (Ks) reportados en procesos de mezclado con fluidos Newtonianos y no Newtonianos.

Los modelos empleados en el calculo de la viscosidad resumidos en la Tabla 1.0, están basados en una rapidez de deformación constante  $\dot{\gamma}$ . En la cual el esfuerzo de corte aplicado es directamente proporcional a la deformación de cizalla simple presente en el espacio anular. Sin embargo esto solo es valido en las inmediaciones del impulsor y no se cumple en el espacio comprendido entre el agitador y la pared del tanque, debido a que implicaría valores de (Ks) constantes en el espacio anular del sistema y a la vez patrones de flujo homogéneos.

### **1.2.- TEORIA DE MEZCLADO.**

El mezclado es uno de los procesos industriales mas comunes y complejos, y ha sido considerado más como un arte que como una ciencia<sup>[32]</sup>. Por lo que en el diseño de sistemas de mezclado un buen número de estos son poco eficientes, debido a una falta de entendimiento de los fundamentos de mezclado. Lo anterior ha causado en la industria(USA), perdidas económicas estimadas en 1993 entre \$ 1 y \$ 10 millones de dólares<sup>[19]</sup>.

Como antecedente, se conoce que el mezclado es interpretado como la deformación en la estructura del material descrita por la mecánica de los medios continuos<sup>[32]</sup> y para llevar a cabo está operación los procesos de agitación con impulsores son los sistemas más comunes aplicados en la industria química.

Por lo cual, el mezclado es un proceso complejo que requiere una adecuada selección y diseño de equipo, a fin de optimizar el grado de homogeneidad que se desea alcanzar en el proceso.

En la selección del sistema de agitación se debe considerar la escala o volumen de los materiales a procesar.

## **CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.**

---

Para geometrías helicoidales con tornillo central(HRS); se puede apreciar en la Figura 1.3 y en la Tabla 1.1, el amplio rango de valores de las constantes (Ks) reportados en procesos de mezclado con fluidos Newtonianos y no Newtonianos.

Los modelos empleados en el calculo de la viscosidad resumidos en la Tabla 1.0, están basados en una rapidez de deformación constante  $\dot{\gamma}$ . En la cual el esfuerzo de corte aplicado es directamente proporcional a la deformación de cizalla simple presente en el espacio anular. Sin embargo esto solo es valido en las inmediaciones del impulsor y no se cumple en el espacio comprendido entre el agitador y la pared del tanque, debido a que implicaría valores de (Ks) constantes en el espacio anular, y patrones de flujo homogéneos.

### **1.2.- TEORIA DE MEZCLADO.**

El mezclado es uno de los procesos industriales mas comunes y complejos, y ha sido considerado más como un arte que como una ciencia<sup>[32]</sup>. Por lo que en el diseño de sistemas de mezclado un buen número de estos son poco eficientes, debido a una falta de entendimiento de los fundamentos de mezclado. Lo anterior ha causado en la industria(USA), perdidas económicas estimadas en 1993 entre \$ 1 y \$ 10 millones de dólares<sup>[33]</sup>.

Como antecedente, el mezclado es interpretado como la deformación en la estructura del material descrita por la mecánica de los medios continuos<sup>[32]</sup>, y para llevar a cabo esta operación los procesos de agitación con impulsores son los sistemas más comunes en la industria química.

Por lo cual, el mezclado es un proceso complejo que requiere una adecuada selección y diseño de equipo, a fin de optimizar el grado de homogeneidad que se desea alcanzar. En la selección del agitador se debe considerar la escala o volumen de los materiales a procesar.

## **CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.**

---

### **1.2.1.-ANTECEDENTES.**

En el diseño de un agitador, el objetivo es mantener un determinado grado de homogeneidad de las características del producto e incrementar la velocidad de transferencia de calor y/o de masa.

El grado de homogeneidad se define en base a una cierta variable del proceso; tal como la concentración o la temperatura, y que presente un valor semejante a diferentes posiciones en el sistema.

El grado de homogeneidad en los procesos industriales es de vital importancia, a fin de lograr las especificaciones finales del producto o en el uso final de la mezcla.

La definición de homogeneidad en el mezclado, presenta dos enfoques:

- 1) Micromezclado: Mezclado a nivel molecular donde la difusión controla el proceso, y
- 2) Macromezclado: Homogeneización a nivel macroscópico donde los mecanismos hidrodinámicos(fuerzas inerciales, fuerzas viscosas, transporte convectivo,etc.) controlan el proceso.

Este estudio considera aspectos relacionados con el macromezclado, debido a que los criterios de macromezclado para líquidos tanto Newtonianos como no Newtonianos en un tanque agitado con agitador helicoidal, no han sido investigados profundamente<sup>[8,10]</sup>.

Dentro de las variables de macromezclado, el consumo de potencia no es el único parámetro ni el más recomendable para seleccionar un agitador en un proceso de mezclado, en particular debido a que existen muchos agitadores que consumen poca potencia pero no proporcionan un nivel de homogeneización aceptable.

Un ejemplo de lo anterior es la turbina Rushton, agitador muy común en la industria que no proporciona niveles de homogeneización aceptables en medios de alta viscosidad y aun cuando consume poca potencia este tipo de geometría, los tiempos de mezclado tienden a ser infinitos en medios de reología compleja(polímero PBD 1,4).

## CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.

---

Por lo que, en la predicción del grado de homogeneidad en un tanque agitado con diferentes tipos de impulsores en éste estudio, se presentan además de la variable de consumo de potencia, las variables de tiempos de mezclado y de circulación.

### 1.2.2.-CONSUMO DE POTENCIA EN REGIMEN LAMINAR.

En tanques agitados donde se mezclan fluidos Newtonianos y no Newtonianos, se debe considerar además del diseño del agitador y de la velocidad del impulsor, el consumo de potencia.

El consumo de potencia está presente por el esfuerzo del impulsor sobre el fluido a mezclar y es un criterio que se emplea en la comparación de diferentes agitadores, con respecto a velocidad y eficiencia en el mezclado.

Diversas correlaciones de consumo de potencia se presentan en la Tabla 1.2. La forma adimensional presentada comúnmente en correlaciones de potencia en regimen laminar, es la siguiente<sup>[10,11,22,26,30,31,33,36,39,40]</sup>:

$$Po = K_p (Re)^\alpha (Fr)^\beta (\text{Variables geométricas})^\Gamma \quad (2)$$

donde:

Po= Representa el consumo de potencia en forma adimensional.

Kp= Constante de proporcionalidad en el consumo de potencia.

Re= Número de Reynolds, que representa la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas.

Variables geométricas=

Relaciones adimensionales de diferentes variables geométricas, tales como: ancho del impulsor(w), diámetro del tanque(D), diámetro del impulsor(d), número de agitadores(n), espacio entre las hélices(s).

Fr= Número adimensional de Froude, que representa la relación entre las fuerzas inerciales y las de gravedad.

# CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.

TABLA 1.2.-CORRELACIONES DE CONSUMO DE POTENCIA EN REGIMEN LAMINAR<sup>[10,11,22,25,26,29,30,31,33,36,39,40]</sup>

| TRABAJO:                 | CORRELACIONES DE CONSUMO DE POTENCIA:<br>PoRe = Kp.                 | COMENTARIOS:                                                                                                                                      |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Palushenko, 1966.        | $PoRe=235 (4\pi)^{n-1}$                                             | Sobreestima el valor del consumo de potencia, ya que no considera la reología del fluido y las variables geométricas del sistema.                 |
| Bourne, et.al, 1969      | $PoRe=1/\pi^2 (h/D)^{-1} *$<br>$(D/T)^2 ((4\pi/n) (D/T)^{-2/n} -1)$ | Sobreestima el valor del consumo de potencia, a pesar de que considera las variables geométricas del sistema, pero no la reología del fluido.     |
| Zlokarnik, et. al, 1970. | $PoRe=1000 (w/D^2)^{0.187}$                                         | Sobreestima el valor de consumo de potencia, debido a que no considera las variables como altura, diámetro del agitador y la reología del fluido. |

**CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.**

|                            |                                                             |                                                                                                  |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Hall,<br>et.al, 1970       | $PoRe=65nb(c/D)^{-0.6}*$<br>$(p/D)^{-0.73}(h/D)(w/D)^{0.5}$ | Para el caso de fluidos newtonianos funciona muy bien, no así para fluidos de reología compleja. |
| Kappel,<br>et.al, 1970     | $PoRe=14nb^{0.9}(h/D)*$<br>$((p/D)^{-2/3}/1-(D/T)^2)$       | Para el caso de fluidos newtonianos funciona muy bien, no así para fluidos de reología compleja. |
| Nagata,<br>1975            | $PoRe=37(c/D)^{-0.5}*$<br>$(p/D)^{-0.5}*nb^{0.5}$           | Para el caso de fluidos newtonianos funciona muy bien.                                           |
| Kappel,<br>et.al, 1979     | $PoRe=60(c/D)^{-0.3}(p/D)^{-0.5}nb^{0.8}$                   | Para el caso de fluidos newtonianos funciona muy bien.                                           |
| Bourne,<br>et. al,<br>1980 | $P_oR_e=134(h/D)(p/D)^{0.3}(c/D)^{0.3}$                     | Para el caso de fluidos newtonianos funciona muy bien.                                           |

**CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.**

|                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Takahashi, et. al, 1980.<br/>Para líquidos altamente viscosos.</p>                                                       | $Po*Re=16\pi^3/(2\ln(4+8c/w)-1)*L/d$ $Po*Re=\frac{16\pi^3}{(2\ln(4+8c/w)-1)}*L/d*f()$ $f(D/c)=1+0.00735(D/c)^{0.832}$ $Po*Re=\frac{16*\pi^3}{2\ln(4+8c/w)-1}*L/d*f(D/c)$ $*Sinh\Phi^{0.5}$ | <p>Considerando el ángulo de inclinación del impulsor:</p>                                                                                                                    |
| <p>Shamlou, et.al, 1985.<br/><br/>Supone una velocidad de corte(<math>\tau</math>) proporcional a la velocidad impulsor</p> | $PoRe=Kp=150(h/D)\sqrt{\frac{n_b}{(p/D)(c/w)^{0.67}}}$                                                                                                                                     | <p>Kp, constante geométrica.</p> <p>Los datos obtenidos son validas en un Reynolds de 10 a 100.</p> <p><u>Ver datos calculados vs. datos experimentales en la Fig.1.4</u></p> |

\*\*(Descripción de las ctes. h,c,d,D,p,L,w en la sección de NOTACION)

## **CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.**

---

El consumo de potencia representada por la ecuación (2), es por tanto función de las condiciones de agitación, variables geométricas y las propiedades del fluido en el sistema.

Sin embargo, las correlaciones de potencia publicadas previamente son relativamente limitadas en cuanto a su aplicación y restringidas a sistemas con fluidos muy específicos. Debido a que las correlaciones reportadas no consideran las propiedades de fluidos no Newtonianos.

Esté estudio toma como base la correlación de Shamlou et. al, aplicable tanto a fluidos Newtonianos como no Newtoninos en el calculo de consumo de potencia y se confronta con datos experimentales de potencia; tal como se aprecia en la Figura 1.4.

El consumo de potencia es sin duda un indicador de la economía del proceso y el parámetro mas estudiado, y su estrategia de estudio es de diferentes maneras, como:

- a) Análisis Dimensional,
- b) Analogías de flujo, y
- c) Determinación de los patrones de flujo por solución numérica de modelos hidrodinámicos.

La mayoría de los estudios sobre consumo de potencia están basados en el análisis dimensional, tal como se muestra en la Tabla 2.3, donde se considera la relación de las variables que intervienen en el mezclado. Este tipo de análisis proporciona información poco cuantitativa y es necesario recurrir a la investigación experimental.

Por lo tanto los estudios de analogía de flujos y patrones de flujo por simulación numérica son una alternativa adecuada, a fin de analizar la hidrodinámica del sistema de mezclado.

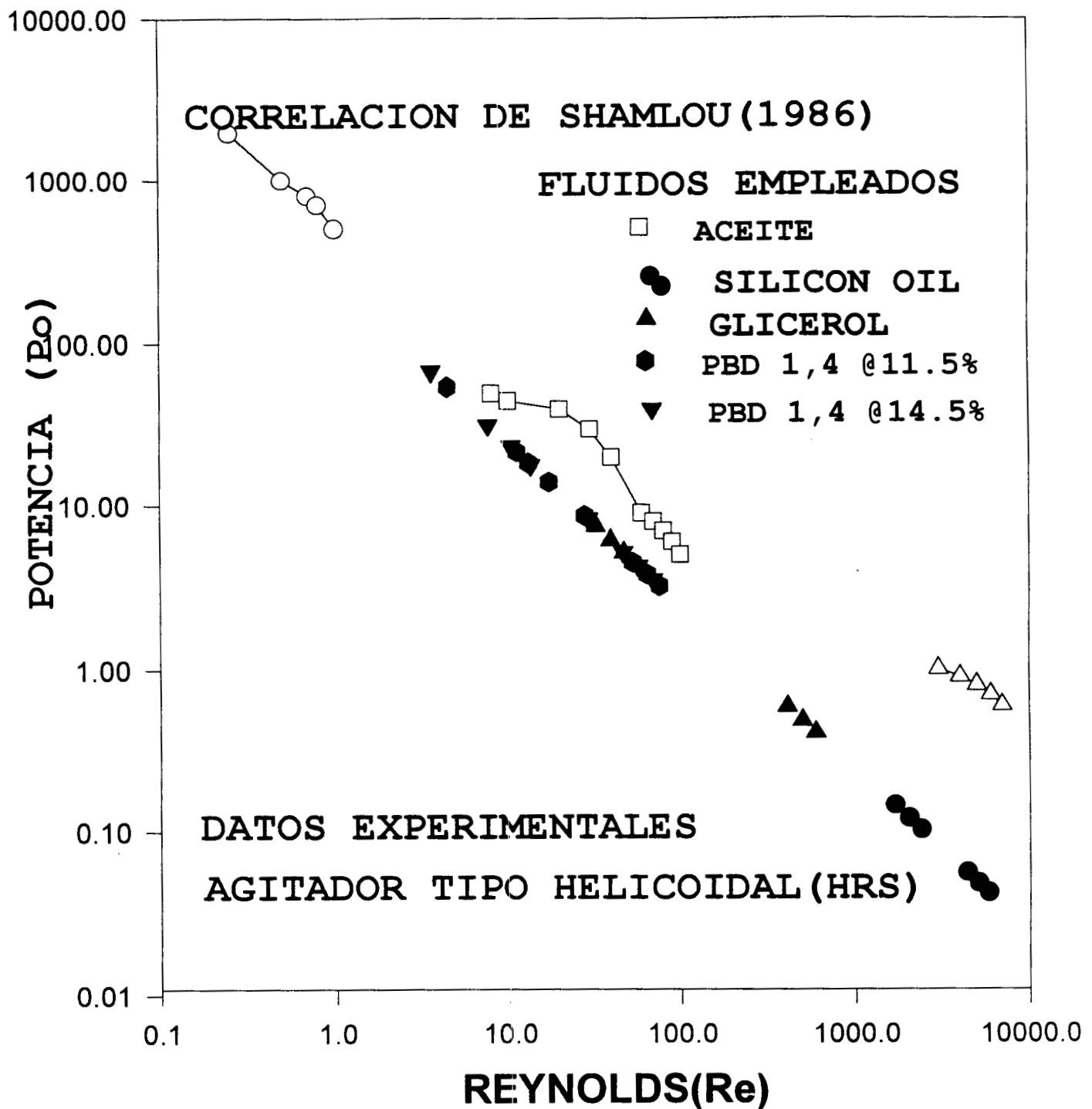


FIGURA 1.4.-DATOS DE CONSUMO DE POTENCIA VS. EL NUMERO DE REYNOLDS<sup>[35,36]</sup>.

## **CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.**

---

### **1.2.3.-TIEMPOS DE MEZCLADO Y DE CIRCULACION.**

En régimen laminar además del consumo de potencia, se debe tomar en cuenta la relación entre el tiempo de mezclado, ( $t_m$ ), y la velocidad de rotación del impulsor, ( $N$ ), para cada geometría específica.

Esta relación esta representada por la siguiente expresión:

$$Nt_m = K_m \quad (3)$$

donde:

$N$ = Velocidad de agitación (1/seg).

$t_m$ = Tiempo de mezclado (seg).

$K_m$ = Constante geométrica

El tiempo de mezclado se define como el período necesario para lograr un determinado grado de homogeneidad en el sistema. Este parámetro es un criterio confiable de macromezclado que permite estimar la eficiencia en el proceso.

A pesar de que el tiempo de mezclado es una variable que está fuertemente relacionada con el grado de homogeneidad alcanzado en el sistema, existe muy poca información al respecto. Se considera que en régimen laminar, el tiempo de mezclado decrece cuando la velocidad se incrementa; tal como se aprecia en la Figura 1.5.

Diversas correlaciones de tiempo de mezclado que han sido publicadas previamente<sup>[7,8]</sup>, y presentan una dependencia de este parámetro con la configuración geométrica del sistema. Este tipo de correlaciones se resumen en la Tabla 1.3.

Adicionalmente, a las variables de consumo de potencia y tiempo de mezclado, el tiempo de circulación es un criterio adicional para definir el grado de homogeneidad en el sistema, que relaciona la capacidad de recirculación del agitador. Este parámetro se define como el tiempo que toma a un elemento del fluido en recorrer un determinado circuito del patrón del flujo en el sistema de mezclado.

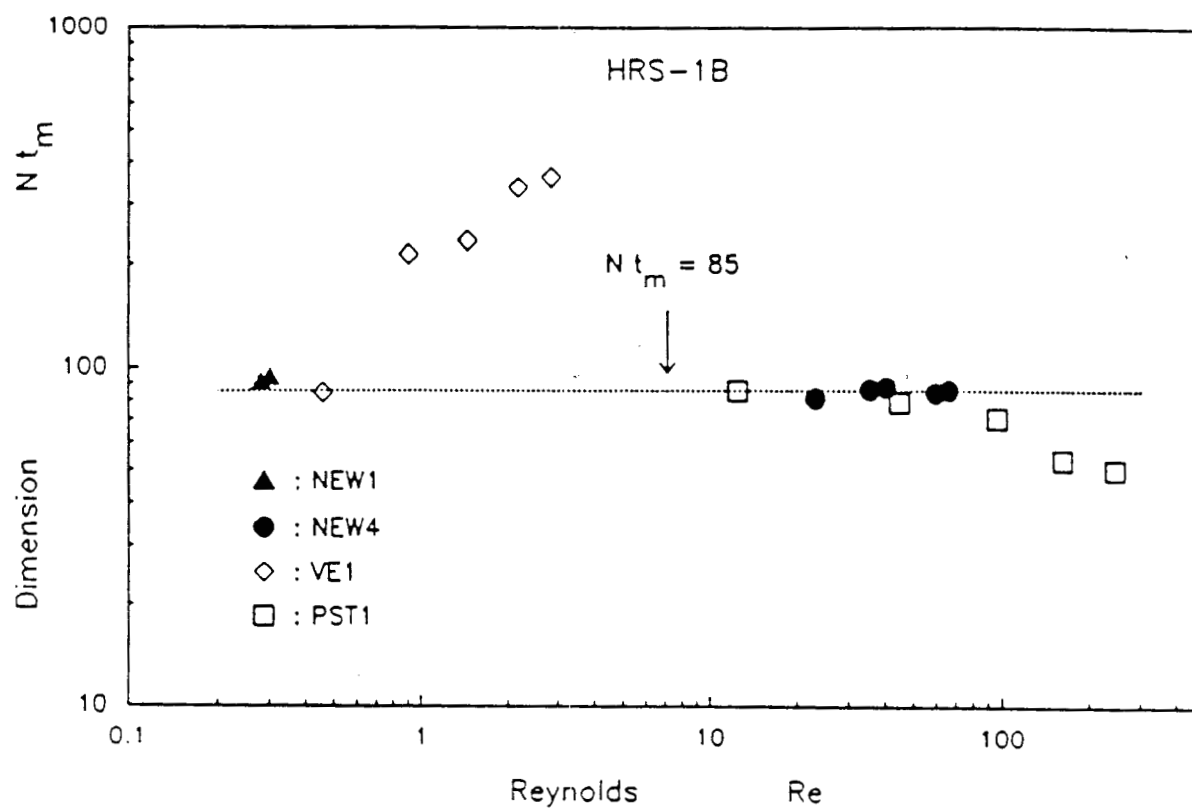


FIGURA 1.5.-EFECTO DEL TIEMPO DE MEZCLADO EN FUNCION DEL NUMERO DE REYNOLDS<sup>[7,42]</sup>.

## CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.

TABLA 1.3.-DATOS DE TIEMPO DE MEZCLADO PARA IMPULSORES HELICOIDALES (HR Y HRS<sup>[8]</sup>).

| TRABAJO:                    | Km=N*tm          | COMENTARIOS. (REGIMEN LAMINAR)                                                                                                                                                     |
|-----------------------------|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gray, (1963).               | 25               | HR:Fluido Newtoniano ( $20 < \mu < 60$ )                                                                                                                                           |
| Zlokanik, 1967.             | 38-72            | HR:Fluido Newtoniano ( $0.1 < \mu < 40$ )                                                                                                                                          |
| Hoogendoorn, et al, (1967). | 65               | HR:Fluido Newtoniano.                                                                                                                                                              |
| Nagata, et al, (1972).      | 30-57<br>100-150 | HRS y HR:Laminar, el agitador central no modifica el tm.                                                                                                                           |
| Ho y Kwong, (1973).         | 90-126           | HR y HRS:Re<20, $0.5 < s/d < 1.0$ .                                                                                                                                                |
| Novak, (1975)               | 40               | HR:Re<40                                                                                                                                                                           |
| Chavan, et al, (1975).      | 100              | HRS:Fluidos Pseudoplásticos no tiene influencia en el tm y la elasticidad lo incrementa.                                                                                           |
| Bourne, et al, (1979).      | 45-53            | HR:Fluidos Newtonianos; w/d no presenta efecto en Km.                                                                                                                              |
| Patterson, et al, (1979).   | 22-49            | HR:Fluidos Newtonianos, $0.1 < \mu < 0.8$ ; a valores grandes de w más eficiente es el mezclado.                                                                                   |
| Käppel (1979)               | 90-130           | HR:Newtonianos; $2.5 < \mu < 35.8$                                                                                                                                                 |
| Takahashi, et al, (1988).   | 30-40            | HR:Fluidos Newtonianos y pseudoplásticos; una fuerte dependencia de Km en c/D y tm se incrementa a un incremento del grado de pseudoplásticidad.                                   |
| Rieger, et al, (1986).      | 35-140           | HR:Fluidos Newtonianos, $30 < Re < 100$                                                                                                                                            |
| Tanguy, et al, (1992).      | 47.5<br>85<br>66 | HR y HRS:Fluidos Newtonianos, pseudoplásticos, elásticos y viscoelásticos; $0.1 < Re < 100$ ; El grado de pseudoplásticidad no modifica el tm y el agitador central incrementa Km. |

## CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.

|                       |                  |                                                                                                                                                                 |
|-----------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Este trabajo, (1994). | 23-28<br>120-133 | HRS:La viscosidad incrementa el tiempo de mezclado( $t_m$ ) y este es función de la temperatura.<br><br>Fluidos viscosos.<br>Fluidos Pseudoplásticos empleados. |
|-----------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Con los datos de consumo de potencia y tiempos de mezclado previamente descritos, se calcula la energía de mezclado, parámetro muy útil para definir la eficiencia en un sistema de mezclado.

La energía de mezclado se define como la cantidad de energía requerida para lograr un determinado nivel de homogeneización de las propiedades o características del fluido.

Así, con los datos de consumo de potencia reportados en la Figura 1.4 y el tiempo de mezclado presentado en la Tabla 1.3, se calcula la energía de mezclado. Este parámetro de comparación es más confiable que únicamente el utilizar el consumo de potencia en la selección de un impulsor.

Por lo tanto, se recomienda emplear la energía de mezclado para decidir si para una situación en particular, un cierto tipo de impulsor es el más recomendable en el mezclado de fluidos que presenten una reología compleja; tal como se ilustra en la Figura 1.6.

La energía de mezclado definida por la ecuación (4), relaciona tanto las variables de potencia como del tiempo de mezclado en un sistema específico, por medio de la siguiente ecuación:

$$E_m = P \cdot t_m \quad (4)$$

donde:

- P = Consumo de potencia en forma adimensional,
- $t_m$  = Tiempo de mezclado, definido en base a la variable de temperatura axial.

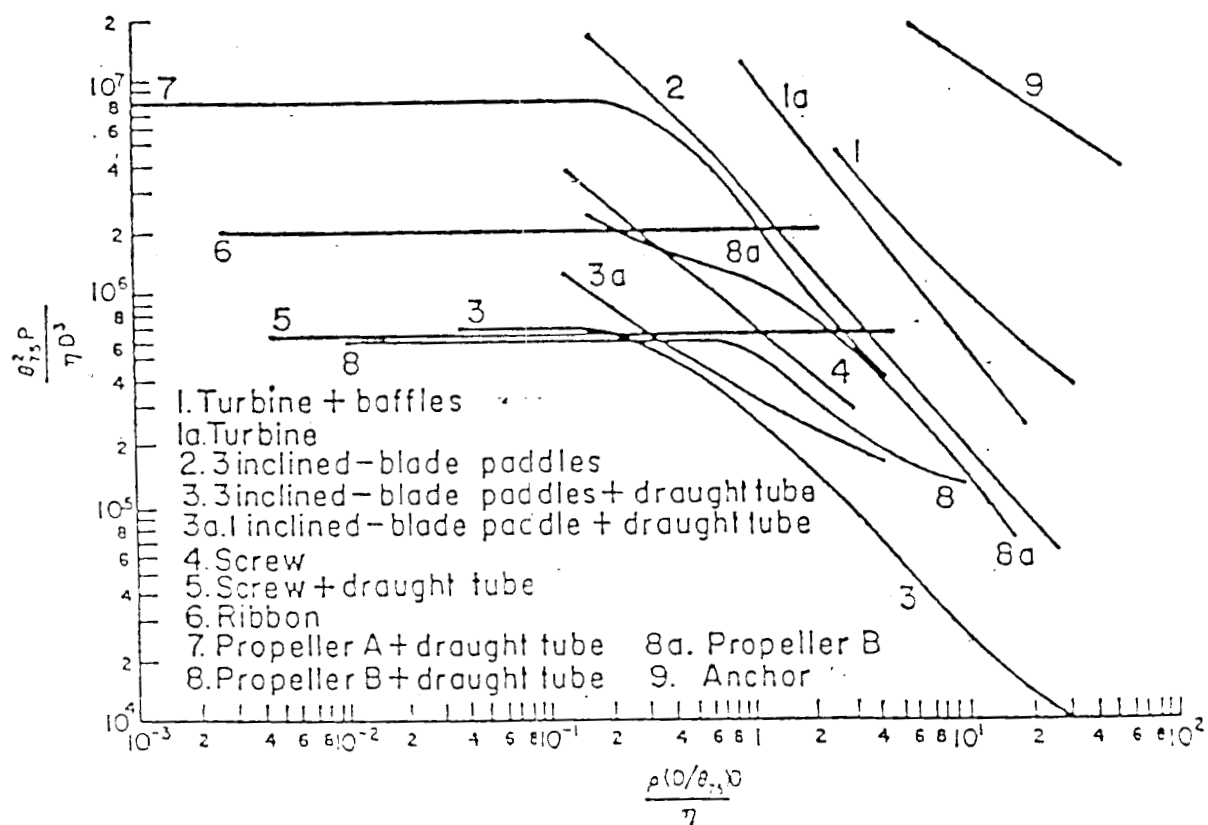


FIGURA 1.6.-CRITERIO PARA COMPARAR EL FUNCIONAMIENTO DE DIFERENTES MEZCLADORES<sup>(8,20)</sup>, SE EMPLEA LA ENERGIA DE MEZCLADO.

## **CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.**

---

### **1.3.-MODELOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.**

Una gran variedad de procesos químicos y biológicos son efectuados en tanques de mezclado empleando diferente tipo de impulsores, donde los líquidos son mezclados con diferentes sistemas de agitación de paletas, turbina, helicoidales, etc.

En la gran mayoría de los casos es necesario enfriar y/o calentar el contenido de estos tanques, sobre todo en los procesos de reacción altamente exotérmicos presentes comúnmente en el procesamiento con fluidos petroquímicos.

El proceso de enfriamiento usualmente se efectúa a través de superficies de transferencia de calor, las cuales pueden ser de diferente geometría ya sea en forma de chaqueta de enfriamiento colocadas alrededor del tanque o de serpentines tubulares colocados en el seno del líquido.

En el diseño de un sistema de enfriamiento de tanques agitados el problema más común es la determinación del tipo de sistema de agitación a emplear y las necesidades de agitación para un proceso determinado.

Generalmente el proceso global de transporte térmico entre el reactor y el sistema de enfriamiento involucra tres resistencias<sup>[4,24,44]</sup>:

- 1) Transferencia convectiva de calor entre el recipiente de proceso y la pared interna,
- 2) Transporte conductivo a través de la pared del recipiente de proceso, y
- 3) Transporte convectivo entre la pared externa del recipiente de proceso y el fluido del sistema de enfriamiento.

El coeficiente global de transferencia de calor (U) se determina como un conjunto de resistencias térmicas en serie, como:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{ext}} + \frac{Espesor}{k} + \frac{1}{\sum h_i} \quad (5)$$

## **CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.**

---

La ecuación (5) representa el conjunto de resistencias que intervienen en la determinación del coeficiente de transferencia global de calor, donde la primera etapa (el coeficiente de película interno) se considera normalmente el paso controlante en el proceso de transferencia de calor, el segundo término de la ecuación es despreciable, debido a que el espesor es muy pequeño en relación al diámetro del tanque y la conductividad térmica del acero es elevada y el tercer termino de la ecuación es el coeficiente de película externo, considerado en este caso despreciable en la relación  $(1/h_{ext})$ , ya que el coeficiente de película externo representa una cantidad considerablemente grande, debido principalmente a que esta sujeto a velocidades de agitación muy elevadas en el sistema de control de temperatura.

Por lo que el coeficiente global se le representa de la siguiente forma:

$$U = \Sigma h_i \quad (6)$$

La transferencia de calor convectiva expresada por la ecuación (6), está asociada con el cambio de energía entre una superficie y un fluido adyacente.

Existen pocas situaciones de interés práctico en las que no ocurra una transferencia de energía y el movimiento de un fluido. Un ejemplo de lo anterior, es la transferencia de calor en tanques agitados que se utilizan con frecuencia en el enfriamiento de reactores de polimerización, cuando los polímeros son elaborados por lotes; por lo que la necesidad de contar con un eficiente proceso de mezclado a fin de lograr remover el calor generado en el sistema hacia el sistema de enfriamiento es indispensable.

Cuando se realiza un intercambio térmico en un recipiente agitado la cantidad de calor removido en estado estable se puede evaluar utilizando el valor del coeficiente convectivo de la ecuación (6), por medio de la expresión siguiente:

$$Q = UA\Delta T \quad (7)$$

## CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.

---

La naturaleza del proceso de intercambio térmico representado por la ecuación (7), depende tanto de la diferencia de temperaturas, el área de transferencia de calor disponible y el coeficiente global de transporte de calor, que es función de los coeficientes individuales de cada una de las etapas anteriores.

El coeficiente de transferencia de calor para fluidos no Newtonianos en tanque agitado, es descrita en forma usual por una correlación del tipo<sup>[4,24,44]</sup>:

$$Nu = C Re^a Pr^b Vis^c \quad (8)$$

donde:

- Nu= Número de Nusselt, que relaciona los mecanismos de transferencia de calor convectivo ( $h_i$ ) y conductivo ( $k$ ).
- Re= Número de Reynolds, que relaciona las condiciones hidrodinámicas del sistema, entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas.
- Pr= Número de Prandtl, que relaciona las propiedades del fluido.
- Visc=Relación de viscosidad entre el sistema de enfriamiento y el seno del fluido.
- C= Relación de las diferentes constantes geométricas.

El problema a resolver para una situación de transferencia de calor en sistemas de mezclado, es el cálculo del coeficiente( $h_i$ ) de película del lado del fluido a enfriar. Este coeficiente depende de la geometría del tanque, del grado de agitación, así como de las características del fluido y se calcula a partir de correlaciones empíricas obtenidas en base a datos experimentales.

La estimación de la tasa de transferencia de calor en un sistema de mezclado ha sido objeto de varios estudios previos<sup>[37]</sup>, los cuales se resumen en la Tabla 1.4.

**CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.**

**TABLA 1.4.-CORRELACIONES DE TRANSFERENCIA DE CALOR TIPO NUSSELT.** <sup>[36,37]</sup>

| TRABAJO                | d              | D              | P/D               | W/D                     | C/D                     | Re               | CORRELACIONES PARA EL NUMERO DE NUSSELT(Nu)                                                              |
|------------------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NAGATA<br>ET.1975      | 13<br>13       | 15<br>15       | .5<br>1.          | 0.015<br>0.015          | 0.026<br>0.026          | <10 <sup>3</sup> | $N_u = C Re^a Pr^b \mu^c (d/D)^e cte^g$ $N_u = 0.568 * Re^{0.23} Pr^{0.23} n_b^{0.23} *$ $(c/T)^{-0.54}$ |
| BOURNE<br>ET.1975      | 13<br>13       | 15<br>15       | .38,<br>82        | 0.103<br>0.124          | 0.062<br>0.059          | <10 <sup>3</sup> | $N_u = C * Re^a Pr^b \mu^c (d/D)^e cte^g$                                                                |
| SAITO ET.<br>1981      | 12             | 16             | 0.9               | .1                      | .024<br>.068<br>.076    | <10 <sup>3</sup> | $N_u = Pr^{1/3} * (\mu_a / \mu)^{-0.2} * Re$                                                             |
| TAKASHAKI<br>ET. 1982a | 13<br>11<br>12 | 15<br>12<br>12 | 0.90<br>.50.<br>9 | 0.113<br>0.113<br>0.113 | 0.060<br>-----<br>----- | <10 <sup>3</sup> | $N_u = C * Re^a Pr^b \mu^c (d/D)^e cte^g$                                                                |
| DEAK<br>ET.1985        | 12<br>14       | 15<br>15       | 0.41<br>.3        | 0.084<br>0.012          | -----                   | <=2<br>0         | $N_u = C * Re^a Pr^b \mu^c (d/D)^e cte^g$                                                                |

## CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.

|                     |                |                |                   |                         |                         |                  |                                                                                                                                                                        |
|---------------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SHAMLOU<br>ET.1986a | 13             | 15             | 1.0               | 0.100                   | 0.076                   | <1               | $N_u = \frac{1}{6} cte^{0.22} Re^{0.17} Pr^{-1/3} \mu^{-1/5}$ $N_u = 0.45 * Re^{0.6} Pr^{-1/3} \mu^{-1/5}$ $\rho N_c \frac{D^2}{\mu} = f( (\mu Cp/k) (c/D) (p/D) (n_b$ |
| SHAMLOU<br>1986b    | 13<br>13<br>11 | 15<br>15<br>15 | 1.0<br>0.5<br>0.5 | 0.097<br>0.104<br>0.106 | 0.055<br>0.055<br>0.163 | <10 <sup>3</sup> | $N_u = C * Re^a Pr^b \mu^c (d/D)^e cte^g$ $\delta$ $Nu = 0.57 \left[ \frac{(\frac{k}{\rho * Cp})}{(c^2 * N)} \right]^{-0.2} \left( \frac{c}{T} \right)^{-1}$           |
| RIEGER ET.<br>1986  | 13<br>13<br>14 | 15<br>15<br>15 | 1.01<br>.01.<br>0 | 0.200<br>0.200<br>0.100 | 0.060<br>0.045<br>0.025 | <10 <sup>3</sup> | $N_u = C * Re^a Pr^b \mu^c$                                                                                                                                            |
| MASIUK<br>1990      | 18             | 20             | 0.51<br>.02.<br>0 | 0.044<br>0.083<br>0.167 | 0.055<br>0.055<br>0.055 | <10 <sup>3</sup> | $N_u = C Re^a Pr^b \mu^c$                                                                                                                                              |

## **CAPITULO I. PROPIEDADES REOLOGICAS Y FUNDAMENTOS DE MEZCLADO.**

---

El objetivo en un sistema de mezclado con transferencia de calor, consiste en la evaluación de la rapidez de transferencia de calor con la geometría y condiciones de flujo existentes.

En la Tabla 1.4 el número de Nusselt es función de cada una de las variables que intervienen, tales como las condiciones hidrodinámicas, las propiedades del fluido y la geometría del sistema; pero muy pocas de estas correlaciones toman en cuenta estudios precisos de la reología del fluido y su efecto entre el seno del fluido y la pared del tanque de mezclado.

Adicionalmente, pocos estudios relacionan las ecuaciones generadas por el mezclado con las ecuaciones de transferencia de calor, situación muy común a la gran mayoría de los procesos de mezclado industrial.

En las correlaciones de la Tabla 1.4 se aprecia, que ningún modelo disponible da información acerca de lo que pasa entre la temperatura en el seno del líquido y la pared del tanque; por lo que siempre se considera que la temperatura del líquido es uniforme, lo cual no es completamente válido debido a que existen variaciones significativas en dirección radial y axial en el sistema geométrico.

---

## **II.-DESARROLLO DEL MODELO DE MEZCLADO.**

**II.-MODELOS MATEMATICOS.**

En los últimos años los procesos de mezclado y transporte de calor de fluidos reológicamente complejos( p.ej. poliméros en solución), han cobrado mayor importancia debido a la necesidad de optimizar la operación de mezclado, a fin de alcanzar los requerimientos de calidad del producto terminado<sup>[5,16]</sup>.

Lo anterior ha originado a estudios más profundos en el proceso de mezclado y en la transferencia de calor con impulsores de proximidad; ya que la necesidad de desarrollar modelos matemáticos aplicables a sistemas con diferente geometría tanto en fluidos Newtonianos como en fluidos no Newtonianos es indispensable a nivel industrial.

**2.1.-MODELOS TRANSFERENCIA DE CALOR Y MOMENTO.**

Actualmente el empleo de modelos matemáticos tratan de describir el comportamiento de diversas situaciones en sistemas físicos basados en los fenómenos de transporte, tanto de momento como de energía y/o masa<sup>[13,14]</sup>.

En la operación de un reactor de polimerización por ejemplo, los fenómenos de trasporte involucrados son conservación de momento(debido a el sistema de mezclado), energía(por los altos calores de reacción y las grandes energías de activación) y masa(por los mecanismos difusionales presentes); por lo que un modelo de transporte que describa un sistema de esté tipo resultaría muy complejo de resolver.

En esté estudio se resuelve únicamente el problema de momento y transferencia de calor en líquidos Newtonianos y no Newtonianos; a fin de lograr un conocimiento adecuado en procesos de mezclado de fluidos poliméricos y la extracción de gradientes apreciables de calor, está situación es de gran interés en la industria química.

En general, el estudio de los patrones de flujo y su efecto en la transferencia de calor en tanques agitados con impulsores de proximidad tiende a incrementarse, con el uso de técnicas matemáticas y de equipo experimental sofisticado. Lo anterior motivado por la inquietud de predecir los patrones de flujo presentes en el interior de un sistema de mezclado.

Los modelos de mezclado desarrollados presentan los perfiles de velocidad y temperatura en coordenadas cilíndricas basados en las ecuaciones de Navier-Stokes modificadas<sup>[4,23]</sup>, así como en los balances de energía, descritos por sistemas de ecuaciones diferenciales parciales del tipo elíptico(EDPE), que describen los patrones de flujo y los perfiles de temperatura en el interior de un sistema experimental.

#### 2.1.1.-EL MODELADO DE LOS PATRONES DE FLUJO EN SISTEMAS CON FLUIDOS REOLOGICAMENTE COMPLEJOS.

En el modelamiento del mezclado con transferencia de calor en sistemas de tanque agitado, se tienen generalmente dos tipos de modelos<sup>[13,17,18,19]</sup>:

- 1) Modelos Empíricos: Se aplican a sistemas lineales o linealizados y generalmente, son funciones de transferencia discretas(ecuaciones en diferencias), las cuales proveen una representación del comportamiento de un proceso de mezclado.

Sus parámetros son usualmente obtenidos a partir de datos experimentales, pero presentan ciertas desventajas tales como limitaciones en sus rangos de aplicabilidad, ya que las extrapolaciones realizadas con estos modelos son generalmente muy pobres debido al comportamiento no lineal de los sistemas de mezclado.

- 2) Modelos Teóricos: Los modelos de este tipo generalmente son complejos para poder tener una estructura satisfactoria y para reproducir correctamente las condiciones de mezclado del sistema; tal como se muestra en la Figura 2.0.

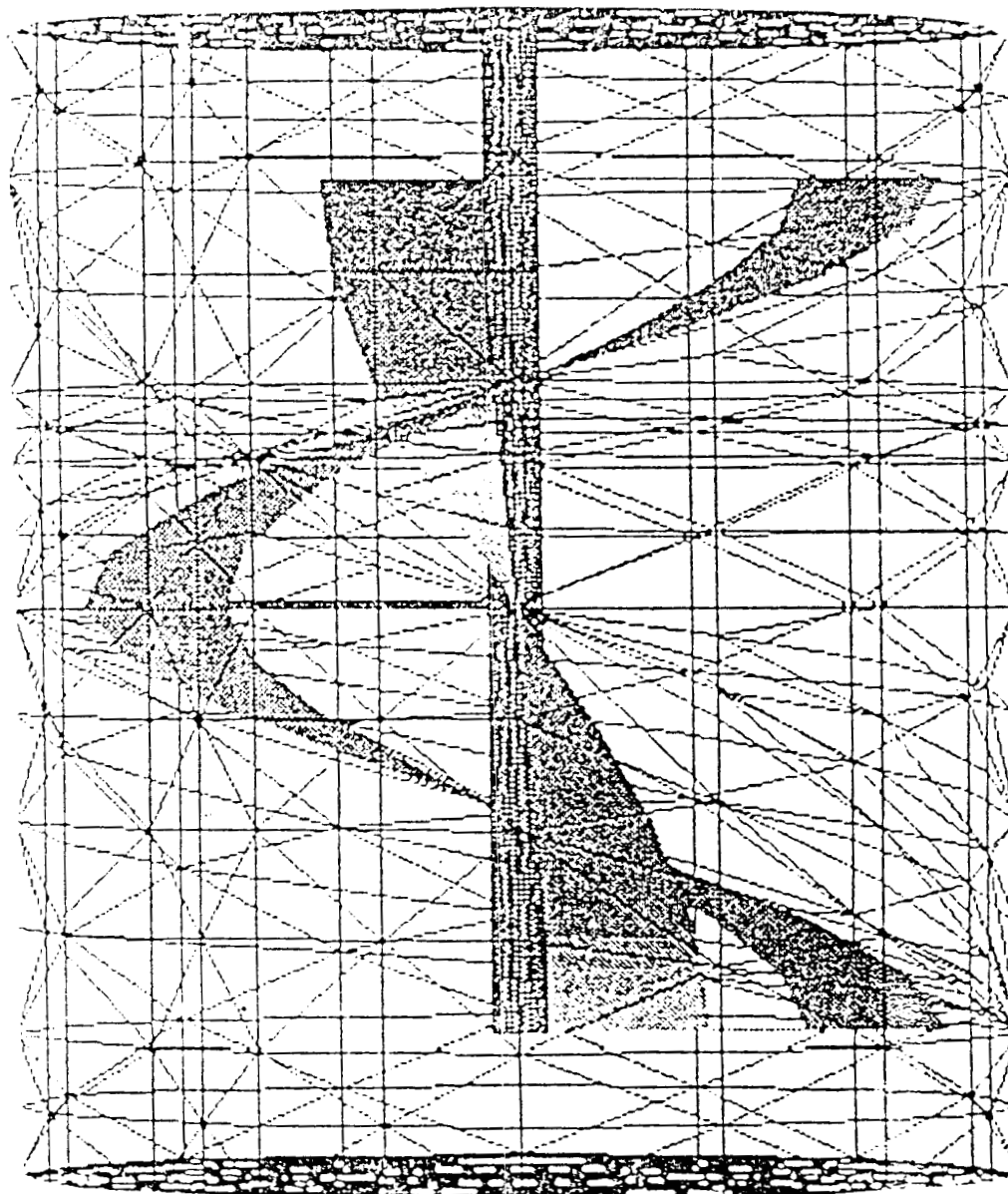


FIGURA 2.0.-REPRESENTACION DEL MALLEO NECESARIO PARA UN ANALISIS DE MEZCLADO EN TRES DIMENSIONES CON IMPULSORES HELICOIDALES<sup>(41)</sup>.

2.1.2.-ESTRATEGIAS SEGUIDAS EN LA ELABORACION DE UN MODELO MATEMATICO: En el planteamiento de los modelos y en su solución, se requiere de una serie de pasos dentro de su construcción, tal como se muestra a continuación:

- 1.- Definición del problema; modelamiento de mezclado en base a los mecanismos involucrados: de momento, energía y/o masa.
- 2.- Análisis del problema(del mundo físico a la abstracción), sistema cilíndrico, empleando un impulsor tipo helicoidal en el mezclado de fluidos Newtonianos y no Newtonianos.
- 3.- Desarrollo del modelo, por medio de (En sus tipos de lineal y no lineal):
  - a)Ecuaciones Algebraicas,
  - b)Ecuaciones Diferenciales Ordinarias,
  - c)Ecuaciones Diferenciales Parciales, balances que describen el mezclado(momento y energía).
  - d)Ecuaciones Combinadas.
- 4.- Solución del modelo, de forma:
  - a)Analítica,
  - b)Aproximada,
  - c)Numérica, en esté estudio utilizando el paquete ELI-COL<sup>[21]</sup>.
- 5.- Evaluación de la solución, Factibilidad física de la solución, traslado del mundo abstracto al mundo físico.

## **2.2.-DESARROLLO DEL MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MEZCLADO EN FORMA GENERAL.**

Las ecuaciones necesarias para representar el flujo de un fluido incompresible en un tanque agitado de manera general, tomando los balances de energía y de momento; se ilustra a continuación.

En principio se muestra los Balances de Energía en coordenadas cilíndricas:

$$\begin{aligned} \rho C_v \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \\ K \nabla^2 T + \mu \left[ \left( \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right)^2 + \right. \\ \left. + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (9)$$

Las ecuaciones de momento que describen los perfiles de velocidad son de la forma siguiente<sup>[4,23]</sup>:

Ecuación de continuidad:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (r v_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

Ecuación de movimiento en dirección r:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - 2\omega v_\theta - \omega^2 r = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + g_r + \frac{n}{\rho} \left( \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right) \\ \frac{2}{\rho} \frac{\partial n}{\partial r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{\rho r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial n}{\partial z} \left( \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

Ecuación de movimiento en dirección  $\theta$ :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v_{\theta}}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_{\theta}}{\partial r} + \frac{v_{\theta}}{r} \frac{\partial v_{\theta}}{\partial \theta} + v_r \frac{v_{\theta}}{r} + v_z \frac{\partial v_{\theta}}{\partial z} + 2\omega v_r = \\ & -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + g_{\theta} + \frac{n}{\rho} \left( \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{v_{\theta}}{r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_{\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_{\theta}}{\partial \theta^2} - \frac{v_{\theta}}{r^2} + \frac{\partial^2 v_{\theta}}{\partial z^2} \right) \\ & + \frac{1}{\rho} \frac{\partial n}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial v_{\theta}}{\partial r} - \frac{v_{\theta}}{r} \right) + \frac{2}{\rho r^2} \frac{\partial n}{\partial \theta} \left( v_r + \frac{\partial v_{\theta}}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial n}{\partial z} \left( \frac{\partial v_{\theta}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} \right) \quad (12) \end{aligned}$$

Ecuación de movimiento en dirección  $z$ :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_{\theta}}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = \\ & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g_z + \frac{n}{\rho} \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \\ & + \frac{1}{\rho} \frac{\partial n}{\partial r} \left( \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{\rho r} \frac{\partial n}{\partial \theta} \times \left( \frac{\partial v_{\theta}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} \right) + \frac{2}{\rho} \frac{\partial n}{\partial z} \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad (13) \end{aligned}$$

El modelo de mezclado en forma general esta representado por las ecuaciones 9 al 13 y representan un modelo bastante completo pero su solución es muy compleja, debido principalmente a que este tipo de modelos requieren sistemas de computo sofisticados (p.ej. CRAY Y-Mp4/464), por la gran cantidad de ecuaciones ha resolver. Adicionalmente se requieren de parámetros tanto hidrodinámicos como reologicos más precisos y completos.

En la Figura 2.0 se muestra, el malleo para un análisis numérico tridimensional, por el método de elemento finito.

### 2.3.-DESARROLLO DEL MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MOMENTO EN FORMA ADIMENSIONAL.

Con el fin de plantear un modelo sencillo, en base a los balances de transporte antes descritos y capaz de representar los perfiles de velocidad, patrones de flujo y los gradientes de temperatura en el sistema de mezclado para el sistema en particular, se considera lo siguiente:

- 1) El agitador y al tanque como dos cilindros concéntricos, con un radio interior  $R_0$  y un radio exterior  $R_1$ , ambos de longitud  $L$ . Para lo cual se tomó al agitador como una frontera solida entre la flecha y la pared del tanque, flujo tipo COUTTE con la limitante que esta suposición implica.
- 2) El flujo es con deformación simple en estado estacionario.
- 3) El fluido en cuestión esta en una sola fase y se considera incompresible.
- 4) El término de la disipación viscosa no se considera en éste estudio por considerarse despreciable, en base a lo publicado en trabajos previos, y por lo complejo de su cuantificación.
- 5) La función aproximación es del tipo polinomial a la solución de la ecuación diferencial.

En el desarrollo de cada uno de los modelos de mezclado supone lo siguiente:

- a) El centro del agitador como el origen de las coordenadas en el sistema experimental, donde el eje  $r$ , representa la dirección radial,  $\theta$  representa la dirección angular y  $z$  la dirección axial.
- b) Las ecuaciones diferenciales parciales (EDP) de momento (Ecuaciones modificadas de Navier-Stokes<sup>(23)</sup>) y energía generadas están relacionadas entre si y las variables a resolver por el método de colocación ortogonal son:  $V_\theta(r,z)$ ,  $V_z(r,z)$  y  $T(r,z)$  en coordenadas cilíndricas. El planteamiento de cada modelo se muestra con sus variables en el apéndice III.

## CAPITULO II

## DESARROLLO DEL MODELO.

2.3.1.-DESARROLLO DEL MODELO DE TRANSPORTE PARA  $V_\theta(r,z)$  Y  $T(r,z)$ .

Las ecuaciones diferenciales parciales de momento y energía que representan el proceso de mezclado con transferencia de calor están relacionadas entre si y las variables a resolver por el método de colocación ortogonal son tanto  $V_\theta(r,z)$  y  $T(r,z)$ .

I).-MODELO EN DIRECCION ANGULAR

ECUACION DE MOVIMIENTO:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial \epsilon^2} + \frac{1}{(\phi + \epsilon)} * \frac{\partial V}{\partial \epsilon} - \frac{V}{(\phi^2 + 2\phi\epsilon + \epsilon^2)} + S^2 * \frac{\partial^2 V}{\partial \zeta^2} = 0 \quad (14)$$

ECUACION DE ENERGIA:

$$Br \left( S^2 \left( \frac{\partial V}{\partial \zeta} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial \epsilon} \right)^2 - \frac{2 * V}{(\phi + \epsilon)} * \frac{V^2}{(\phi^2 + 2\phi\epsilon + \epsilon^2)} \right) + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \epsilon^2} + \frac{1}{(\phi + \epsilon)} * \frac{\partial \Theta}{\partial \epsilon} + S^2 \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \zeta^2} = 0 \quad (15)$$

Esté modelo se resuelve con las condiciones frontera de la Tabla 2.0 y los parámetros de operación presentes en el apéndice III; tal como se muestra en las Tablas III.1 y III.2.

TABLA 2.0-CONDICIONES FRONTERA PARA EL MODELO EN DIRECCION ANGULAR.

| POSICION                                 | MOVIMIENTO               | TEMPERATURA                                                      |
|------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------|
| $\epsilon = (R - R_o) / (R_i - R_o) = 0$ | $V = V_z / V_{zmax} = 1$ | $\theta = \text{Finita}^*$                                       |
| $\epsilon = 1$                           | $V = 0$                  | $\frac{\partial \Theta}{\partial \epsilon} = -Bi_h (\Theta - 1)$ |
| $\zeta = Z / Z_{max} = 0$                | $V = 0$                  | $\frac{\partial \Theta}{\partial \zeta} = -Bi_h (\Theta - 1)$    |
| $\zeta = 1$                              | $V = 0$                  | $\partial \theta / \partial \zeta = 0$                           |

\*  $\theta$  = Función polinomial finita, que representa un promedio de temperaturas a diferentes posiciones axiales.

### 2.3.2.-DESARROLLO DEL MODELO DE TRANSPORTE PARA $V_\theta(r,z)$ , $V_z(r,z)$ y $T(r,z)$ .

Las ecuaciones diferenciales parciales de momento y energía resultantes están relacionadas entre si y las variables a resolver son:  $V_\theta(r,z)$ ,  $V_z(r,z)$  y  $T(r,z)$  en éste modelo. A fin de analizar el efecto de los perfiles de velocidad  $V_z(r,z)$  con respecto a los perfiles de velocidad angular  $V_\theta$  en la solución del sistema.

#### II).-MODELO EN DIRECCION ANGULAR Y AXIAL:

##### ECUACION DE MOVIMIENTO:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial \epsilon^2} + \frac{1}{(\phi + \epsilon)} * \frac{\partial V}{\partial \epsilon} - \frac{V}{(\phi^2 + 2\phi\epsilon + \epsilon^2)} + S^2 * \frac{\partial^2 V}{\partial \zeta^2} - Re_z * S * V * \frac{\partial V}{\partial \zeta} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2} + \frac{1}{(\phi + \xi)} * \frac{\partial U}{\partial \xi} + S^2 * \frac{\partial^2 U}{\partial \zeta^2} - Re (Ga + S * U * \frac{\partial U}{\partial \zeta}) = 0 \quad (17)$$

##### ECUACION DE ENERGIA:

$$Br_\theta * (S^2 * (\frac{\partial V}{\partial \zeta})^2 + (\frac{\partial V}{\partial \epsilon} - \frac{V}{(\phi + \xi)})^2) + Br_z * ((\frac{\partial U}{\partial \xi})^2 + 2 * S^2 * (\frac{\partial V}{\partial \zeta})^2) + (\frac{\partial^2 \Theta}{\partial \epsilon^2} + \frac{1}{(\phi + \epsilon)} * \frac{\partial \Theta}{\partial \epsilon} + S^2 * \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \zeta^2}) - B * S * U * \frac{\partial \Theta}{\partial \zeta} = 0 \quad (18)$$

Esté modelo se resuelve con las condiciones frontera de la Tabla 2.1 y los parámetros del apéndice III, en las Tablas III.3 y III.4.

TABLA 2.1.- LAS CONDICIONES FRONTERA PARA EL MODELO.

| Posición:    | $V_\phi$ | $V_z$ | Temperatura, $\theta$                                            |
|--------------|----------|-------|------------------------------------------------------------------|
| $\epsilon=0$ | $V=1$    | $U=1$ | $\theta=\text{Finita}$                                           |
| $\epsilon=1$ | $V=0$    | $U=0$ | $\frac{\partial \Theta}{\partial \epsilon} = -Bi_h (\Theta - 1)$ |
| $\zeta=0$    | $V=0$    | $U=0$ | $\frac{\partial \Theta}{\partial \zeta} = -Bi_h (\Theta - 1)$    |
| $\zeta=1$    | $V=0$    | $U=0$ | $\partial \theta / \partial \zeta = 0$                           |

### 2.3.3.-DESARROLLO DEL MODELO DE PATRONES DE FLUJO EN UN TANQUE AGITADO.

Las ecuaciones diferenciales parciales de momento en forma bidimensional(r,z) resultantes en este modelo, se relacionan entre si en base a la definición de vorticidad, por medio de la función corriente, con el fin de obtener una ecuación diferencial parcial ha resolver, en donde las variables por determinar son:  $V_\theta(r,z)$  y  $V_z(r,z)$ .

#### III).-MODELO DE LOS PATRONES DE FLUJO EN DIRECCION ANGULAR Y AXIAL: ECUACION DE MOVIMIENTO:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial \epsilon^2} + \frac{1}{(\phi + \epsilon)} * \frac{\partial V}{\partial \epsilon} - \frac{V}{(\phi^2 + 2\phi\epsilon + \epsilon^2)} + S^2 * \frac{\partial^2 V}{\partial \zeta^2} - Re_z * S * V * \frac{\partial V}{\partial \zeta} = 0$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2} + \frac{1}{(\phi + \xi)} * \frac{\partial U}{\partial \xi} + S^2 * \frac{\partial^2 U}{\partial \zeta^2} - Re(Ga + S * U * \frac{\partial U}{\partial \zeta}) = 0$$

Por medio de la definición de vorticidad, se relacionan ambos perfiles de velocidad  $V_\theta(r,z)$  y  $V_z(r,z)$  en una sola ecuación fácil de resolver numéricamente.

#### ECUACION DE MOVIMIENTO:

$$-V * \frac{\partial \Psi}{\partial \Theta} - \alpha * \Gamma * U * \frac{\partial \Psi}{\partial \zeta} + \frac{1}{Re_\Theta} * \left[ \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \Theta^2} \right] + \frac{\Gamma}{Re_z} * \left[ \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \zeta^2} \right] = 0 \quad (19)$$

En donde, la función corriente está definida en forma adimensional de la siguiente manera:

$$\Psi = \Gamma * \frac{\partial V}{\partial \zeta} - \alpha * \frac{\partial U}{\partial \Theta} \quad (20)$$

Esté modelo se resuelve con las condiciones frontera presentes en la Tabla 2.2, así como los parámetros de operación en el apéndice III, de las Tabla III.5 y III.6.

TABLA 2.2.- LAS CONDICIONES FRONTERA PARA EL MODELO.

| Posición:  | $V_\phi$ | $V_z$ |
|------------|----------|-------|
| $\zeta=0$  | $V=1$    | $U=1$ |
| $\zeta=1$  | $V=0$    | $U=0$ |
| $\theta=0$ | $V=0$    | $U=0$ |
| $\theta=1$ | $V=1$    | $U=1$ |

**2.4.-SOLUCION DE LOS MODELOS EN FORMA NUMERICA.**

Se han usado diversas técnicas matemáticas para obtener soluciones a este tipo de situaciones particulares. Una de estas técnicas es el método de residuos ponderados en sus modalidades de colocación ortogonal.

Para realizar la solución del sistema de EDP Elípticas resultantes de cada uno de los modelos de transporte planteados, se utilizó el programa ELI-COL, ya que la solución del sistema de Ecuaciones Diferenciales Parciales Elípticas (EDPE) desarrolladas es necesariamente numérica.

El paquete numérico empleado para la solución de las EDPE en cada uno de los modelos de transporte se basa en el método de doble colocación ortogonal, que consiste en aproximar la solución del sistema de ecuaciones generadas con polinomios de Legendre.

El método de colocación ortogonal<sup>[13,38]</sup> consiste en proponer una función de aproximación generalmente polinomial a la solución de una ecuación diferencial y hacer que el residuo  $R(a_j, x)$  sea igual a cero, evaluado en una serie de puntos de colocación.

Esta técnica incluye varias maneras de aproximación que utiliza una solución de prueba en términos de parámetros indeterminadas. Las funciones prueba representan una familia de soluciones, los parámetros indeterminados se seleccionan de tal manera que proporcionen una mejor solución (aproximada) a la ecuación diferencial. Lo anterior, se realiza evaluando el residuo entre la solución real y la aproximada, de tal modo que el residuo ponderado sea cero.

Para el caso de colocación ortogonal, los puntos donde el residuo es cero corresponden a las raíces de los polinomios ortogonales como los de Legendre, Jacobi, Hermite, Laguerre, etc.

Los polinomios ortogonales más comúnmente empleados son los de Legendre y se emplean en éste estudio, ya que el error disminuye a medida que se incrementa el grado del polinomio.

Por lo tanto, con la colocación ortogonal es posible convertir EDP Elípticas a ecuaciones algebraicas, que se resuelven por el metodo de Newton-Raphson y las Ecuaciones Diferenciales Parciales EDP del tipo parabólico, se convierten a EDO con valores iniciales, que se pueden resolver por integración explícita o implícita de Runge-Kutta-Gill.

En esté estudio la función de aproximación del tipo polinomial es expresado de la forma siguiente:

$$P(X) = -1 + 30x - 210x^2 + 560x^3 - 630x^4 + 252x^5 \quad (21)$$

El polinomio es evaluado en una serie de puntos de colocación, los puntos donde el residuo es cero corresponden a las raíces de polinomios ortogonales. Las raíces del polinomio resueltas con Newton (división sintética) son las siguientes:

0.046910077031

0.230765362239

0.500000289408

0.769234288180

0.953090097769

El número de puntos depende de la precisión con que se desee la solución. El número de puntos de colocación ortogonal que se empleó son cinco para las isotérmicas y nueve para los patrones de flujo, por lo tanto el número de sistemas de ecuaciones algebraicas a resolver son en total 98 y 121 respectivamente.

En esté estudio se plantean ecuaciones diferenciales parciales resueltas por medio de una función aproximación con sus condiciones frontera de el tipo Dirichlet y Neumann.

El problema en por tanto, consiste en resolver el sistema de ecuaciones diferenciales que se plantean en el sistema de mezclado propuesto, por lo que la situación física determina las condiciones iniciales o de frontera, o ambas que deberá satisfacer una primera aproximación a la solución final.

Las condiciones frontera se refieren a los valores de temperatura y velocidad que prevalecen. A menudo las condiciones frontera puede relacionar mecanismos combinados de transferencia de energía. Las ecuaciones de los modelos desarrollados en flujo laminar, toman en cuenta el transporte convectivo, el viscoso y las fuerzas externas involucradas durante el mezclado.

Una situación que se presenta muy comúnmente con una frontera sólida, es la de la igualdad entre la transferencia de calor y la superficie de conducción y el calor que abandona la superficie por conveccion, estas condiciones frontera están determinadas por la situación física, siempre y cuando la solución tenga sentido físico.

---

### **III.-METODOS Y MATERIALES.**

**III.- METODO EXPERIMENTAL.**

Se describe a continuación la manera en que se realizaron cada una de las corridas experimentales en el sistema de mezclado. Además de los ordenes de viscosidad manejados utilizando diferentes fluidos; el efecto de la viscosidad sobre el sistema de mezclado con transporte de calor, es analizando tanto el efecto en líquidos Newtonianos y no Newtonianos, usando el modelo de la ley de la potencia de Oswald de Waele.

**3.1.-MONTAJE EXPERIMENTAL Y SUS ACCESORIOS.**

La Figura 3.0 muestra el sistema de mezclado empleado en cada uno de los experimentos, y cada uno de los accesorio:

- 1) Reactor cilíndrico de acero inoxidable de 4 Lts.
- 2) Torquimetro tipo Lightnin, con velocidad de agitacion constante.
- 3) Impulsor helicoidal con tornillo central, (HRS).
- 4) Termopares tipo K,
- 5) Unidad de control de temperatura en el sistema de calentamiento-enfriamiento,
- 6) Sistema de control de nivel del fluido de calentamiento-enfriamiento,
- 7) Sistema de adquisición de datos de temperatura(ubicados a diferentes posiciones axiales en el interior del tanque de mezclado), con 8 canales en cada lectura empleados en el monitoreo tanto del tiempo del mezclado, así como del grado de homogeneización alcanzado en un sistema con impulsores de paleta y de proximidad (p. ej. helicoidal).

El equipo experimental utilizado se muestra en la Figura 3.0 con sus componentes. En su interior se representa las diferentes posiciones axiales de los termopares en el sistema de mezclado.

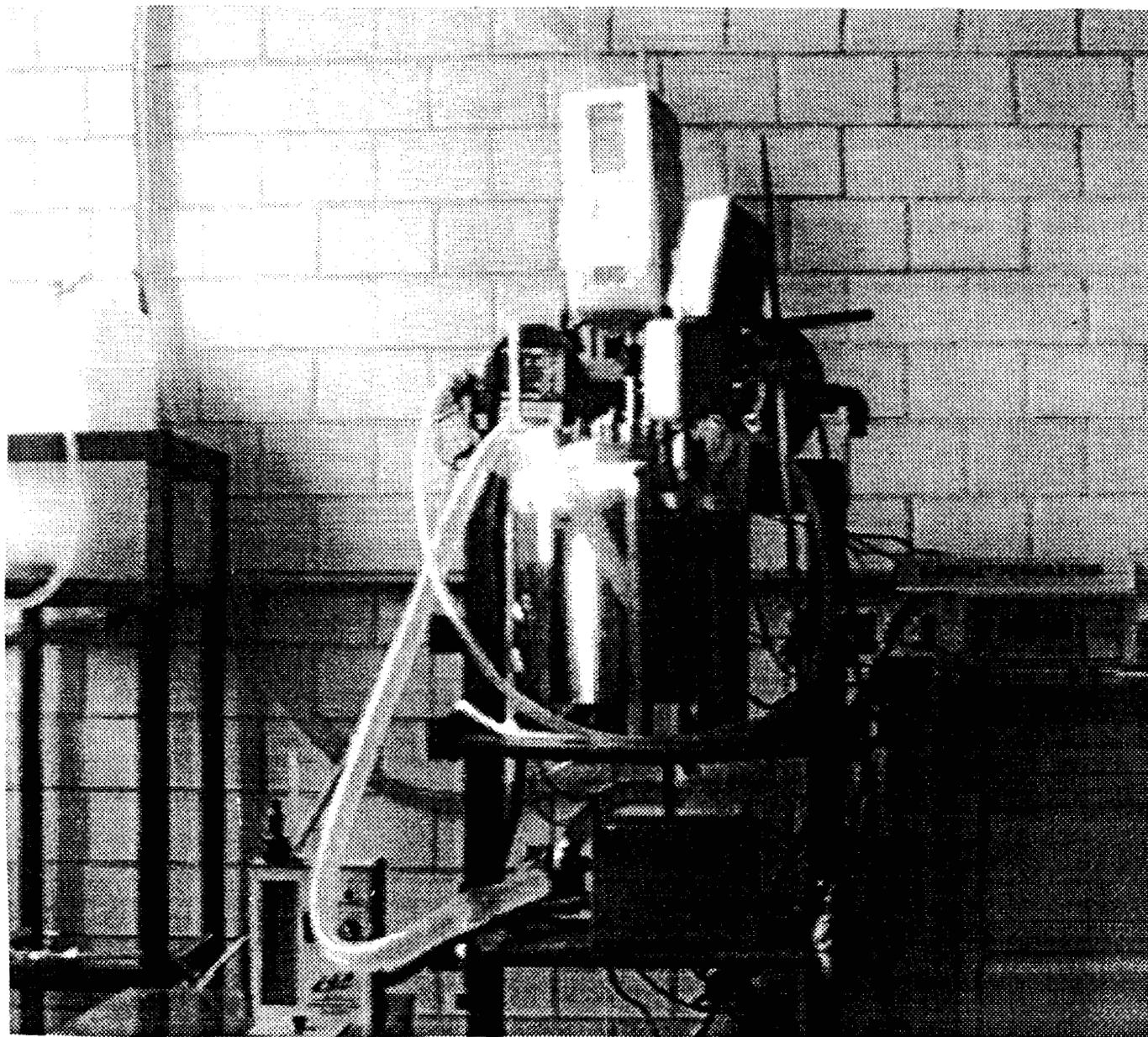


FIGURA 3.0.- EQUIPO EXPERIMENTAL.

En el tanque de mezclado se emplearon diferentes líquidos: agua, silicón, glicerol, polibutadieno en solución a diferentes concentraciones; con los siguientes equipos de trabajo:

- a) Termopares a diferentes posiciones axiales y en lo casos que así lo permita la geometría del agitador radial,
- b) Impulsores de diferente geometría, como los presentados en la Figuras 3.1, 3.2;
- c) Baño de calentamiento controlado, con una resistencia eléctrica de 3,700 watt de capacidad calorífica, así como del proceso de enfriamiento controlado con un sistema refrigerante a 10 °C,
- d) Los procesos son monitoreados con un dispositivo electrónico, a fin de mantener un control de la temperatura dentro del sistema de mezclado.

El monitoreo de las variables de macromezclado previamente descritas, se realizaron en un torquímetro tipo Lighthin; tales lecturas fueron de potencia y tiempo de circulación, en régimen laminar.

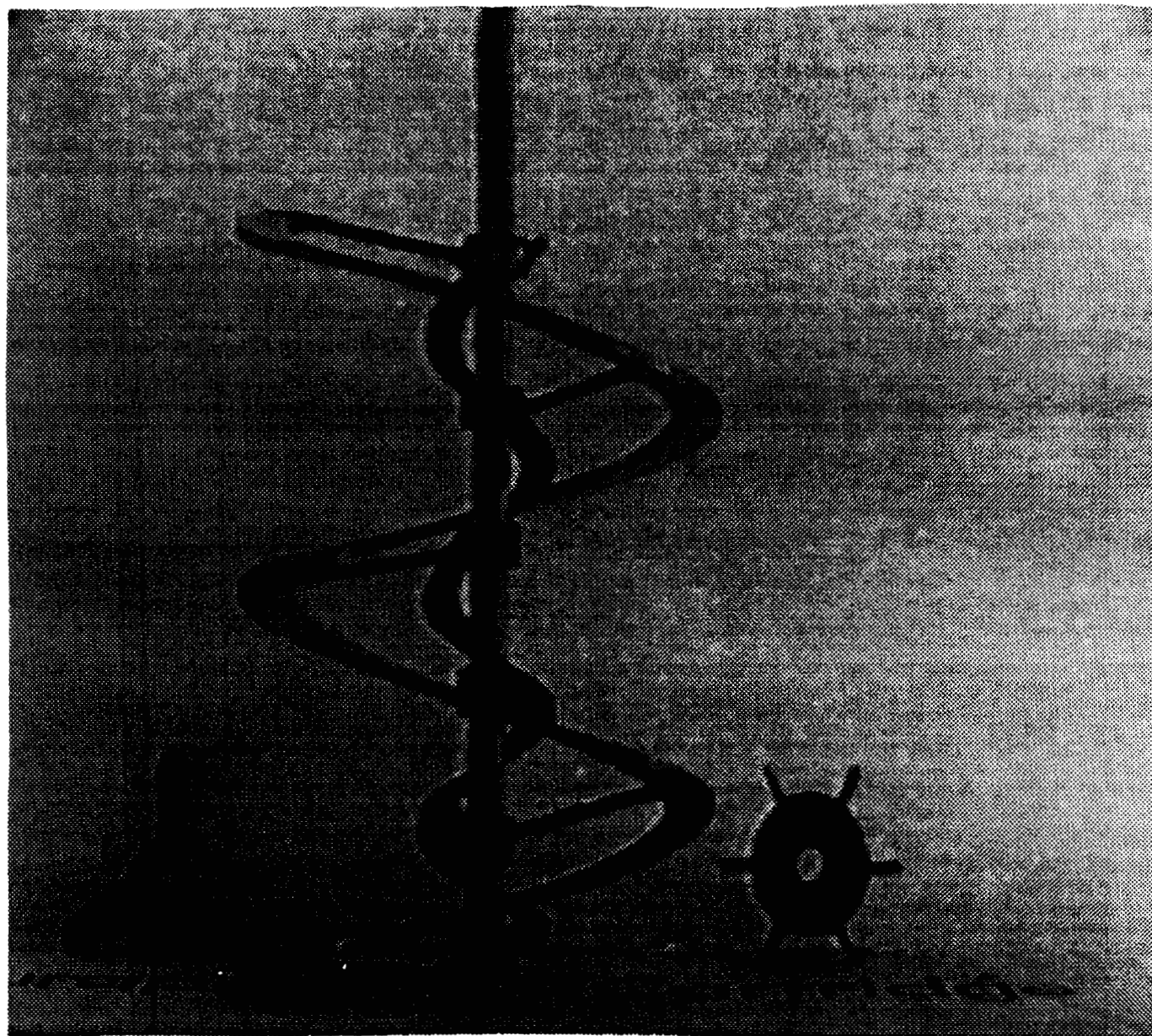


FIGURA 3.1.-TIPO DE IMPULSORES EMPLEADOS EN EL EQUIPO  
EXPERIMENTAL EMPLEADO.

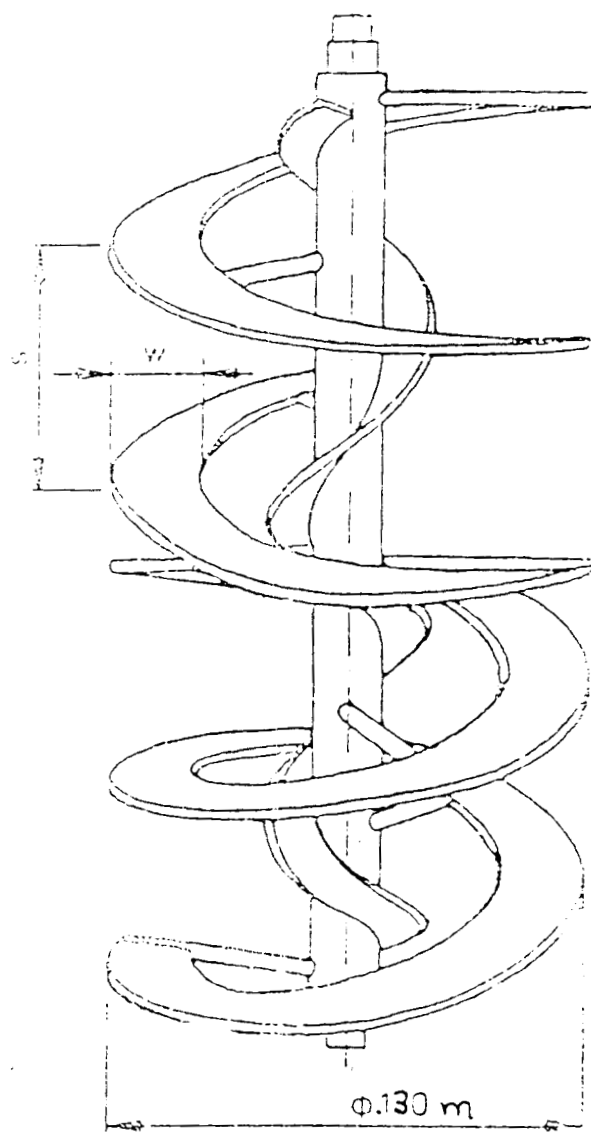


FIGURA 3.2.-DIMENSIONES DEL IMPULSOR EMPLEADO.

### 3.2.-PREPARACION DE LAS SOLUCIONES.

Las soluciones empleadas se prepararon a partir de muestras grado reactivo, utilizando como fluidos viscosos de comportamiento Newtoniano el silicón oil y el glicerol al 95 % y para el caso de fluidos pseudoplásticos muestras de polímero (S-200) de Industrias Negromex S.A., de la ciudad de Salamanca, Gto.

El polímero empleado en el estudio(S-200), corresponde a pacas de producto terminado del proceso de polibutadieno 1,4 en ciclohexano(polimerización en solución).

La preparación de las muestra del polímero tipo polibutadieno 1,4 (PBD 1,4), se prepararon en ciclohexano diferentes diluciones(11.5 y 14.5 % en peso).

Las mediciones de viscosidad se realizaron tanto en un viscosímetro tipo Brookfield como en un Reómetro tipo Haake Rotovisco modelo RV-20 y los resultados se emplean en el desarrollo de cada uno de los modelos de mezclado.

La polimerización en solución de este tipo de producto se describe en el Apéndice I, y su caracterización reológica corroborada en un Reómetro modelo RV-20 con geometría cono y plato, se presenta en el Apéndice II y Apéndice III.

Los valores de viscosidad empleados en esté estudio, son determinados experimentalmente con los equipos mencionados anteriormente, y como se observa, la viscosidad es función de la velocidad de deformación, la cual depende de las condiciones hidrodinámicas presentes en el sistema.

### 3.3.-CONDICIONES EXPERIMENTALES.

El procedimiento experimental utilizado en cada una de las corridas de mezclado y transferencia de calor, están sujetas al tipo de solución a emplear (fluido Newtoniano o fluido no-Newtoniano), a fin de medir las variables de macromezclado.

En la Tabla 3.0, se resumen cada una de las corridas experimentales a las diferentes condiciones de operación.

## 3.3.1.- EL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Las muestras se colocaron en un tanque provisto con una chaqueta de calentamiento/enfriamiento a temperatura controlada; tal como se muestra en la Figura 3.0, y se procedió a un estudio de mezclado empleando diferentes tipos de impulsores, como los paleta y helicoidales con tornillo central.

Lo anterior se realizó con un calentamiento desde 25 °C en forma de rampa hasta alcanzar un estado estable inicial a 80 °C, y posteriormente se realizó un enfriamiento hasta obtener un estado estacionario final a 25 °C; tal como se ilustra en cada una de las gráficas experimentales.

En cada una de las corridas se analizaron los diferentes parámetros de macromezclado, tales como: consumo de potencia, tiempos de circulación y de mezclado tomando como variable de medición para el caso de tiempo de mezclado la temperatura con termopares con una resolución de 30 seg. en su tiempo de respuesta.

El coeficiente convectivo de transferencia de calor se determinó a partir de la correlación de Shamlou et.al<sup>[37]</sup>, parámetro que es necesario en el cálculo del número de Biot utilizado en el modelamiento de mezclado con transferencia de calor.

El procedimiento experimental seguido en el laboratorio, simula procesos de mezclado y transferencia de calor en ausencia de reacción, tal como se presenta en la Tabla 3.0, con el fin de evaluar el grado de homogeneidad alcanzado en función de los gradientes de temperatura medidos a diferentes posiciones axiales en el interior del sistema experimental.

TABLA 3.0.-CONDICIONES EXPERIMENTALES.

| FLUIDO/<br>COND.OPER.                    | Silicón<br>oil.                                              | Glicerol | PBD<br>11 % | PBD<br>14.5% |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------|-------------|--------------|
| VELOCIDAD: rpm                           | 30                                                           | 30       | 30          | 30           |
|                                          | 60                                                           | 60       | 60          | 60           |
|                                          | 70                                                           | 70       | 70          | 70           |
|                                          | 80                                                           | 80       | 80          | 80           |
| RANGO DE<br>TEMPERATURA                  | 25                                                           | 25       | 25          | 25           |
|                                          | 30                                                           | 30       | 30          | 30           |
|                                          | 40                                                           | 40       | 40          | 40           |
|                                          | 50                                                           | 50       | 50          | 50           |
|                                          | 60                                                           | 60       | 60          | 60           |
|                                          | 70                                                           | 70       | 75          | 75           |
|                                          | 80                                                           | 80       |             |              |
| Medición de<br>Temperatura<br>Inicial(T) | 25                                                           | 25       | 25          | 25           |
| Tiempo Edo.<br>estacionario<br>1(Min)    | 30                                                           | 30       | 30          | 30           |
| Temperatura<br>de final<br>Líquido.      | 80                                                           | 80       | 80          | 80           |
| Tiempo edo.<br>estacionario<br>2(Min)    | 30                                                           | 30       | 30          | 30           |
| Viscosidad<br>cada 10 c.                 | Función<br>de fluido<br>y<br>condición<br>es de<br>operación |          |             |              |

El estudio experimental tal como se presenta en la Tabla 3.0 y en la Figura 3.3 se contempla la relación de las variables geométricas, las propiedades del fluido y el efecto sobre el transporte de calor en el tanque agitado, de la manera siguiente:

- a) Montaje y prueba de equipo de mezclado.
- b) Caracterización reológica de los fluidos.
- c) Mediciones de perfiles de temperatura, a fin de obtener una reproducibilidad y repetivilidad de resultados.
- d) Experimentos con diferentes geometrías del agitador (helicoidal y de paletas).
- e) Variación de la viscosidad con la temperatura y con la concentración del polímero.
- f) Implementación y desarrollo de modelo de transferencia de calor y patrones de flujo, en base a mediciones de temperatura.
- g) Reproducibilidad de resultados en el sistema experimental en conjunto, con el objeto de evitar mediciones erróneas en el interior de tanque en lugares, donde se presente tanto zonas muertas como concavidades.
- h) Análisis de resultados experimentales.

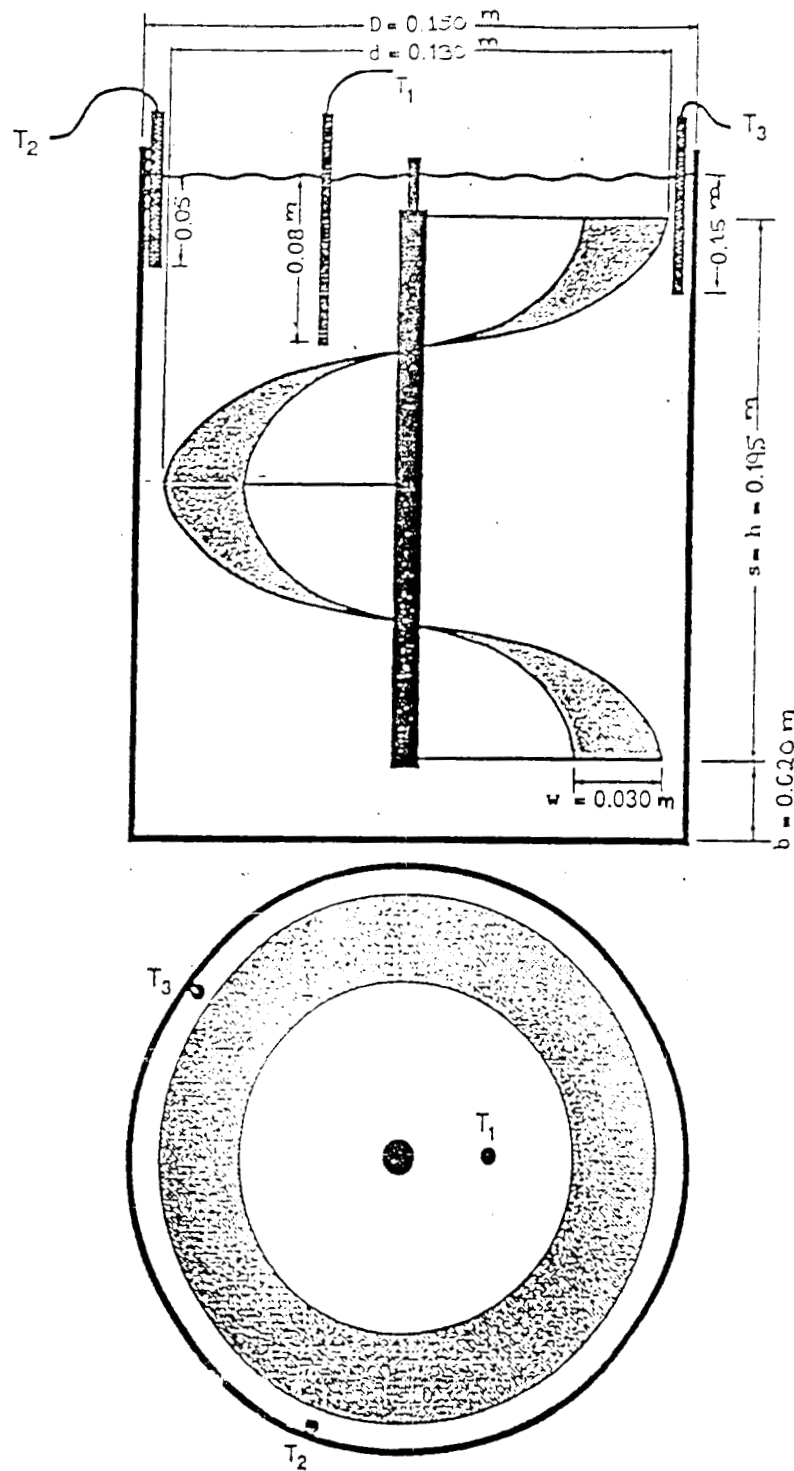


FIGURA 3.3.-REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL ARREGLO EXPERIMENTAL.

---

#### **IV.-ANALISIS DE RESULTADOS.**

**IV.-RESULTADOS.**

Uno de los objetivos de este trabajo consiste en determinar el grado de homogeneidad alcanzado con diferentes impulsores en un proceso de mezclado con transferencia de calor. En general, se sabe que para situaciones de similaridad dinámica y similaridad geométrica, una de las variables más importantes en el estudio de mezclado es la reología del fluido, en especial en el caso de fluidos de reología compleja.

Por esto, en base a un estudio experimental de un sistema de mezclado y al uso de diversos fluidos Newtonianos y no Newtonianos, se plantea una comparación con los modelos matemáticos desarrollados, a fin de describir el grado de homogeneidad alcanzado en función de los gradientes de temperatura, así como de los patrones de flujo en condiciones de estado estacionario.

En los resultados las variables de velocidad de agitación en los perfiles de temperatura en el sistema es significativa; tal como se muestra en la eliminación de calor en la etapa de enfriamiento en las Gráficas 4.1 a 4.32.

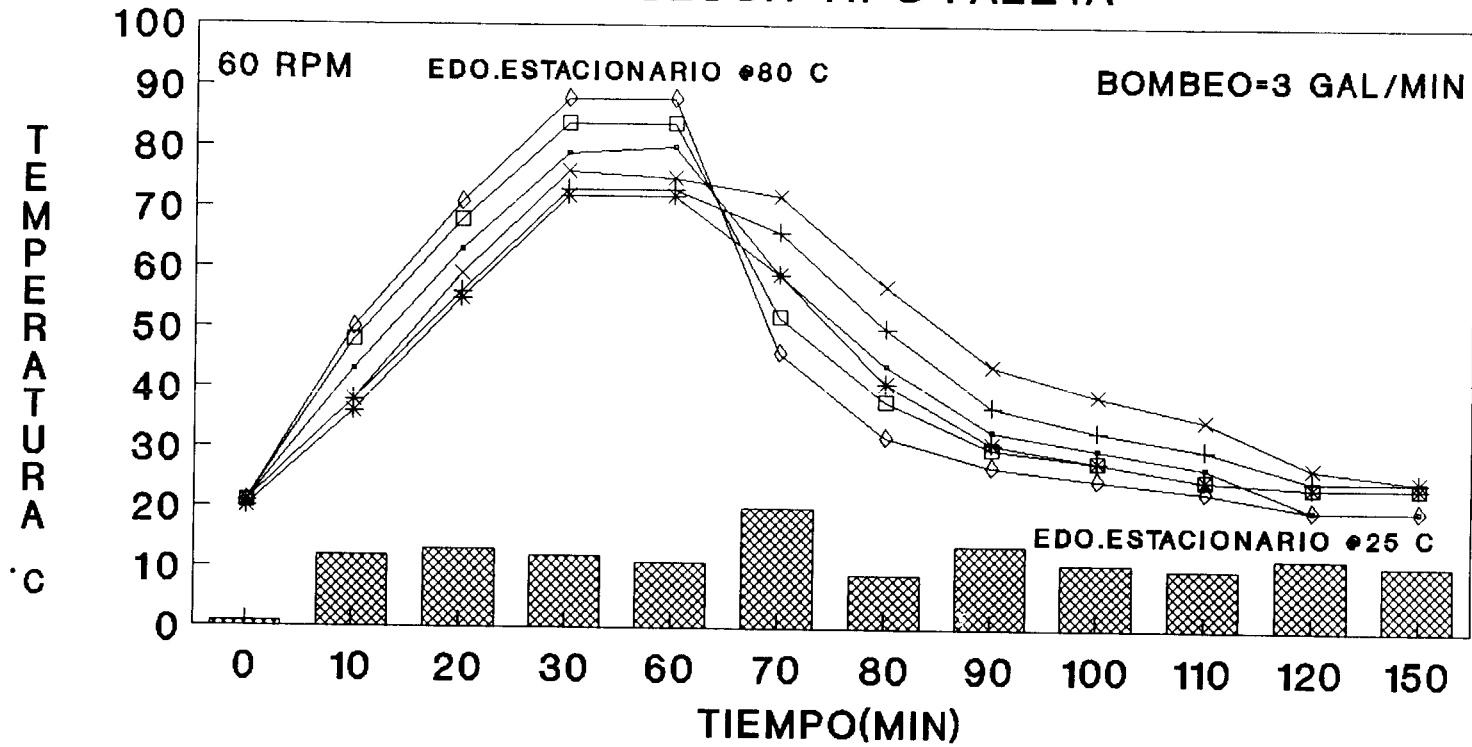
**4.1.-RESULTADOS EXPERIMENTALES DE GRADIENTES DE TEMPERATURA PARA FLUIDOS NEWTONIANOS.**

En las Gráficas 4.1 a 4.17 se muestran los resultados en fluidos Newtonianos a diferentes condiciones de operación, geometría del agitador y reología del fluido:

- 1) Gráficas experimentales 4.1 a 4.4 para agitador tipo paleta empleando silicon oil.
- 2) Gráficas experimentales 4.5 a 4.8 para agitador de proximidad o Helicoidal empleando silicon oil.
- 3) Gráficas experimentales 4.9 a 4.12 para agitador tipo paleta empleando glicerol.
- 4) Gráficas experimentales 4.13 a 4.16 para agitador de proximidad o Helicoidal empleando glicerol.

# GRAFICA No. 4.1

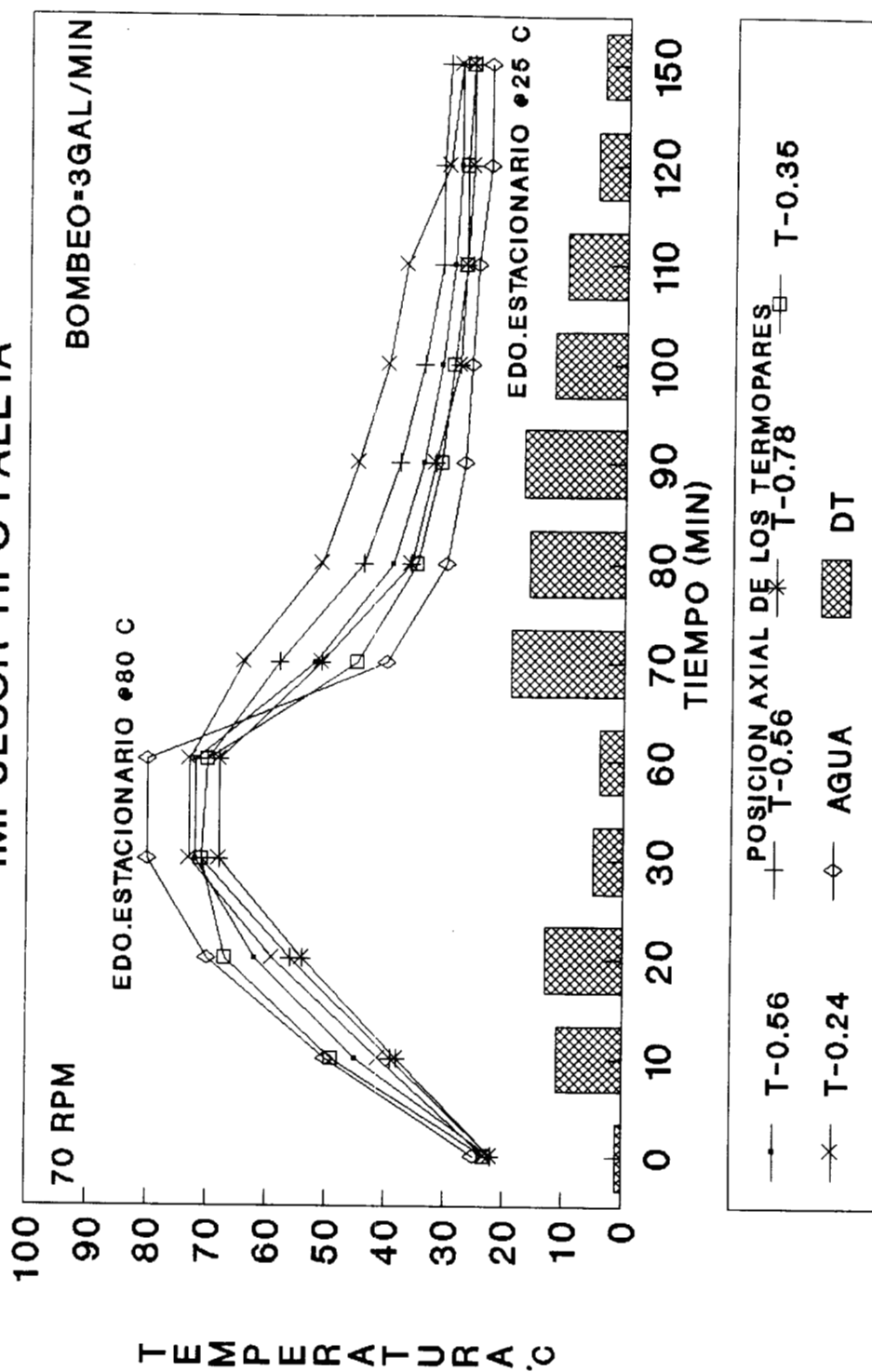
## CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO SILICON OIL IMPULSOR TIPO PALETA



PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

# GRAFICA No. 4.2

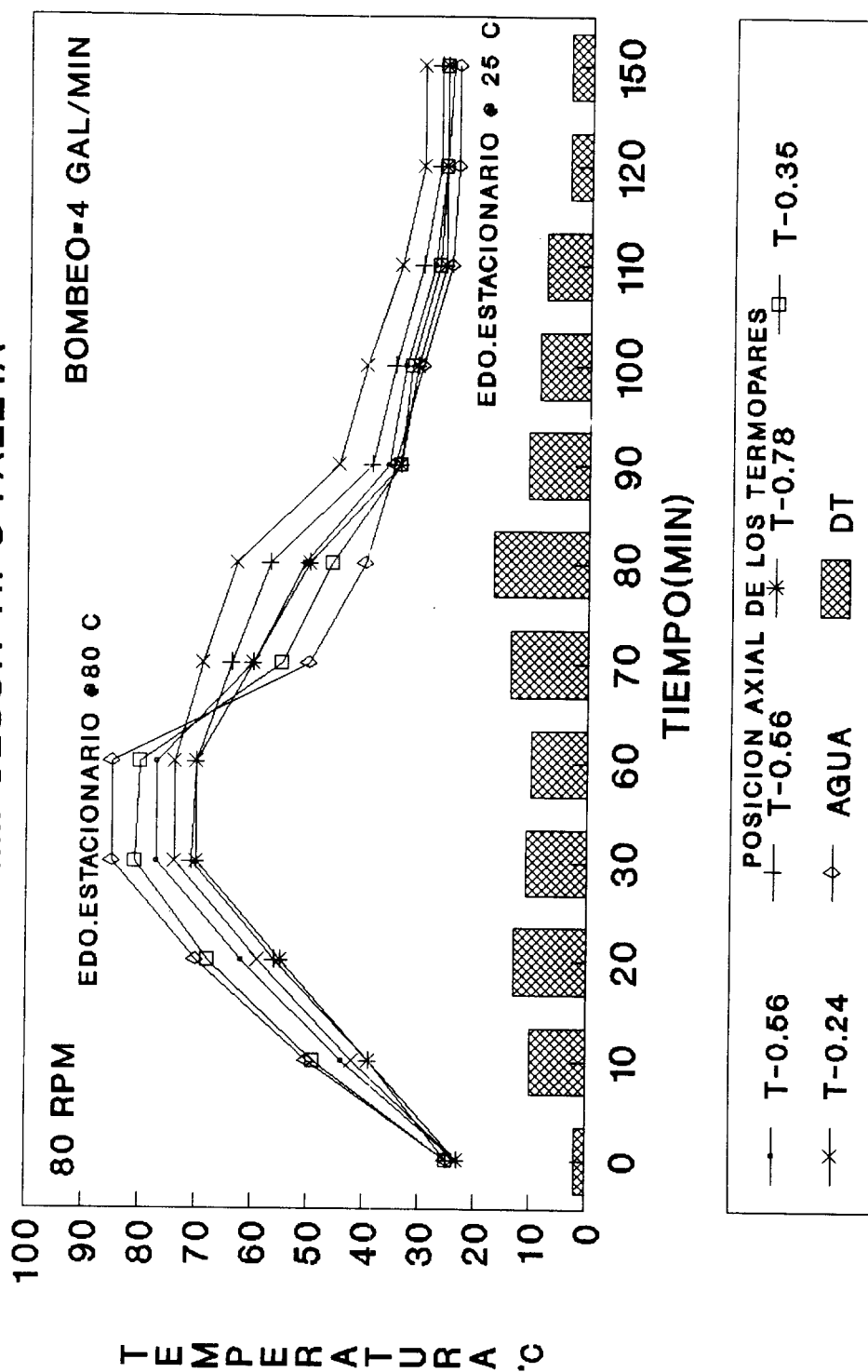
## CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO SILICON OIL IMPULSOR TIPO PALETA



PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

# GRAFICA No. 4.3

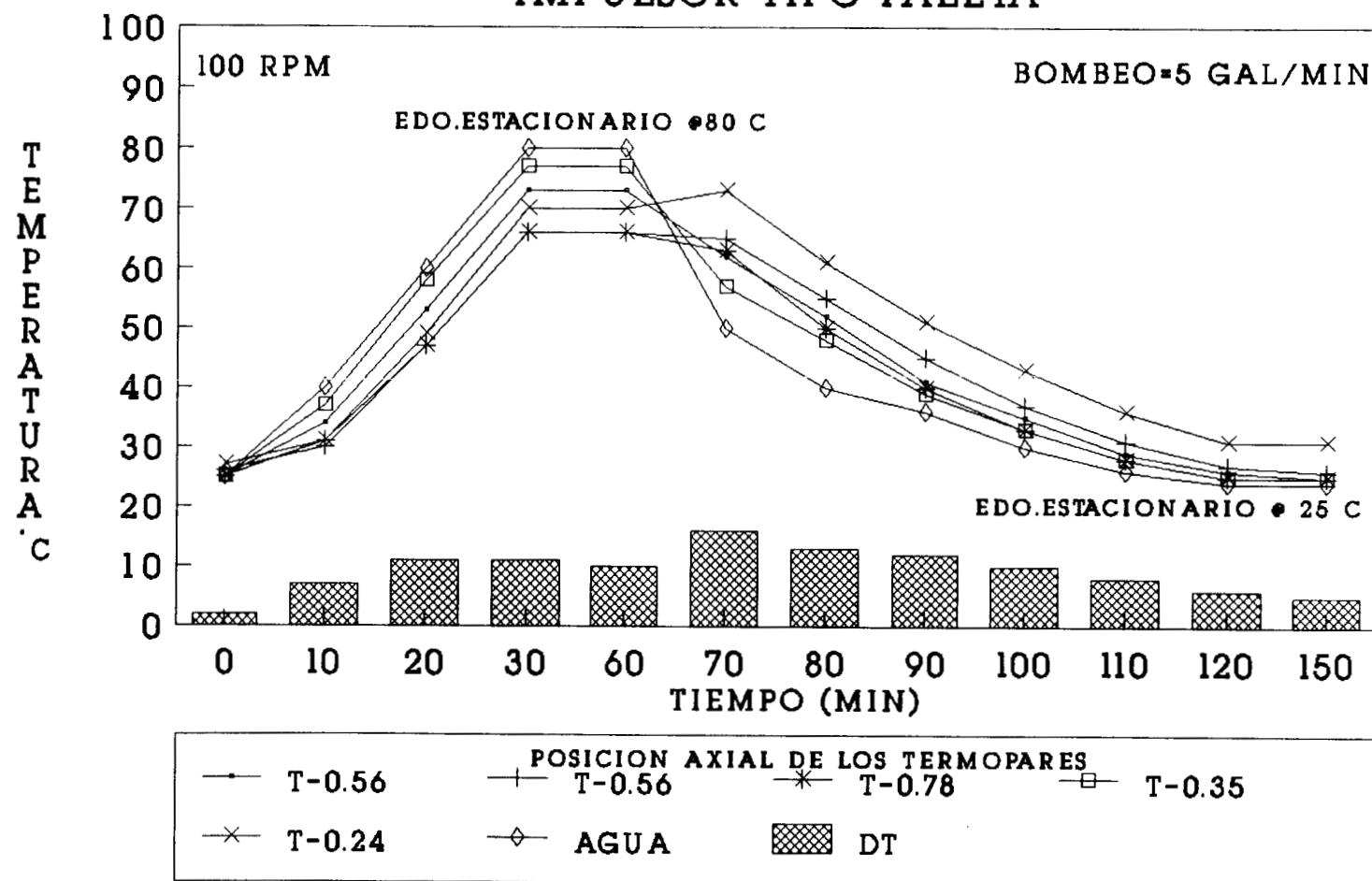
## CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO SILICON OIL IMPULSOR TIPO PALETA



PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

# GRAFICA No. 4.4

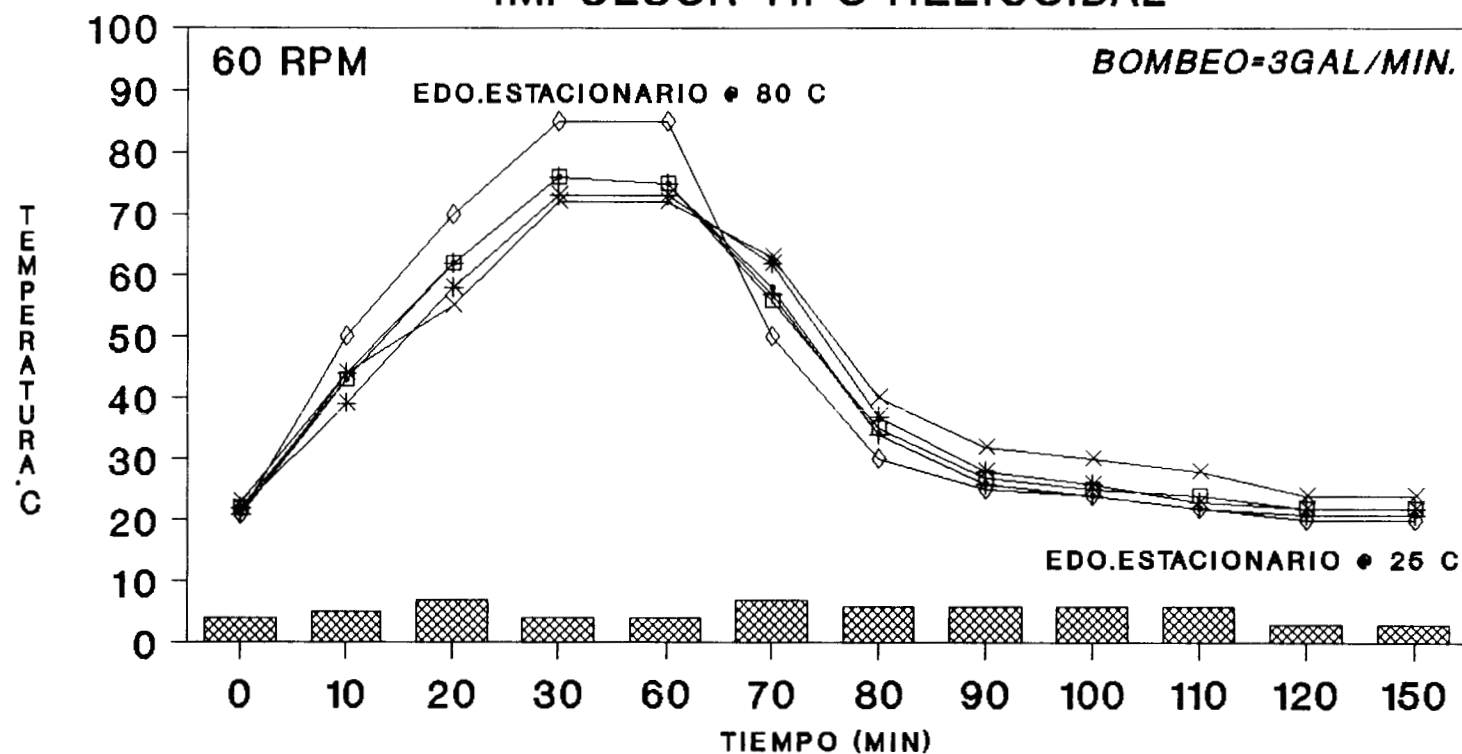
## CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO SILICON OIL IMPULSOR TIPO PALETA



PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

# GRAFICA No. 4.5

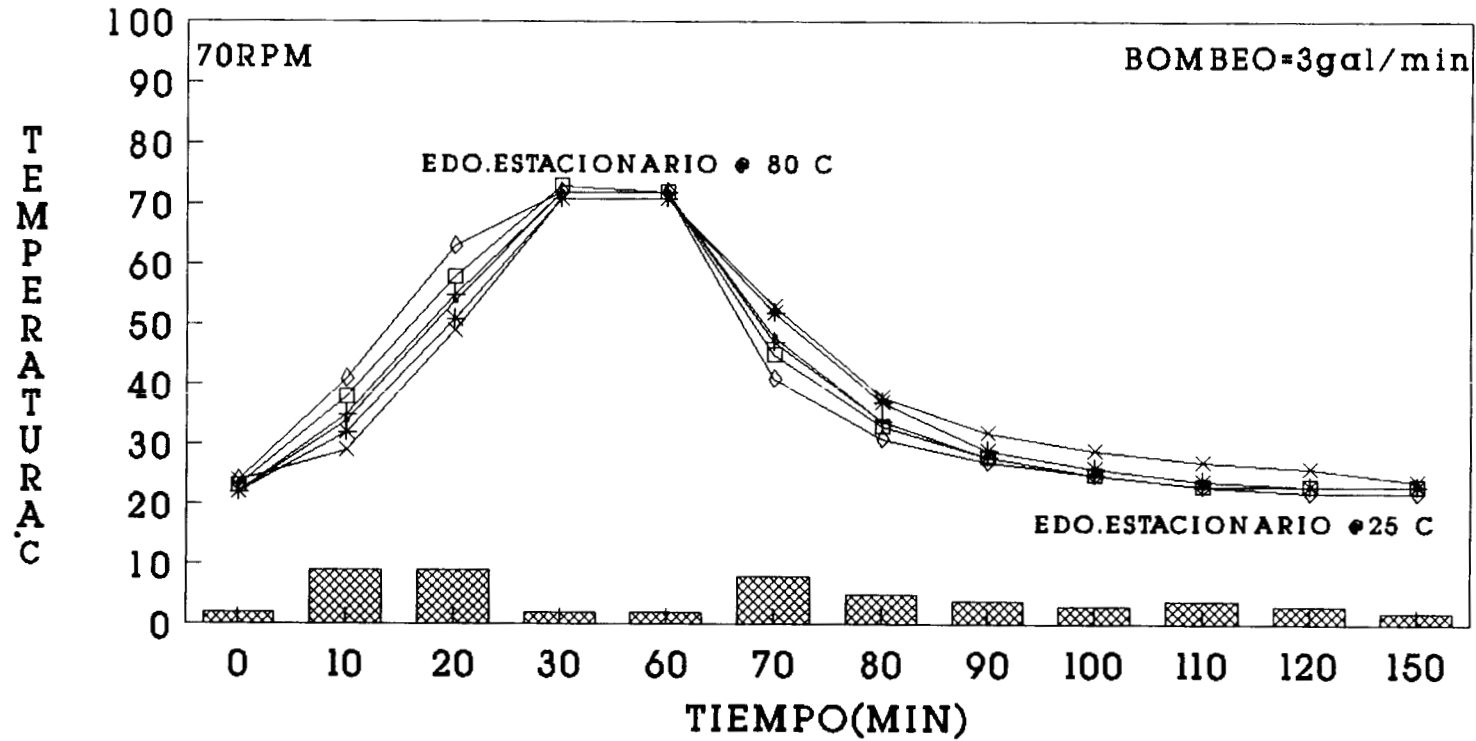
## SIMULACION EXPERIMENTAL FLUIDO SILICON OIL IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

# GRAFICA No. 4.6

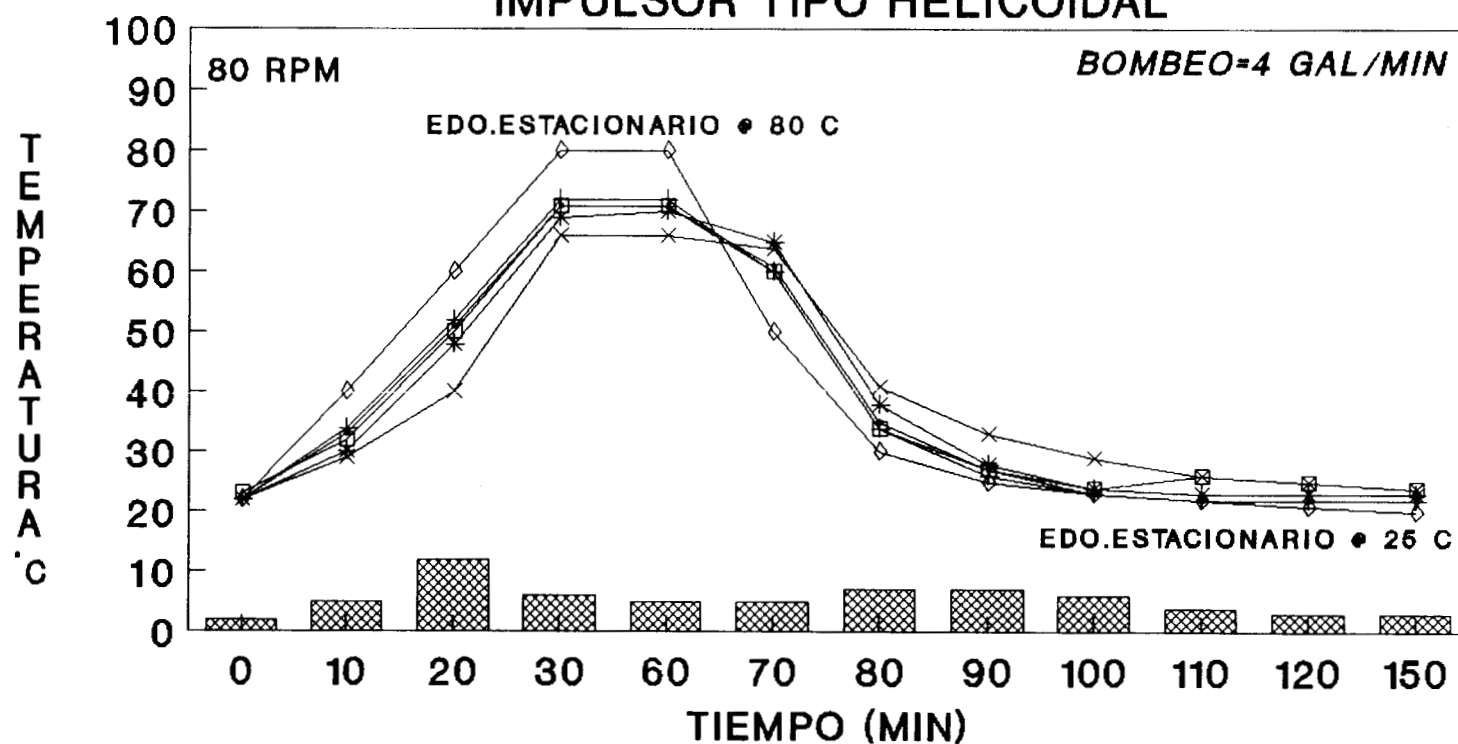
## CORRIDA EXPERIMENTAL. FLUIDO SILICON OIL IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

# GRAFICA No. 4.7

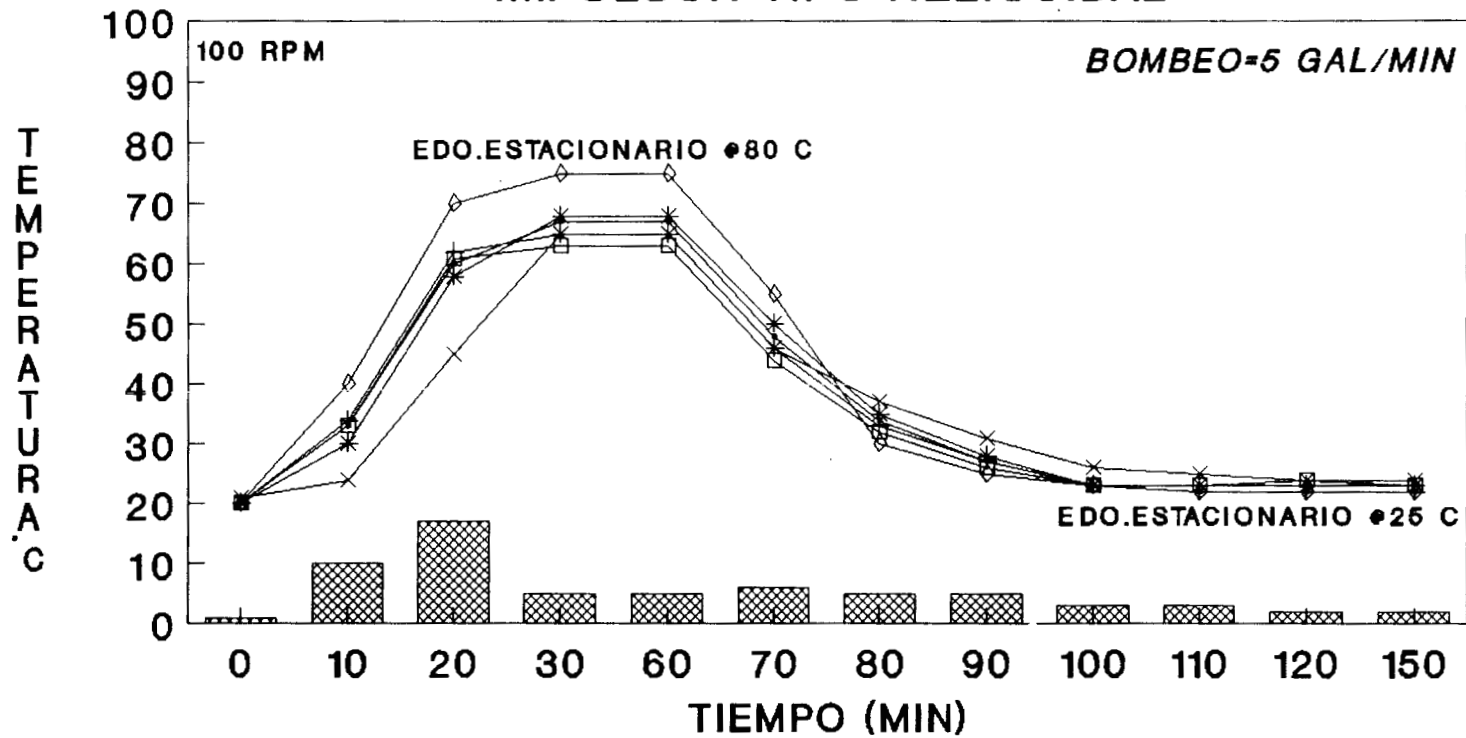
## CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO SILICON OIL IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

# GRAFICA No. 4.8

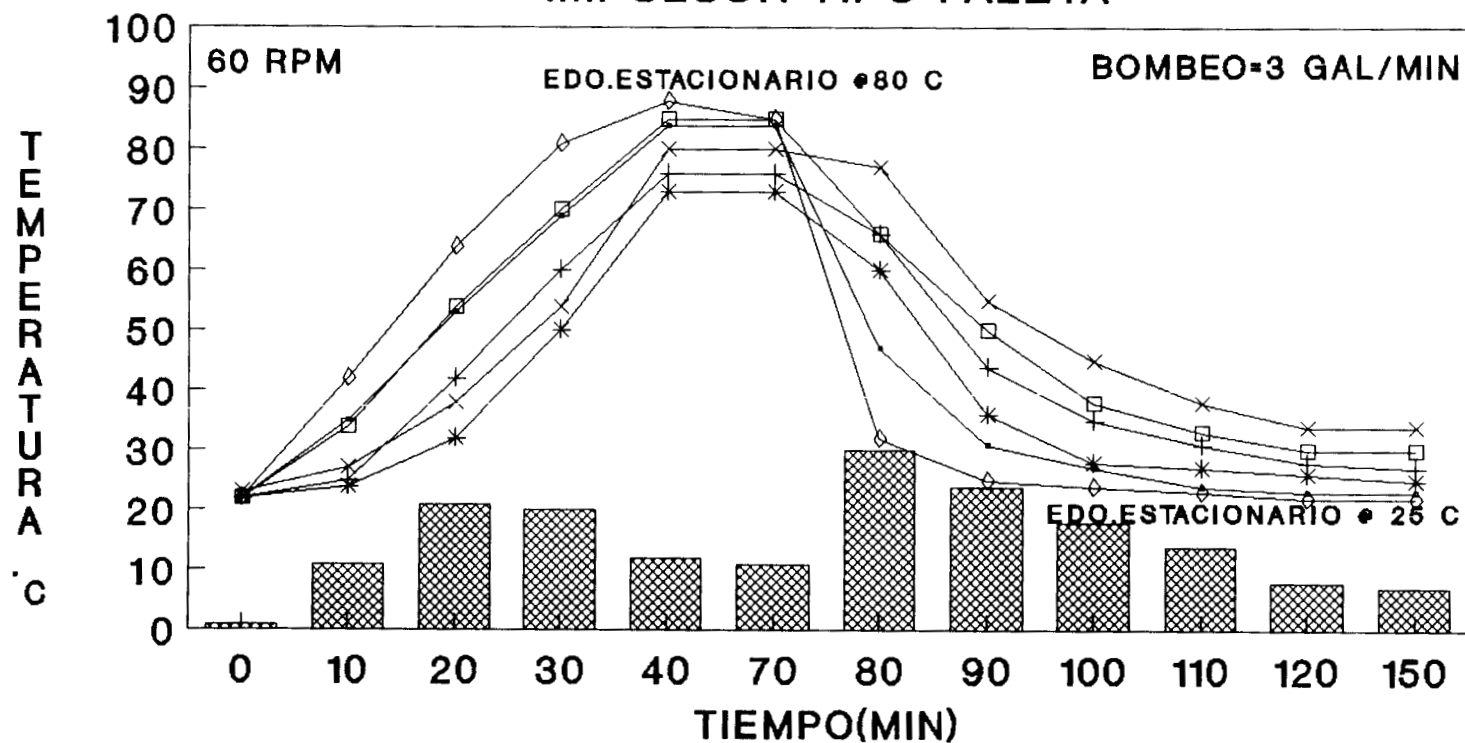
## CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO SILICON OIL IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

# GRAFICA No. 4.9

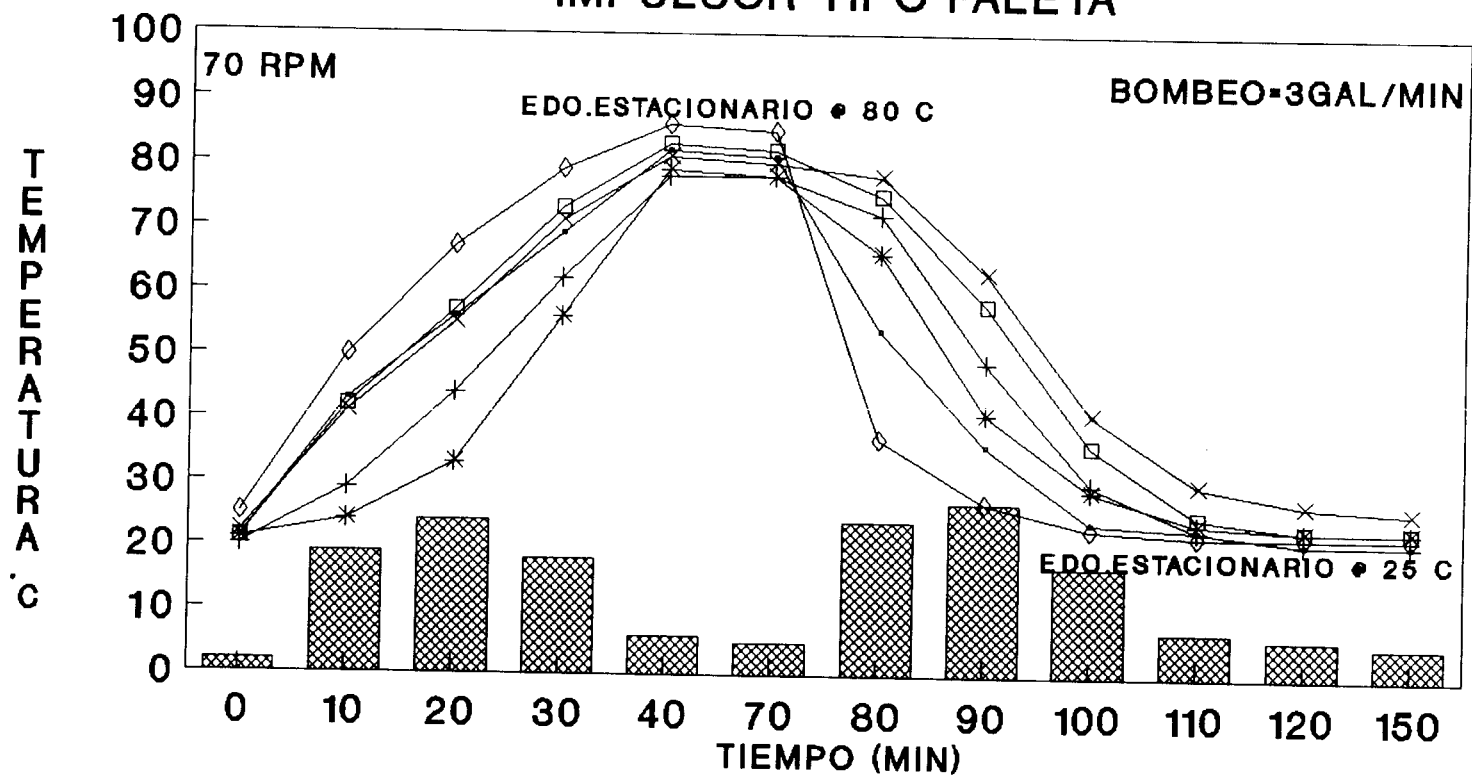
## CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO GLICEROL IMPULSOR TIPO PALETA



PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

# GRAFICA No. 4.10

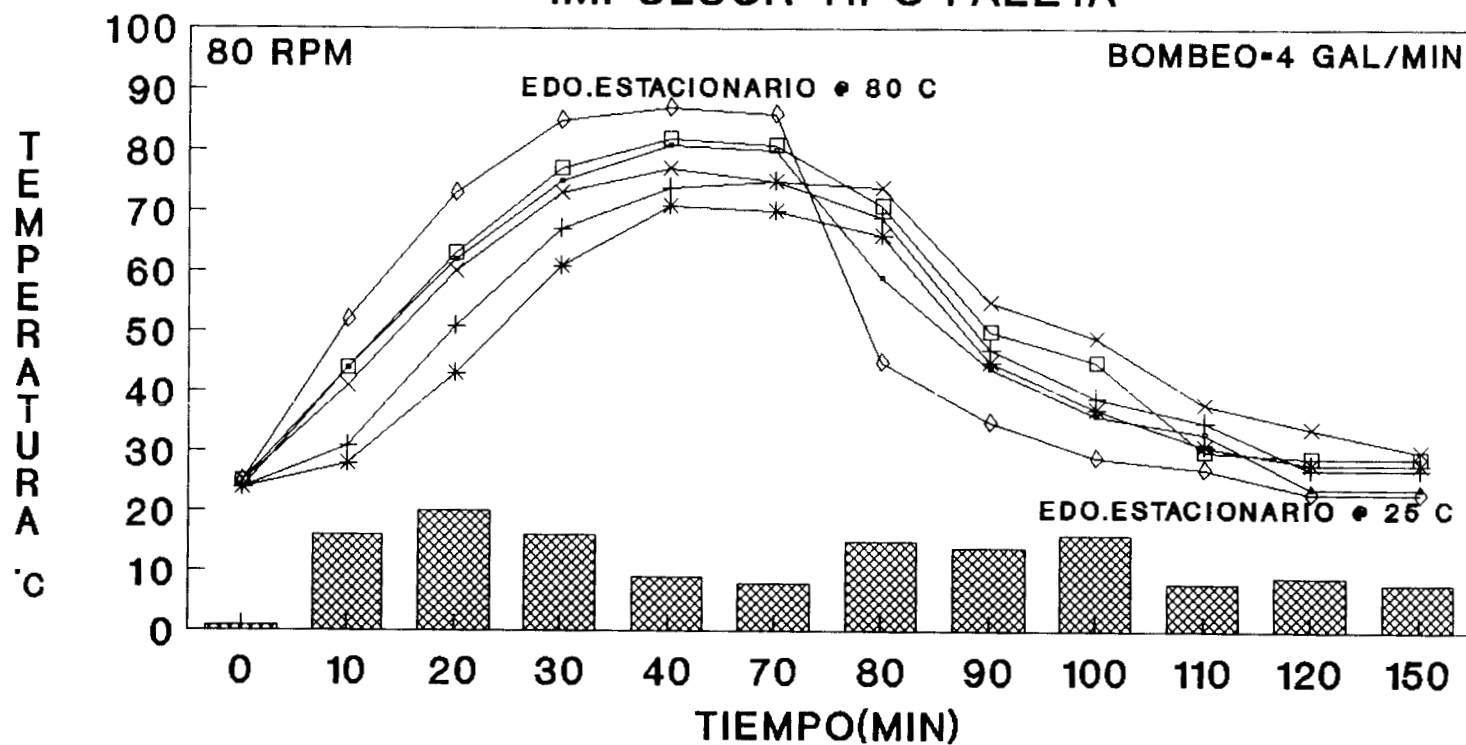
## CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO GLICEROL IMPULSOR TIPO PALETA



PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

# GRAFICA No. 4.11

## CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO GLICEROL IMPULSOR TIPO PALETA

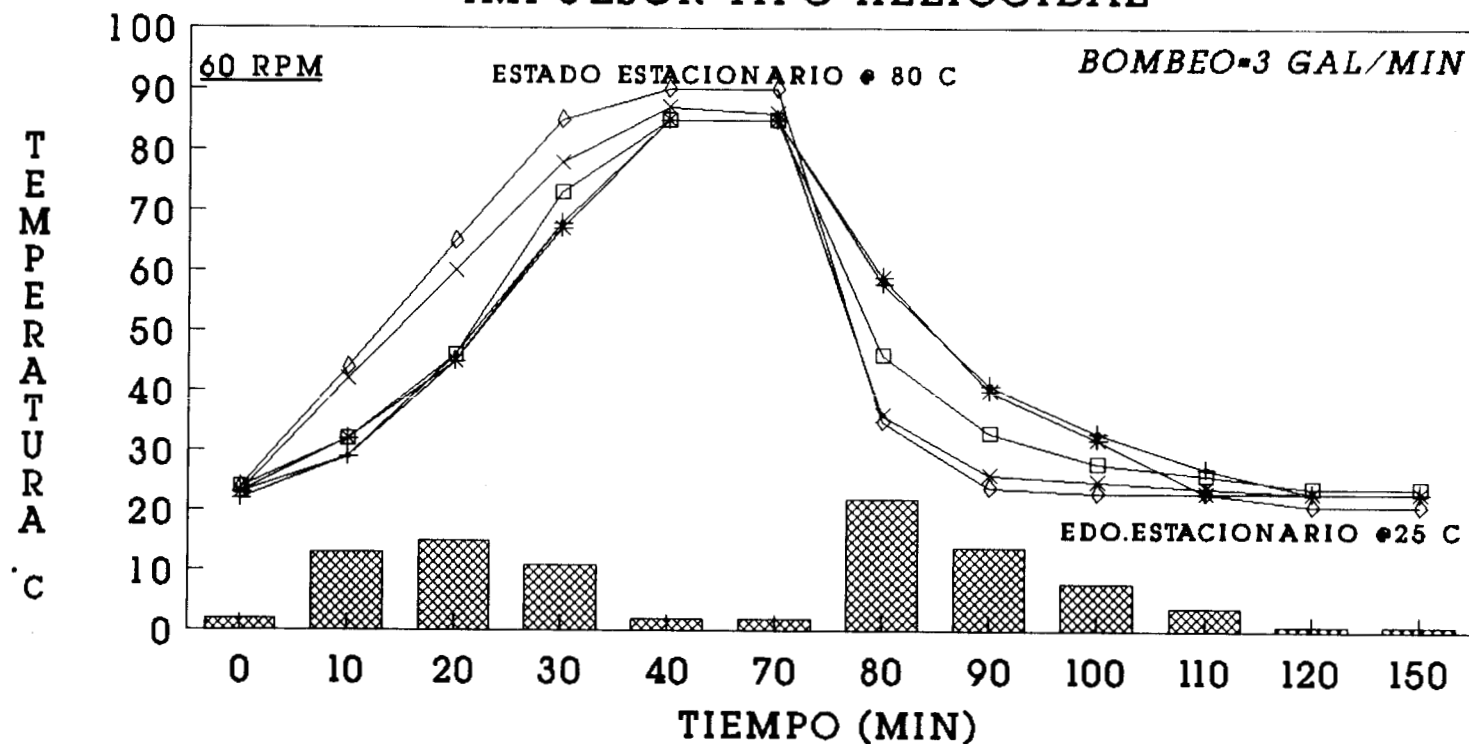


PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

# GRAFICA No. 4.13

## CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO GLICEROL

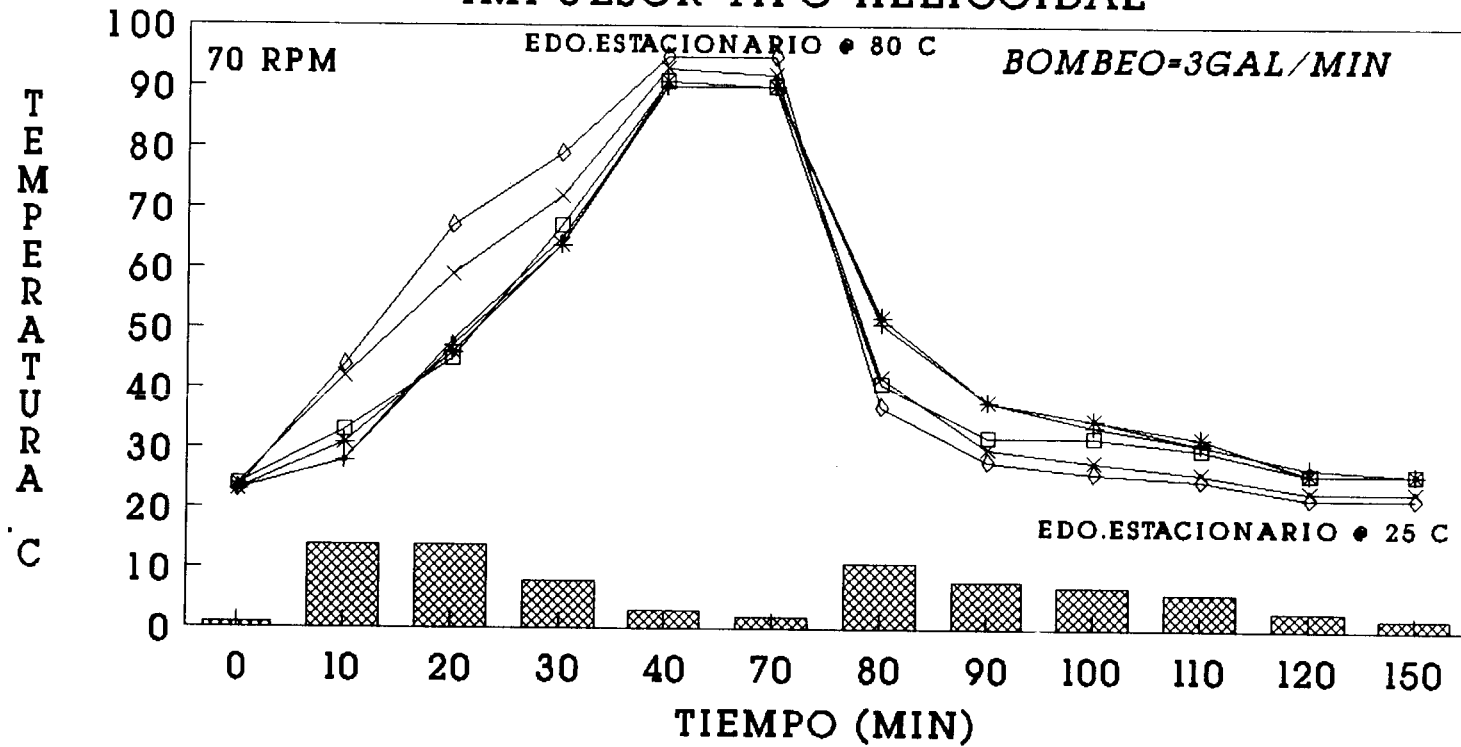
### IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

# GRAFICA No. 4.14

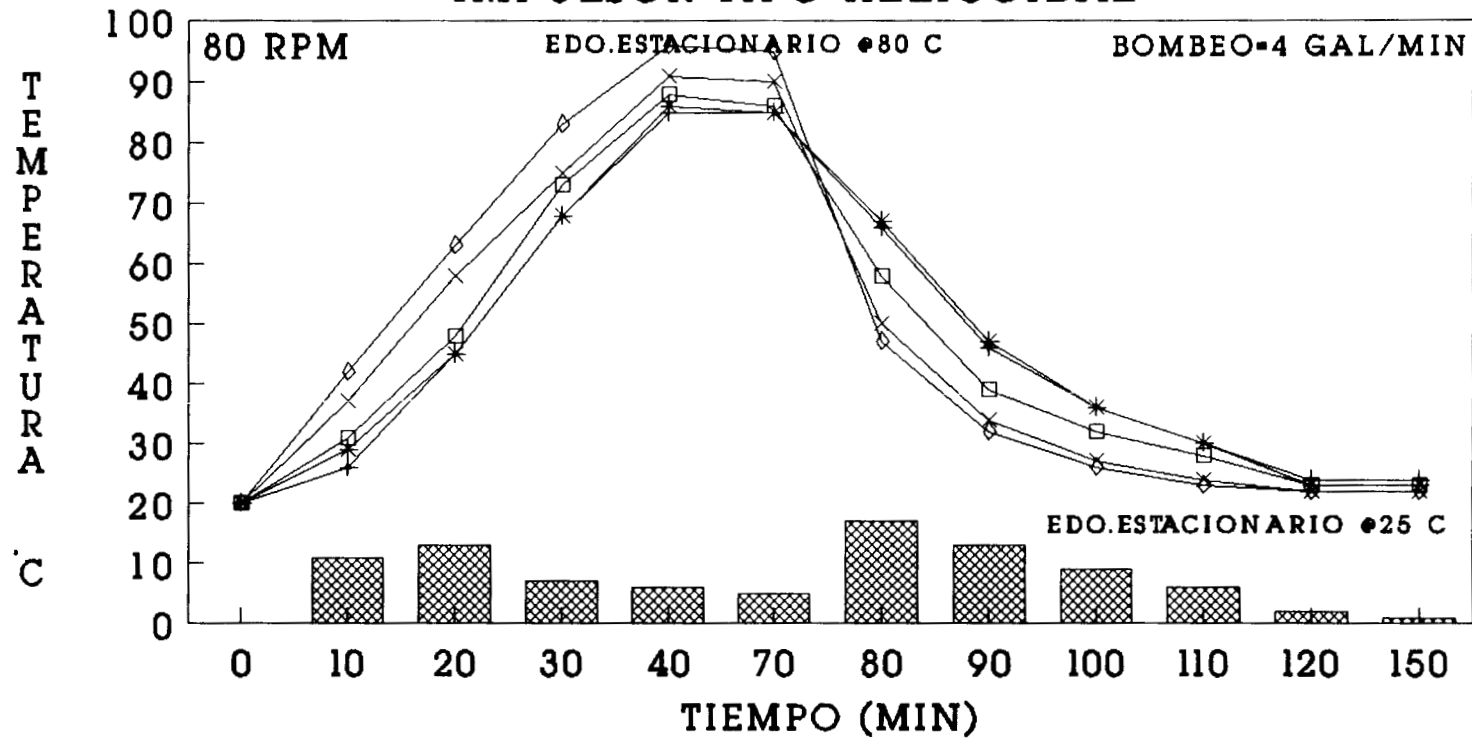
## CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO GLICEROL IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

# GRAFICA No. 4.15

## CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO GLICEROL IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



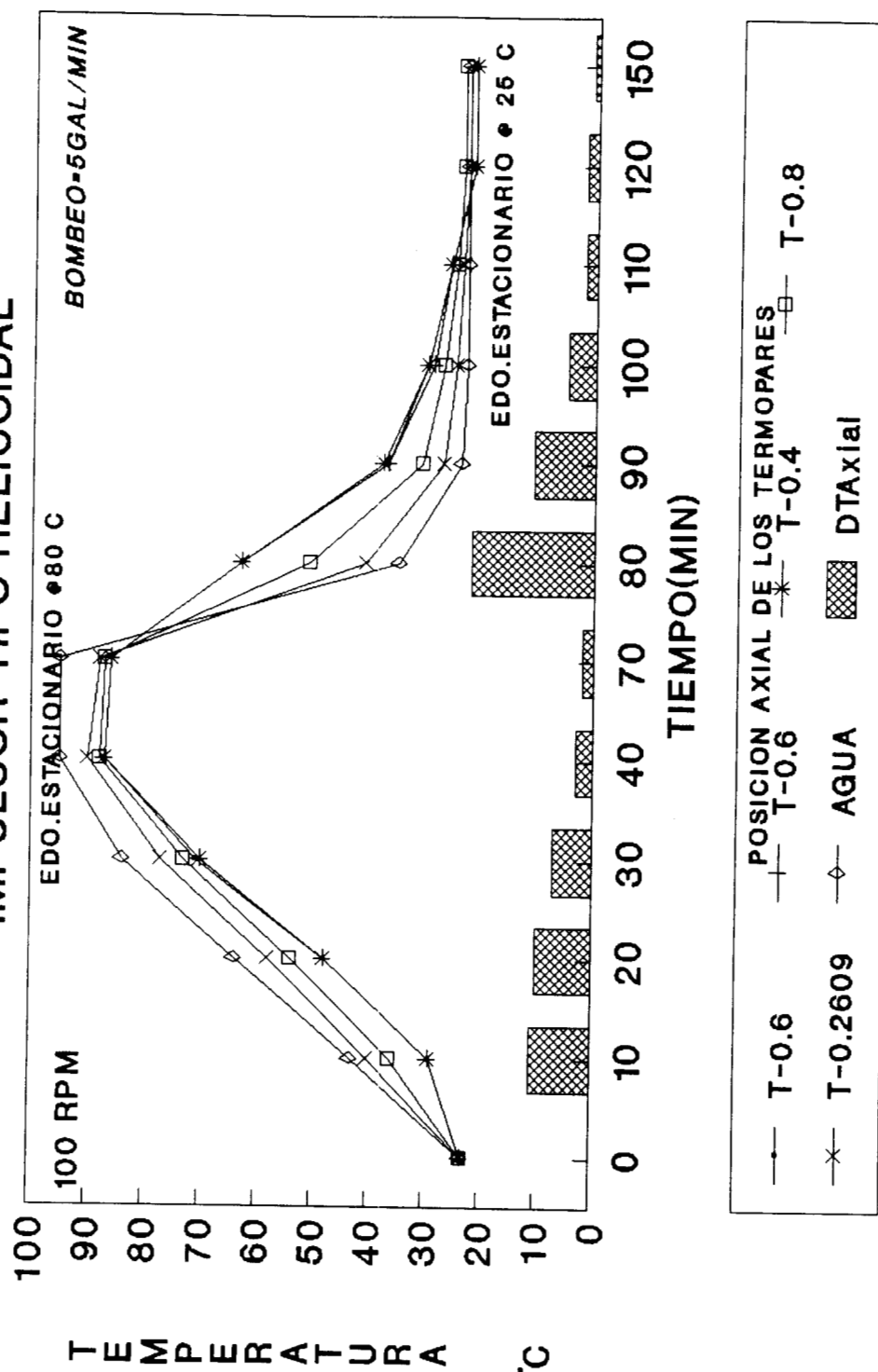
| POSICION AXIAL DE LOS TERMOPARES |              |              |              |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| —•— T-0.5869                     | —+— T-0.5869 | —*— T-0.3913 | —□— T-0.8043 |
| —x— T-0.2608                     | —◇— AGUA     | ▨ DTA axial  |              |

PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

152185

# GRAFICA No. 4.16

## CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO GLICEROL IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

---

#### 4.2.-ANALISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA FLUIDOS NEWTONIANOS.

Las condiciones de operación del sistema experimental se resumen en la Tabla 3.0. Estas se escogieron en base a las variables de operación del proceso del polibutadieno en solución a escala industrial, y porque de estas variables depende en buena medida la calidad del producto final (Ver Apéndice I).

Una comparación de resultados experimentales de la Gráficas 4.1 a 4.17 muestran lo siguiente:

- 1) Las Gráficas 4.1 a 4.4 muestran los gradientes axiales de temperatura medidos durante los procesos de calentamiento, estado estable y enfriamiento en un fluido de silicon oil con un agitador tipo paleta a diferentes velocidades de agitación de 60 a 100 rpm, respectivamente. Se observa el efecto de los gradientes de temperatura en la etapa de enfriamiento a diferentes velocidades de agitación alrededor de 20 °C. Esto nos indica la capacidad de remoción de calor con sistemas de ésta naturaleza.
- 2) Las Gráficas 4.5 a 4.8 muestran los gradientes axiales de temperatura medidos durante los procesos de calentamiento, estado estable y enfriamiento en un fluido Newtoniano silicon oil con un agitador tipo helicoidal a diferentes velocidades de agitación de 60 a 100 rpm, respectivamente. Se observa el efecto que tiene de la velocidad de agitación con los gradientes de temperatura, los cuales debido a la geometría del agitador tienden a ser más uniformes menores a 10 °C.
- 3) Las Gráficas 4.1 y 4.5 muestran los gradientes axiales de temperatura medidos durante los procesos de calentamiento, estado estable y enfriamiento en un fluido de silicon oil con diferente tipo de agitador (paleta y helicoidal) a una velocidad de agitación de 60 rpm. Muestran la capacidad de

remoción de calor, donde es muy significativa en la etapa de enfriamiento para un agitador convencional.

- 4) Las Gráficas 4.4 y 4.8 muestran los gradientes axiales de temperatura medidos durante los procesos de calentamiento, estado estable y enfriamiento con diferente tipo de agitador (paletas y helicoidal) a una velocidad de agitación de 100 rpm. Se aprecia que los gradientes de temperatura son muy apreciables durante todo el proceso. Lo cual refleja el grado de homogeneidad alcanzado con un impulsor tipo helicoidal a diferencia del impulsor tradicional tipo paleta.

El sistema de mezclado con agitador helicoidal no resulta ser tan homogéneo como se desea pero es más válida la suposición de cierta homogeneidad de temperaturas en dirección radial, no así para el caso de la dirección axial.

- 5) Las Gráficas 4.9 a 4.12 muestran los gradientes axiales de temperatura medidos durante los procesos de calentamiento, estado estable y enfriamiento en un fluido de glicerol al 95 % con un agitador tipo paleta a diferentes velocidades de agitación de 60 a 100 rpm, respectivamente.

Se observa el efecto de los gradientes de temperatura sobre todo en la etapa de enfriamiento a diferentes velocidades de agitación.

- 6) Las Gráficas 4.13 a 4.16 muestran los gradientes axiales de temperatura medidos durante los procesos de calentamiento, estado estable y enfriamiento en un fluido Newtoniano de glicerol al 95 % con un agitador tipo helicoidal a diferentes velocidades de agitación de 60 a 100 rpm, respectivamente.

Se observa el efecto que a medida que se incrementa la velocidad de agitación los gradientes de temperatura tienden a ser más homogéneos, sobre todo en la etapa de remoción de calor del sistema.

- 7) Las Gráficas 4.9 y 4.13 muestran los gradientes axiales de temperatura medidos durante los procesos de calentamiento, estado estable y enfriamiento en un fluido de glicerol con diferente tipo de agitador (paleta y helicoidal) a una velocidad de agitación de 60 rpm. Muestran que los gradientes de temperatura son importantes en la etapa de enfriamiento para un agitador convencional.
- 8) Las Gráficas 4.12 y 4.16 muestran los gradientes axiales de temperatura medidos durante los procesos de calentamiento, estado estable y enfriamiento con diferente tipo de agitador (paletas y helicoidal) a una velocidad de agitación de 100 rpm. Se aprecia que los gradientes de temperatura son muy apreciables durante todo el proceso para el agitador de paletas.

Lo anterior refleja el grado de homogeneidad alcanzado con un impulsores tipo helicoidal a diferencia del impulsor tradicional tipo paleta en función de los gradientes de temperatura en fluidos Newtonianos. Un resumen se presenta en la Tabla 4.0.

TABLA 4.0.-LOS GRADIENTES DE TEMPERATURA ALCANZADOS CON DIFERENTE IMPULSOR Y DIFENTES FLUIDOS.

| FLUIDO   | AGITADOR   | RPM | $\Delta T$ max. |
|----------|------------|-----|-----------------|
| SILICON  | PALETA     | 60  | 20              |
|          | HELICOIDAL | 60  | 5               |
|          | PALETA     | 70  | 21              |
|          | HELICOIDAL | 70  | 6               |
|          | PALETA     | 80  | 19              |
|          | HELICOIDAL | 80  | 11              |
|          | PALETA     | 100 | 15              |
|          | HELICOIDAL | 100 | 11              |
| GLICEROL | PALETA     | 60  | 32              |
|          | HELICOIDAL | 60  | 19              |
|          | PALETA     | 70  | 26              |
|          | HELICOIDAL | 70  | 14              |
|          | PALETA     | 80  | 21              |
|          | HELICOIDAL | 80  | 17              |
|          | PALETA     | 100 | 35              |
|          | HELICOIDAL | 100 | 20              |

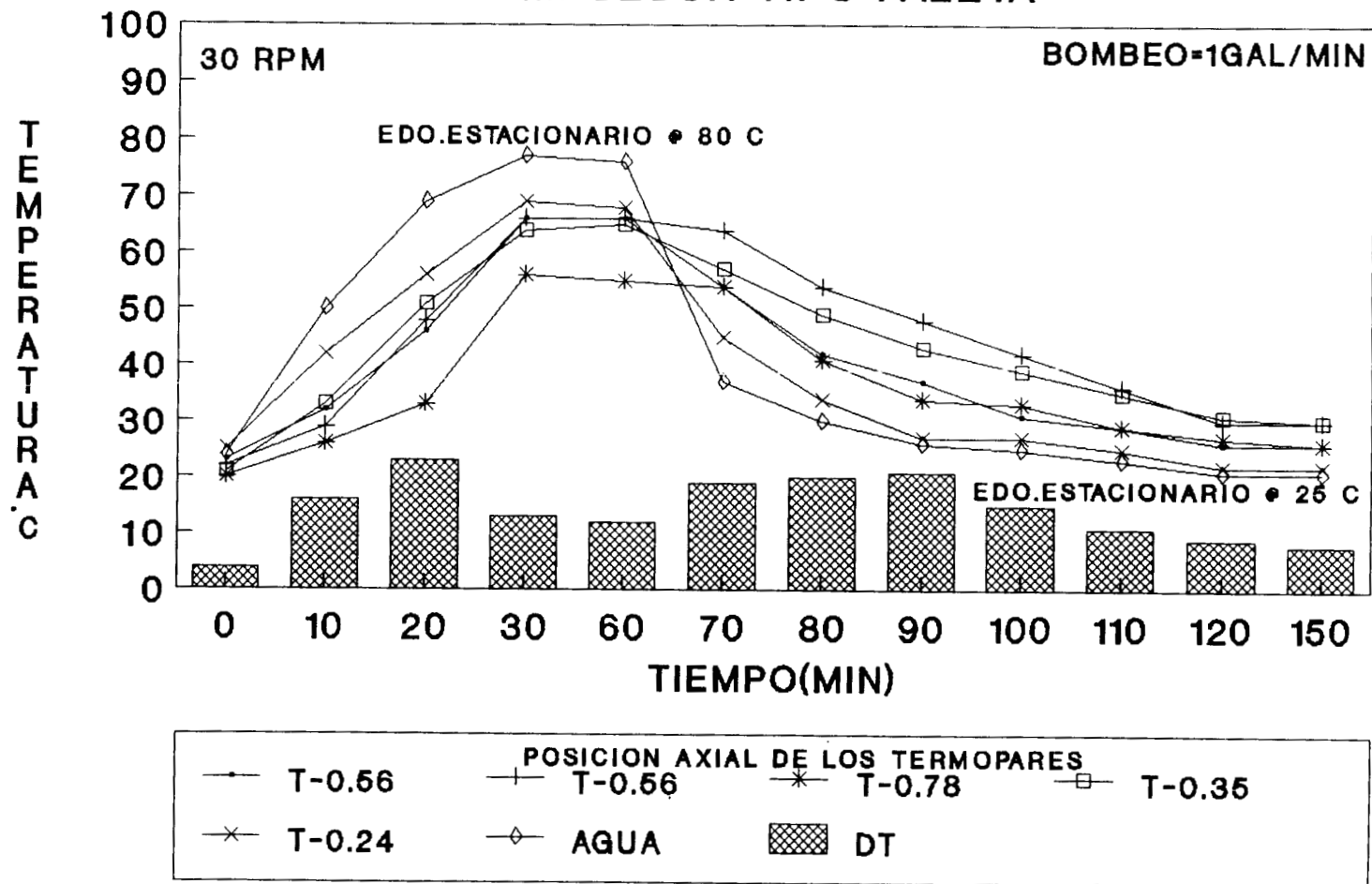
**4.3.-RESULTADOS EXPERIMENTALES DE GRADIENTES DE TEMPERATURA CON FLUIDOS NO NEWTONIANOS:**

En las Gráficas 4.17 a 4.32 se muestran los resultados en fluidos no Newtonianos a diferentes condiciones de operación en el sistema, geometría del agitador y reología del fluido::

- 1) Gráficas experimentales 4.17 a 4.20 para agitador tipo paleta empleando polímero al 11.5 % en ciclohexano.
- 2) Gráficas experimentales 4.21 a 4.24 para agitador de proximidad o Helicoidal empleando polímero al 11.5 % en ciclohexano.
- 3) Gráficas experimentales 4.25 a 4.28 para agitador tipo paleta empleando polímero al 14.5 % en ciclohexano.
- 4) Gráficas experimentales 4.29 a 4.32 para agitador de proximidad o Helicoidal empleando polímero al 14.5 %.

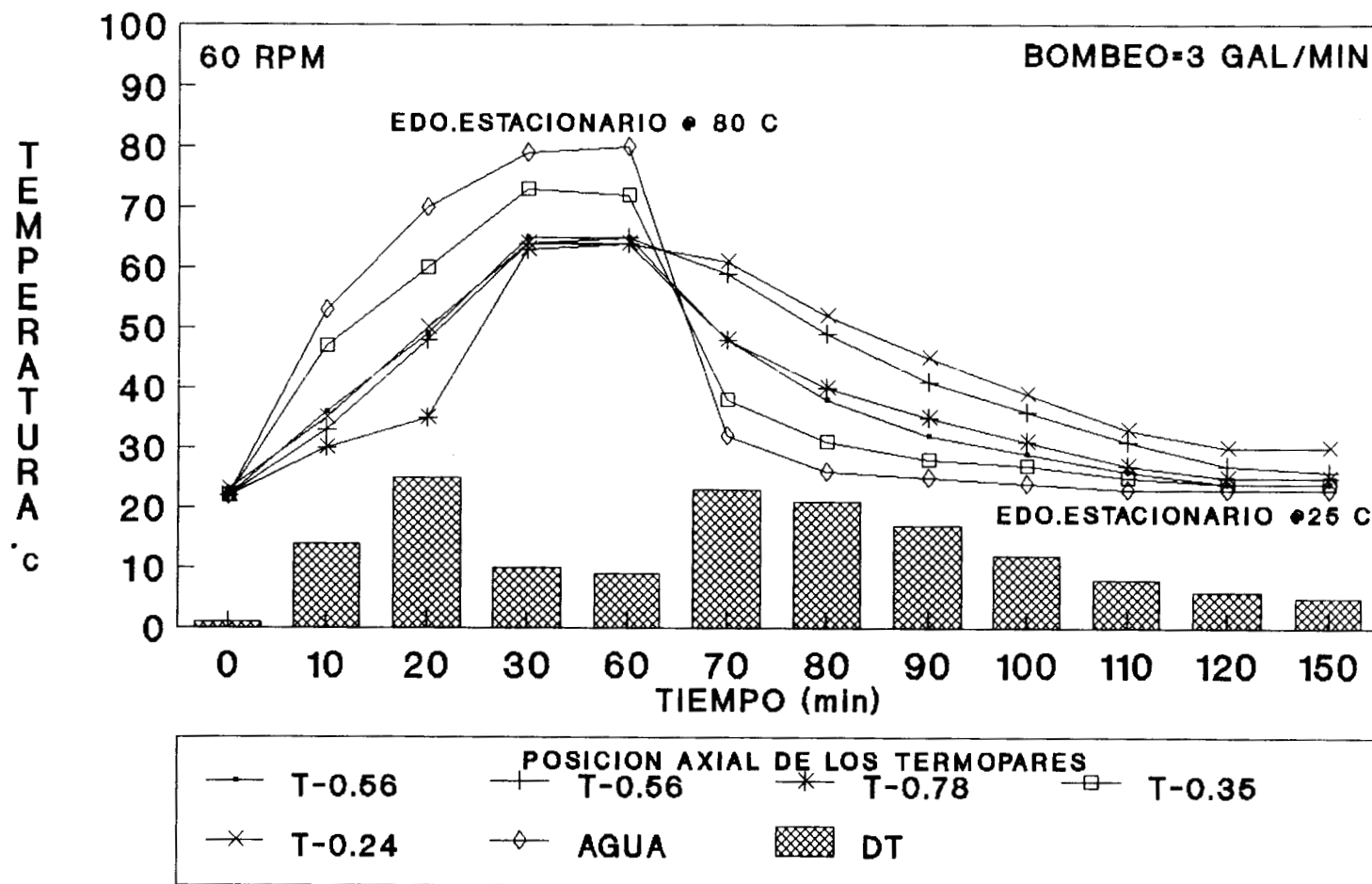
# GRAFICA 4.17.

## CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO 11.5 % IMPULSOR TIPO PALETA



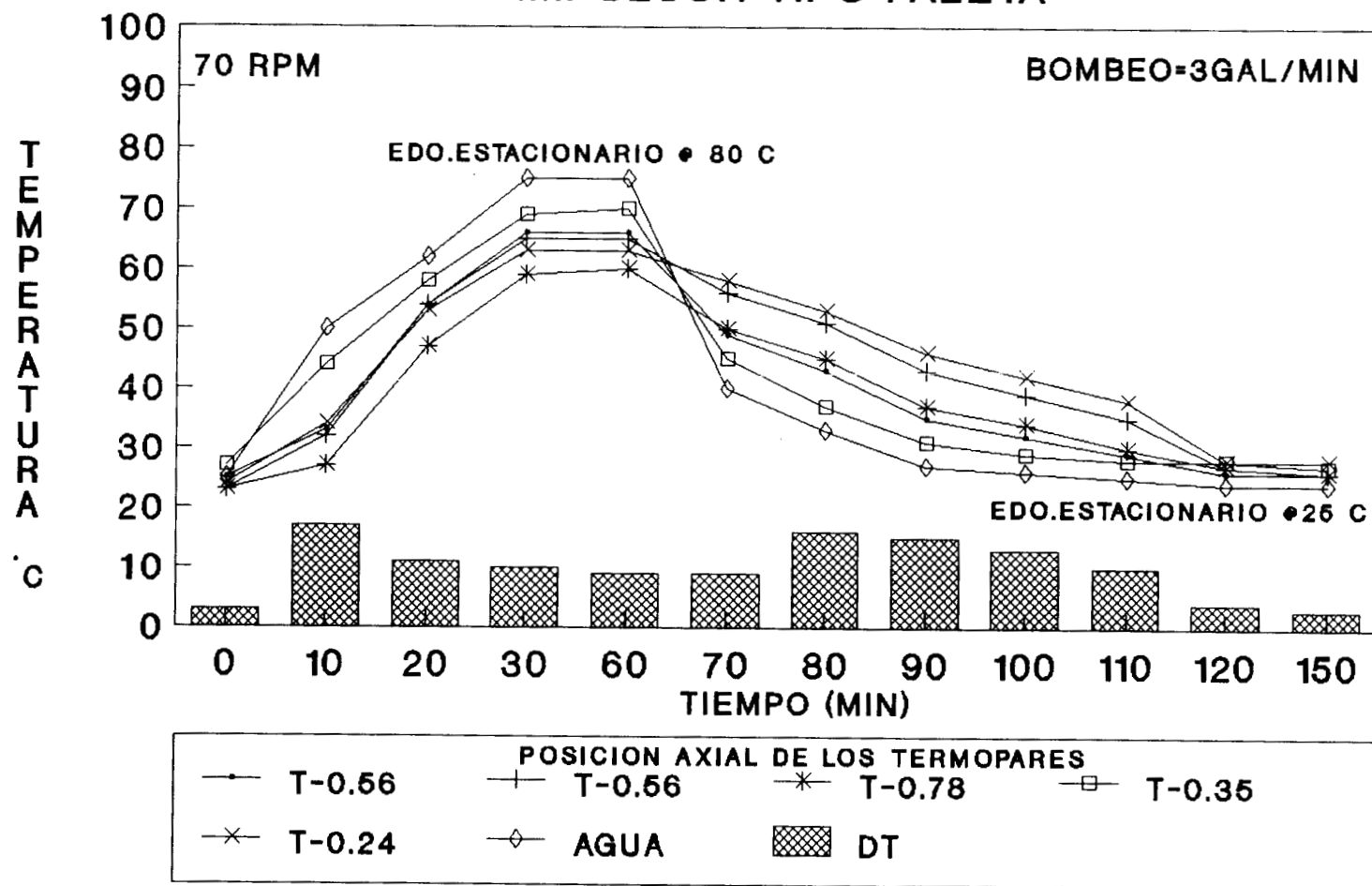
# GRAFICA No.4.18

## CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @ 11.5% IMPULSOR TIPO PALETA



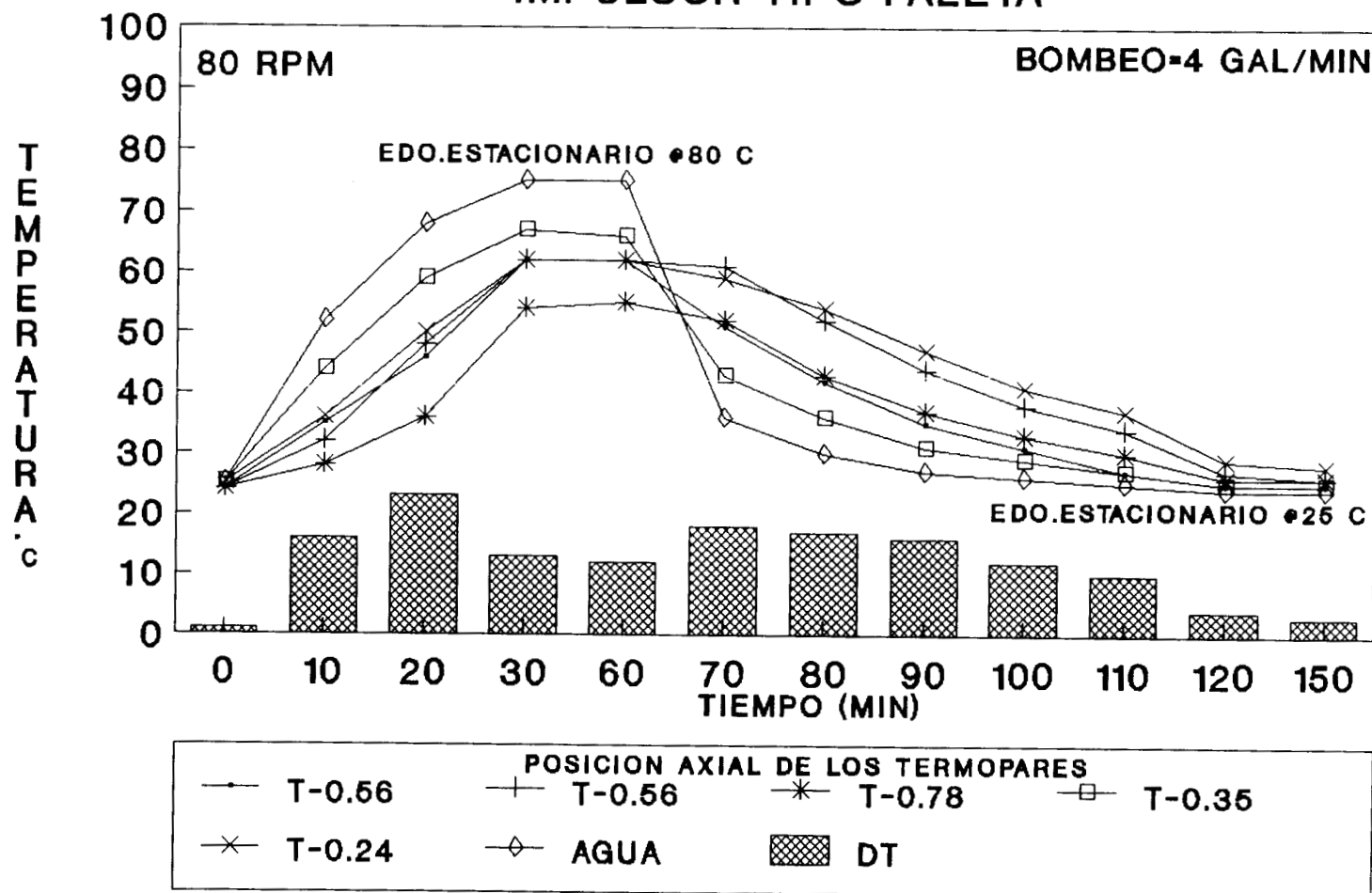
# GRAFICA No.4.19

## CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @11.5% IMPULSOR TIPO PALETA



# GRAFICA 4.20.

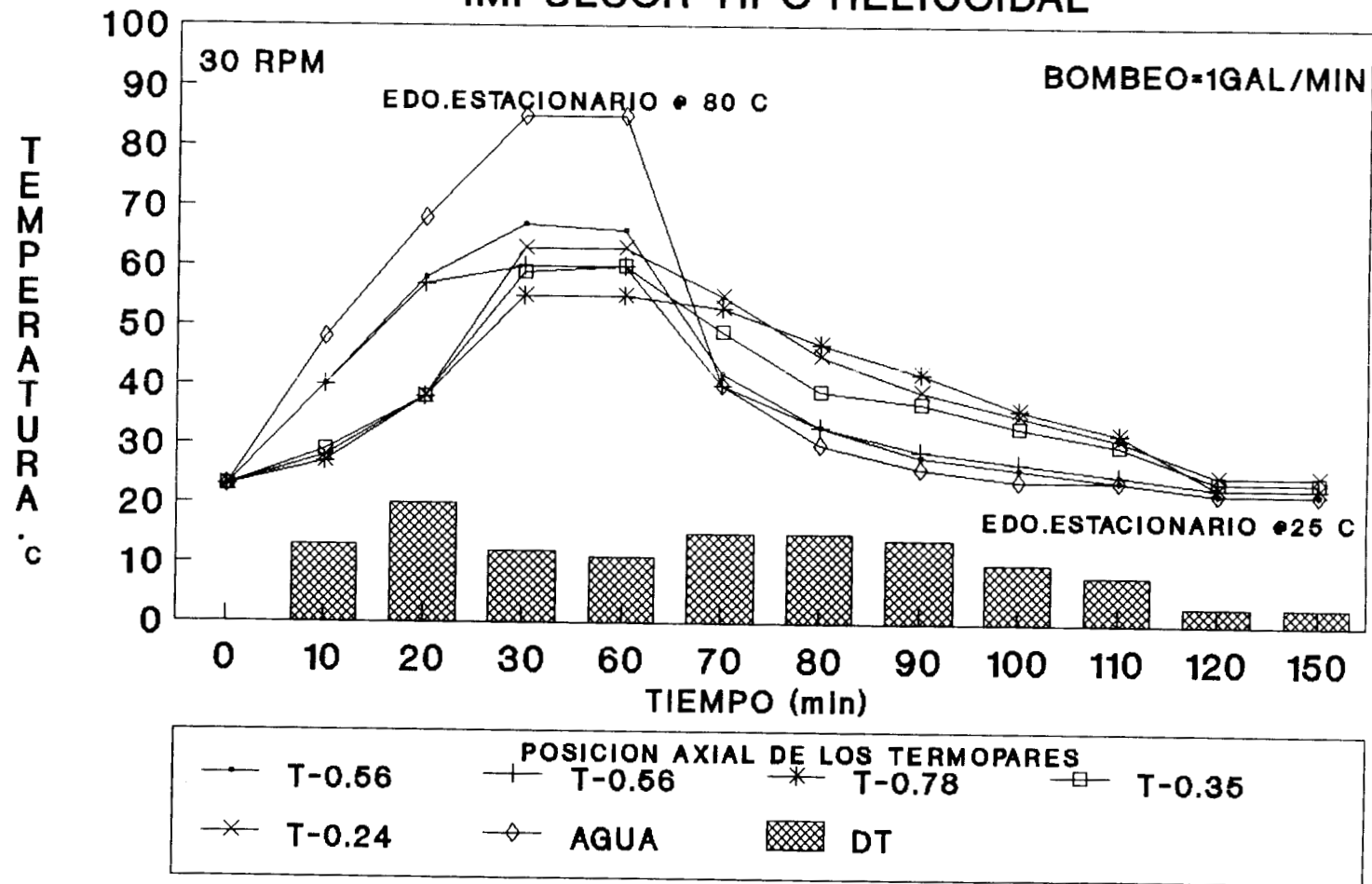
CORRIDA EXPERIMENTAL  
FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO 11.5%  
IMPULSOR TIPO PALETA



PROCESO DE CALENTAMIENTO/ENFRIAMIENTO

# GRAFICA 4.21.

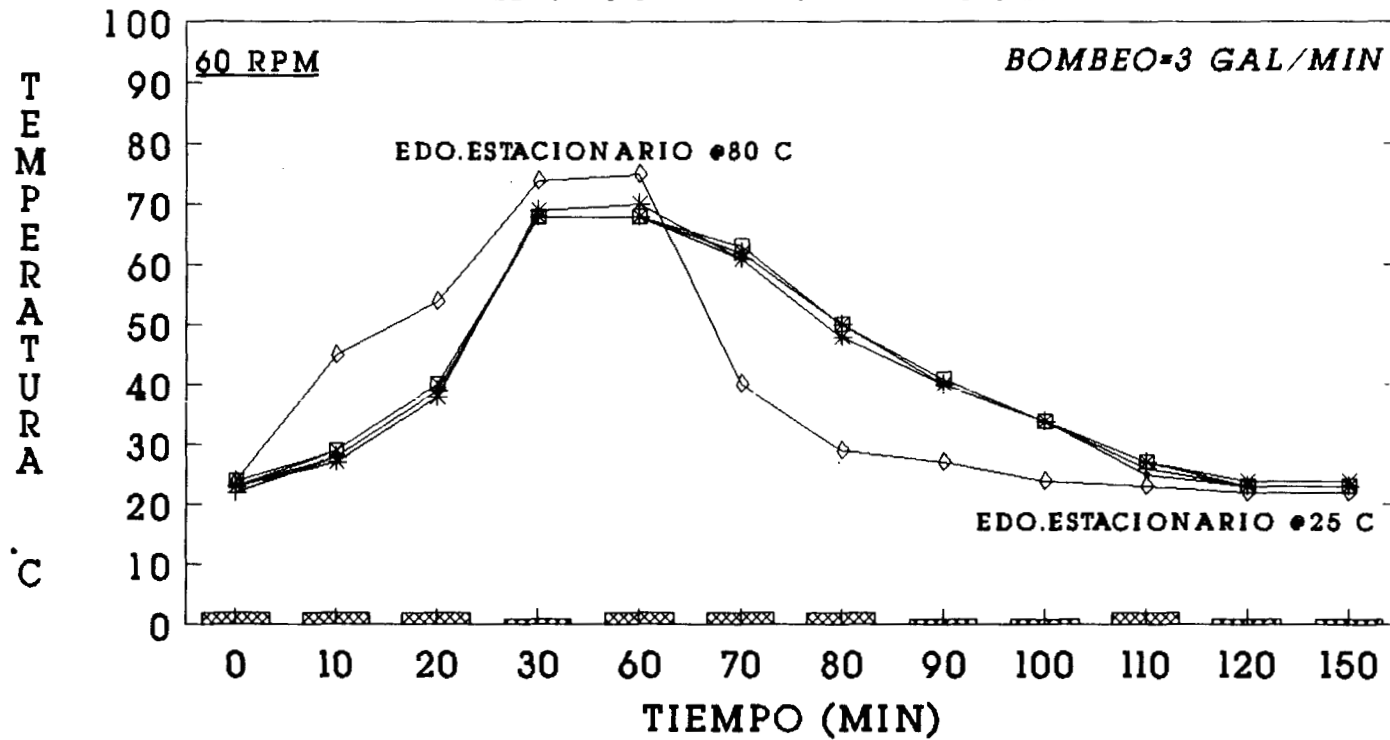
## CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @11.5% IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



PROCESO DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO

# GRAFICA No.4.22

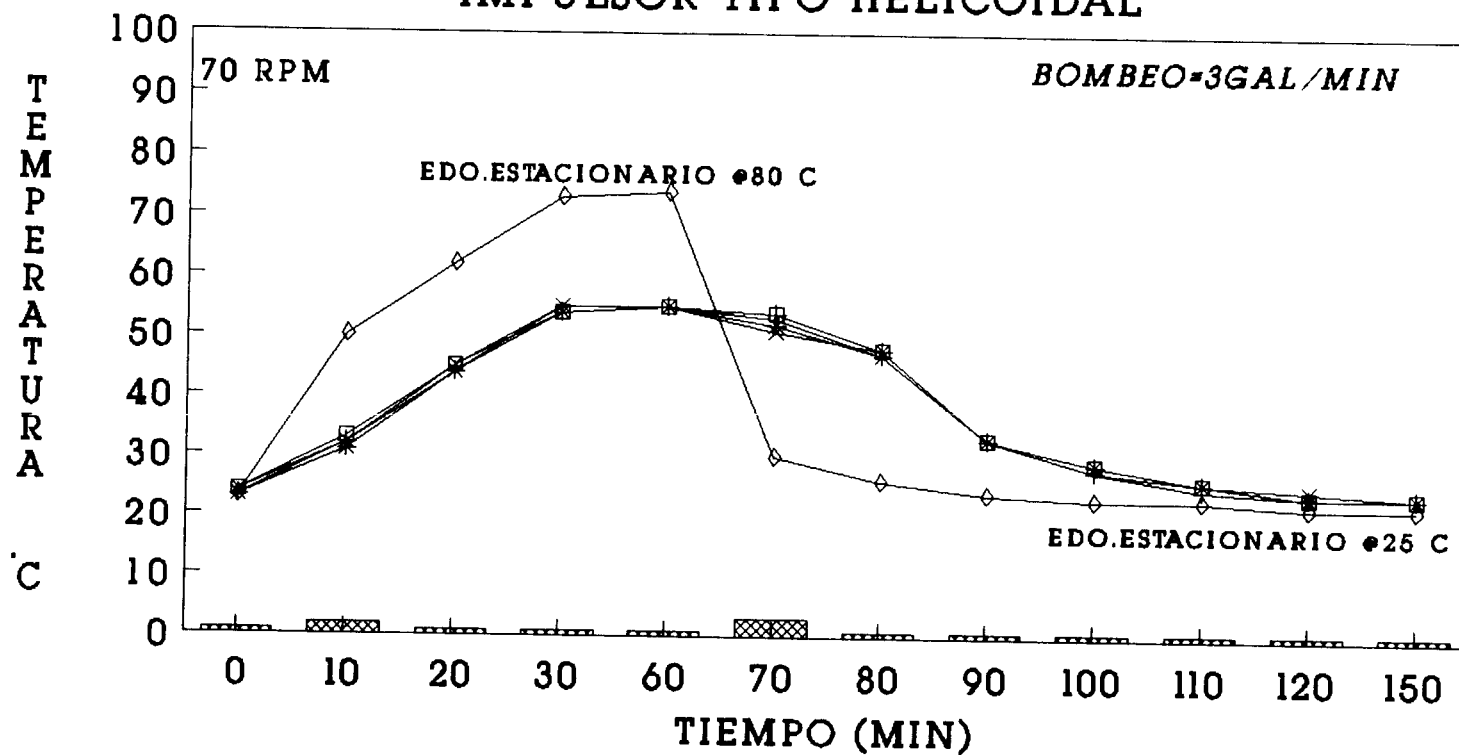
CORRIDA EXPERIMENTAL  
FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @11.5%  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

# GRAFICA No.4.23

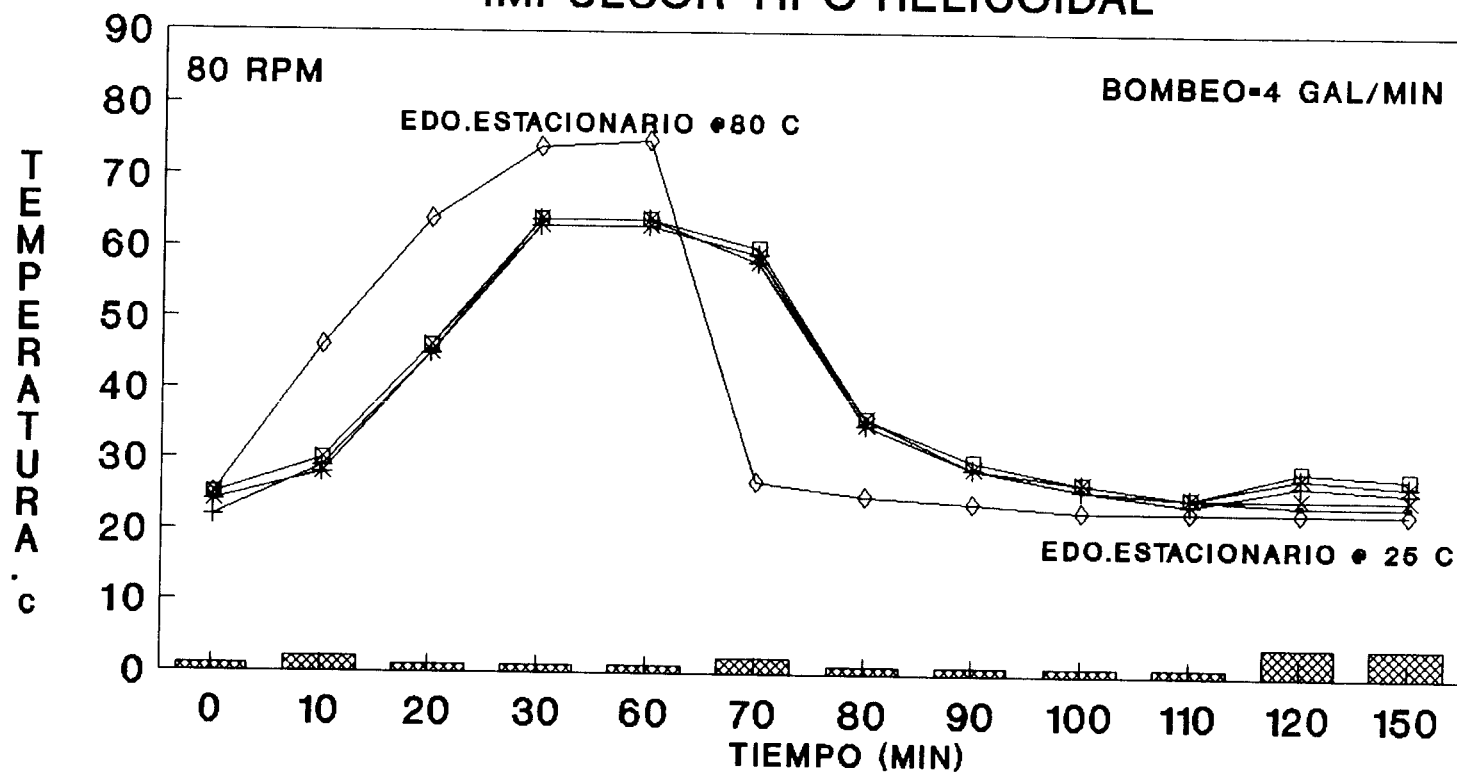
CORRIDA EXPERIMENTAL  
FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @11.5%  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

# GRAFICA 4.24.

## CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @11.5% IMPULSOR TIPO HELICOIDAL

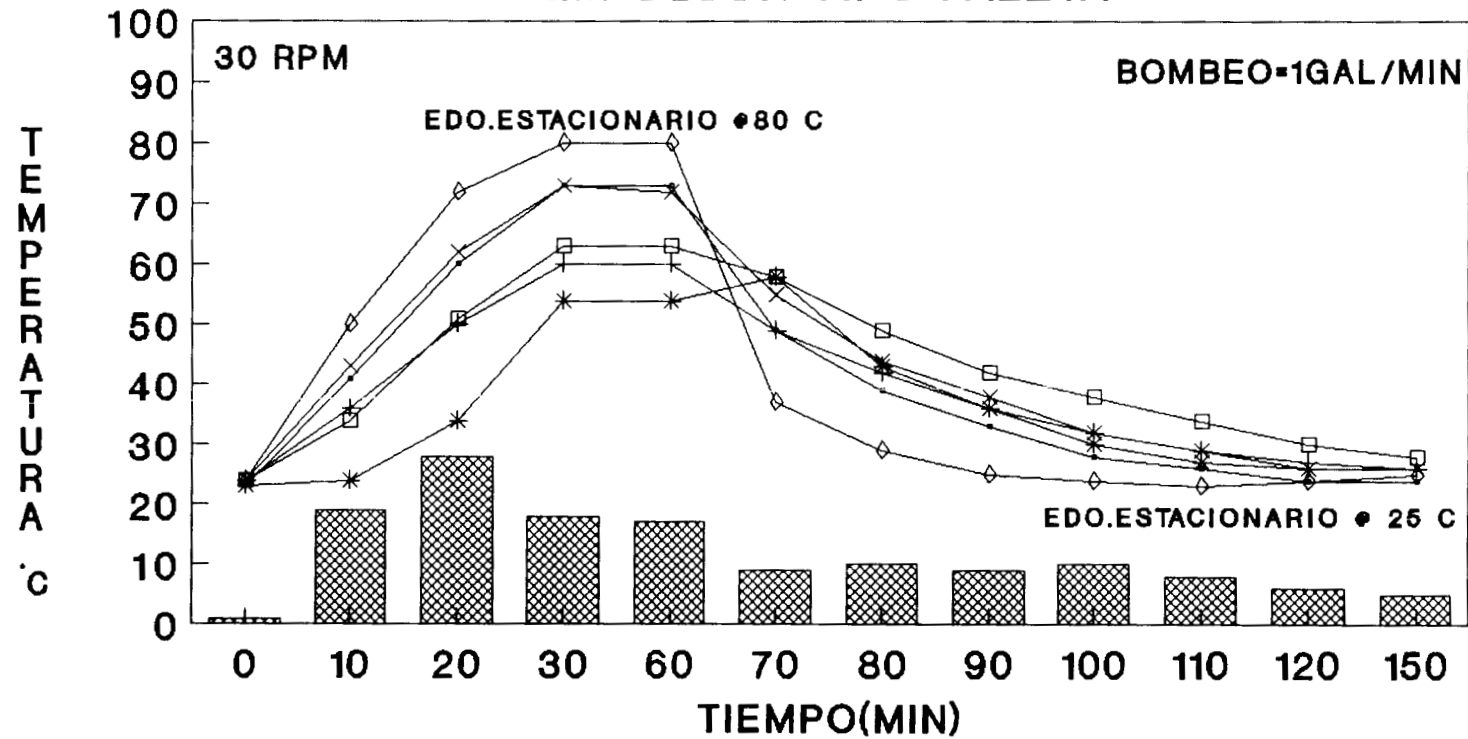


PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

# GRAFICA No. 4.25

## CORRIDA EXPERIMENTAL

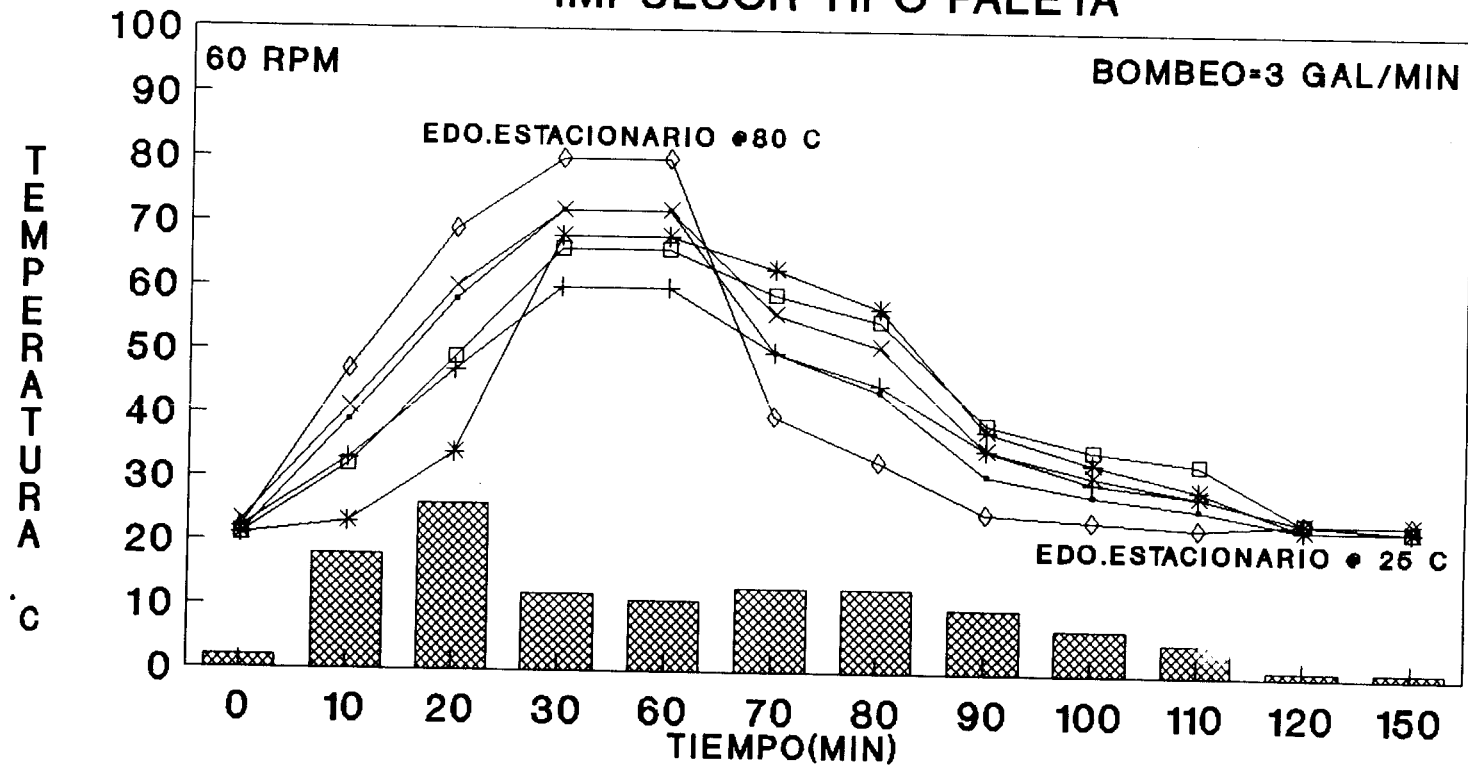
FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @14.5%  
IMPULSOR TIPO PALETA



PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

# GRAFICA No. 4.26

## CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @14.5% IMPULSOR TIPO PALETA

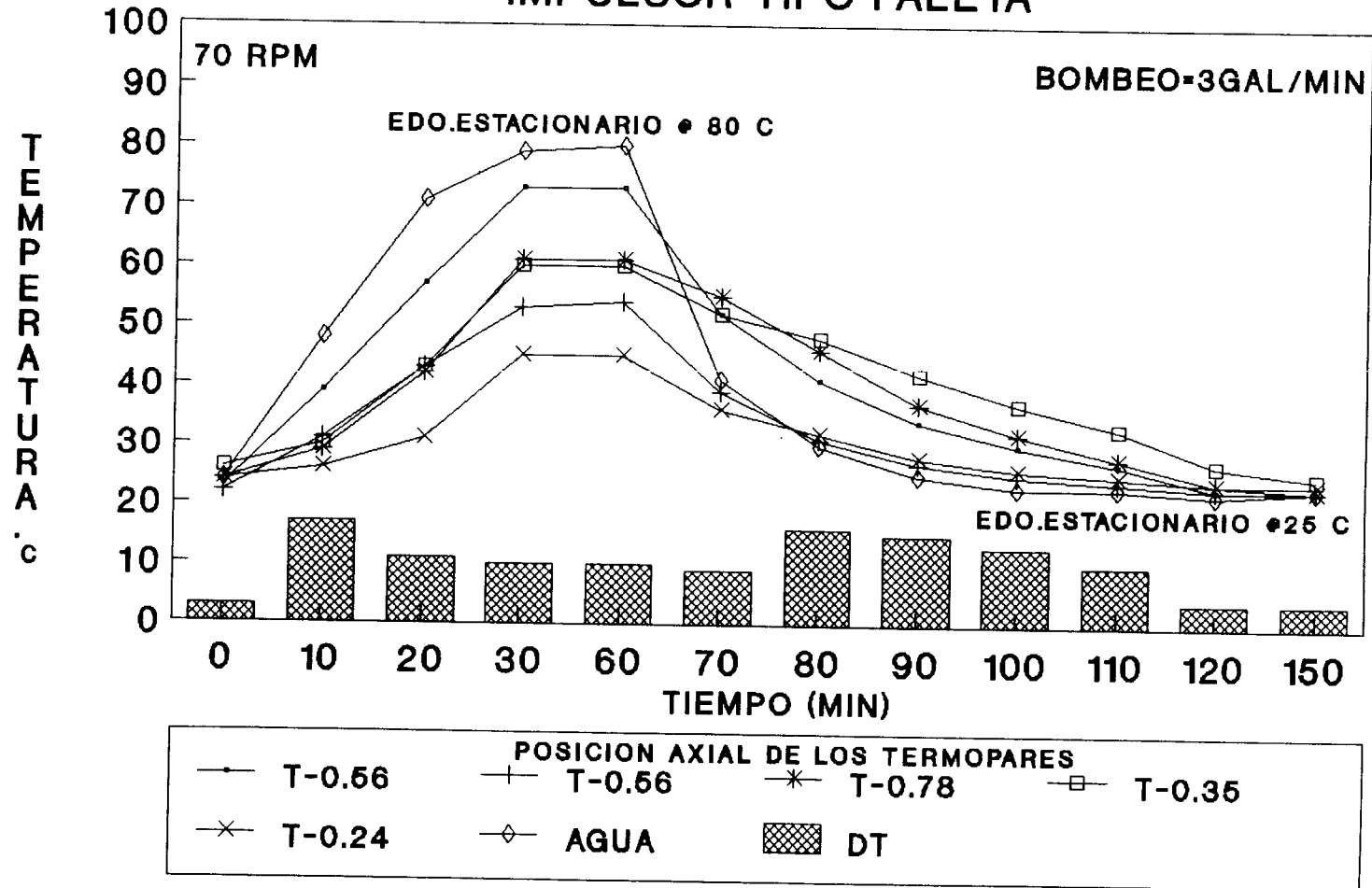


PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

# GRAFICA No. 4.27

## CORRIDA EXPERIMENTAL

FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @14.5%  
IMPULSOR TIPO PALETA



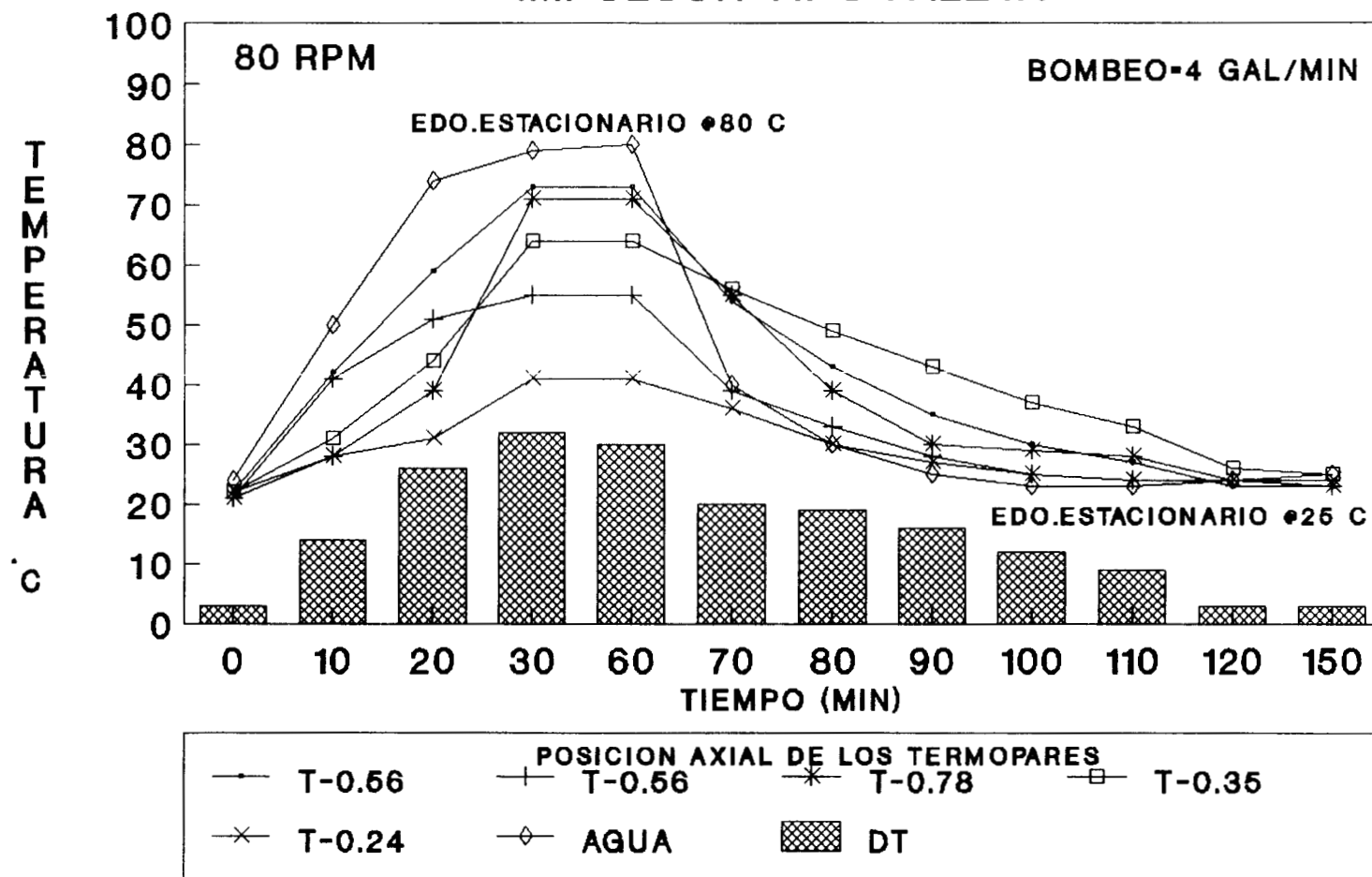
PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

# GRAFICA No. 4.28

## CORRIDA EXPERIMENTAL

FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @14.5%

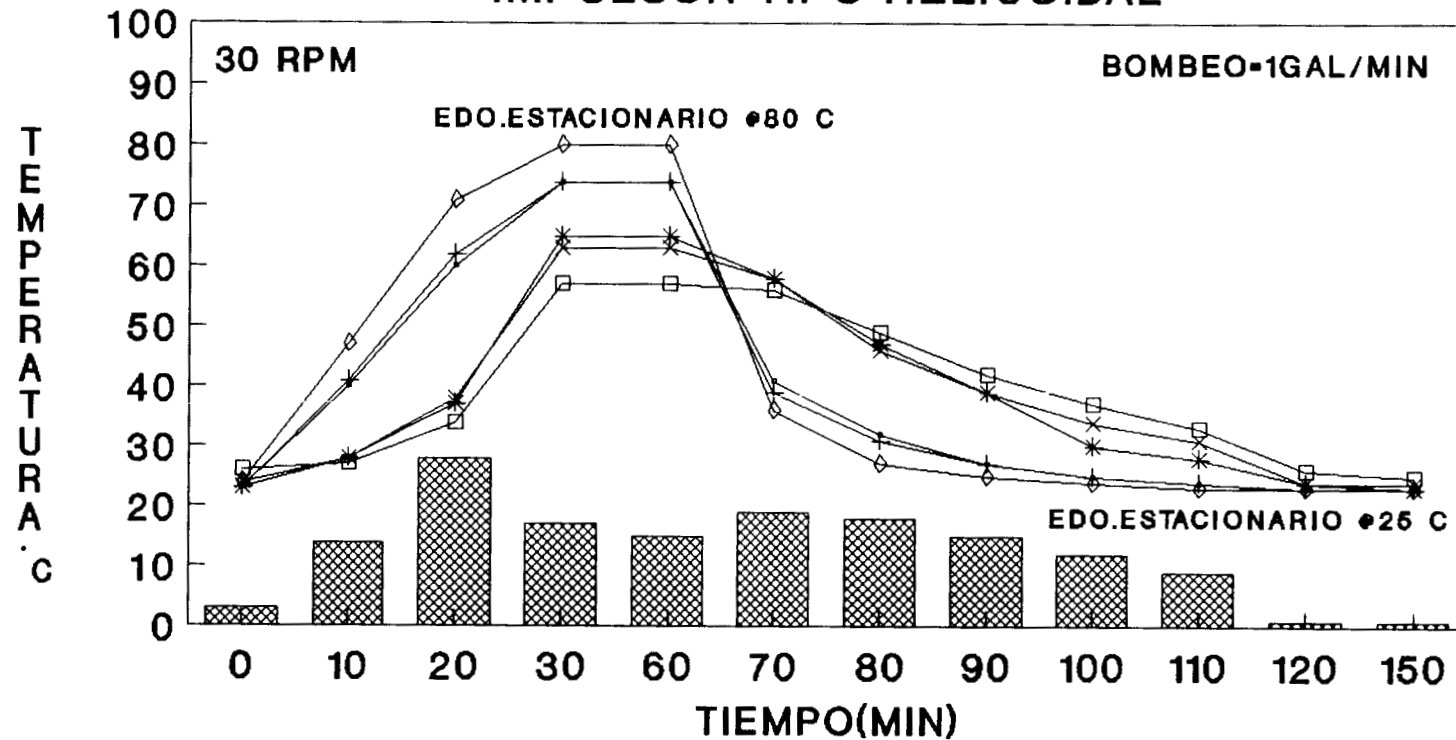
IMPULSOR TIPO PALETA



PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

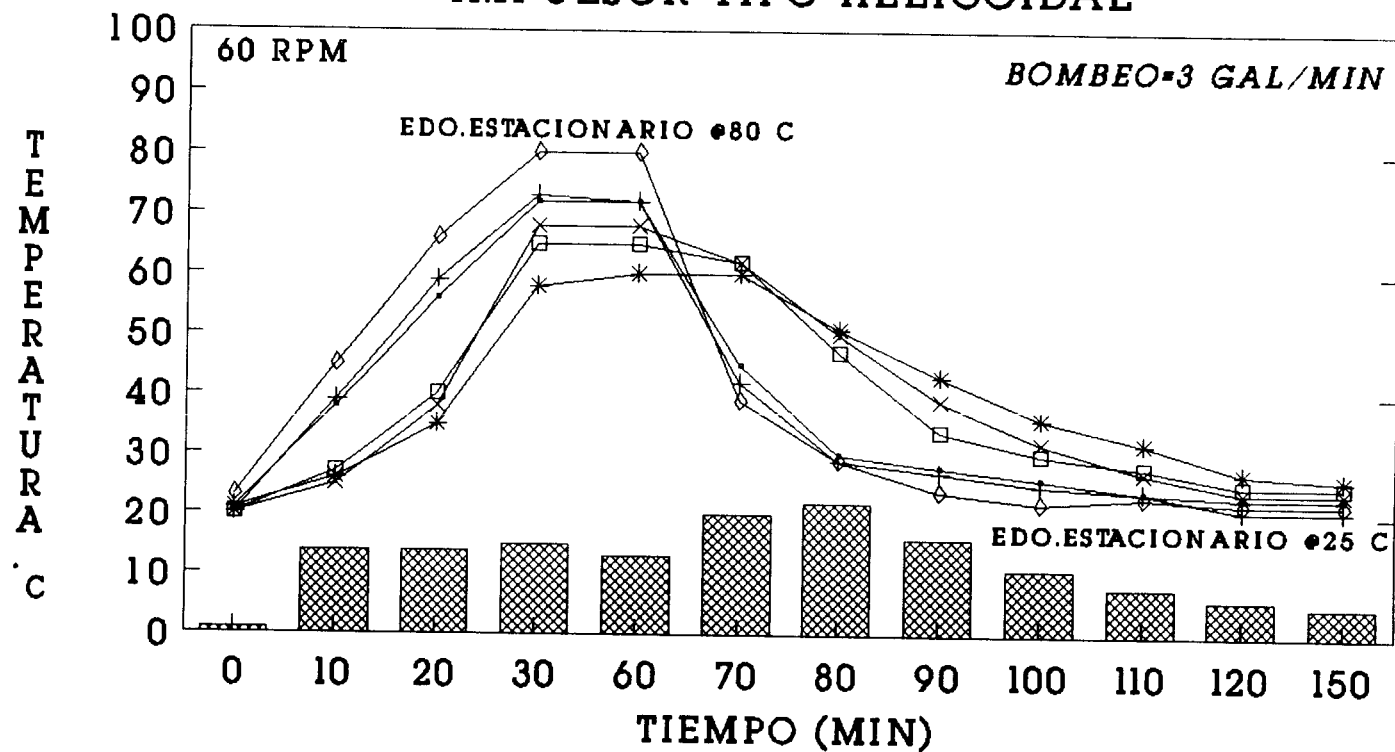
# GRAFICA No. 4.29

## CORRIDA EXPERIMENTAL FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @14.5% IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



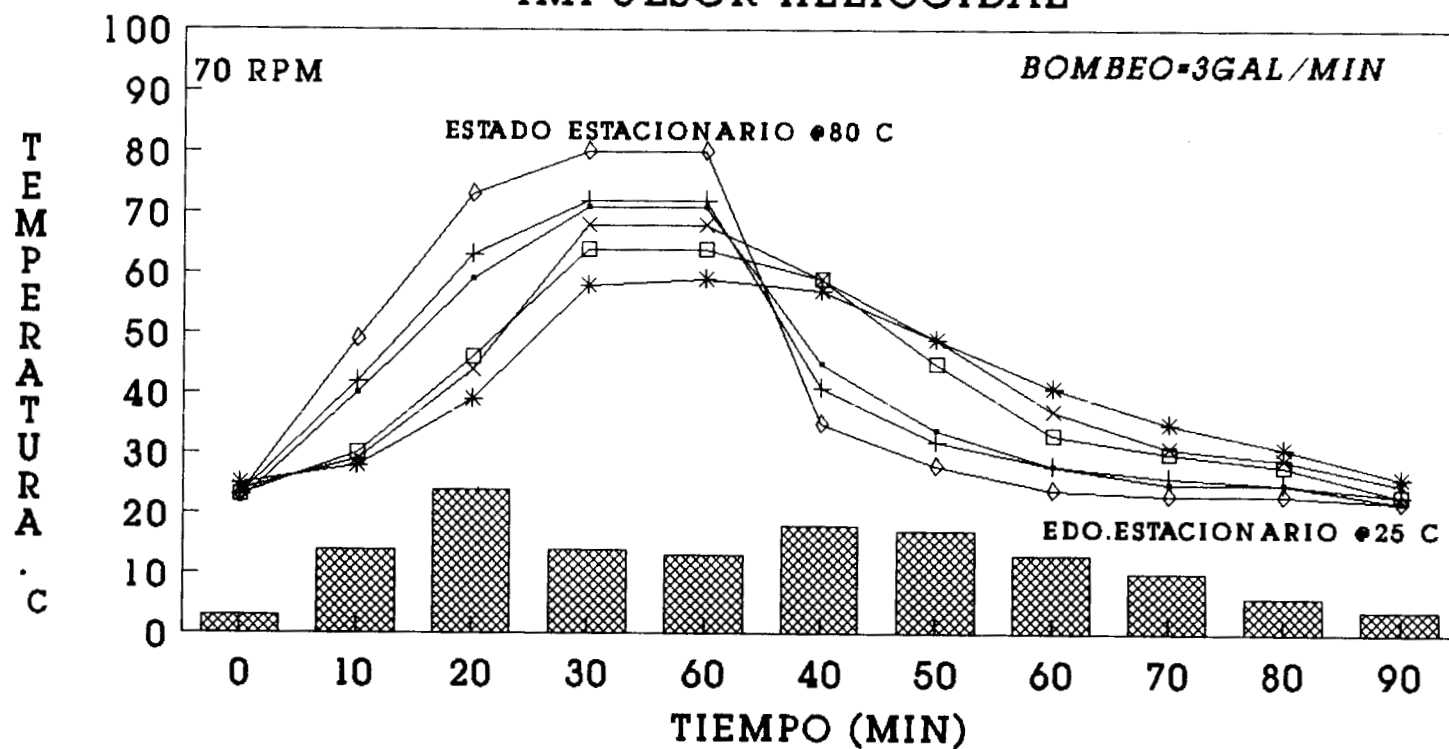
PROCESO DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO

GRAFICA No. 4.30  
 CORRIDA EXPERIMENTAL  
 FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @14.5%  
 IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

**GRAFICA No. 4.31**  
**CORRIDA EXPERIMENTAL**  
**FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @14.5%**  
**IMPULSOR HELICOIDAL**



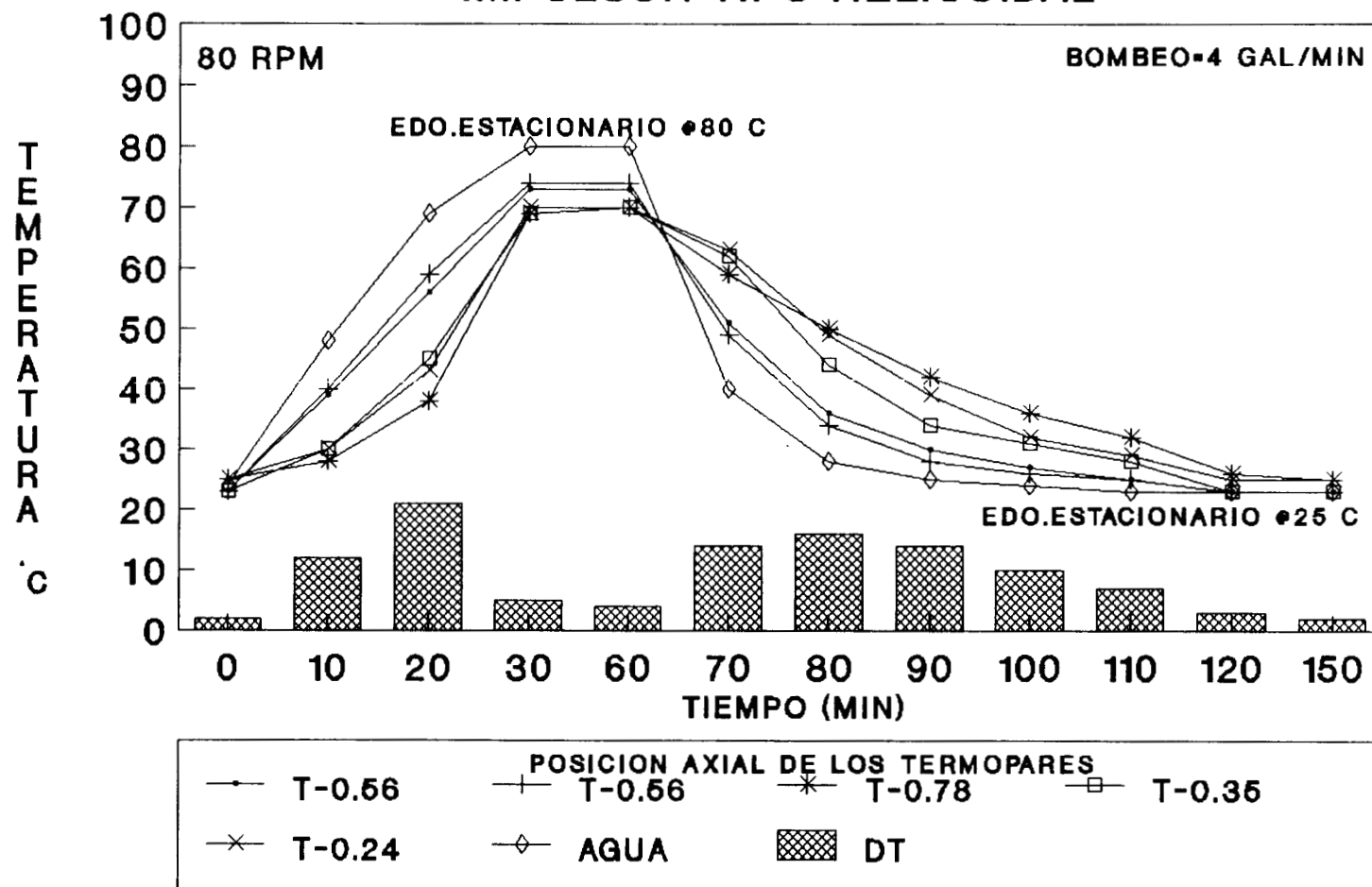
PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

# GRAFICA No. 4.32

## CORRIDA EXPERIMENTAL

FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @14.5%

IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



PROCESO DE CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO

---

#### 4.4.-ANALISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA FLUIDOS NO NEWTONIANOS.

Una comparación de resultados experimentales presentan lo siguiente:

- 1) Las Gráficas 4.17 a 4.20 muestran los gradientes axiales de temperatura medidos durante los procesos de calentamiento, estado estable y enfriamiento en un fluido polimérico tipo polibutadieno en ciclohexano 1,4 al 11.5% con un agitador tipo paleta a diferentes velocidades de agitación de 30 a 80 rpm, respectivamente. Se observa que el efecto de los gradientes de temperatura en la etapa de enfriamiento a diferentes velocidades de agitación y no presenta una variación significativa en la remoción de transporte de calor.
- 2) Las Gráficas 4.21 a 4.24 muestran los gradientes axiales de temperatura medidos durante los procesos de calentamiento, estado estable y enfriamiento en un fluido no Newtoniano de PBD 1,4 al 11.5 % con un agitador tipo helicoidal a diferentes velocidades de agitación de 30 a 80 rpm, respectivamente. Se observa el efecto de la velocidad de agitación con los gradientes de temperatura alcanzados, ya que a medida que se incrementa la velocidad de agitación la viscosidad disminuye y por consiguiente el transporte de calor convectivo tiende a aumentar.
- 3) Las Gráficas 4.17 y 4.21 muestran los gradientes axiales de temperatura medidos durante los procesos de calentamiento, estado estable y enfriamiento en un fluido de PBD 1,4 al 11.5% con diferente tipo de agitador (paleta y helicoidal) a una velocidad de agitación de 30 rpm. Presentan que los gradientes de temperatura son significativos en la etapa de enfriamiento, lo cual refleja el grado de remoción de calor, con diferente tipo de agitador.

- 
- 4) Las Gráficas 4.20 y 4.24 muestran los gradientes axiales de temperatura medidos durante los procesos de calentamiento, estado estable y enfriamiento con diferente tipo de agitador (paletas y helicoidal) a una velocidad de agitación de 80 rpm. Se observa que los gradientes de temperatura son muy significativos durante todo el proceso. Lo cual refleja el grado de homogeneidad alcanzado con un impulsor tipo helicoidal a diferencia del impulsor tradicional tipo paleta.
  - 5) Las Gráficas 4.25 a 4.28 muestran los gradientes axiales de temperatura medidos durante los procesos de calentamiento, estado estable y enfriamiento en un fluido polimérico tipo polibutadieno en ciclohexano 1,4 al 14.5% con un agitador tipo paleta a diferentes velocidades de agitación de 30 a 80 rpm, respectivamente. Se observa el efecto que tienen los gradientes de temperatura en la etapa de enfriamiento a diferentes velocidades de agitación, debido a las diferentes viscosidades del fluido empleado.
  - 6) Las Gráficas 4.29 a 4.32 muestran los gradientes axiales de temperatura medidos durante los procesos de calentamiento, estado estable y enfriamiento en un fluido no Newtoniano de PBD 1,4 al 14.5 % con un agitador tipo helicoidal a diferentes velocidades de agitación de 30 a 80 rpm, respectivamente. Se observa el efecto que presenta la velocidad de agitación con los gradientes de temperatura en un polímero tipo pseudoplástico, ya que a medida que se incrementa la velocidad de agitación la viscosidad disminuye y por consiguiente el transporte de calor convectivo aumenta.
  - 7) Las Gráficas 4.25 y 4.29 muestran los gradientes axiales de temperatura medidos durante los procesos de calentamiento, estado estable y enfriamiento en un fluido de PBD 1,4 al 14.5%

con diferente tipo de agitador (paleta y helicoidal) a una velocidad de agitación de 30 rpm. Muestran de que manera los gradientes de temperatura son apreciables principalmente en la etapa de enfriamiento.

- 8) Las Gráficas 4.28 y 4.32 muestran los gradientes axiales de temperatura medidos durante los procesos de calentamiento, estado estable y enfriamiento con diferente tipo de agitador (paletas y helicoidal) a una velocidad de agitación de 80 rpm. Se observa que los gradientes de temperatura son muy significativos durante todo el proceso. Lo cual refleja el grado de homogeneidad alcanzado con un impulsor tipo helicoidal a diferencia del impulsor tradicional tipo paleta.

Adicionalmente, los gradientes de temperatura en la parte inferior del tanque tienden a ser menores a 5 °C, pero a medida que se incrementa la distancia de la base a la superficie del tanque, los gradientes de temperatura para un agitador tipo paleta se incrementan, los que no se presentan para un impulsor Helicoidal donde tienden a ser más homogéneos.

- 9) En el sistema de enfriamiento a temperatura constante de 19 °C se logra remover el calor presente en el sistema en un tiempo menor a 50 min. Utilizando para tal efecto un impulsor helicoidal a diferencia de un impulsor tipo paleta donde el tiempo de remoción de calor es infinito, debido a las zonas muertas, concavidades y recirculación presentes.
- 10) Los perfiles de temperatura tienden a ser mayores cuando se incrementa la relación entre hélice/diámetro del tanque, como se ilustra en el sistema.

Los valores de  $c/D$ ,  $s/D$  y  $w/D$  de la geometría de impulsor helicoidal, utilizados parecen ser los más adecuados para este sistema en particular.

Una característica importante en este tipo de agitadores parece ser la relación entre el diámetro del agitador y el diámetro del tanque ( $d/D$ ).

Valores típicos para esta relación se encuentran en el rango de 0.8 y 0.98. Estos valores difieren de los reportados por Nagata<sup>[30]</sup>, pero están acorde con lo presentado por Shamlou<sup>[36,37]</sup> y se observa que pequeñas variaciones en la geometría del impulsor tienen un efecto significativo en el tiempo de mezclado.

Lo anterior, refleja el grado de homogeneidad alcanzado con un impulsor tipo helicoidal a diferencia del impulsor tradicional tipo paleta en función de los gradientes de temperatura en fluidos no Newtonianos. Un resumen de lo anterior se presenta en la Tabla 4.1.

**TABLA 4.1.-LOS GRADIENTES DE TEMPERATURA ALCANZADOS CON DIFERENTE IMPULSOR Y DIFERENTES FLUIDOS.**

| FLUIDO                                               | AGITADOR   | RPM | $\Delta T$ max. |
|------------------------------------------------------|------------|-----|-----------------|
| POLIBUTADIENO<br>1,4 EN<br>CICLOHEXANO<br>AL 11.5 %. | PALETA     | 30  | 25              |
|                                                      | HELICOIDAL | 30  | 20              |
|                                                      | PALETA     | 60  | 24              |
|                                                      | HELICOIDAL | 60  | 5               |
|                                                      | PALETA     | 70  | 19              |
|                                                      | HELICOIDAL | 70  | 4               |
|                                                      | PALETA     | 80  | 24              |
|                                                      | HELICOIDAL | 80  | 5               |
| POLIBUTADIENO<br>1,4 EN<br>CICLOHEXANO<br>AL 14.5 %. | PALETA     | 30  | 29              |
|                                                      | HELICOIDAL | 30  | 27              |
|                                                      | PALETA     | 60  | 23              |
|                                                      | HELICOIDAL | 60  | 20              |
|                                                      | PALETA     | 70  | 19              |
|                                                      | HELICOIDAL | 70  | 20              |
|                                                      | PALETA     | 80  | 32              |
|                                                      | HELICOIDAL | 80  | 21              |

---

**4.5.-RESULTADOS DE LA SOLUCION NUMERICA DEL MODELO CON PERFIL DE VELOCIDAD ANGULAR Y TRANSFERENCIA DE CALOR PARA FLUIDOS NEWTONIANOS.**

Los resultados fueron obtenidos através de los modelos matemáticos planteados y resueltos con un paquete numérico(ELI-COL). Para lo cual se realizaron varias simulaciones numéricas de los modelos propuestos a las mismas condiciones en que se realizaron cada uno de los experimentos (Ver Tabla 3.0).

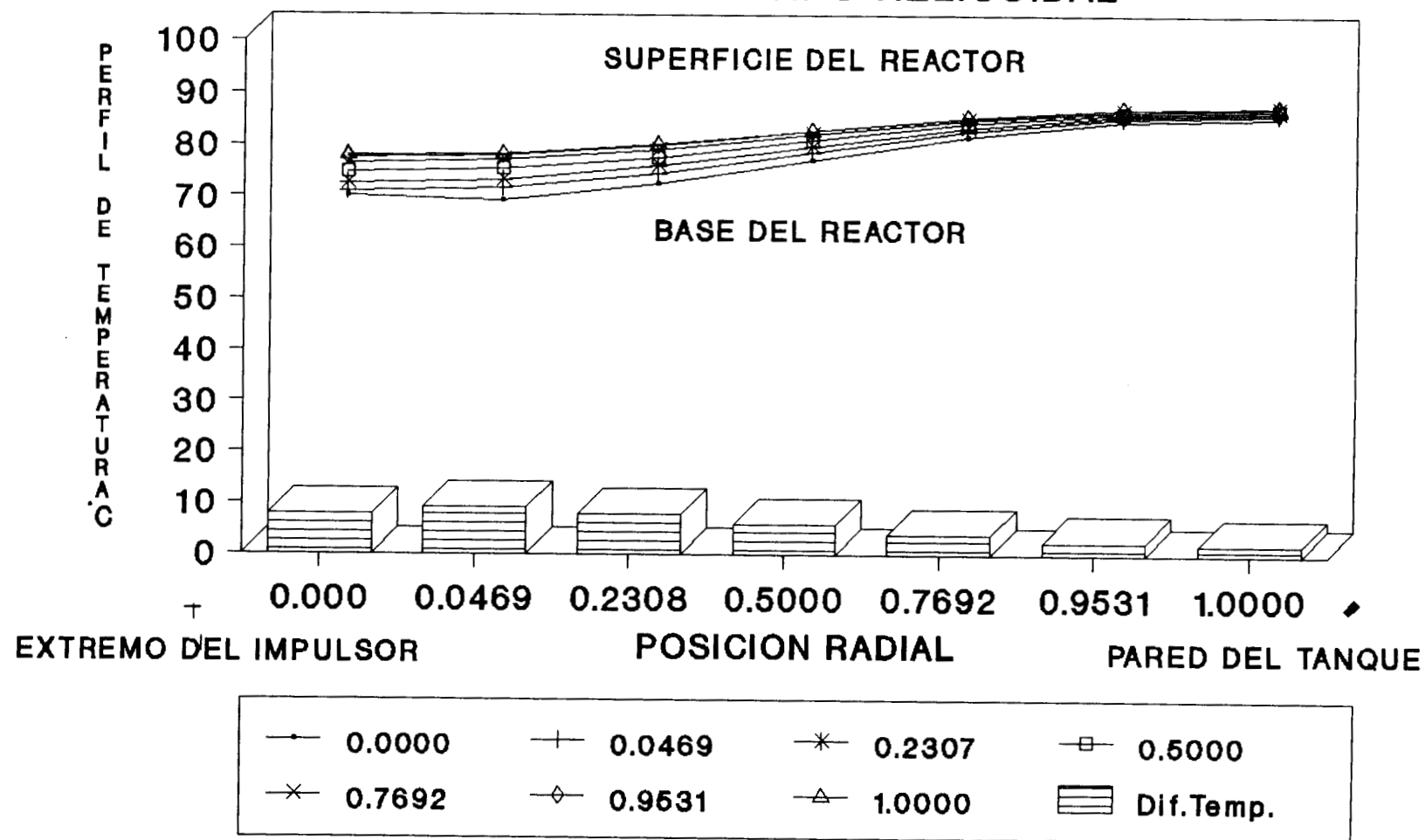
Las Gráficas 4.33 a 4.60 se presentan los resultados, a fin de conocer el comportamiento del sistema de mezclado con transferencia de calor en estado estacionario.

En las Gráficas 4.33 a 4.44 se muestran los resultados en fluidos Newtonianos a las mismas condiciones experimentales:

- 1) Gráficas 4.33 a 4.38 con el modelo matemático para un agitador Helicoidal empleando como fluido silicon oil.
- 2) Gráficas 4.39 a 4.44 con el modelo matemático para un agitador Helicoidal empleando como fluido glicerol.

GRAFICA No.4.33

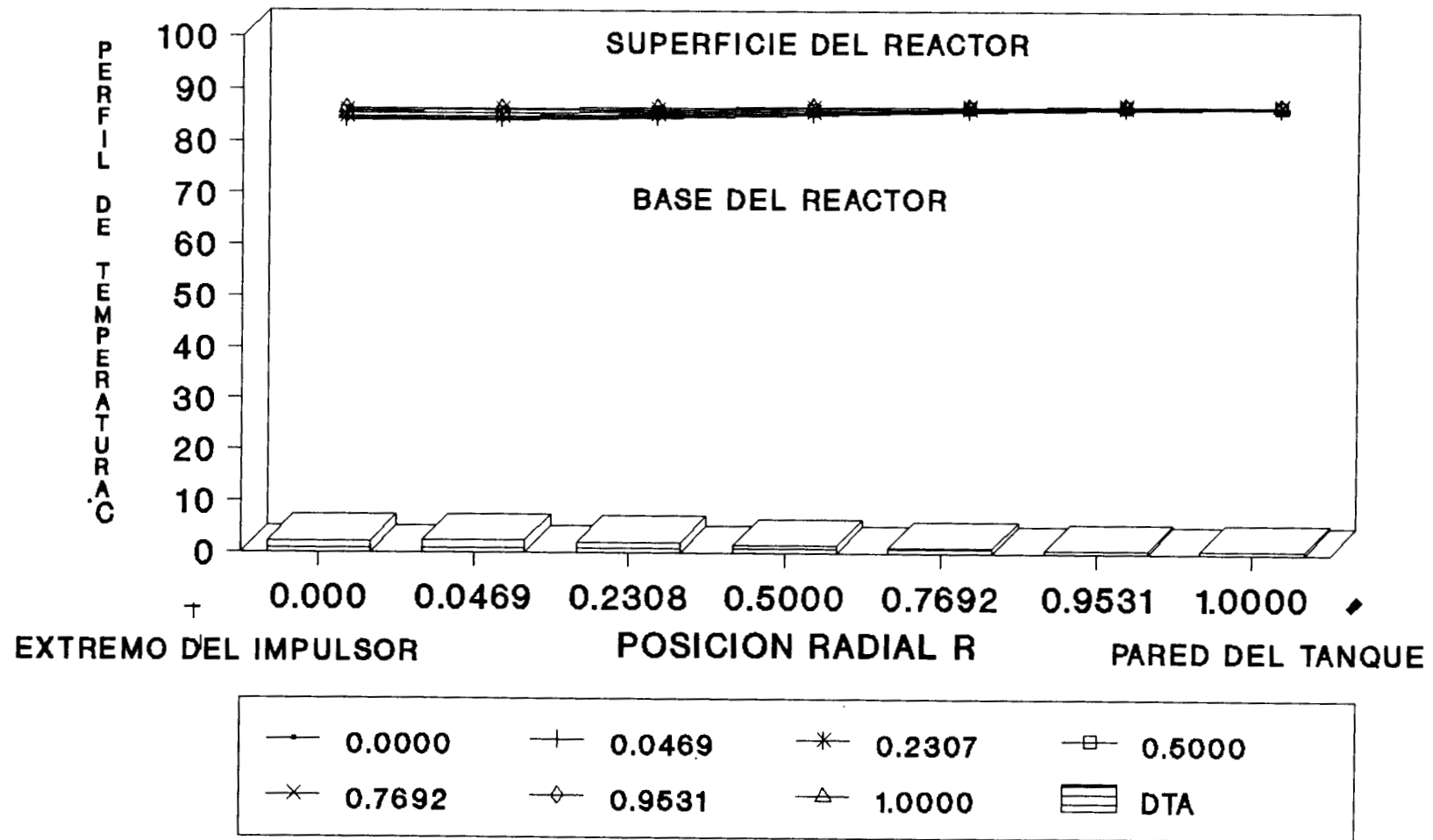
SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO SILICON OIL  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



SILICON OIL, N=60 rpm, E.E, @ 80 C.

GRAFICA No.4.34

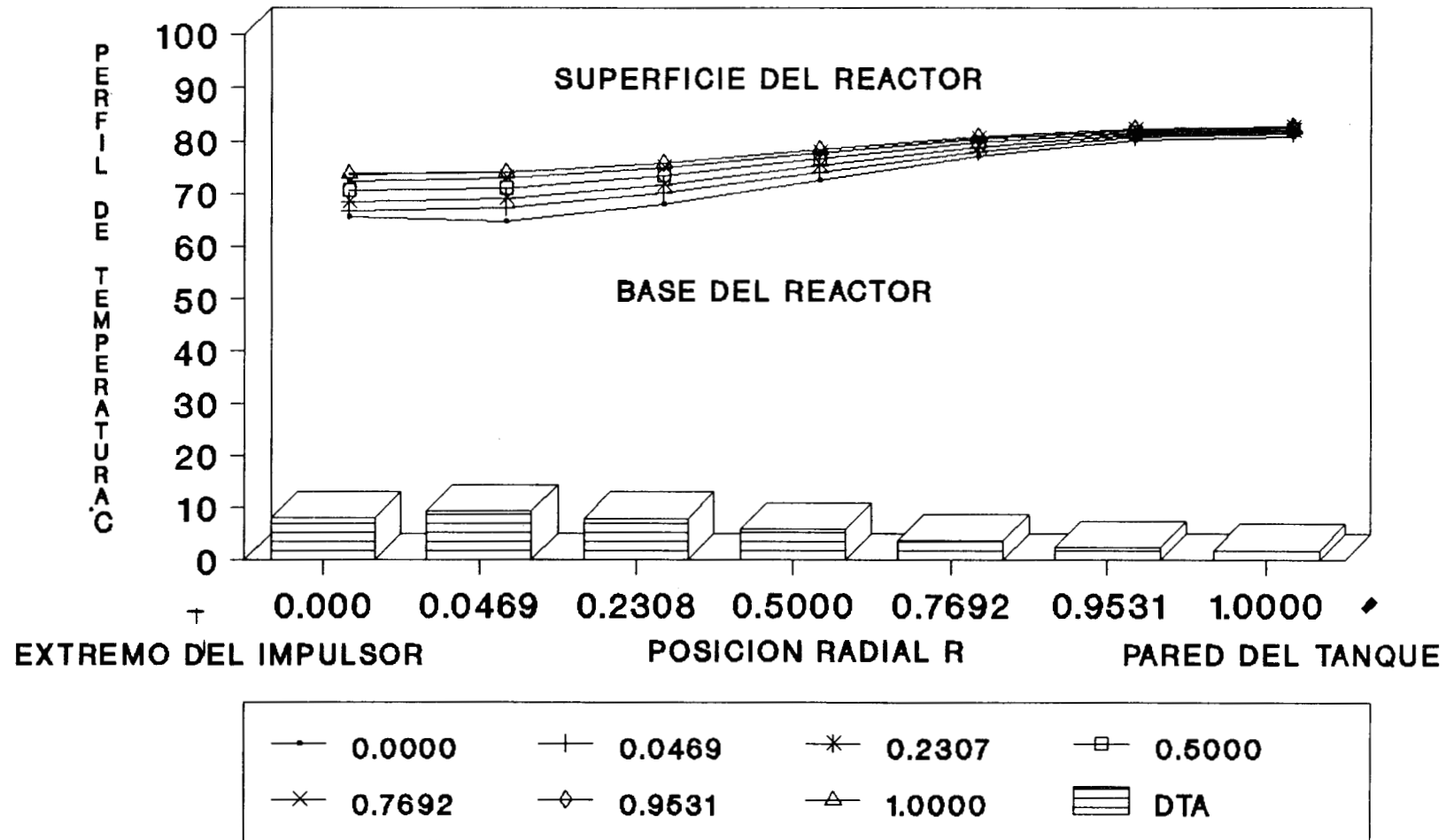
SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO SILICON OIL  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



SILICON OIL, N=70 rpm, E.E. @ 80 C.

GRAFICA No.4.35

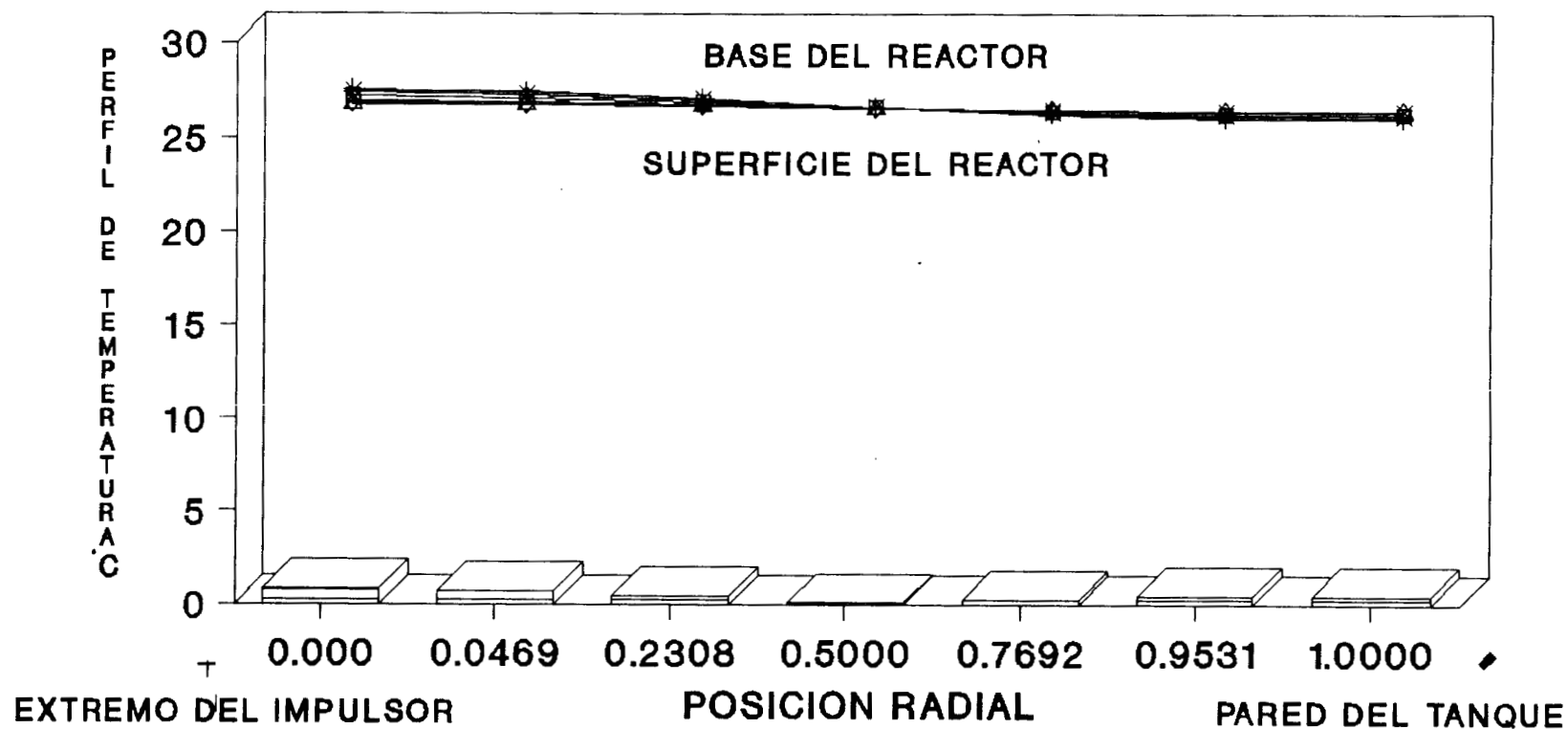
SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO SILICON OIL  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



SILICON OIL, N=80 rpm, E.E. @ 80 C.

GRAFICA No.4.36

SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO SILICON OIL  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL

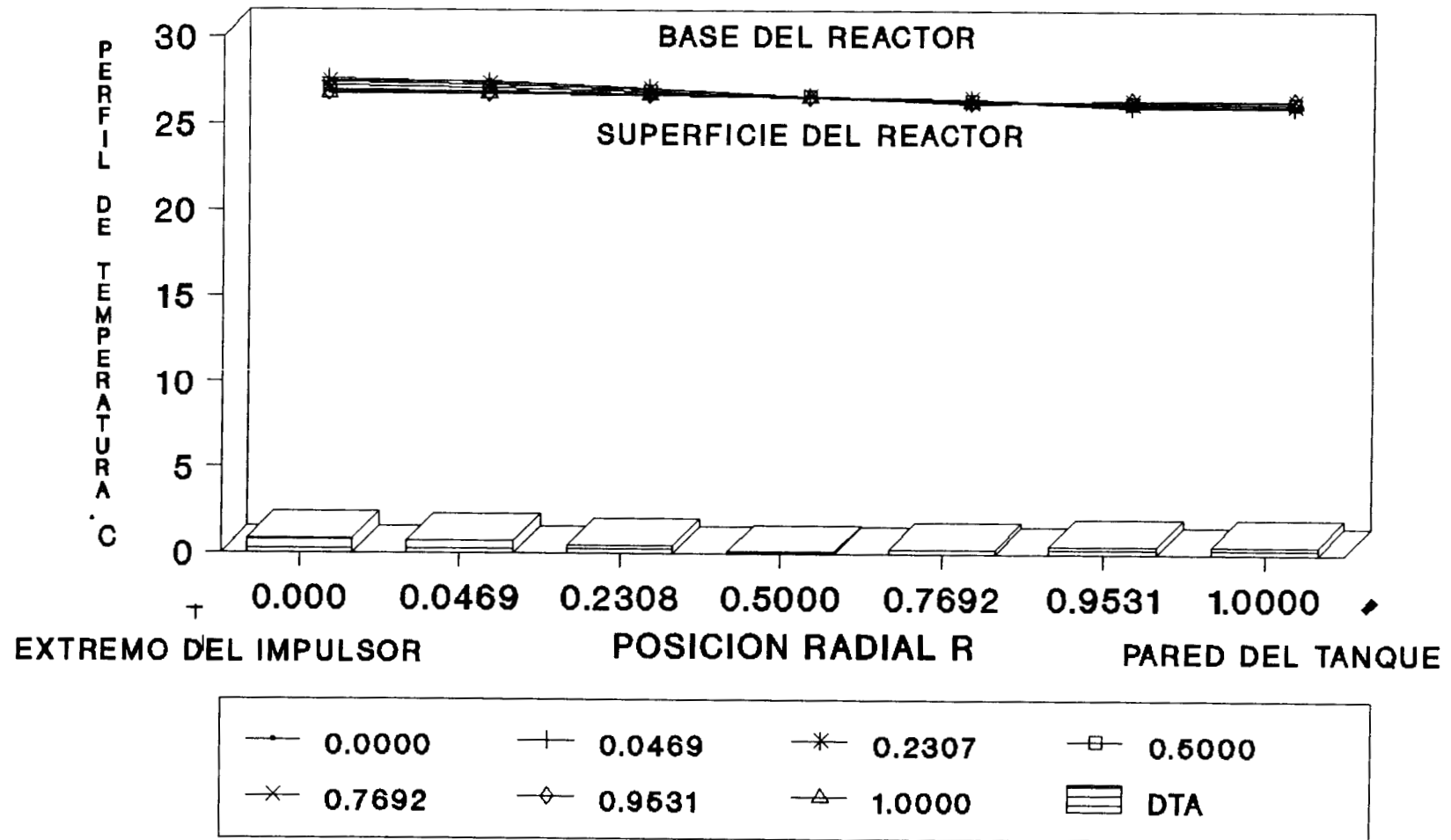


|            |            |            |             |
|------------|------------|------------|-------------|
| —•— 0.0000 | —+— 0.0469 | —*— 0.2307 | —□— 0.5000  |
| —x— 0.7692 | —◇— 0.9531 | —△— 1.0000 | ▨ Dif.Temp. |

SILICON OIL, N=60 rpm, E.E, • 25 C.

GRAFICA No. 4.37

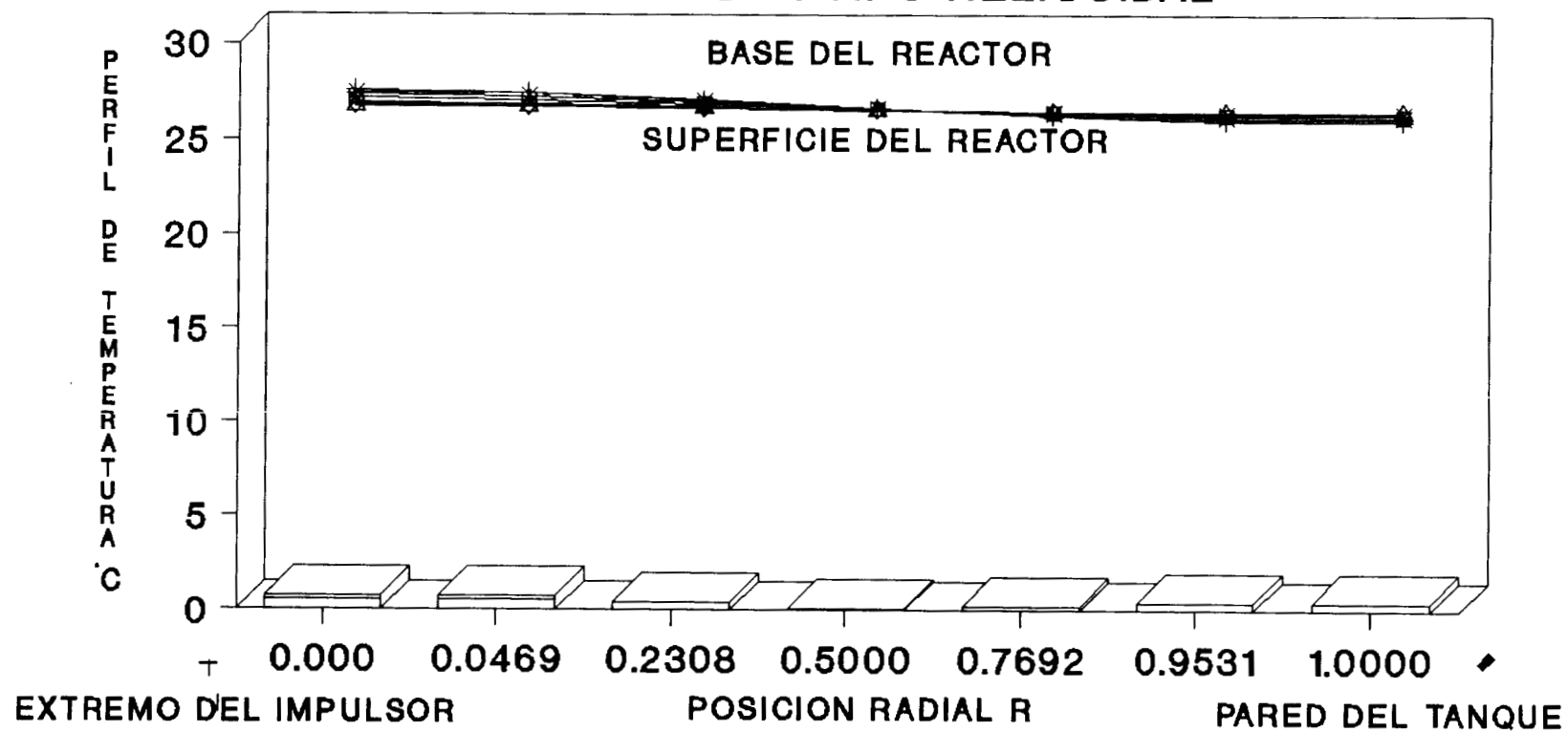
SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO SILICON OIL  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



SILICON OIL, N=70 rpm, E.E. • 25 C.

GRAFICA No. 4.38

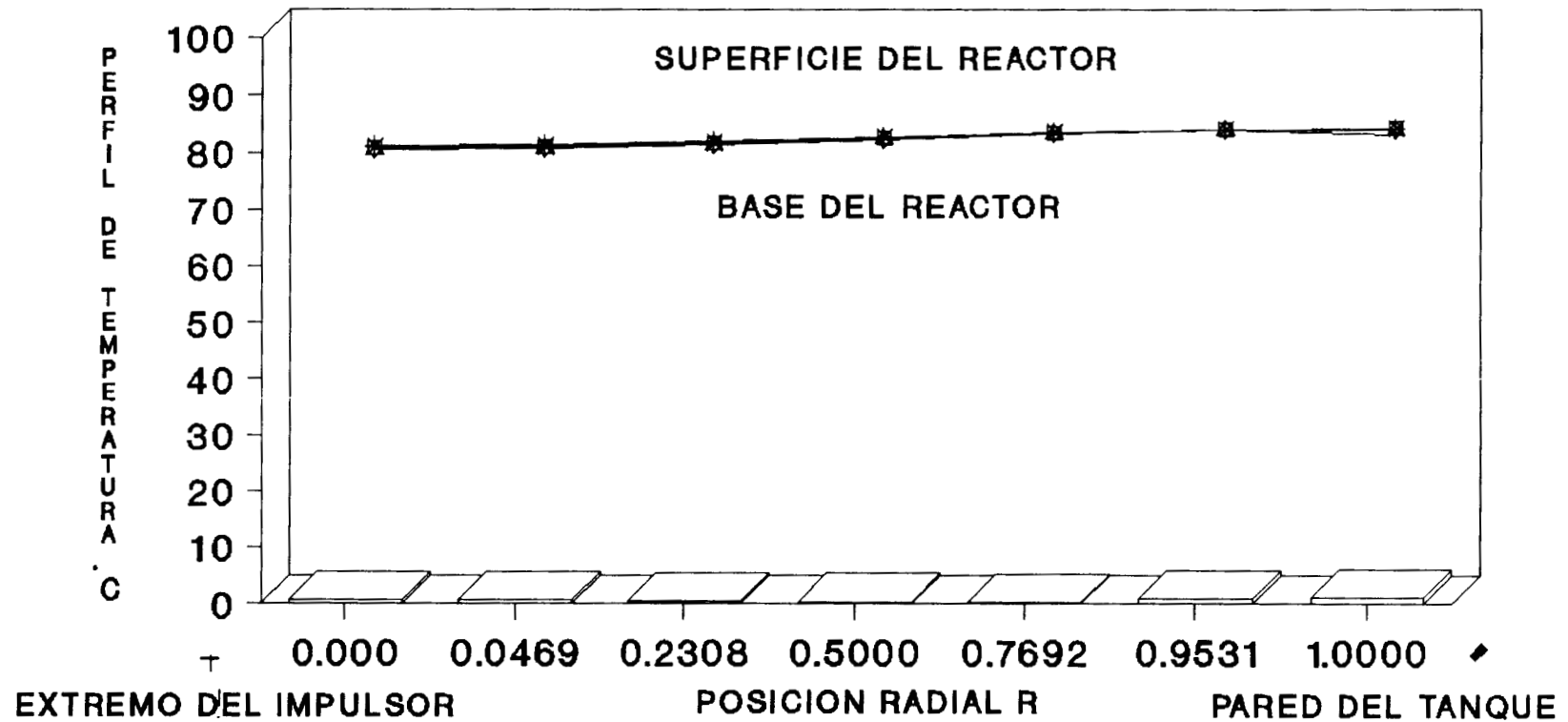
SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO SILICON OIL  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



SILICON OIL, N=80 rpm, E.E. • 25 C.

GRAFICA No. 4.39

SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO GLICEROL  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL

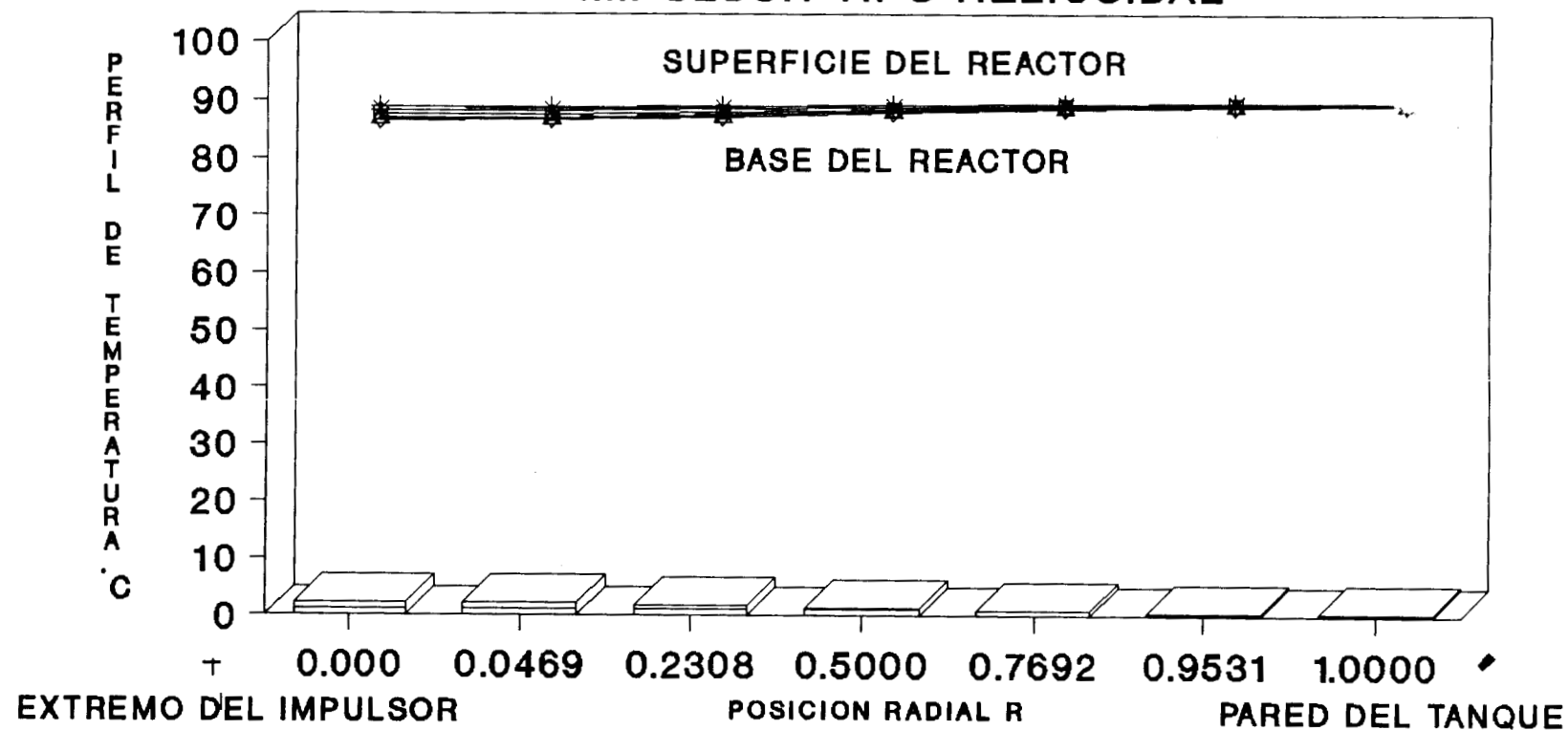


|            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|
| —•— 0.0000 | —+— 0.0469 | —*— 0.2307 | —□— 0.5000 |
| —x— 0.7692 | —◇— 0.9531 | —△— 1.0000 | DTA        |

GLICEROL, N=60 rpm, E.E. ø 80

GRAFICA No. 4.40

SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO GLICEROL  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL

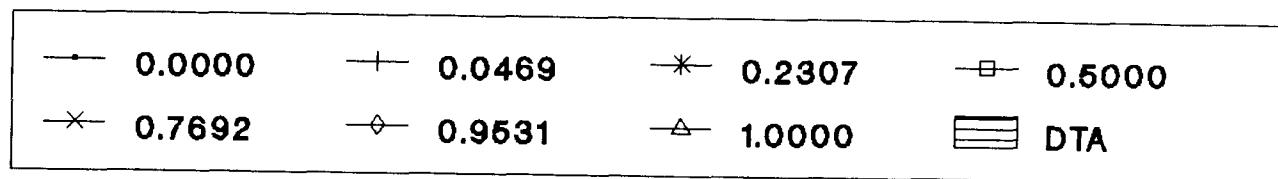
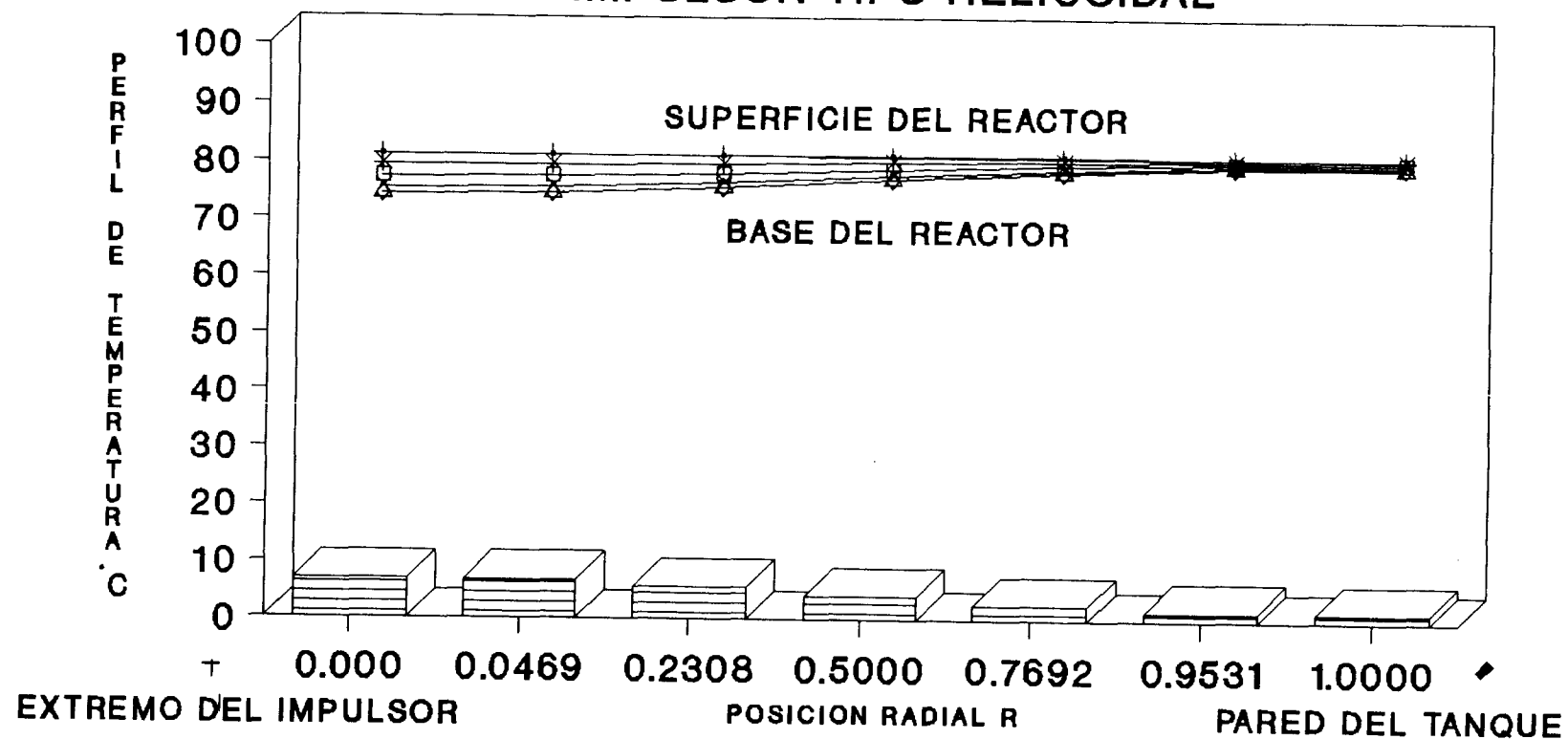


|            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|
| —•— 0.0000 | —+— 0.0469 | —*— 0.2307 | —□— 0.5000 |
| —x— 0.7692 | —◇— 0.9531 | —△— 1.0000 | DTA        |

GLICEROL, N=70 rpm, E.E. ø 80

GRAFICA No. 4.41

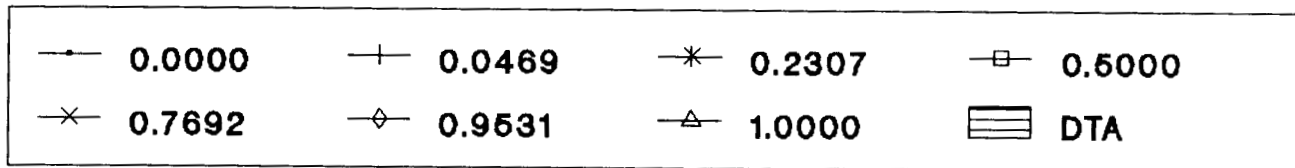
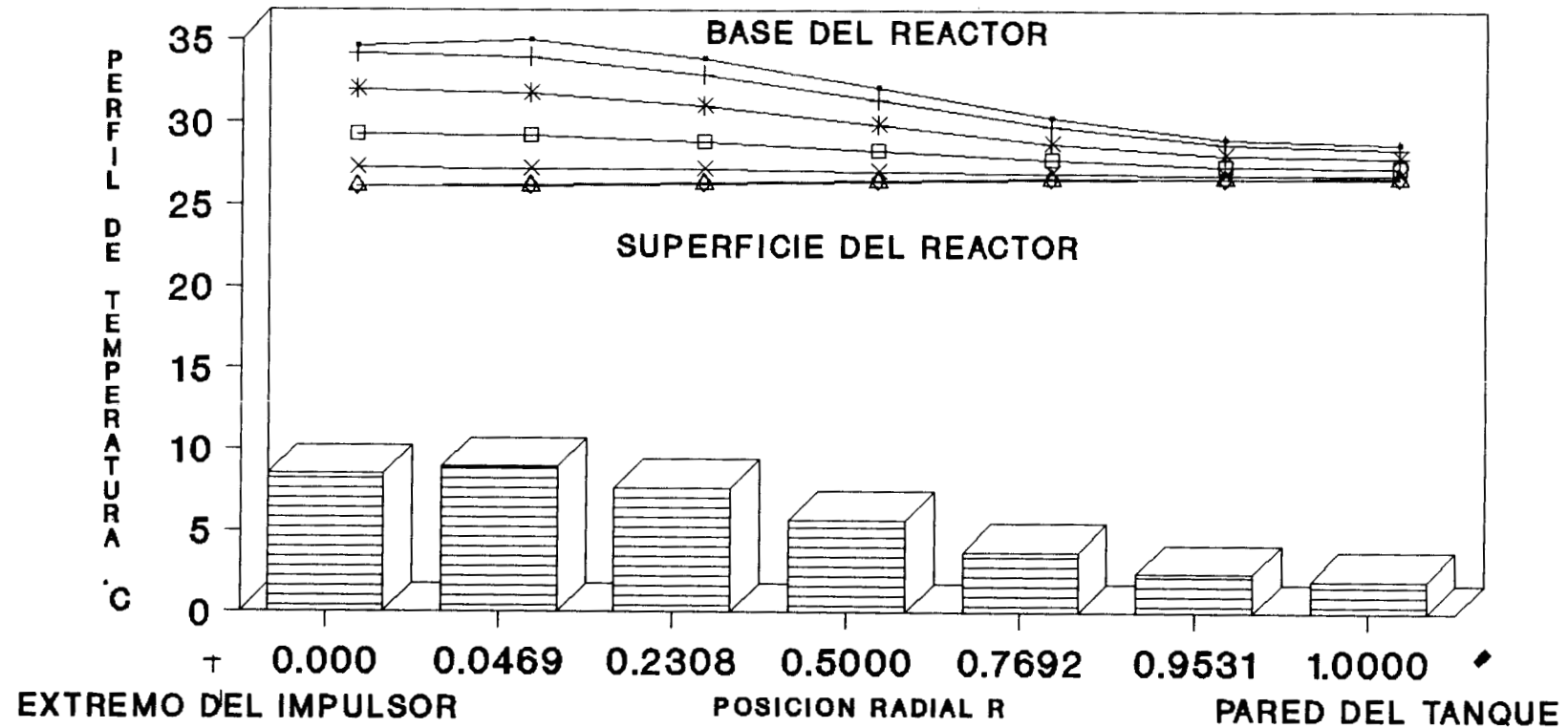
SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO GLICEROL  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



GLICEROL, N=80 rpm, E.E. • 80

GRAFICA No. 4.42

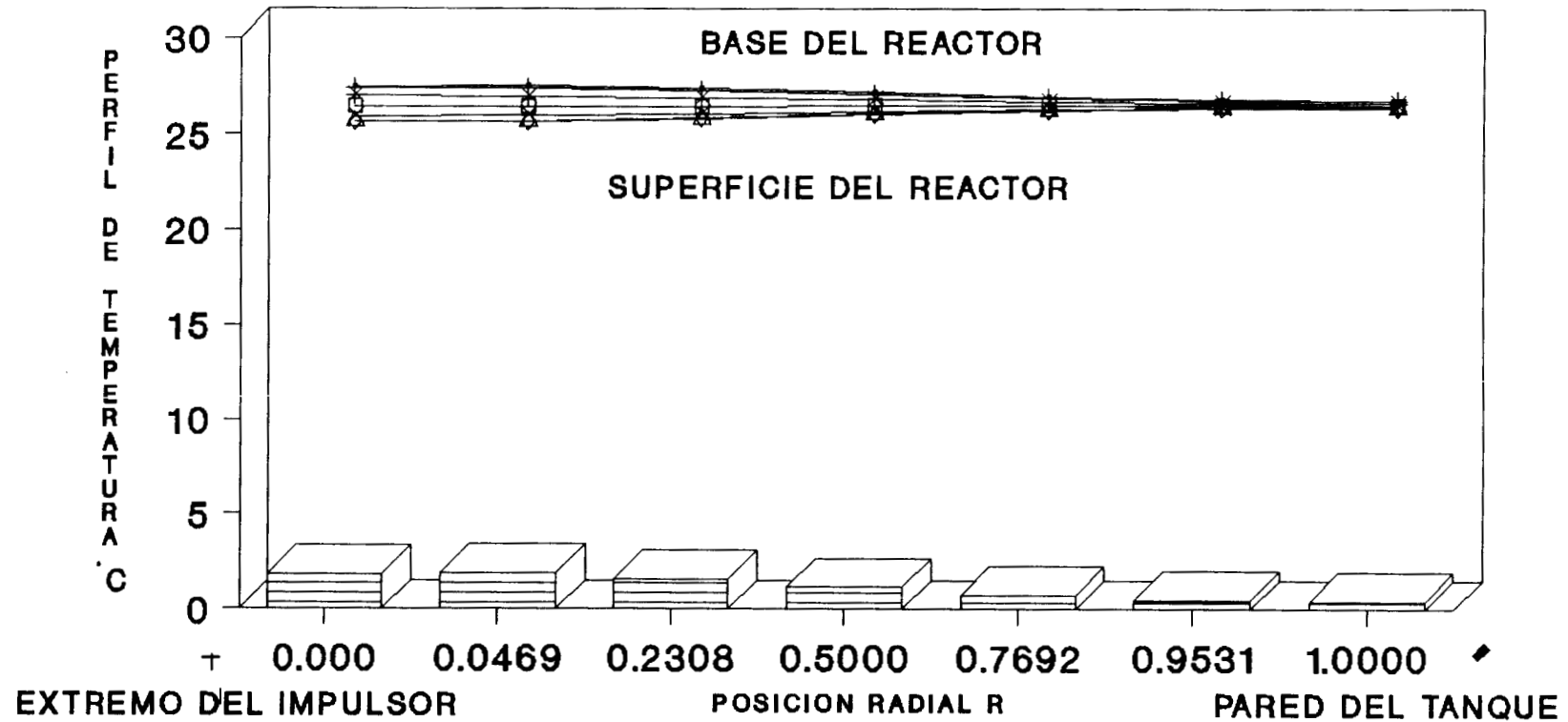
SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO GLICEROL  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



GLICEROL, N=60 rpm, E.E. ø 25

GRAFICA No. 4.43

SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO GLICEROL  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL

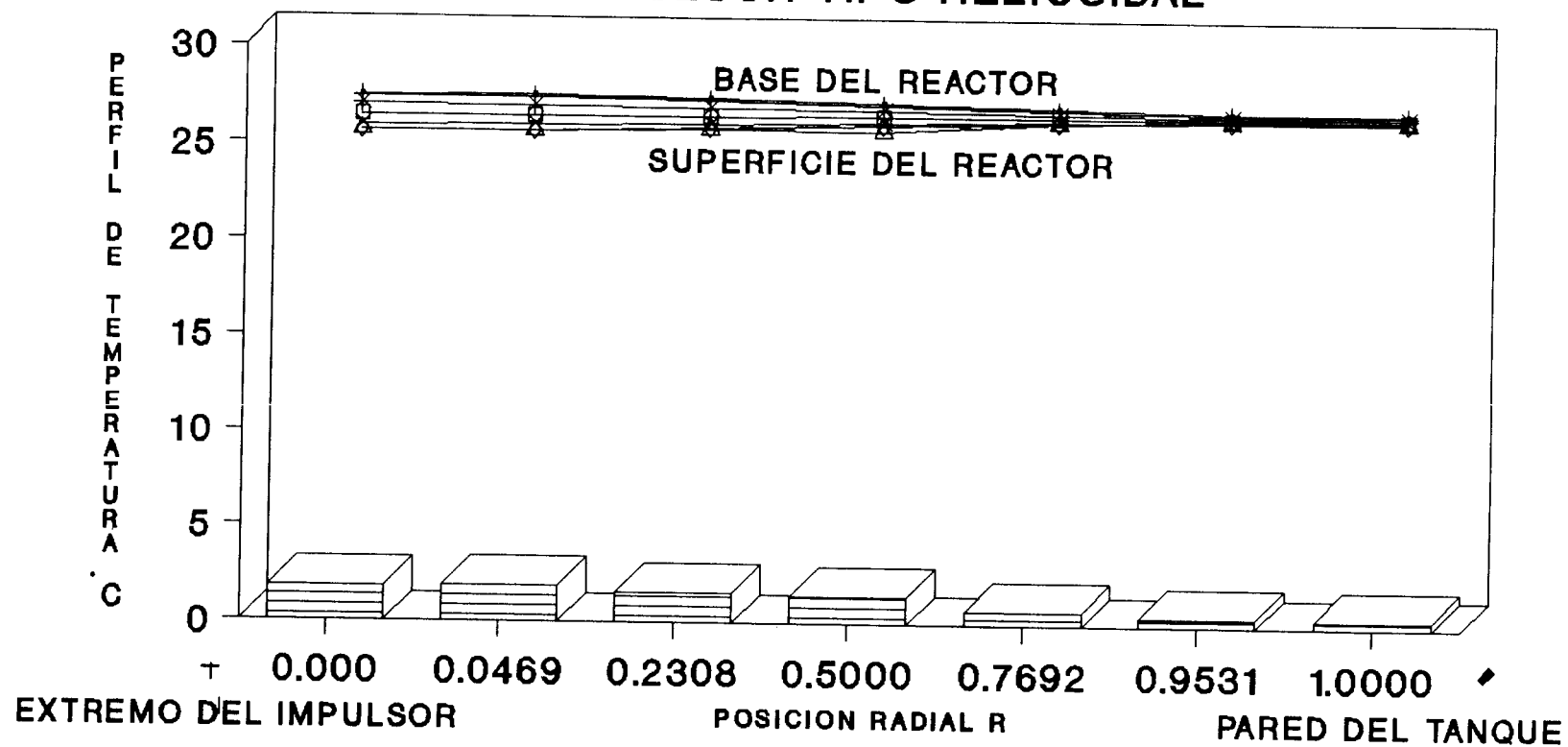


|            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|
| —•— 0.0000 | —+— 0.0469 | —*— 0.2307 | —□— 0.5000 |
| —x— 0.7692 | —◇— 0.9531 | —△— 1.0000 | DTA        |

GLICEROL, N=70 rpm, E.E. • 25

GRAFICA No. 4.44

SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO GLICEROL  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



|            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|
| —•— 0.0000 | —+— 0.0469 | —*— 0.2307 | —□— 0.5000 |
| —x— 0.7692 | —◇— 0.9531 | —△— 1.0000 | DTA        |

GLICEROL, N=80 rpm, E.E. • 25

**4.6.-ANALISIS DE LOS RESULTADOS NUMERICOS EN FLUIDOS NEWTONIANOS.**

La solución de los modelos de mezclado en dirección circunferencial representa una aproximación a lo mostrado en las corridas experimentales.

En los resultados de la simulación numérica se aprecia:

- 1) Las Gráficas 4.33 a 4.35 muestran que los gradientes axiales de temperatura no presentan efectos muy apreciables en concordancia con los datos experimentales durante el proceso simulado en estado estable a 80°C con un agitador tipo helicoidal en un fluido de silicon oil a diferentes velocidades de agitación de 60 rpm a 80 rpm, respectivamente.

Se observa el efecto que tiene de la velocidad de agitación con los gradientes de temperatura, donde a medida que se incrementa la velocidad, la viscosidad tiende a disminuir en el espacio comprendido en el espacio anular y el transporte convectivo de calor tiende a aumentar.

- 2) Las Gráficas 4.36 a 4.38 muestran los gradientes axiales de temperatura son muy significativos en la base del tanque con respecto a los gradientes de temperatura presentes en la superficie en el procesos simulado en estado estable a 25°C con un agitador tipo helicoidal en un fluido de silicon oil a diferentes velocidades de agitación de 60 rpm a 80 rpm respectivamente. Se observa el efecto que tiene la velocidad de agitación con los gradientes de temperatura semejantes a los obtenidos experimentalmente a diferentes posiciones axiales de los termopares.
- 3) Las Gráficas 4.33 y 4.36 muestran los gradientes axiales de temperatura simulados durante el proceso en estado estable en silicon oil a diferentes temperaturas 80°C y 25°C respectivamente y una velocidad de agitación de 60 rpm. Se

---

observa el efecto que tiene de los gradientes de temperatura con respecto a la viscosidad, lo cual se refleja con el grado de homogeneidad de las isotérmicas de temperatura.

- 4) En las Gráficas 4.35 y 4.38 muestran los gradientes axiales de temperatura simulados durante el proceso en estado estable a diferentes temperaturas 80°C y 25°C respectivamente y una velocidad de agitación de 80 rpm. Se observa el efecto que tienen los cambios de viscosidad del fluido con respecto a la temperatura, tiende a aumentar a medida que se disminuye la presencia de calor presente en el sistema.
- 5) Las Gráficas 4.39 a 4.41 muestran que los gradientes axiales de temperatura no presentan efectos muy apreciables en concordancia con los datos experimentales durante el procesos simulado en estado estable a 80°C con un agitador tipo helicoidal en un fluido de glicerol al 95% a diferentes velocidades de agitación de 60 rpm a 80 rpm, respectivamente.
- 6) Las Gráficas 4.42 a 4.44 muestran los gradientes axiales de temperatura son muy apreciables en la base del tanque con respecto a los gradientes de temperatura presentes en la superficie en el procesos simulado en estado estable a 25°C con un agitador tipo helicoidal en un fluido de glicerol a diferentes velocidades de agitación de 60 rpm a 80 rpm., donde a medida que la viscosidad disminuye el transporte de calor convectivo tiende a aumentar y se refleja en los patrones de flujo existentes.
- 7) Las Gráficas 4.39 y 4.42 muestran los gradientes axiales de temperatura simulados durante el proceso en estado estable en glicerol al 95% a diferentes temperaturas 80°C y 25°C

respectivamente y una velocidad de agitación de 60 rpm. Se observa el efecto que tiene de los gradientes de temperatura debidos a la viscosidad del fluido.

- 8) En las Gráficas 4.41 y 4.44 muestran los gradientes axiales de temperatura simulados durante el proceso en estado estable a diferentes temperaturas 80°C y 25°C y una velocidad de agitación de 80 rpm.

Se observa el efecto de los gradientes de temperatura por los cambios de viscosidad del fluido, un resumen de lo anterior se presenta en la Tabla 4.2.

TABLA 4.2.-LOS GRADIENTES DE TEMPERATURA ESTIMADOS CON DIFENTES FLUIDOS NEWTONIANOS A 80 °C Y 25 °C A UNA POSICION AXIAL CON AGITADOR HELICOIDAL.

| FLUIDO   | TEMPERATURA<br>DEL SISTEMA<br>DE CONTROL<br>DE<br>TEMPERATURA<br>(°C) | RPM | T exp.<br>(A la mitad<br>de la base<br>al nivel del<br>el tanque) | T num.<br>(A la mitad<br>de la base<br>al nivel del<br>tanque) | $\Delta T$<br>Dif.<br>Temp. |
|----------|-----------------------------------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| SILICON  | 80                                                                    | 60  | 74                                                                | 78                                                             | 4                           |
|          | 25                                                                    | 60  | 22                                                                | 26                                                             | 4                           |
|          | 80                                                                    | 70  | 75                                                                | 82                                                             | 7                           |
|          | 25                                                                    | 70  | 20                                                                | 26                                                             | 6                           |
|          | 80                                                                    | 80  | 71                                                                | 72                                                             | 1                           |
|          | 25                                                                    | 80  | 25                                                                | 27                                                             | 2                           |
| GLICEROL | 80                                                                    | 60  | 80                                                                | 80                                                             | -                           |
|          | 25                                                                    | 60  | 25                                                                | 27                                                             | 2                           |
|          | 80                                                                    | 70  | 86                                                                | 87                                                             | 1                           |
|          | 25                                                                    | 70  | 25                                                                | 27                                                             | 2                           |
|          | 80                                                                    | 80  | 85                                                                | 80                                                             | 5                           |
|          | 25                                                                    | 80  | 25                                                                | 27                                                             | 2                           |

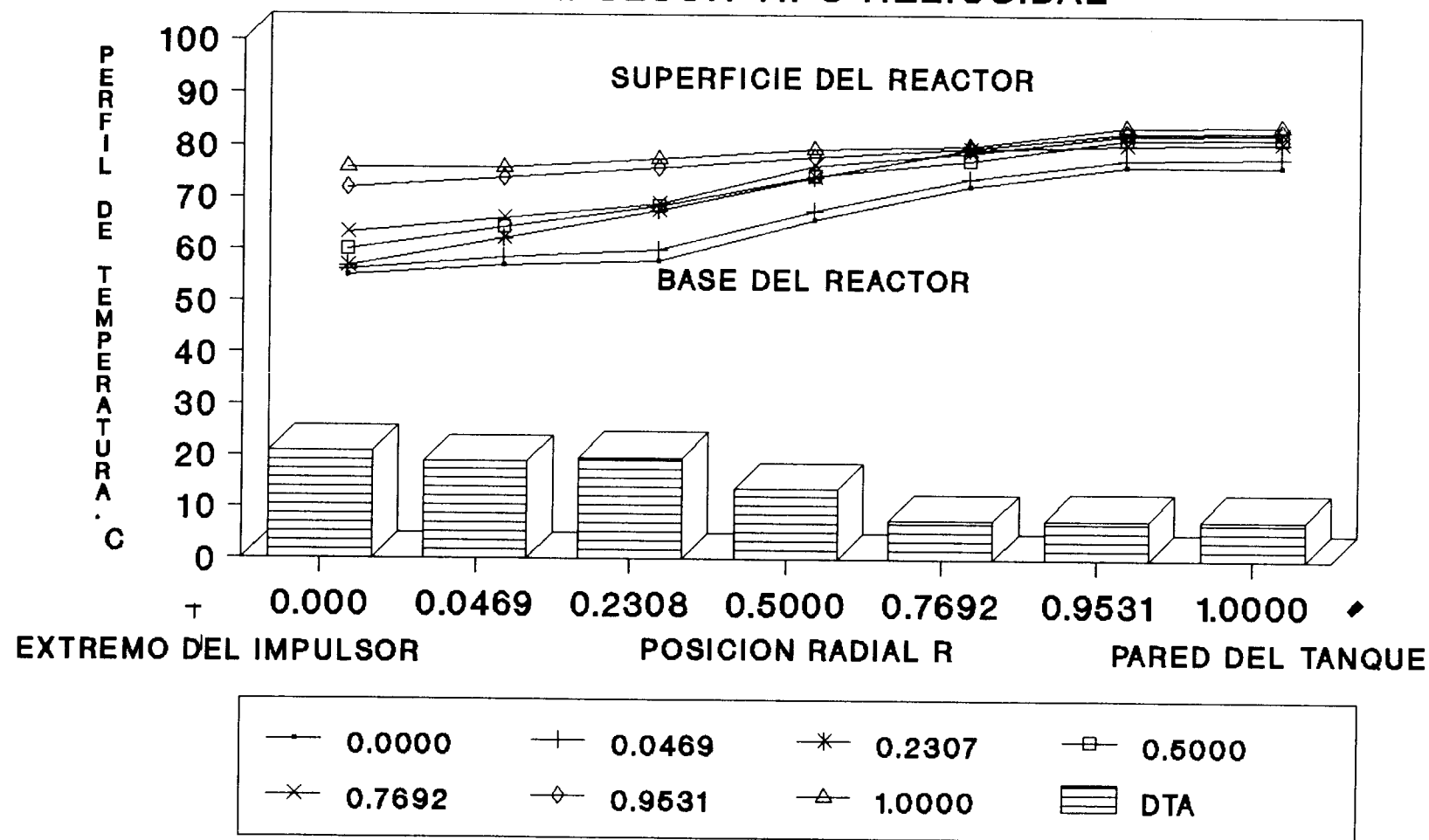
## 4.7.-RESULTADOS DE LA SOLUCION NUMERICA PARA FLUIDOS NO NEWTONIANOS.

En las Gráficas 4.45 a 4.60 se muestran los resultados en fluidos no Newtonianos a las mismas condiciones experimentales:

- 1) Gráficas 4.45 a 4.52 con el modelo matemático para agitador Helicoidal empleando un polímero al 11.5% en solución.
- 2) Gráficas 4.53 a 4.60 con el modelo matemático para agitador de Helicoidal empleando un polímero al 14.5% en solución.

# GRAFICA No. 4.45

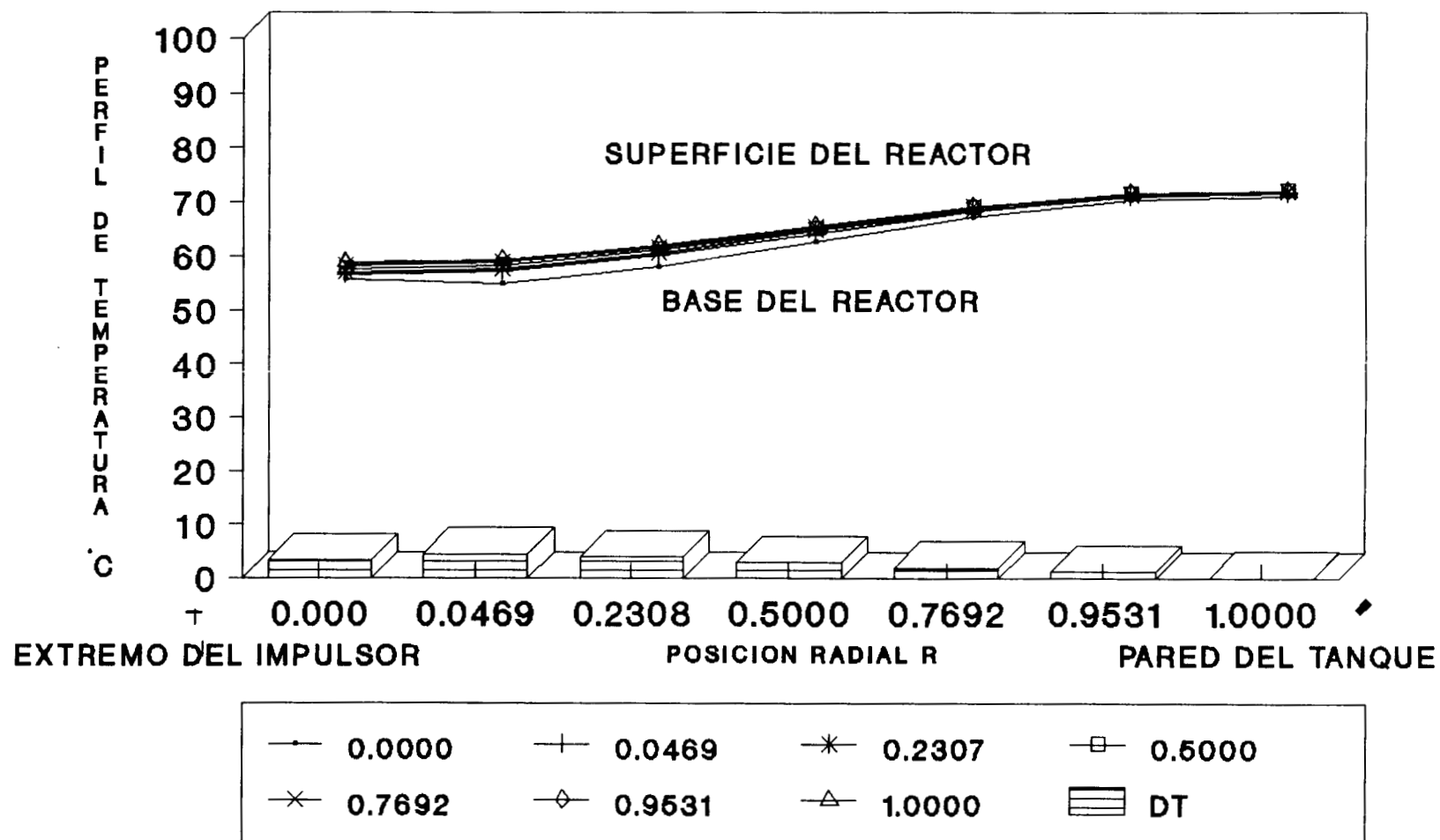
## SIMULACION NUMERICA FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @ 11.5 % IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



PBD @ 11.5 % N=30 rpm, E.E. @ 75

# GRAFICA No. 4.46

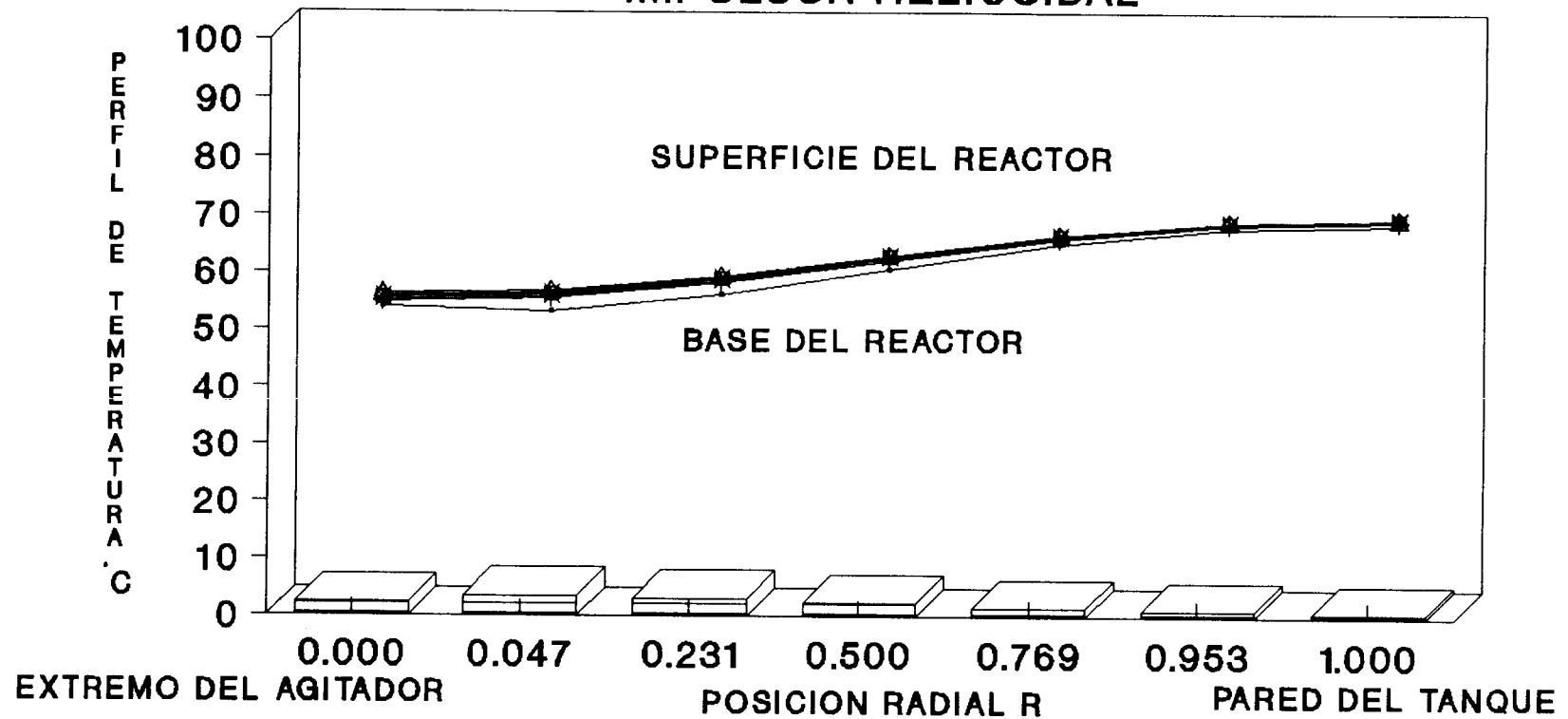
SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO PBD 1,4/CICLOHEXANO 11.5 %  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



PBD, N=60 rpm, E.E. @ 75 C.

# GRAFICA No. 4.47

SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO PBD 1,4/CICLOHEXANO 11.5 %  
IMPULSOR HELICOIDAL

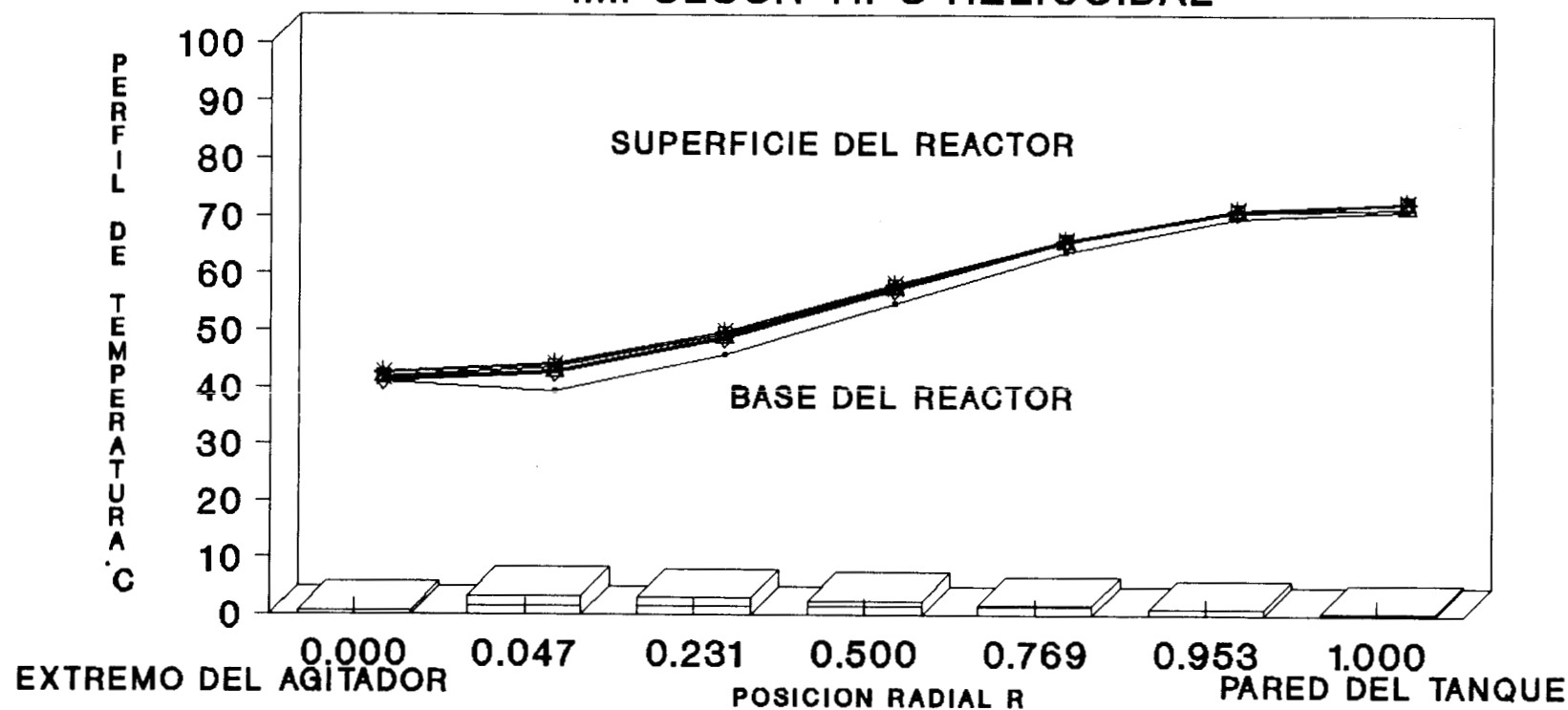


|            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|
| —•— 0.0000 | —+— 0.0469 | —*— 0.2308 | —□— 0.5000 |
| —x— 0.7692 | —◇— 0.9531 | —△— 1.0000 |            |

PBD, N=70 rpm, E.E. • 75 C.

# GRAFICA No. 4.48

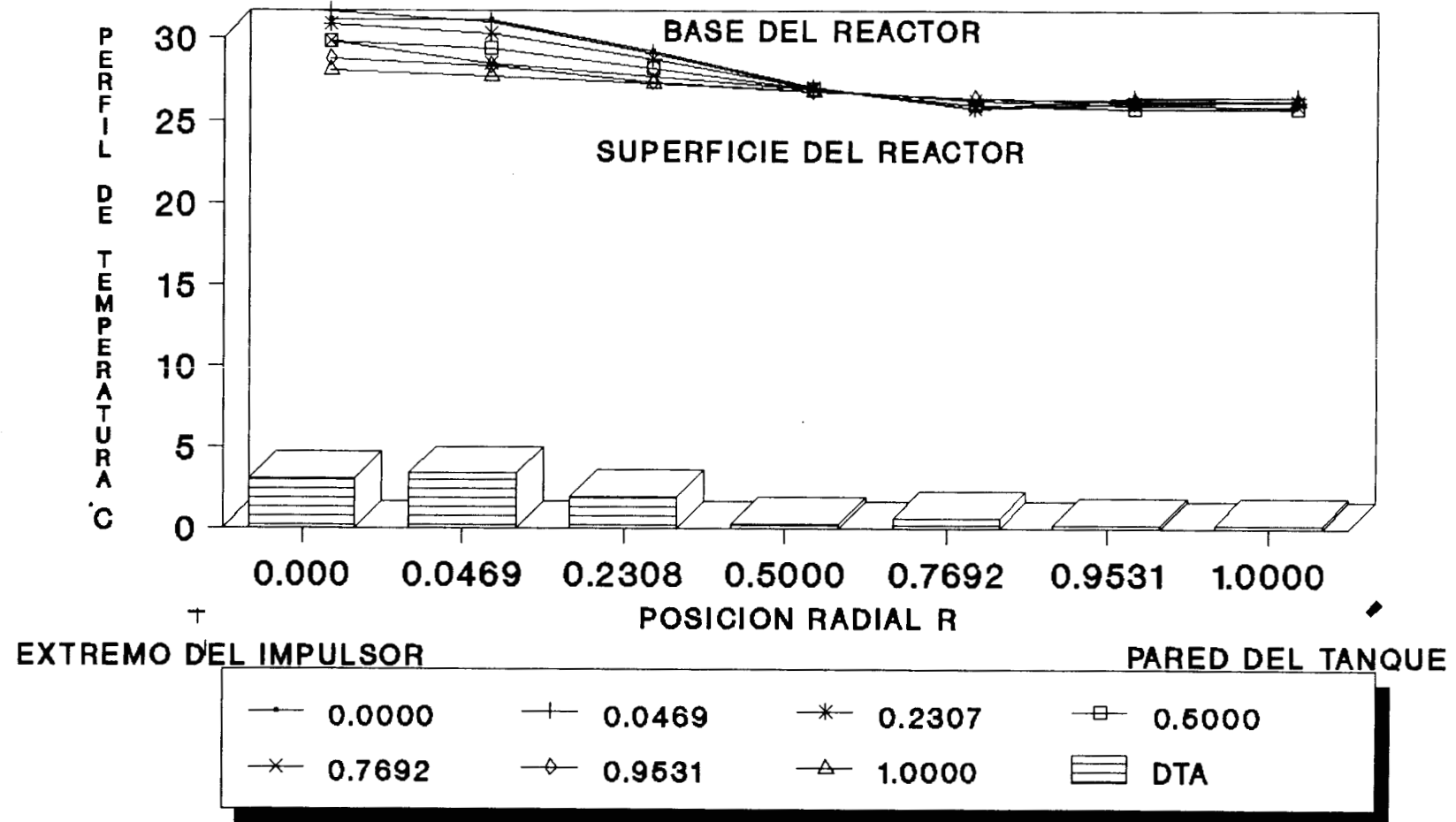
SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO PBD 1,4/CICLOHEXANO 11.5 %  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



PBD, N=80 rpm, E.E. • 75 C.

GRAFICA No. 4.49

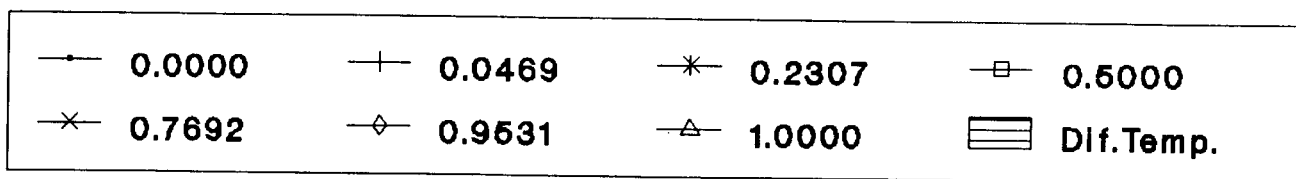
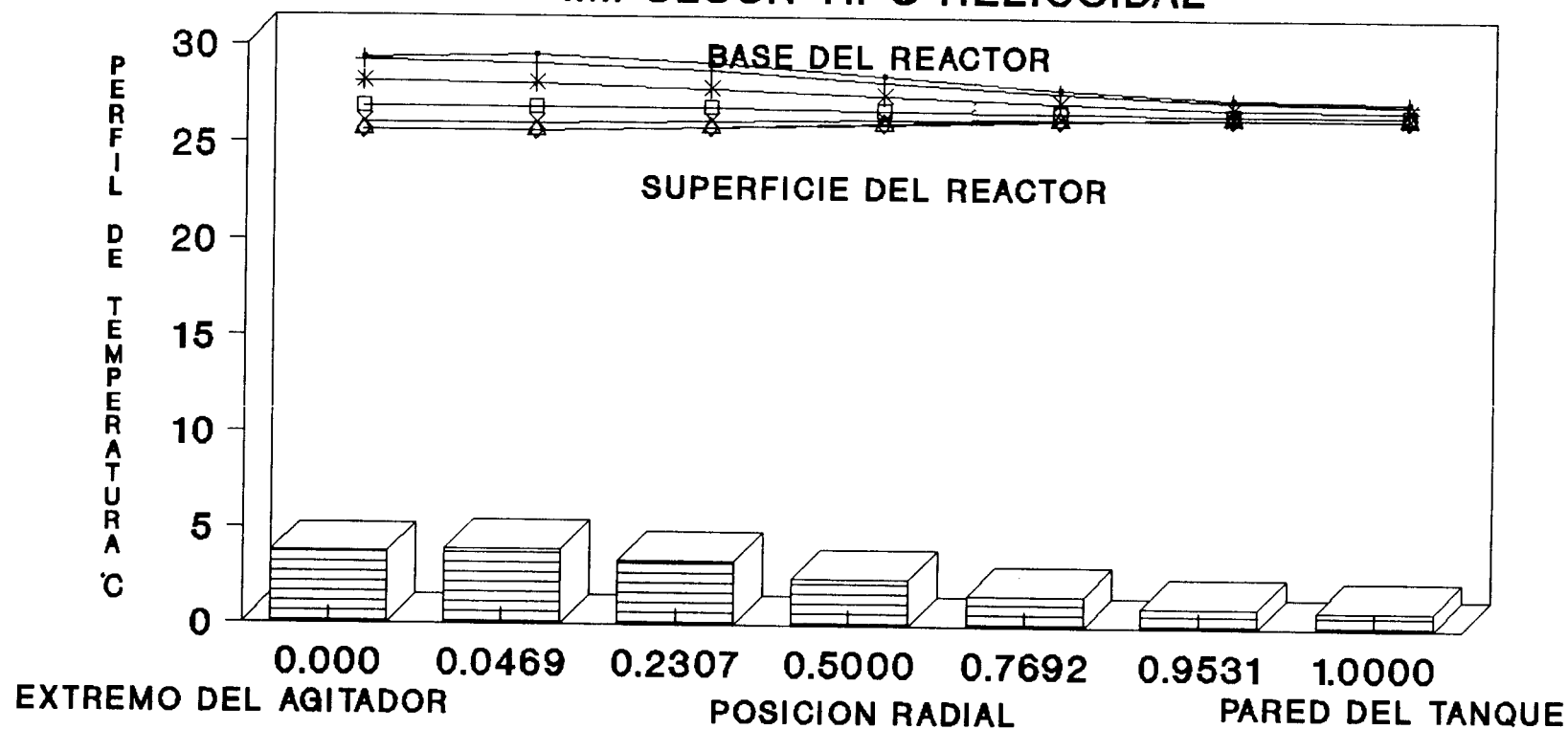
SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @ 11.5 %  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



PBD @ 11.5 % N=30 rpm, E.E. @ 25

GRAFICA No. 4.50

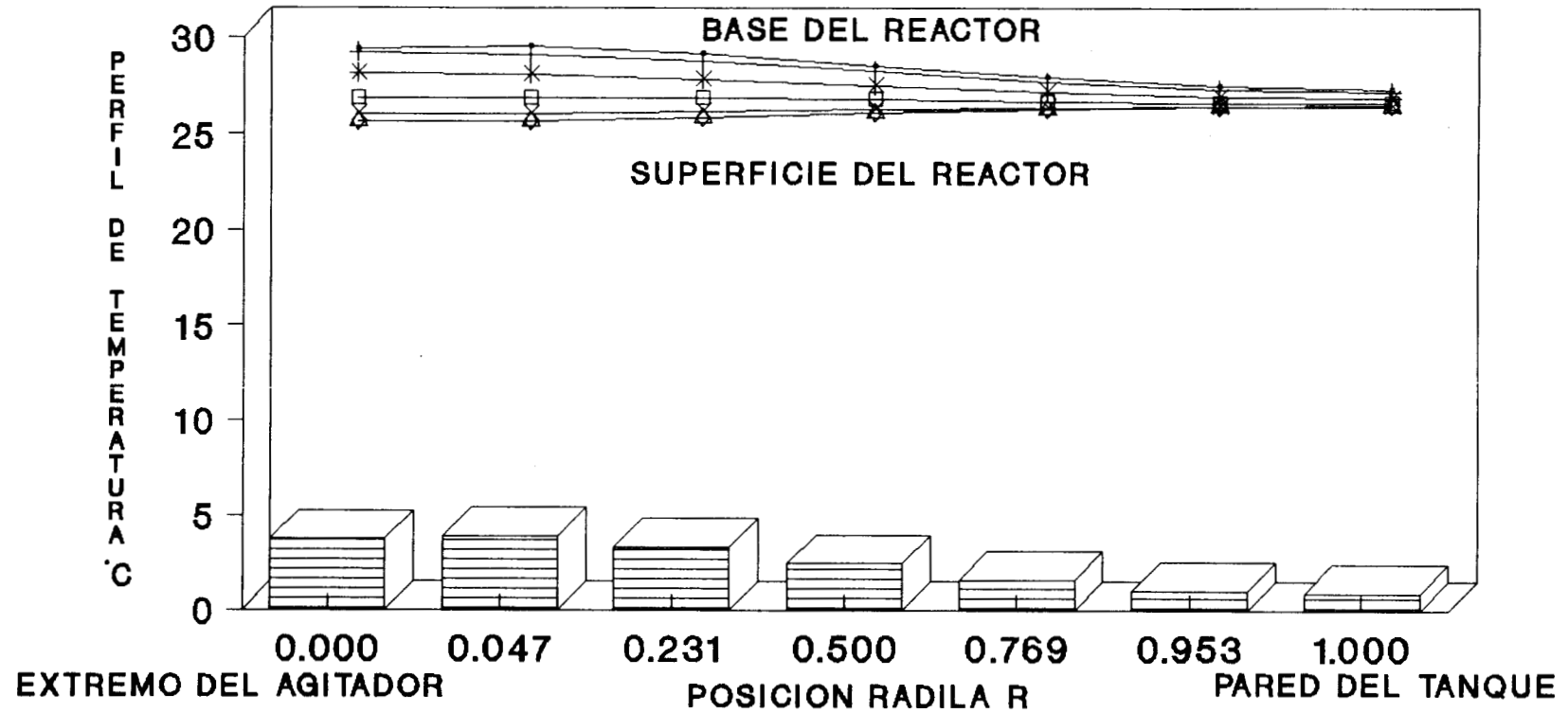
SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO PBD 1,4/CICLOHEXANO 11.5 %  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



PBD, N=60 rpm, E.E. • 25 C.

GRAFICA No. 4.51

SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO PBD 1,4/CICLOHEXANO 11.5%  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL

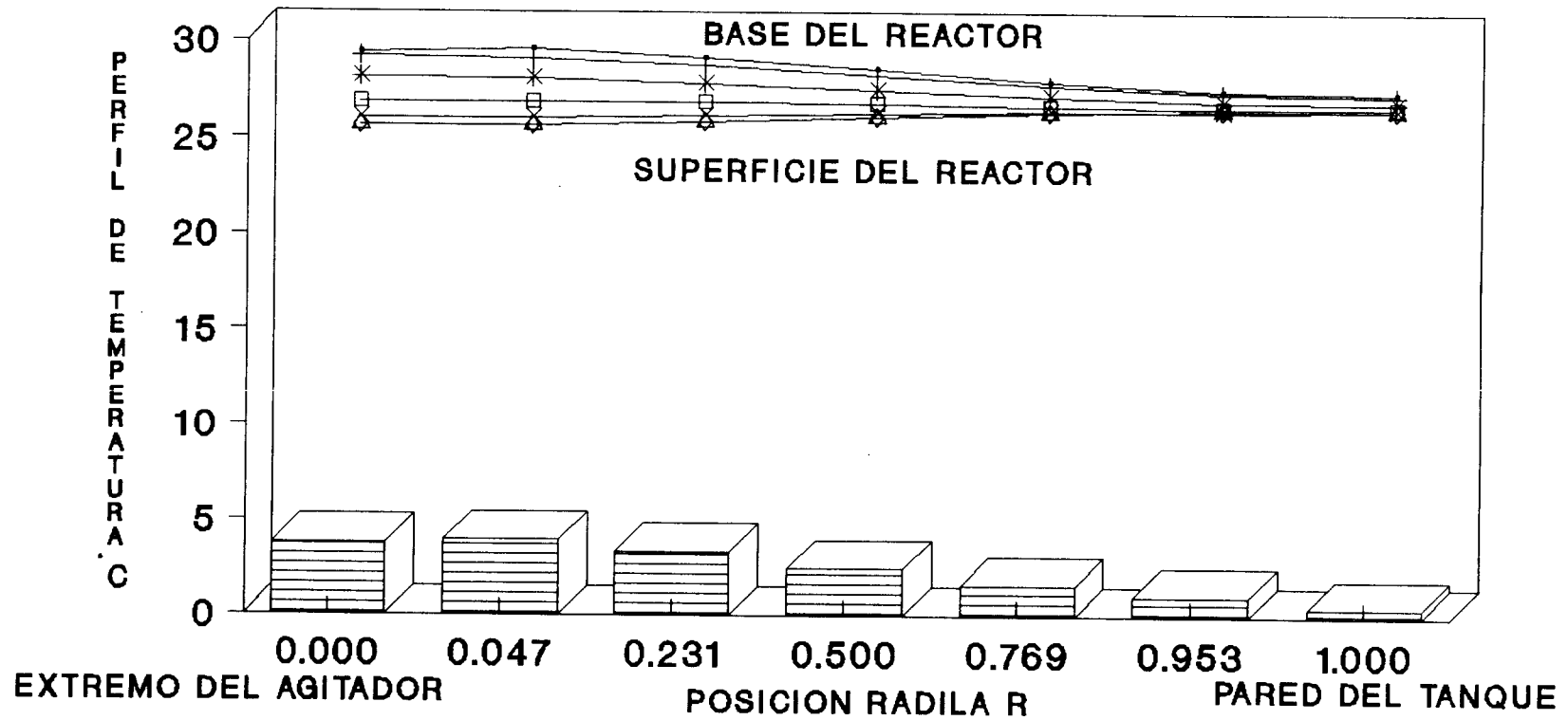


|            |            |            |             |
|------------|------------|------------|-------------|
| —•— 0.0000 | —+— 0.0469 | —*— 0.2308 | —□— 0.5000  |
| —×— 0.7692 | —◇— 0.9531 | —△— 1.0000 | ▨ Dif.Temp. |

PBD, N=70 rpm, E.E. • 25 C.

GRAFICA No. 4.52

SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO PBD 1,4/CICLOHEXANO 11.5%  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL

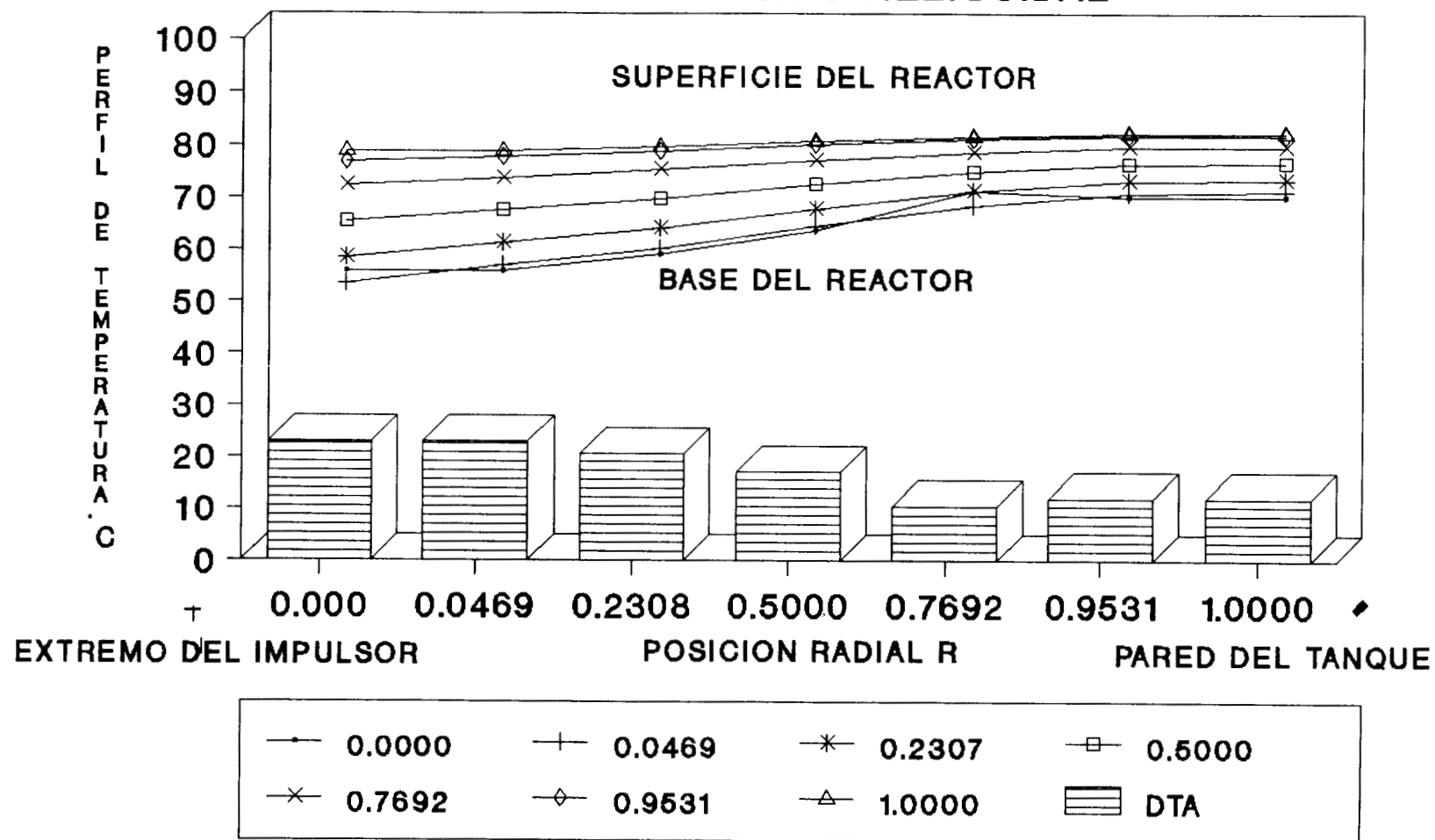


|            |            |            |             |
|------------|------------|------------|-------------|
| —•— 0.0000 | —+— 0.0469 | —*— 0.2308 | —□— 0.5000  |
| —x— 0.7692 | —◇— 0.9531 | —△— 1.0000 | ▨ Dif.Temp. |

PBD, N=80 rpm, E.E. @ 25 C.

# GRAFICA No. 4.53

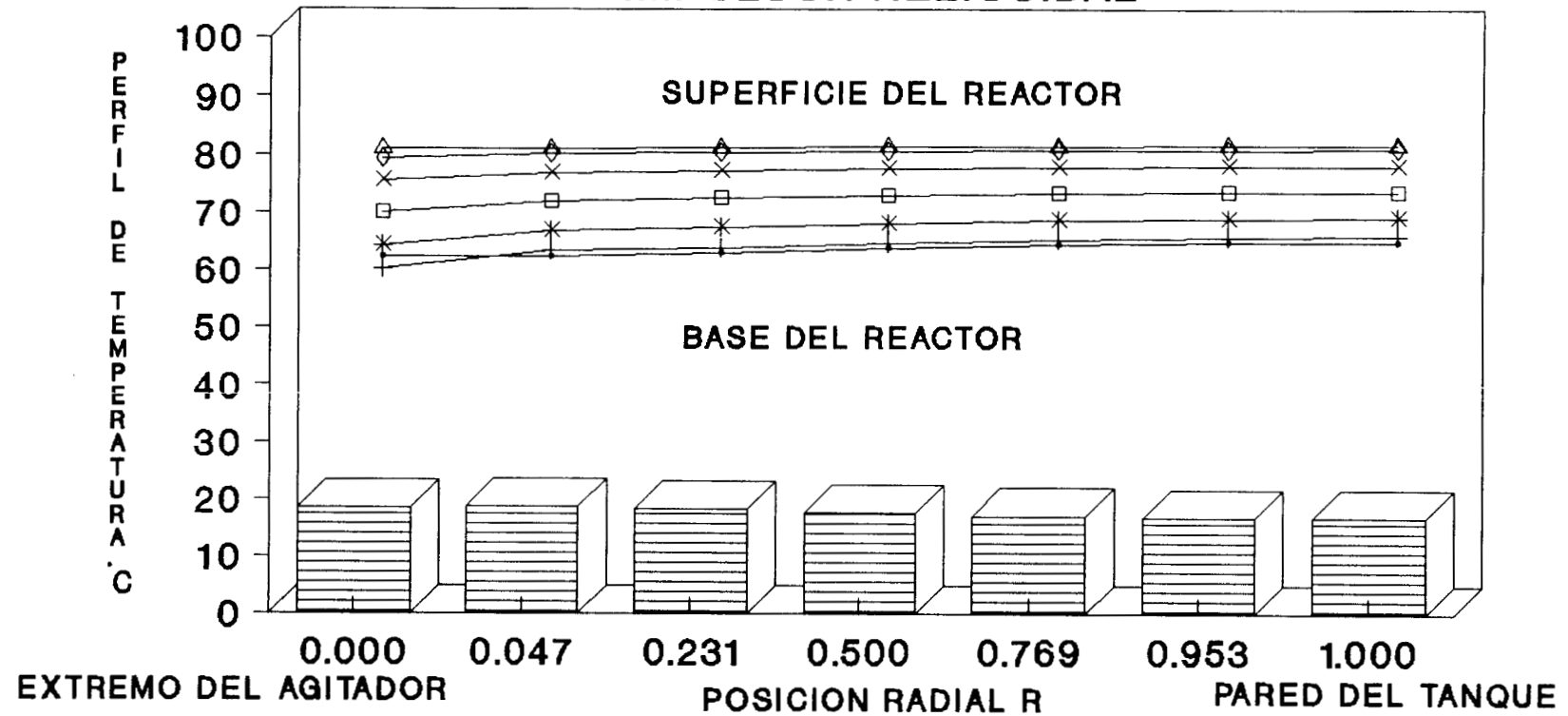
## SIMULACION NUMERICA FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO 14.5 % IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



PBD • 14.5 % N=30 rpm, E.E. • 75

# GRAFICA No. 4.54

SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @ 14.5 %  
IMPULSOR HELICOIDAL

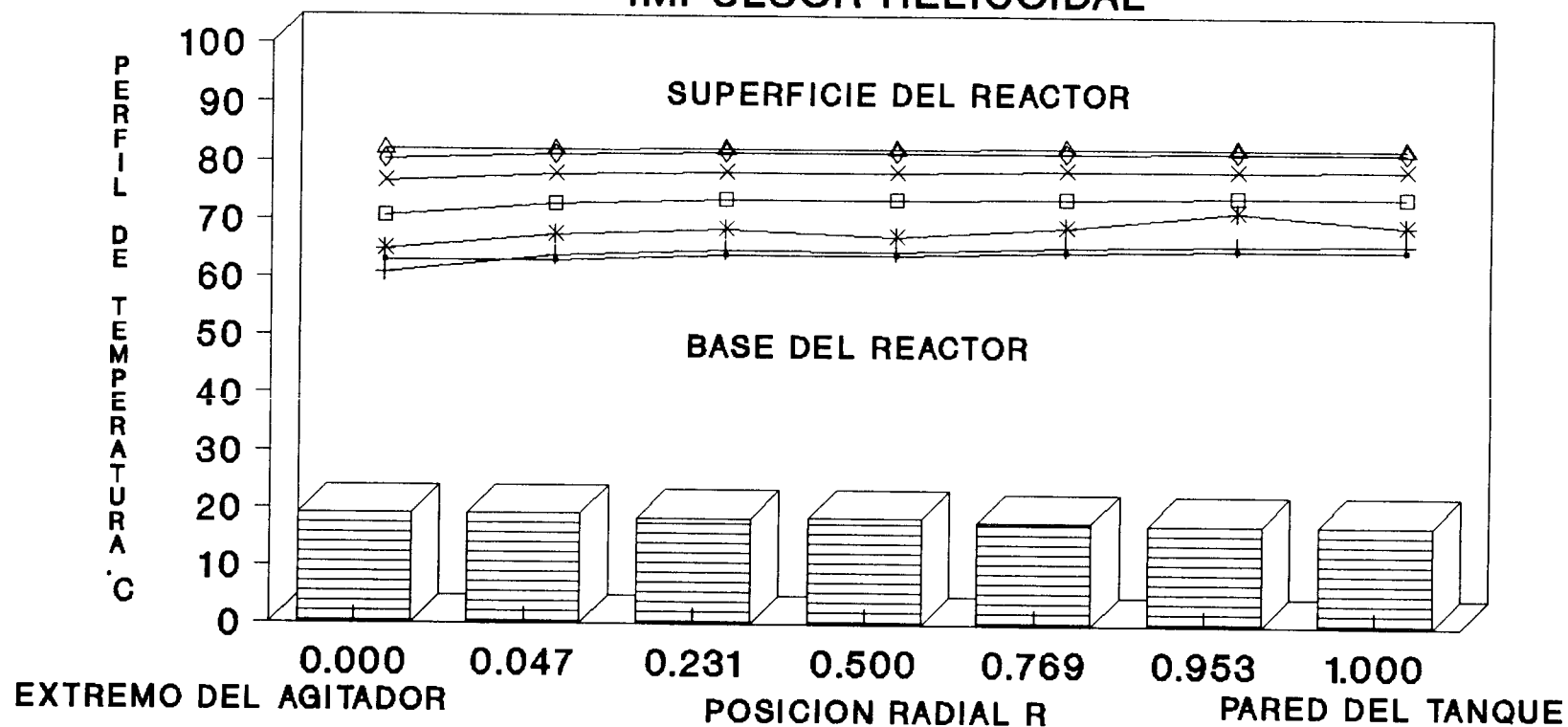


|            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|
| —●— 0.0000 | —+— 0.0469 | —*— 0.2308 | —□— 0.5000 |
| —x— 0.7692 | —◇— 0.9531 | —△— 1.0000 |            |

PBD 1,4 @ 14.5 %, N=60 rpm, E.E. @ 75 C.

# GRAFICA No. 4.55

SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @ 14.5 %  
IMPULSOR HELICOIDAL

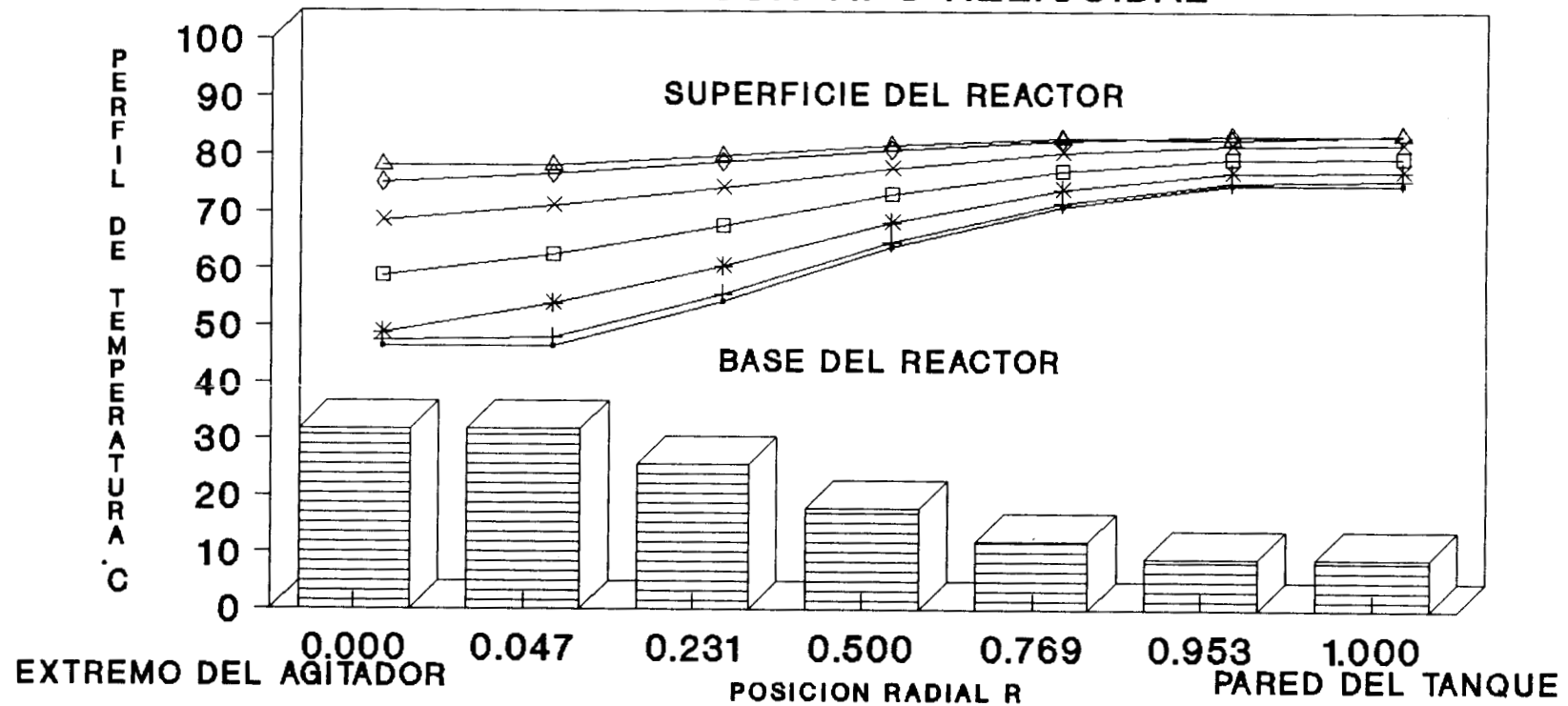


|            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|
| —•— 0.0000 | —+— 0.0469 | —*— 0.2308 | —□— 0.5000 |
| —x— 0.7692 | —◇— 0.9531 | —△— 1.0000 |            |

PBD 1,4 @ 14.5 %, N=70 rpm, E.E. @ 70 C.

# GRAFICA No. 4.56

SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @ 14.5 %  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL

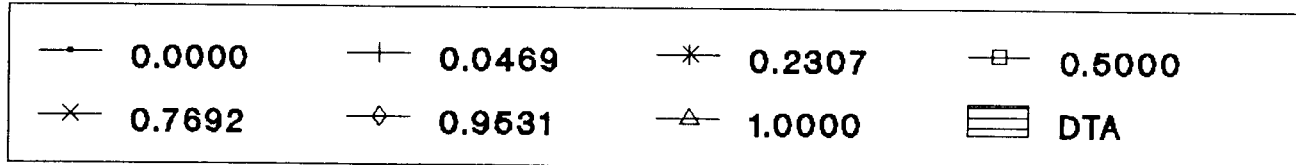
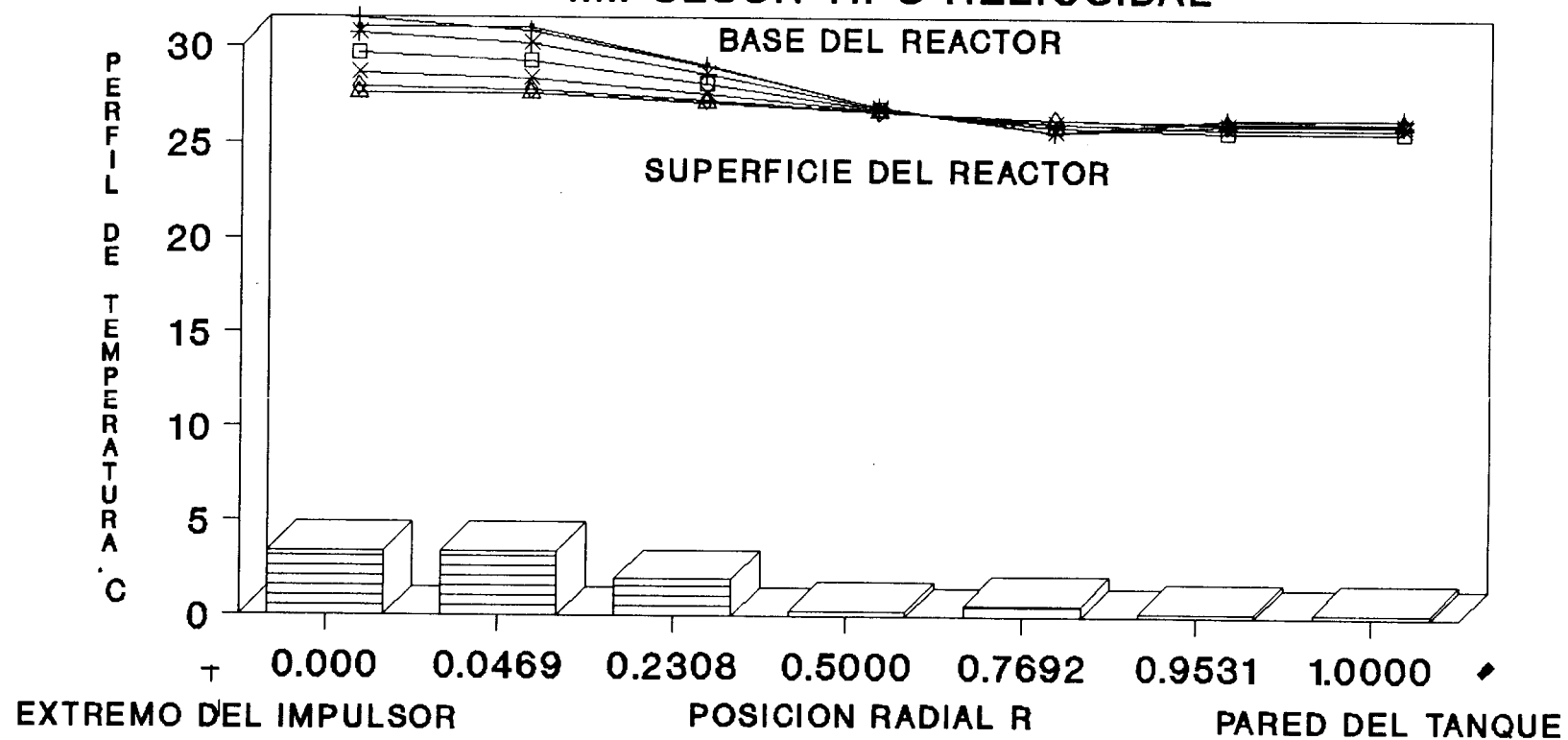


|            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|
| —•— 0.0000 | —+— 0.0469 | —*— 0.2308 | —□— 0.5000 |
| —x— 0.7692 | —◇— 0.9531 | —△— 1.0000 | DT         |

PBD114 @14.5%, N=80 rpm, E.E. @ 75 C.

GRAFICA No. 4.57

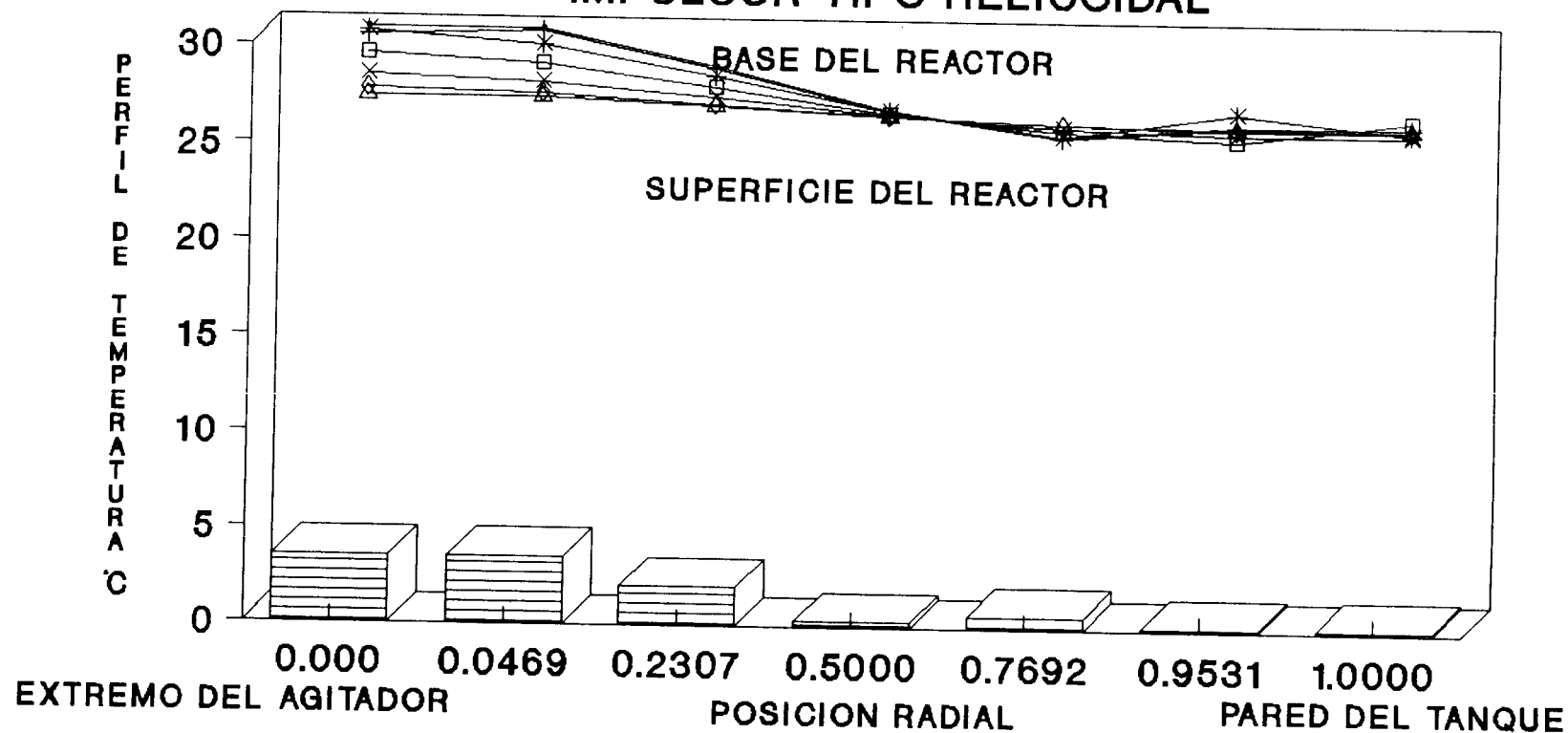
SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @ 14.5 %  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



PBD @ 14.5 % N=30 rpm, E.E. @ 25

# GRAFICA No. 4.58

SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @ 14.5 %  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL

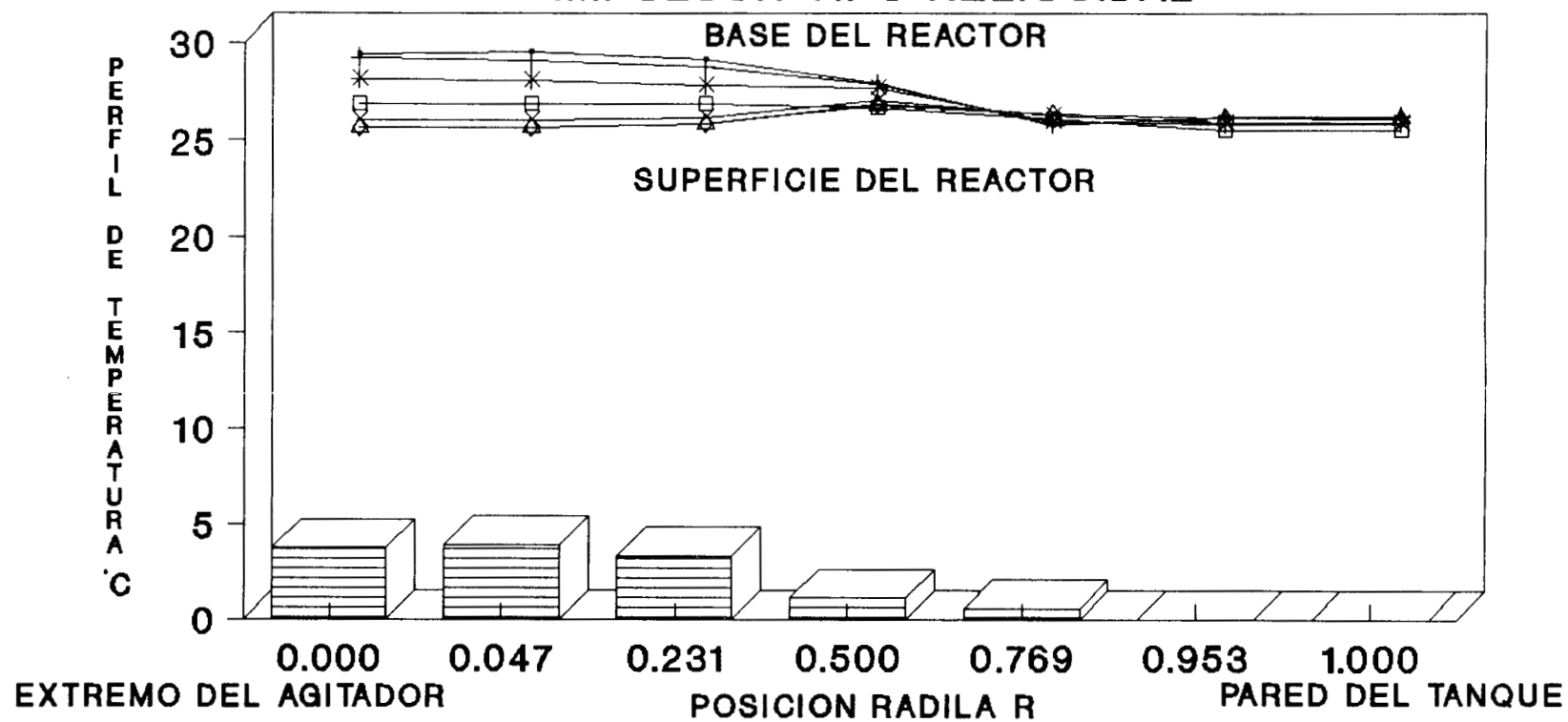


|            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|
| —•— 0.0000 | —+— 0.0469 | —*— 0.2307 | —□— 0.5000 |
| —x— 0.7692 | —◇— 0.9531 | —△— 1.0000 |            |

PBD 1,4 @ 14.5 %, N=60 rpm, E.E. @ 25 C.

GRAFICA No. 4.59

SIMULACION NUMERICA  
FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @ 14.5 %  
IMPULSOR TIPO HELICOIDAL

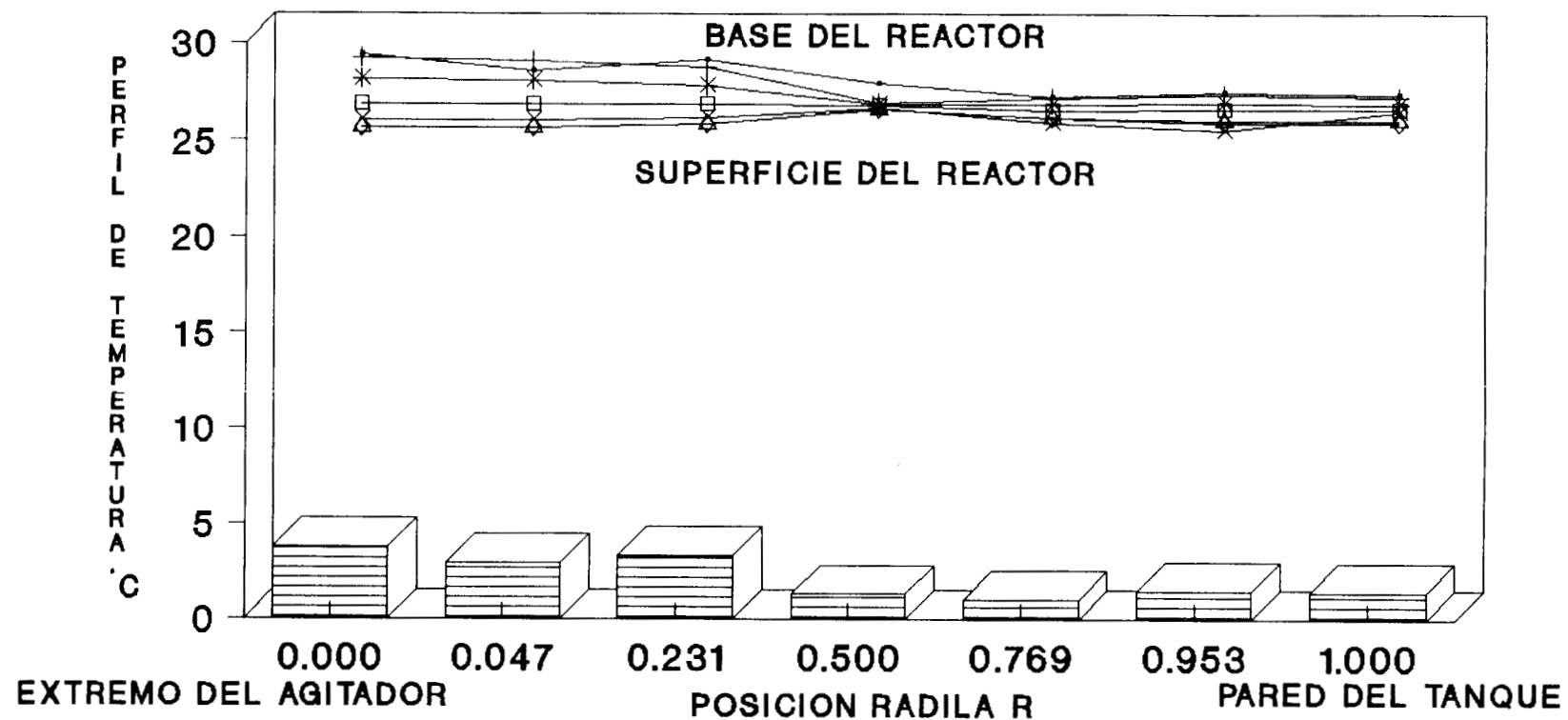


|            |            |            |             |
|------------|------------|------------|-------------|
| —•— 0.0000 | —+— 0.0469 | —*— 0.2308 | —□— 0.5000  |
| —x— 0.7692 | —◇— 0.9531 | —△— 1.0000 | ▨ Dif.Temp. |

PBD, N=70 rpm, E.E. @ 25 C.

# GRAFICA No. 4.60

## SIMULACION NUMERICA FLUIDO POLIBUTADIENO 1,4/CICLOHEXANO @ 14.5 % IMPULSOR TIPO HELICOIDAL



|            |            |            |             |
|------------|------------|------------|-------------|
| —•— 0.0000 | —+— 0.0469 | —*— 0.2308 | —□— 0.5000  |
| —x— 0.7692 | —◇— 0.9531 | —△— 1.0000 | ▨ Dif.Temp. |

PBD, N=80 rpm, E.E. @ 25 C.

**4.8.-ANALISIS DE RESULTADOS NUMERICOS EN FLUIDOS NO NEWTONIANOS.**

En los resultados de la simulación numérica se observa lo siguiente:

- 1) El modelo más complejo ( $V\theta$ ,  $Vz$  y  $T$ ) presentado en este trabajo presentó variaciones poco significativas con respecto a los resultados del modelo con perfiles de velocidad angular alrededor del 5 % . En base a lo cual esté tipo de modelos son sencillos de aplicar considerando unicamente la velocidad angular ( $V\theta$  y  $T$ ) y es capaz de representar el mezclado en dirección bidimensional con una aceptable aproximación.
- 2) Las Gráficas 4.45 a 4.48 muestran que los gradientes axiales de temperatura no presentan efectos muy significativos en concordancia con los datos experimentales durante el proceso simulado en estado estable a 80°C con un agitador tipo helicoidal en un PBD 1,4 al 11.5% a diferentes velocidades de agitación de 30 rpm a 80 rpm, respectivamente. Se observa el efecto que tiene de la velocidad de agitación con los gradientes de temperatura, ya que a medida que se incrementa la velocidad de agitación del fluido los perfiles de temperatura tienden a ser más homogéneos, ya que la viscosidad disminuye debido a que la velocidad de deformación no es constante y por consiguiente el transporte de calor convectivo aumenta y los perfiles de temperatura son más uniformes.
- 3) Las Gráficas 4.49 a 4.52 muestran los gradientes axiales de temperatura son muy apreciables en la base del tanque con respecto a los gradientes de temperatura presentes en la superficie en el proceso simulado en estado estable a 25°C con un agitador tipo helicoidal en un fluido de PBD 1,4 al 11.5% a diferentes velocidades de agitación de 30 rpm a 80 rpm. Se observa que a medida que la viscosidad disminuye la velocidad

de deformación no es constante y por consiguiente el transporte de calor convectivo aumenta y los perfiles de temperatura son más uniformes.

- 4) Las Gráficas 4.45 y 4.49 muestran los gradientes axiales de temperatura simulados durante el proceso en estado estable en PBD al 11.5% a diferentes temperaturas 80°C y 25°C respectivamente y una velocidad de agitación de 30 rpm.

Se aprecia en las Gráficas 4.45 y 4.49 el efecto que tienen de los gradientes de temperatura debido a la viscosidad de fluido, la cual es función de la velocidad de agitación del fluido.

- 5) En las Gráficas 4.48 y 4.52 muestran los gradientes axiales de temperatura simulados durante el proceso en estado estable a diferentes temperaturas 80°C y 25°C respectivamente y una velocidad de agitación de 80 rpm. Se observa el efecto que tiene de los gradientes de temperatura debidos a los cambios de viscosidad del fluido polimérico, ya que ésta es fuerte función de la temperatura.

- 6) Las Gráficas 4.53 a 4.56 muestran que los gradientes axiales de temperatura no presentan efectos muy apreciables en concordancia con los datos experimentales durante el proceso simulado en estado estable a 80°C con un agitador tipo helicoidal en un PBD 1,4 al 14.5% a diferentes velocidades de agitación de 30 rpm a 80 rpm, respectivamente. Se observa el efecto que tiene de la velocidad de agitación con los gradientes de temperatura, ya que a medida que se incrementa la velocidad de agitación del fluido los perfiles de temperatura tienden a ser más homogéneos, debidos al

---

transporte convectivo principalmente.

- 7) Las Gráficas 4.57 a 4.60 muestran los gradientes axiales de temperatura son muy apreciables en la base del tanque con respecto a los gradientes de temperatura presentes en la superficie en el proceso simulado en estado estable a 25°C con un agitador tipo helicoidal en un fluido de PBD 1,4 al 14.5% a diferentes velocidades de agitación de 30 rpm a 80 rpm.
- 8) Las Gráficas 4.53 y 4.57 muestran los gradientes axiales de temperatura simulados durante el proceso en estado estable en PBD al 14.5% a diferentes temperaturas 80°C y 25°C respectivamente y una velocidad de agitación de 30 rpm.

Se observa en las Gráficas 4.53 y 4.57 el efecto que tienen de los gradientes de temperatura debido a los cambios en la viscosidad del fluido.
- 9) En las Gráficas 4.56 y 4.60 muestran los gradientes axiales de temperatura simulados durante el proceso en estado estable a diferentes temperaturas 80°C y 25°C respectivamente y una velocidad de agitación de 80 rpm. Se observa el efecto que tiene de los gradientes de temperatura debidos a los cambios de viscosidad del fluido polimérico, ya que a medida que disminuye la temperatura la viscosidad del polímero se incrementa, por lo que los perfiles de temperatura a la misma velocidad de agitación nos son completamente homogéneos. Ver Tabla 4.4.
- 10) En las Gráficas 4.45 a 4.60 es posible seguir la evolución de los principales factores que describen el comportamiento del proceso de mezclado de polímeros, ya que éstos están íntimamente relacionados con las propiedades mecánicas del polímero y por lo tanto en la calidad del producto.

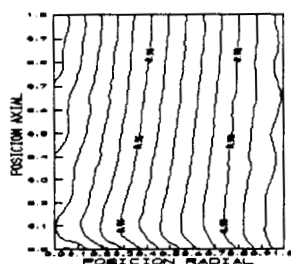
**TABLA 4.3.-LOS GRADIENTES DE TEMPERATURA ESTIMADOS CON DIFERENTES FLUIDOS NO NEWTONIANOS A 75 °C Y 25 °C A UNA POSICION AXIAL CON AGITADOR HELICOIDAL.**

| FLUIDO                                      | TEMPERATURA DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA (°C) | RPM | T exp. (A la mitad de la base al nivel del el tanque) | T num. (A la mitad de la base al nivel del tanque) | ΔT max |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------|
| POLIBUTADIENO 1,4 EN CICLOHEXANO AL 11.5 %. | 75                                                     | 30  | 68                                                    | 75                                                 | 7      |
|                                             | 25                                                     | 30  | 25                                                    | 27                                                 | 2      |
|                                             | 75                                                     | 60  | 71                                                    | 68                                                 | 3      |
|                                             | 25                                                     | 60  | 25                                                    | 27                                                 | 2      |
|                                             | 75                                                     | 70  | 60                                                    | 61                                                 | 1      |
|                                             | 25                                                     | 70  | 25                                                    | 27                                                 | 2      |
|                                             | 75                                                     | 80  | 64                                                    | 60                                                 | 4      |
|                                             | 25                                                     | 80  | 25                                                    | 27                                                 | 2      |
| POLIBUTADIENO 1,4 EN CICLOHEXANO AL 14.5 %. | 75                                                     | 30  | 72                                                    | 69                                                 | 3      |
|                                             | 25                                                     | 30  | 25                                                    | 27                                                 | 2      |
|                                             | 75                                                     | 60  | 75                                                    | 70                                                 | 5      |
|                                             | 25                                                     | 60  | 25                                                    | 27                                                 | 2      |
|                                             | 75                                                     | 70  | 75                                                    | 72                                                 | 3      |
|                                             | 25                                                     | 70  | 25                                                    | 27                                                 | 2      |
|                                             | 75                                                     | 80  | 71                                                    | 69                                                 | 2      |
|                                             | 25                                                     | 80  | 25                                                    | 27                                                 | 2      |

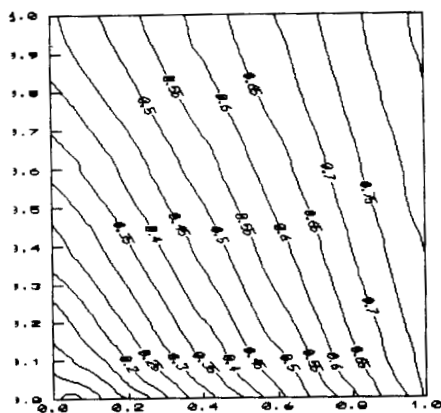
#### 4.9.-RESULTADOS DE LOS MODELOS EN FORMA DE LINEAS DE CORRIENTE PARA LOS PERFILES DE TEMPERATURA.

Los resultados del modelo de mezclado con perfiles de velocidad angular en dirección radial y axial se muestran en las Gráficas 4.61 a 4.72 a diferentes condiciones.

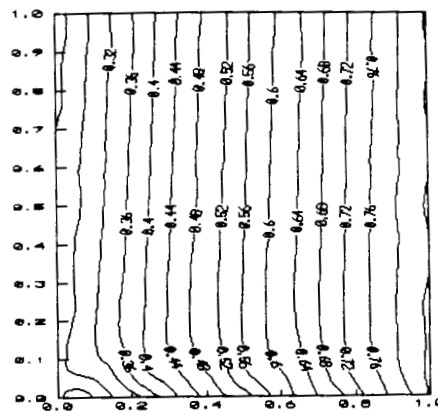
GRAFICA 4.61.-PERFILES DE TEMPERATURA CON GLICEROL A 60 RPM Y 80 C.



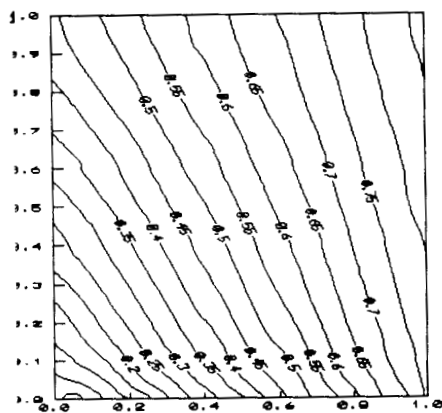
GRAFICA 4.65.-PERFILES DE TEMPERATURA CON PBD AL 11.5% A 30 RPM Y 80 °C.



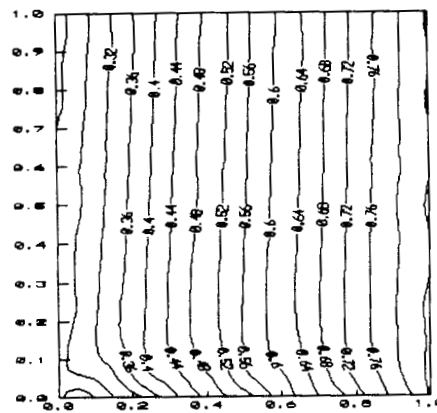
GRAFICA 4.66.PERFILES DE TEMPERATURA CON PBD A 11.5% A 80 RPM Y 80 °C.



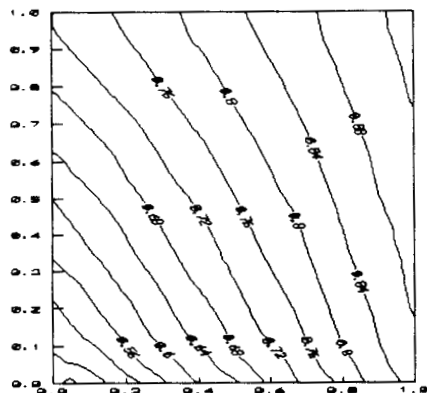
GRAFICA 4.67.-PERFILES DE TEMPERATURA CON PBD AL 11.5% A 30 RPM Y 25 °C.



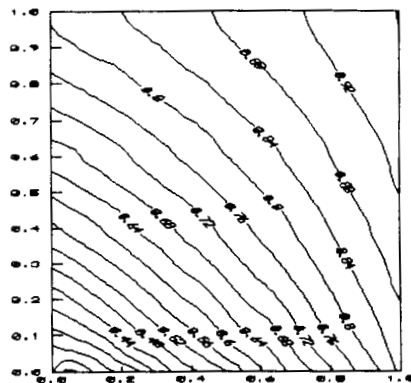
GRAFICA 4.68.PERFILES DE TEMPERATURA CON PBD A 11.5% A 80 RPM Y 25 °C.



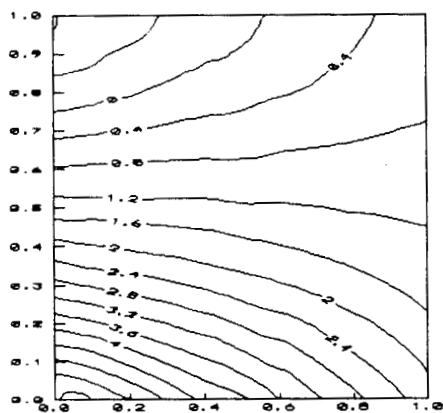
GRAFICA 4.69.-PERFILES DE  
TEMPERATURA CON PBD AL 14.5%  
A 30 RPM Y 80 °C.



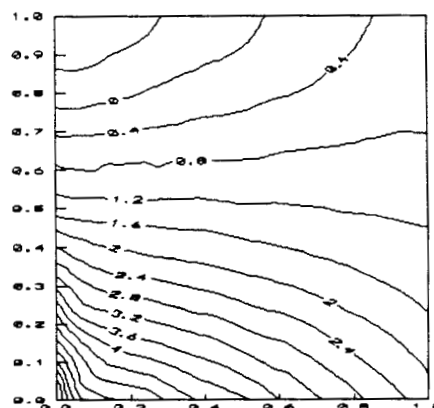
GRAFICA 4.70.PERFILES DE  
TEMPERATURA CON PBD A 14.5%  
A 80 RPM Y 80 °C.



GRAFICA 4.71.-PERFILES DE  
TEMPERATURA CON PBD AL 14.5%  
A 30 RPM Y 25 °C.



GRAFICA 4.72.PERFILES DE  
TEMPERATURA CON PBD A 14.5%  
A 80 RPM Y 25 °C.



#### 4.10.-ANALISIS DE RESULTADOS EN FORMA DE LINEAS DE CORRIENTE PARA LOS PERFILES DE TEMPERATURA.

En las Gráficas 4.61.a 4.72 se observan aspectos importantes, tales como la influencia de la velocidad de agitación con la temperatura, la influencia de la temperatura a una misma velocidad de agitación en fluidos Newtonianos y en no Newtonianos.

En los resultados de la simulación numérica se observa lo siguiente:

- 1) Las Gráficas 4.61 y 4.62 muestran que a una misma posición axial los gradientes de temperatura presentan efectos muy significativos acorde con los datos experimentales durante el proceso modelado en estado estable a 80°C con un agitador tipo helicoidal y con fluido glicerol a diferentes velocidades de agitación de 60 rpm y 80 rpm, respectivamente. Se muestra que a medida que se incrementa la velocidad de agitación la contribución radial empieza ser apreciable.
- 2) Las Gráficas 4.63 y 4.64 muestran los gradientes axiales de temperatura son muy significativos no presentandose ésto con los gradientes de temperatura radial, debido a que la viscosidad del fluido aumenta y por consiguiente la remoción de transferencia de calor del sistema aumenta, durante el cual se presenta un mejor mezclado. Además se observa que en la base del tanque los gradientes de temperatura son mayores que en la superficie debido a las variaciones existentes de los patrones de flujo. El proceso simulado esta en estado estable a 25 oC con agitador tipo helicoidal en un fluido de glicerol a diferentes velocidades de agitación de 60 rpm a 80 rpm.
- 3) Las Gráficas 4.61 y 4.64 muestran que los gradientes axiales de temperatura durante el proceso en estado estable en glicerol a diferentes temperaturas 80°C y 25°C respectivamente,

y a una velocidad de agitación de 60 rpm son más significativos durante el proceso de enfriamiento, debido a que el transporte convectivo de calor tiende a aumentar.

- 4) Se aprecia en las Gráficas 4.62 y 4.64 el efecto que tienen de los gradientes de temperatura debido a la viscosidad de fluido, ya que esta es función tanto de la velocidad de agitación como de la temperatura.
- 5) En las Gráficas 4.65 y 4.66 muestran los gradientes axiales de temperatura son poco apreciables, no así los gradientes de temperatura radial durante el proceso en estado estable a diferentes temperaturas 80°C y una velocidad de agitación de 30 y 80 rpm, respectivamente. Se observa el efecto que tiene de los gradientes de temperatura debidos a los cambios de viscosidad del fluido polimérico, ya que ésta es función de la velocidad de agitación y el mecanismo que predomina es la transferencia de calor convectivo.
- 6) Las Gráficas 4.67 y 4.68 muestran que los gradientes axiales de temperatura presentan efectos muy significativos en concordancia con los datos experimentales durante el proceso simulado en estado estable a 25°C con un agitador tipo helicoidal en un PBD 1,4 al 11.5% a diferentes velocidades de agitación de 30 rpm a 80 rpm, respectivamente. Se observa el efecto que tiene de la velocidad de agitación con los gradientes de temperatura, ya que a medida que se incrementa la velocidad de agitación del fluido los perfiles de temperatura tienden a ser más homogéneos.
- 7) Las Gráficas 4.65 y 4.67 muestran los gradientes axiales de temperatura son muy apreciables en la base del tanque con

respecto a los gradientes de temperatura presentes en la superficie en el proceso simulado en estado estable a 80 °C y 25 °C con un agitador tipo helicoidal en un fluido de PBD 1,4 al 11.5% a una velocidad de agitación de 30 rpm.

- 8) Las Gráficas 4.66 y 4.68 muestran los gradientes axiales de temperatura simulados durante el proceso en estado estable en PBD al 11.5% a diferentes temperaturas 80°C y 25°C respectivamente, y una velocidad de agitación de 80 rpm.

Se observa en las Gráficas 4.66 y 4.68 el efecto que tienen de los gradientes de temperatura debido a los cambios en la viscosidad del fluido, donde el mecanismo de transferencia de calor es el transporte convectivo principalmente.

- 9) En las Gráficas 4.69 y 4.76 muestran los gradientes axiales de temperatura son poco apreciables, no así los gradientes de temperatura radial durante el proceso en estado estable a diferentes temperaturas 80°C y una velocidad de agitación de 30 y 80 rpm, respectivamente. Se observa el efecto que tiene de los gradientes de temperatura debidos a los cambios de viscosidad del fluido polimérico, ya que ésta es función de la velocidad de agitación y el mecanismo que predomina en la transferencia de calor es el convectivo.

- 10) Las Gráficas 4.71 y 4.72 muestran que los gradientes axiales de temperatura presentan efectos muy significativos en concordancia con los datos experimentales durante el proceso simulado en estado estable a 25°C con un agitador tipo helicoidal en un PBD 1,4 al 11.5% a diferentes velocidades de agitación de 30 rpm a 80 rpm, respectivamente. Se observa el efecto que tiene de la velocidad de agitación con los

gradientes de temperatura, ya que a medida que se incrementa la velocidad de agitación del fluido los perfiles de temperatura tienden a ser más homogéneos.

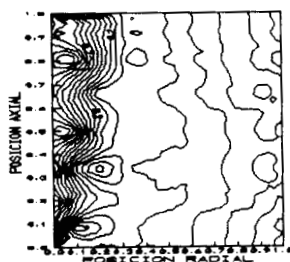
- 11) Las Gráficas 4.69 y 4.71 muestran los gradientes axiales de temperatura son muy apreciables en la base del tanque con respecto a los gradientes de temperatura presentes en la superficie en el proceso simulado en estado estable a 80 °C y 25 °C con un agitador tipo helicoidal en un fluido de PBD 1,4 al 14.5% a una velocidad de agitación de 30 rpm.
- 12) Las Gráficas 4.70 y 4.72 muestran los gradientes axiales de temperatura simulados durante el proceso en estado estable en PBD al 14.5% a diferentes temperaturas 80°C y 25°C respectivamente, y una velocidad de agitación de 80 rpm.

Se observa en las Gráficas 4.70 y 4.72 el efecto que tienen de los gradientes de temperatura debido a los cambios en la viscosidad del fluido, donde el mecanismo de transferencia de calor es el transporte convectivo principalmente a temperaturas elevadas.

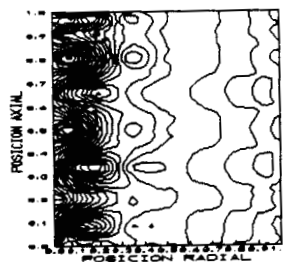
#### 4.11.-RESULTADOS DE LOS MODELOS EN FORMA DE LINEAS DE CORRIENTE PARA LOS PATRONES DE FLUJO.

Los resultados del modelo de mezclado con perfiles de velocidad angular en dirección radial y axial se muestran en las Gráficas 4.73 a 4.92 a diferentes condiciones.

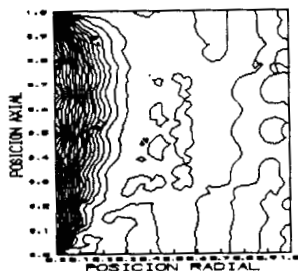
GRAFICA 4.73.-PATRONES DE  
FLUJO CON GLICEROL  
A 60 RPM Y 80 C.



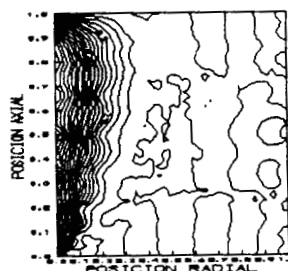
GRAFICA 4.74.PATRONES DE  
FLUJO CON GLICEROL  
A 80 RPM Y 80 C.



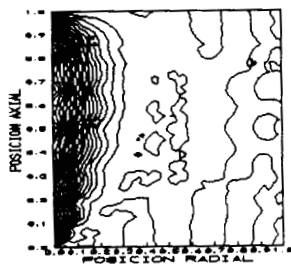
GRAFICA 4.75.-PATRONES DE  
FLUJO CON GLICEROL  
A 60 RPM Y 25 C.



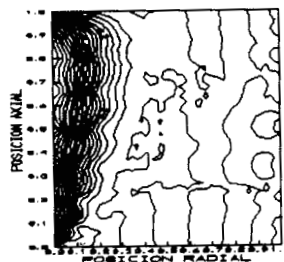
GRAFICA 4.76.PATRONES DE  
FLUJO CON GLICEROL  
A 80 RPM Y 25 C.



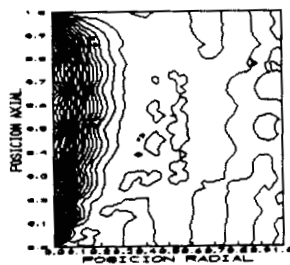
GRAFICA 4.77.-PATRONES DE  
FLUJO CON PBD AL 11.5%  
A 30 RPM Y 80 C.



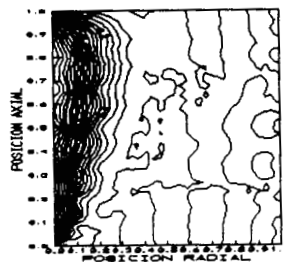
GRAFICA 4.78.PATRONES DE  
FLUJO CON PBD AL 11.5%  
A 60 RPM Y 80 C.



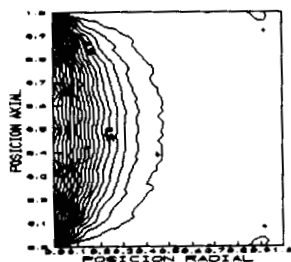
GRAFICA 4.79.-PATRONES DE  
FLUJO CON PBD AL 11.5%  
A 70 RPM Y 80 C.



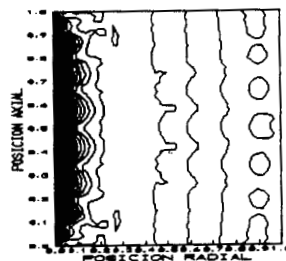
GRAFICA 4.80.PATRONES DE  
FLUJO CON PBD AL 11.5%  
A 80 RPM Y 80 C



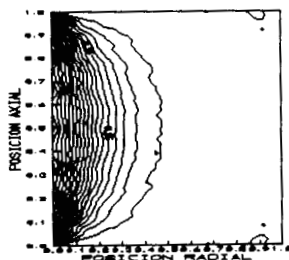
GRAFICA 4.81.-PATRONES DE  
FLUJO CON PBD AL 11.5%  
A 30 RPM Y 25 C.



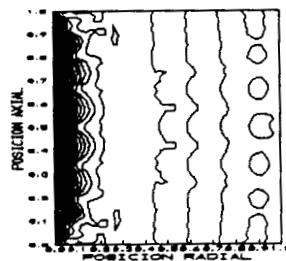
GRAFICA 4.82.PATRONES DE  
FLUJO CON PBD AL 11.5%  
A 60 RPM Y 25 C.



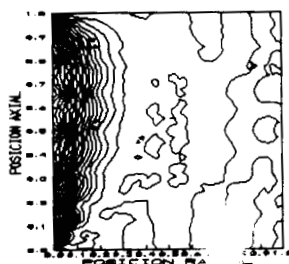
GRAFICA 4.83.-PATRONES DE  
FLUJO CON PBD AL 11.5%  
A 70 RPM Y 25 C.



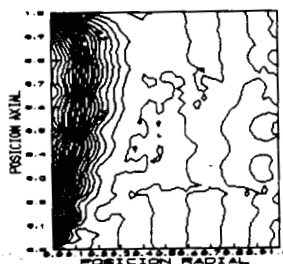
GRAFICA 4.84.PATRONES DE  
FLUJO CON PBD AL 11.5%  
A 80 RPM Y 25 C.



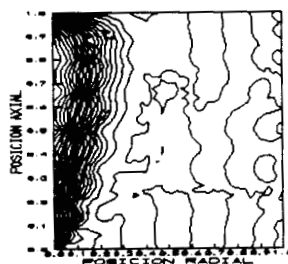
GRAFICA 4.85.-PATRONES DE  
FLUJO CON PBD AL 14.5%  
A 30 RPM Y 80 C.



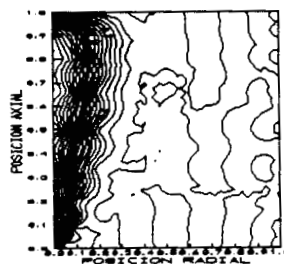
GRAFICA 4.86.PATRONES DE  
FLUJO CON PBD AL 14.5%  
A 60 RPM Y 80 C.



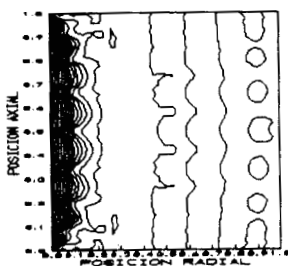
GRAFICA 4.87.-PATRONES DE  
FLUJO CON PBD AL 14.5%  
A 70 RPM Y 80 C.



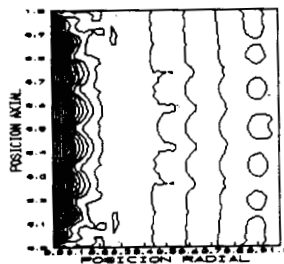
GRAFICA 4.88.PATRONES DE  
FLUJO CON PBD AL 14.5%  
A 80 RPM Y 80 C.



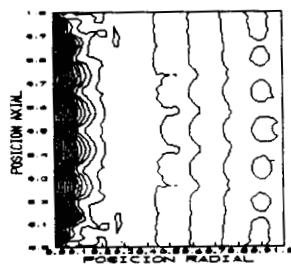
GRAFICA 4.89.-PATRONES DE  
FLUJO CON PBD AL 14.5%  
A 30 RPM Y 25 C.



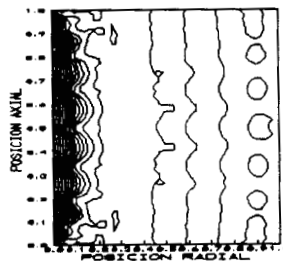
GRAFICA 4.90.PATRONES DE  
FLUJO CON PBD AL 14.5%  
A 60 RPM Y 25 C.



GRAFICA 4.91.-PATRONES DE  
FLUJO CON PBD AL 14.5%  
A 70 RPM Y 25 C.



GRAFICA 4.92.PATRONES DE  
FLUJO CON PBD AL 14.5%  
A 80 RPM Y 25 C.



---

**4.12.-ANALISIS DE RESULTADOS EN FORMA DE LINEAS DE CORRIENTE PARA LOS PATRONES DE FLUJO.**

En las Gráficas 4.73 a 4.92 se observan aspectos importantes en los patrones de flujo, que explican de alguna manera el grado de homogeneidad alcanzado en el proceso de mezclado a diferentes condiciones de operación; tales como la influencia de la velocidad de agitación con la temperatura, la influencia de la temperatura a una misma velocidad de agitación en fluidos Newtonianos y en no Newtonianos. En los resultados de la simulación numérica se observa lo siguiente:

- 1) Las Gráficas 4.73 y 4.74 muestran las líneas de corriente a diferentes velocidades de agitación 60 y 80 rpm, respectivamente, y a una temperatura de 80 °C. Se observa que los patrones de flujo son más homogéneos en las inmediaciones del agitador y por consiguiente a mayor velocidad de agitación los gradientes de temperatura son más homogéneos.
- 2) Las Gráficas 4.75 y 4.76 muestran las líneas de corriente a diferentes velocidades de agitación 60 y 80 rpm, respectivamente, y a una temperatura de 25 °C. Se observa que los patrones de flujo son más homogéneos en las inmediaciones del agitador y por consiguiente a mayor velocidad de agitación los gradientes de temperatura son más homogéneos, presentándose cambios importantes de los patrones de flujo cercanos a la pared del tanque.
- 3) Las Gráficas 4.73 y 4.75 así como 4.74 y 4.76 muestran que los patrones de flujo son más homogéneos temperaturas elevadas, debido a la viscosidad del fluido.
- 4) Se aprecia en las Gráficas 4.77 y 4.78, así como las Gráficas 4.85 y 4.86 el efecto de los patrones de flujo, donde no presenta variación muy significativa a pesar de que la

concentración del polímero es diferente, ésto debido a que los cambios de la viscosidad de fluido a temperaturas elevadas tiende a ser muy similares y los patrones de flujo son muy homogéneos.

- 5) En las Gráficas 4.79 y 4.80 así como en las Gráficas 4.87 y 4.88 muestran que las variaciones de los patrones de flujo son poco significativos, debido a que no se presentan cambios apreciables en la velocidad de agitación durante el proceso en estado estable a una temperatura de 80°C y una velocidad de agitación de 70 y 80 rpm, respectivamente, y como se aprecia a diferentes concentraciones de polímero los patrones de flujo son muy homogéneos en las inmediaciones del impulsor no así cercanos a la pared del tanque, ésto debido a que el mecanismo que predomina es el transporte convectivo de momento.
- 6) Se aprecia en las Gráficas 4.81 y 4.82 así como las Gráficas 4.89 y 4.90 el efecto de los patrones de flujo, donde no presenta variación muy significativa a pesar de que la concentración del polímero es diferente, ésto debido a que los cambios de la viscosidad de fluido con una disminución de la temperatura son apreciables y por consiguiente el transporte de momento disminuye.
- 7) En las Gráficas 4.83 y 4.84 así como en las Gráficas 4.91 y 4.92 muestran aspectos importantes en el proceso de mezclado, donde a diferente concentración de polímero los patrones de flujo son muy similares a las mismas condiciones de operación, debido a que no se presentan cambios apreciables en la velocidad de agitación 70 y 80 rpm y una misma temperatura de 25 °C durante el proceso en estado estable, los patrones de flujo son homogéneos en las inmediaciones del impulsor.

---

## **V.-CONCLUSIONES**

---

**V.-CONCLUSIONES.**

Considerando los resultados obtenidos y conforme a los objetivos trazados en el desarrollo de este proyecto de estudio de mezclado con transferencia de calor en un sistema, se infieren las conclusiones y recomendaciones siguientes:

- 1) Las correlaciones de macromezclado y transferencia de calor, así como el desarrollo de modelos validados experimentalmente permiten obtener una mayor información con respecto a los fenómenos de mezclado y transporte de calor en sistemas altamente exotérmicos y de gran interés en la industria química.
- 2) La información obtenida puede utilizarse en la operación de sistemas de esta naturaleza, ya que las correlaciones empleadas permiten predecir el grado de homogeneidad en el proceso de mezclado.  
Además, los modelos desarrollados predicen las diferencias de temperatura en el reactor con agitador helicoidal-tornillo en ausencia de reacción.
- 3) La contribución de esta investigación se basa en la simulación experimental de cambios de la viscosidad del fluido a lo largo de la operación, el efecto sobre el mezclado y el transporte de calor. Además, analizar el comportamiento que se presenta en sistemas con diferente geometría del impulsor.
- 4) El desarrollo y validación de modelos para la predicción del grado de mezclado y el transporte de calor (perfiles de temperatura y coeficientes de transporte de calor) en el sistema con impulsor helicoidal tipo tornillo, a través de los contornos resultantes, nos da una descripción del mezclado de fluidos poliméricos en tanques agitados y esta descripción es válida en sistemas de diferente escala.

- 
- 5) La distribución de temperaturas de un fluido en un tanque agitado, equipado con impulsor helicoidal, nos indican que la no uniformidad en temperatura puede ser despreciable en dirección radial como se supone en régimen laminar<sup>[23]</sup>, y que para este caso el modelo de los patrones de flujo representa un comportamiento adecuado para agitadores de proximidad en fluidos no Newtonianos y presenta buena concordancia con los resultados experimentales.
  - 6) En base al modelo la transferencia de calor en líquidos altamente viscosos en un sistema de tanque agitado, es atribuido al transporte convectivo ocasionado por la recirculación de patrones de flujo del fluido, el cual controla la distribución de temperaturas en el seno del líquido y el líquido que se mueve hacia la pared del tanque.
  - 7) El resultado de la simulación numérica para el modelo en dirección angular, muestra una buena aproximación de los datos experimentales. Además, la solución de la ecuaciones de momento y energía y sus condiciones de frontera toman en cuenta diferentes velocidades de agitación, despreciando la contribución de la disipación viscosa por considerarla poco significativa y se puede apreciar la manera como influye la viscosidad directamente en los patrones de mezclado y en los mecanismos de transferencia de calor.
  - 8) El uso de los parámetros de macromezclado en sistemas de tanque agitado permite definir el grado de homogeneidad alcanzado en el sistema con cada fluido en particular.

Además, los datos experimentales permitieron validar los modelos derivados de los balances de momento y energía, obteniendo resultados confiables, que puedan ser una base para su posterior implementación en sistemas de diferente escala.

La efectividad de las variables de mezclado, en el monitoreo del grado de homogeneidad alcanzado en el equipo experimental, sugiere la aplicación de dichas variables en procesos de mezclado con transferencia de calor. A fin de resolver problemas relacionados con la homogeneidad del producto.

Se recomienda emplear para el mezclado de fluidos pseudoplásticos(polímeros) agitadores de proximidad y predecir los perfiles de temperatura y los patrones de flujo con modelos más complejos en forma tridimensional partiendo de los reportados en este trabajo e incluyendo condiciones frontera desde la flecha del agitador.

Se recomienda además emplear para el mezclado de fluidos pseudoplásticos(polímeros) agitadores de proximidad, a fin de asegurar una eficiente homogeneización de las propiedades del producto final. Con la ventaja de que a pesar de el consumo de potencia es mayor que el de otros agitadores convencionales (p.ej. Turbinas Rushton, paletas), proporcionan tiempos de mezclado finitos, en ordenes de magnitud inferiores. Esto permite alcanzar niveles mas altos de homogeneización a un costo mucho mas bajo.

---

## REFERENCIAS

REFERENCIAS.

- 1.-Austin,G.T., "Manual de procesos químicos en la industria". McGraw Hill, México., Vol.3, Cap.36, (1988).
- 2.-Biesenberger, J. A., Capinpin R. and Yang J. C. Polymer Engineering and Science, Vol.16, pag.101, (1976).
- 3.-Bird,R.B.,Armstrong,R and Hassager,O., "Dynamics of Polymeric Liquids", Vol. 1,2, Ed. Wiley, (1977).
- 4.-Bird,R.B.,Stewart W.E.,y Linghtfoot.E.N., "Fenomenos de Transporte.", Ed.Reverté,(1982).
- 5.-Bogomolov et. al., "Química del petróleo y gas natural." Cap.7., Mir.Moscu., (1984).
- 6.-Bourne,J.R., Chemical Eng. Sci., Vol.35, pag.347, (1980).
- 7.-Brito,E., Leuliet,J.C., Choplin, L and Tanguy,P.A., "Mixing and Circulation Times in Rheologically Complex Fluids", International Chemical Eng. Symposium Series No. 121., (1990).
- 8.-Brito de la Fuente, Edmundo., "Thesis Doctoral", Ecole Polytechnique de Laval., (1992).
- 9.-Brito,E., Leuliet,J.C., Choplin, L and Tanguy,P.A., "Rheologically Complex Fluids", International Chemical Eng. Symposium Series No. 88., pag.28-32., (1992).
- 10.-Carreau,P.J., R.P.Chhabra, and J.Cheng., "Effect of Rheological Properties on Power Consumption With Helical Ribbon Agitators" Journal Chemical Eng. of Canadian., Vol.39, pag.1421, (1993).
- 11.-Chavan, V.V., and J.J.Ulbrecht, "Power Correlation for Close Clearance Helical Impellers in Non-Newtonian Fluids", Chemical Engineering Journal., Vol.10, pag.205, (1975).
- 12.-Deak, G., Havas, J., Sawinsky. International Chemical Engineering, Vol.25, pag.558, (1985).
- 13.-Finlayson,B.A., "Nonlinear Analysis in Chemical Engineering", McGraw-Hill Book Co. USA. (1980).
- 14.-Gaidos,R.E.,Darby,R and Wickern,G., Canadian Journal of Chemical Eng., Vol.66, (1988).
- 15.-Godfrey,J.C., Mixing in process industry, Butterworths ser. in Chemical Eng., pag.11, (1985).

## REFERENCIAS.

- 
- 16.-Hesie H.L., Journal of Polimer Science.,Vol. 3, pag.153, (1965).
  - 17.-Hiraoka,S., Yamada,I and Mizoguchi,K.,Journal of Chemical Eng. of Japan., Vol.11, pag.487 (1978).
  - 18.-Hiraoka,S.,Yamada,I.,Aragaki,T.,Nishiki,N., Sato,A and Takagi,T.Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol.21, pag.79, (1988).
  - 19.-Hiraoka,S.,Yamada,I and Mizoguchi,K.,Journal of Chemical Eng. of Japan., Vol.12, pag 58 (1979).
  - 20.-Hoogendoorn,C.J., and A.P.den Hartog, "Model Studies on Mixers in the Viscous Flow Region", Chemical Eng. Sci.,Vol.22, pag.1689, (1967).
  - 21.-Jiménez,I.H. "ELI-COL. Programa para resolver sistemas de EDP por doble colocación ortogonal",Tesis Doctoral(En desarrollo).Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. (1993).
  - 22.-Kay,W and Shengyao,Y., "Heat Transfer and Power Consumption in Non-Newtonian Fluids in Agitated Vessels", Chemical Eng. Science, Vol.1,pag.33 (1989).
  - 23.-Kaminoyama,M., Saito,F., Kamiwano,M., International Chemical Engineering,Vol.30,pag.720 (1990).
  - 24.-Kern D. Process Heat Transfer.,McGraw Hill,New York. Cap.5-18, (1950).
  - 25.-Kuriyama,M., Ohta,M., Yanagawa,K.,Arai,K and Saito,S. Journal of Chemical Eng. of Japan, Vol.14,pag.323 (1981).
  - 26.-Masiuk, S.,Lacki,H and Strek,F. Chemical Eng. Journal, Vol.14, pag.135 (1992).
  - 27.-Metzner, A.B., and R.E.Otto, "Agitation of Non-Newtonian Fluids," AIChE Journal.,Vol.3,pag.3,(1957).
  - 28.-Middleman,S., The Flow of High Polymers, Inter Sci. (1968).
  - 29.-Mizushina, T., Ito, R., Koda, S., Kabashima, A, Hiraoka, S.and Nakamura, J.Chem. Eng. Japan, Vol.10,pag.2 (1977).
  - 30.-Nagata S., Mixing Principles and Applications, International Chem. Eng. Japan.,Vol.5, pag.83, (1975).

## REFERENCIAS.

---

- 31.-Novak,V., and F.Rieger., Chemical Eng.Journal.,Vol,9; pag.63, (1975).
- 32.-Ottino,J,M., Chem. Eng. Science,Vol.35, pag.1377-1391, (1980).
- 33.-Rieger,F.,V.Novak, and Havelková,D., Chemical Eng. Journal, Vol.33, pag. 143 (1986).
- 34.-Ryan, D.F. and L.L.Van Dierendonck., Chemical Eng. Sci.,Vol.43, pag.1961, (1988).
- 35.-Shamlou,P.A and M.F.Edwards., "Power Consumption of the Ribbon Mixers in Viscous Newtonian and Non-Newtonian".Chem. Eng. Sci. Septiembre, Vol.41,pag.1957 (1984).
- 36.-Shamlou,P.A., and Edwards,M.F. Chemical Eng. Science, Vol.41, pag.1773 (1986).
- 37.-Shamlou P.A., and Edwards,M.F. Chemical Engineering Res Des, Vol.67,pag. 537 (1989).
- 38.-Stewart, W.E., Simulation and Estimation by Orthogonal Collocation, Chemical Eng. Education, pag. 204-210, (1984).
- 39.-Takahashi,K., Arai,K and Saito,S.Journal Chemical Eng. of Japan, Vol.13, pag.148 (1980).
- 40.-Takahashi,K., Arai,K., and Saito,S. Journal of Chemical Eng. Japan, Vol.15,pag.217 (1982).
- 41.-Tanguy,P.A., Lacroix,R., Bertrand,F., Choplin,L and Brito de la Fuente,E, "Mixing of Rheologically Complex Fluids with an Helical Ribbon Impeller",AIChE Journal, Vol.38, pag 939 (1992).
- 42.-Tatterson,G.B., "Fluid Mixing In Agitated Tanks",Mc.Graw Hill, New York, Cap.3-5, (1991).
- 43.-Van Krevelen D.W., Hoftyzer P.J. Properties of Polymers, Ed.Elsevier Scientific Publishing Company, (1976).
- 44.-Welty, J.R., Wicks,Ch.E., and Wilson,R.E., "Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa.", Ed. Limusa, (1982).
- 45.-William D. J., Polymer Science Engineering, Prentice Hall,NJ. (1971).

---

**SECCION DE APENDICES.**

---

---

## APENDICE I

### I.-FUNDAMENTOS DE LA POLIMERIZACION.

En la industria química, el sector de los polímeros se ha convertido en un área estratégica en el sistema productivo del país. Esto es debido a los grandes volúmenes de producción alcanzados y a la inmensa variedad de productos manufacturados (termoplásticos) que son de uso indispensable para satisfacer un elevado porcentaje de las necesidades de la sociedad.

#### I.1.-ANTECEDENTES.

A partir de 1930 diversas industrias comienzan a procesar y manufacturar materiales poliméricos, utilizando en un principio insumos de origen natural y en una segunda etapa de desarrollo, insumos naturales modificados.

##### I.1.1.-DESARROLLO DE LA POLIMERIZACION INDUSTRIAL.

La utilización del hule data de tiempos prehispánicos, ya que los pueblos mesoamericanos utilizaban para fines diversos el látex proveniente de la corteza de algunos árboles.

En el siglo XIX el estadounidense Charles Goodyear descubrió que al mezclar azufre con hule natural se obtenía un compuesto (Caucho vulcanizado) que al calentarse se transformaba en un material estable, no pegajoso y con características impermeables que eran de gran utilidad. Aproximadamente el 70% de la producción de hule actualmente se emplea en la industria de los neumáticos y cerca del 30% restante se utiliza en la fabricación de plásticos automotrices.

El desarrollo del hule sintético comenzó principalmente en países como Alemania, que buscaba fundamentalmente el desarrollo de hules de uso general, y en Estados Unidos que por su parte pretendían la manufactura de nuevos hules de uso específico.

El interés en la elaboración de hules de uso específico condujo a la síntesis de un copolímero de butadieno-estireno (SBR), el cual tuvo un importante impacto en la industria de los polímeros en general, ya que condujo a la instalación de grandes plantas para satisfacer a la demanda de hules sintéticos para diversos usos.

La industria hulera agrupa a dos grandes sectores:

- 1) El sector industrial de elastómeros, conjunto de empresas que modifican productos petroquímicos y vegetales.

A partir de productos petroquímicos, se manufactura una amplia gama de hules sintéticos como por ejemplo el polibutadieno-estireno, el polibutadieno, el cloropreno y butilo.

En lo que respecta a las especies de tipo vegetal, tienen la capacidad de producir látex. Las más importantes son el guayule y el árbol del hule (*Hevea brasiliensis*).

- 2) El sector manufacturero de hule contiene a todas las industrias relacionadas con la fabricación de artículos terminados de hule entre los que destacan la industria llantera y en un grado menor las industrias de partes automotrices y del calzado.

En base a lo anterior, el sector de los polímeros en sus varias facetas, es muy complejo. Una de estas facetas que actualmente es estudiada de manera intensiva es la síntesis de polímeros, debido a las necesidades de insumos de uso específico por parte de la sociedad.

Actualmente, no se producen estos compuestos en nuestro país principalmente a que los requerimientos tecnológicos para su manufactura son cada vez mayores, entre otras causas debido a las recientes necesidades de aumentar la calidad del producto, necesidades de procesos más eficientes, necesidad de nuevos materiales, etc.

El trabajo que se requiere realizar para subsanar estas grandes deficiencias en nuestro sector productivo es variado y complejo, pero desde el punto de vista tecnológico lo que se requiere, al igual que en otros países, es desarrollar nuevos procesos y diseñar mejores equipos de proceso, que a su vez influyan en esquemas de monitoreo y control en línea para lograr los objetivos de calidad de productos y de eficiencia del proceso.

## I.2.-PROCESO DE LA POLIMERIZACION ANIONICA EN SOLUCION.

El proceso de polimerización en solución se emplea para llevar a cabo polimerizaciones de tipo aniónico o de coordinación. La reacción se lleva a cabo en un solvente.

Los procesos de polimerización en solución presentan las características siguientes (Meherenberger, 1986) <sup>[28,43,45]</sup>:

- a) El solvente ayuda en gran medida a extraer el calor generado por la reacción, por medio de la elevación en la temperatura o por vaporización.
- b) Reduce la viscosidad de la mezcla reaccionante, en comparación con la polimerización en masa.
- c) Es difícil eliminar las huellas del solvente en el polímero.
- d) El solvente puede intervenir como reactivo y conducir a reacciones no deseadas, originando la formación de polímero con bajo peso molecular.

### I.2.1.-PROCESO INDUSTRIAL DE LA POLIMERIZACION DE n-BUTADIENO EN SOLUCION.

El proceso de polimerización en solución consta de dos fases: La fase vapor en la cual se encuentra una fracción del monómero y solvente alimentados, y la fase líquida (solución), en la cual la reacción ocurre en ella de manera preferente en donde están presentes el iniciador, los oligómeros formados, una fracción de solvente y el monómero.

La producción de polibutadieno vía solución es un proceso complejo, en donde el butadieno es alimentado al reactor, que conducen el monómero en estado líquido, junto con el solvente (ciclohexano) con una relación de sólidos de 12.5-14.5 %.

Posteriormente se agrega el iniciador (butadienil-litio) de la reacción en solución, a una concentración del 15% en volumen.

El proceso se efectúa en operación por lotes. Durante los primeros 20 minutos se lleva a cabo la reacción de polimerización y los 20-40 minutos restantes el polímero permanece dentro del reactor con agitación constante debido a la necesidad de enfriamiento del sistema.

Cabe resaltar que la polimerización aniónica no presenta reacciones de terminación por lo que es necesario desactivar las cadenas de oligómeros formados para obtener el polibutadieno, lo cual se logra añadiendo un compuesto polar.

Cuando los requerimientos son de polibutadieno entre-cruzado, se agrega un compuesto acomplejante (short stop), como el tetracloruro de silicio o de estaño, que tienen la capacidad de entrecruzar a las moléculas de oligómeros por interacción química.

EL control de la calidad del PBD formado se lleva a cabo tomando muestras del reactor y midiendo la viscosidad Mooney y ajustándose el producto a las especificaciones marcadas.

Condiciones nominales de operación en planta:

- concentración inicial de monómero  $M_o=1.33\text{mol/l}$
- volumen del reactor  $V= 30000\text{l}$
- concentración inicial de iniciador  $I_o=0.65 \times 10^{-3}$
- concentración inicial de solvente  $S_o=8.05\text{mol/l}$
- momento cero  $I_o=0.0 \text{ mol/l}$
- momento uno  $I_1=0.0\text{mol/l}$
- momento dos  $I_2=0.0\text{mol/l}$
- Temperatura inicial del reactor  $T_o=50 \text{ C.}$

### I.3.-CINETICA RELACIONADA CON EL PROCESO DE POLIMERIZACION ANIONICA.

La reacción de polimerización de ciertas especies diénicas (que contienen dentro de su estructura molecular por lo menos dos dobles enlaces entre carbono y carbono), fue promovida por metales de tipo alcalino, de principios de siglo.

La polimerización de etileno a baja presión utilizando como iniciador un compuesto litiado se realiza en 1930 y se demuestra que el complejo formado por sodio metálico y naftaleno es capaz de iniciar la polimerización del 1,2 dihidronaftaleno<sup>[5,28]</sup>.

Es en la década de los 50' cuando se logra obtener una explicación satisfactoria del mecanismo cinético de la polimerización del tipo aniónico.

En ésta época se consigue sintetizar un polímero similar al hule natural, al polimerizar isopreno con litio. A partir de ese momento y hasta la fecha, la polimerización de tipo aniónico es un proceso ampliamente estudiado y se ha convertido en un método adecuado en la obtención de polímeros monodispersos y de copolímeros injertados o en bloques.

#### II.3.1.-ETAPAS DEL MECANISMO CINETICO DE LA POLIMERIZACION.

El mecanismo cinético de polimerización consta:

##### 1) Etapa de Iniciación.

Considerando dos mecanismos:

- a) Consistente en el ataque de una especie básica según el criterio de Lewis al doble enlace presente en el monómero, y se tiene la formación de un carbanión que prosigue con el proceso de polimerización.
- b) Consiste en la transferencia de un electrón de una especie donadora activa al doble enlace del monómero, con la formación de un anión-radical que inicia la polimerización por radicales libres o aniónica.

La fuerza básica necesaria para comenzar con una polimerización aniónica depende básicamente de la reactividad del monómero, de las características del ión acoplado, de la temperatura y de la polaridad del solvente.

Un esquema cinético global del proceso de polimerización aniónica:



Entre los mecanismos tipo iónico y el de coordinación existen toda una variedad de compuestos intermedios, con lo cual se da una idea de lo complejo de los fenómenos involucrados.

## 2) Etapa de Propagación.

Las reacciones de polimerización aniónicas presentan variaciones significativas debido al enlace metal alcalino-carbono; por lo que las constantes cinéticas dependen a su vez del ión metálico asociado y de la naturaleza del solvente empleado, cuya constante dieléctrica es la causante del fenómeno de disociación iónica y de la polaridad de los procesos de solvatación.

En el solvente se pueden presentar: pares de iones no asociados, pares de iones solvatados y iones libres de cierto grado de solvatación .

## 3) Etapa de terminación.

La definición de una reacción de terminación es muy simple, ya que ésta solo consiste en la destrucción de un centro activo de un oligómero activo. Sin embargo, en los procesos de polimerización de tipo aniónico, generalmente no se presentan este tipo de reacciones y los polímeros formados permanecen activos.

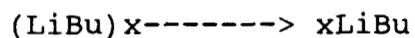
### I.3.2.-MECANISMOS DE LA POLIMERIZACION ANIONICA DEL n-BUTADIENO.

Los estudios sobre catálisis y cinética han proporcionado amplios conocimientos sobre los posibles mecanismos que sigue una polimerización de este tipo, en el caso de utilizar **litio como iniciador en el proceso**, se observa que el metal aparentemente se adiciona a la unidad de monómero en una primera etapa, para formar un compuesto bi-litiado, el cual procede a adicionar más monómero, formándose un butil-litio, soluble en solventes de tipo hidrocarburo.

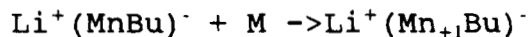
El fenómeno más notable de la polimerización de butadieno vía aniónica es la ausencia de reacciones de terminación en condiciones de extrema pureza, lo cual lleva al sistema a polimerizar con una distribución de pesos moleculares muy estrecha (distribución de Poisson), debido a que todas las cadenas en crecimiento, tienen en principio, la misma probabilidad para crecer.

EL MECANISMO CINETICO ES EL SIGUIENTE:

#### 1) INICIACION.



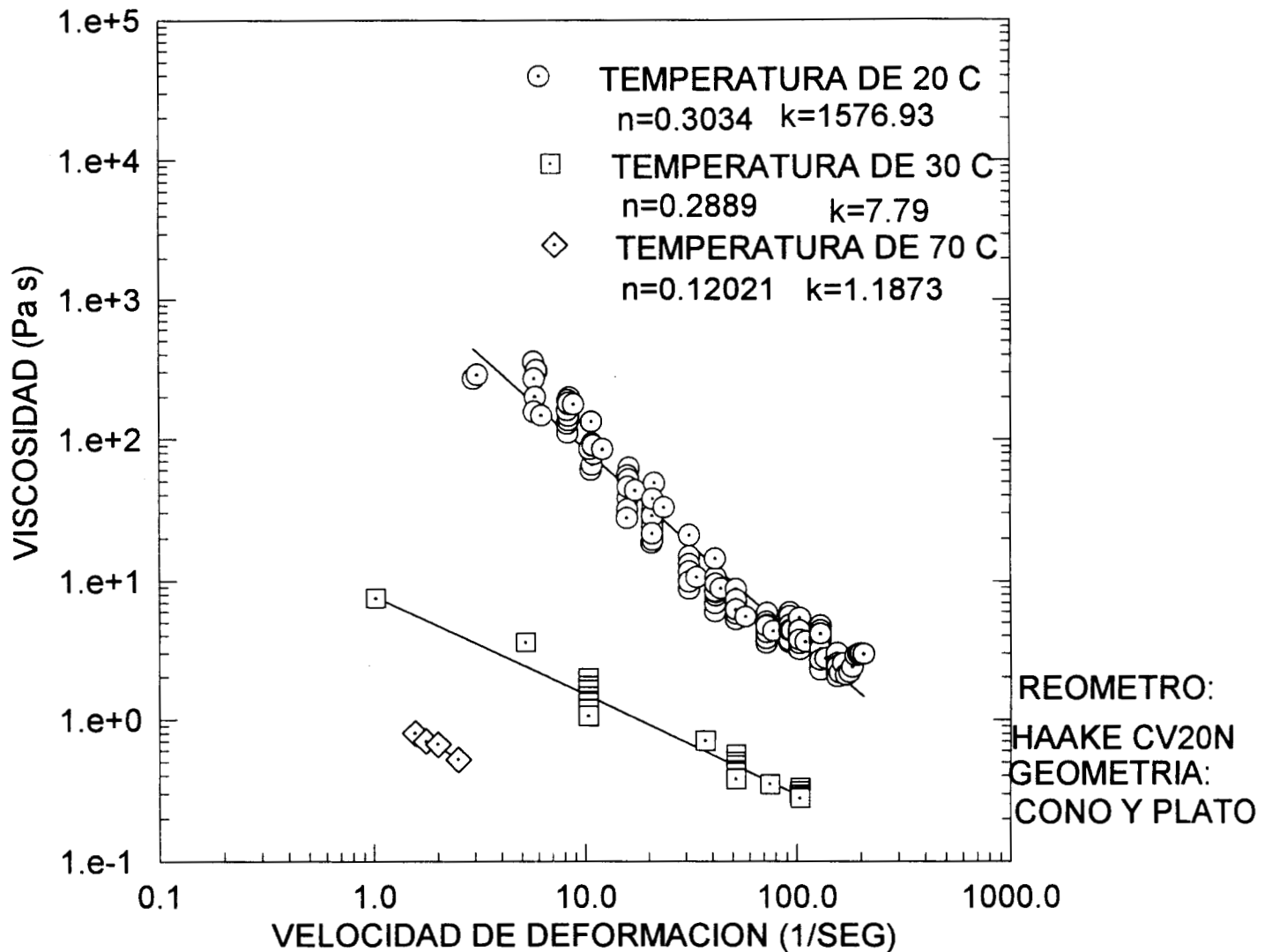
#### 2) PROPAGACION.



Los pasos de propagación son similares pero no idénticos a los de iniciación, ya que en la etapa de iniciación, el monómero es insertado entre iones de litio y butilo, y durante la propagación se inserta entre el litio y el residuo del ion butilo.

## APENDICE II

### DATOS REOLOGICOS DEL POLIMERO DE POLIBUTADIENO 1,4. PARAMETROS APLICADOS EN EL MODELO DE LA LEY DE LA POTENCIA EVALUADOS A DIFERENTES TEMPERATURAS



PARAMETROS DEL MODELO DE LA LEY DE LA POTENCIA:

$$\eta = k \cdot (\text{Vel. Def})^{\exp(n-1)}$$

$$n = 0.3904 - 3.8219 \cdot 10^{-3} \cdot T$$

$$k = 1430.0415 - 22.54 \cdot T$$

APENDICE III.

PARAMETROS DE OPERACION DE CADA UNO DE LOS MODELOS PROPUESTOS.

TABLA III.1.-PARAMETROS DE OPERACION DEL MODELO I,  $V\phi$  A 80 °C.

| COND.<br>OPERACIÓN<br>FLUIDO | $V\phi$<br>(m/s) | $\mu_s^*$<br>(Pa/s) | S    | $\phi$ | Br<br>1E-3 | $Bi_h$ | Nu    |
|------------------------------|------------------|---------------------|------|--------|------------|--------|-------|
| SILICON<br>OIL               | 0.0650           | 0.0043              | 0.05 | 6.5    | 0.014      | 3.56   | 26.72 |
|                              | 0.0758           | 0.0043              | 0.05 | 6.5    | 0.166      | 3.69   | 27.69 |
|                              | 0.0866           | 0.0043              | 0.05 | 6.5    | 0.024      | 3.81   | 28.55 |
| GLICEROL                     | 0.0650           | 0.0577              | 0.05 | 6.5    | 0.244      | 3.44   | 25.74 |
|                              | 0.0758           | 0.0525              | 0.05 | 6.5    | 0.302      | 3.57   | 26.74 |
|                              | 0.0866           | 0.0487              | 0.05 | 6.5    | 0.293      | 3.68   | 27.58 |
| POLIMERO<br>@ 11.5%          | 0.0325           | 0.2741              | 0.05 | 6.5    | 0.143      | 2.97   | 22.28 |
|                              | 0.0650           | 0.2884              | 0.05 | 6.5    | 1.378      | 3.48   | 26.13 |
|                              | 0.0758           | 0.2782              | 0.05 | 6.5    | 2.535      | 3.61   | 27.13 |
|                              | 0.0866           | 0.2704              | 0.05 | 6.5    | 4.021      | 3.72   | 27.91 |
| POLIMERO<br>@ 14.5%          | 0.0325           | 0.2885              | 0.05 | 6.5    | 1.33       | 3.04   | 22.77 |
|                              | 0.0650           | 0.3606              | 0.05 | 6.5    | 1.51       | 3.56   | 26.71 |
|                              | 0.0758           | 0.3462              | 0.05 | 6.5    | 1.13       | 3.68   | 27.67 |
|                              | 0.0866           | 0.3245              | 0.05 | 6.5    | 3.86       | 3.80   | 28.53 |

\* Determinada experimentalmente empleando un viscosímetro tipo Brookfield RV SPINDLE para los fluidos de silicon oil y glicerol y para fluidos pseudoplásticos se uso un Reómetro RV-20 en flujo de deformación simple.

Los parámetros de los modelos se obtuvieron partiendo del hecho de que existe un estado estacionario a 80 °C y 25 °C, a las cuales se evaluaron cada una de las variables adimensionales requeridas para la solución de los modelos planteados.

TABLA III.2.-PARAMETROS DE OPERACION DEL MODELO I,  $V\phi$  A 25 °C.

| COND.<br>OPERACIÓN<br>FLUIDO | $V\phi$<br>(m/s) | $\mu_a^*$<br>Pa/s | S    | $\phi$ | Br<br>1E-3 | Bi <sub>h</sub> | Nu    |
|------------------------------|------------------|-------------------|------|--------|------------|-----------------|-------|
| SILICON<br>OIL               | 0.0650           | 0.0098            | 0.05 | 6.5    | 0.273      | 3.59            | 26.98 |
|                              | 0.0758           | 0.0095            | 0.05 | 6.5    | 0.182      | 3.73            | 27.96 |
|                              | 0.0866           | 0.0093            | 0.05 | 6.5    | 0.464      | 3.84            | 28.83 |
| GLICEROL                     | 0.0650           | 0.6488            | 0.05 | 6.5    | 10.97      | 3.46            | 25.80 |
|                              | 0.0758           | 0.6204            | 0.05 | 6.5    | 14.28      | 3.58            | 26.74 |
|                              | 0.0866           | 0.5956            | 0.05 | 6.5    | 17.90      | 3.69            | 27.58 |
| POLIMERO<br>@ 11.5%          | 0.0325           | **<br>1.731       | 0.05 | 6.5    | 14.47      | 3.02            | 22.66 |
|                              | 0.0650           | 1.362             | 0.05 | 6.5    | 45.58      | 3.54            | 26.10 |
|                              | 0.0758           | 1.261             | 0.05 | 6.5    | 57.41      | 3.67            | 27.00 |
|                              | 0.0866           | 1.179             | 0.05 | 6.5    | 75.52      | 3.78            | 27.90 |
| POLIMERO<br>@ 14.5%          | 0.0325           | 2.308             | 0.05 | 6.5    | 19.29      | 3.09            | 23.16 |
|                              | 0.0650           | 2.164             | 0.05 | 6.5    | 72.39      | 3.62            | 27.16 |
|                              | 0.0758           | 1.855             | 0.05 | 6.5    | 84.42      | 3.75            | 28.14 |
|                              | 0.0866           | 1.623             | 0.05 | 6.5    | 96.50      | 3.87            | 29.03 |

\*\* Determinada a partir de muestras problema en un reómetro tipo RV-20, con geometría de placas paralelas PQ20, a diferentes condiciones de velocidad de deformación.

TABLA III.3. PARAMETROS DE OPERACION DEL MODELO II,  $V\phi$  y  $Vz$  A 80 C.

| COND. OPER.      | $V\phi$<br>m/s | $\mu_a^*$<br>Pa/s | S    | $\phi$ | B1E<br>+2 | Bz1<br>E-7 | Br $\phi$<br>1E-3 | Bih | N<br>u |
|------------------|----------------|-------------------|------|--------|-----------|------------|-------------------|-----|--------|
| SILICON OIL      | 0.065          | 0.0043            | 0.05 | 6.5    | 8.9       | 0.3        | 0.01              | 3.5 | 26     |
|                  | 0.076          | 0.0043            | 0.05 | 6.5    | 10.36     | 4.0        | 0.16              | 3.6 | 27     |
|                  | 0.086          | 0.0043            | 0.05 | 6.5    | 11.84     | 0.6        | 0.02              | 3.8 | 28     |
| GLICEROL         | 0.065          | 0.0576            | 0.05 | 6.5    | 7.664     | 4.9        | 0.24              | 3.4 | 25     |
|                  | 0.076          | 0.0525            | 0.05 | 6.5    | 8.911     | 6.0        | 0.30              | 3.5 | 26     |
|                  | 0.086          | 0.0486            | 0.05 | 6.5    | 10.18     | 3.7        | 0.29              | 3.6 | 27     |
| POLIMERO @ 11.5% | 0.032          | 0.274             | 0.05 | 6.5    | 0.002     |            | 0.14              | 2.9 | 22     |
|                  | 0.065          | 0.288             | 0.05 | 6.5    | 0.002     | 40         | 1.37              | 3.4 | 26     |
|                  | 0.076          | 0.278             | 0.05 | 6.5    | 0.003     | 18         | 2.53              | 3.6 | 27     |
|                  | 0.086          | 0.270             | 0.05 | 6.5    | 0.0029    | 40         | 4.02              | 3.7 | 27     |
| POLIMERO @ 14.5% | 0.10           | 0.288             | 0.05 | 6.5    | 0.002     |            | 1.33              | 3.0 | 22     |
|                  | 0.21           | 0.360             | 0.05 | 6.5    | 0.002     | 40         | 1.51              | 3.5 | 26     |
|                  | 0.24           | 0.346             | 0.05 | 6.5    | 0.003     | 18         | 1.13              | 3.6 | 27     |
|                  | 0.28           | 0.324             | 0.05 | 6.5    | 0.002     | 40         | 3.86              | 3.8 | 28     |

\* Determinada experimentalmente empleando un viscosímetro tipo Brookfield RV SPINDLE en los fluidos de silicon oil y glicerol y para fluidos pseudoplásticos un Reómetro RV-20 en flujo de deformación simple, empleando la muestra problema utilizada en el interior del tanque)

TABLA III.4.-PARAMETROS DE OPERACION DEL MODELO II,  $V\phi$  y  $Vz$  A 25 °C.

| COND.<br>OPERACIÓN<br>FLUIDO | $V\phi$<br>(m/s) | $\mu_a^*$<br>Pa/s | S    | $\phi$ | Br<br>1E-3 | $Bi_h$ | Nu    |
|------------------------------|------------------|-------------------|------|--------|------------|--------|-------|
| SILICON<br>OIL               | 0.0650           | 0.0098            | 0.05 | 6.5    | 0.273      | 3.59   | 26.98 |
|                              | 0.0758           | 0.0095            | 0.05 | 6.5    | 0.182      | 3.73   | 27.96 |
|                              | 0.0866           | 0.0093            | 0.05 | 6.5    | 0.464      | 3.84   | 28.83 |
| GLICEROL                     | 0.0650           | 0.6488            | 0.05 | 6.5    | 10.97      | 3.46   | 25.80 |
|                              | 0.0758           | 0.6204            | 0.05 | 6.5    | 14.28      | 3.58   | 26.74 |
|                              | 0.0866           | 0.5956            | 0.05 | 6.5    | 17.90      | 3.69   | 27.58 |
| POLIMERO<br>@ 11.5%          | 0.0325           | **<br>1.731       | 0.05 | 6.5    | 14.47      | 3.02   | 22.66 |
|                              | 0.0650           | 1.362             | 0.05 | 6.5    | 45.58      | 3.54   | 26.10 |
|                              | 0.0758           | 1.261             | 0.05 | 6.5    | 57.41      | 3.67   | 27.00 |
|                              | 0.0866           | 1.179             | 0.05 | 6.5    | 75.52      | 3.78   | 27.90 |
| POLIMERO<br>@ 14.5%          | 0.0325           | 2.308             | 0.05 | 6.5    | 19.29      | 3.09   | 23.16 |
|                              | 0.0650           | 2.164             | 0.05 | 6.5    | 72.39      | 3.62   | 27.16 |
|                              | 0.0758           | 1.855             | 0.05 | 6.5    | 84.42      | 3.75   | 28.14 |
|                              | 0.0866           | 1.623             | 0.05 | 6.5    | 96.50      | 3.87   | 29.03 |

\*\* Determinada a partir de muestras problema en un reómetro tipo RV-20, con geometrías de placas paralelas PQ20, a diferentes condiciones de velocidad de deformación.

TABLA III.5. PARAMETROS DE OPERACION DEL MODELO III,  $V\phi$  y  $Vz$  @ 80 °C.

| COND. OPER.      | $V\phi$<br>m/s | $\mu_a^*$<br>Pa/s | $\alpha$ | $\Gamma$ | Rez    |
|------------------|----------------|-------------------|----------|----------|--------|
| SILICON OIL      | 0.065          | 0.0043            | 1        | 4.54     | 782.1  |
|                  | 0.076          | 0.0043            | 1        | 4.54     | 912.4  |
|                  | 0.086          | 0.0043            | 1        | 4.54     | 1042.7 |
| GLICEROL         | 0.065          | 0.0576            | 1        | 4.54     | 78.01  |
|                  | 0.076          | 0.0525            | 1        | 4.54     | 99.92  |
|                  | 0.086          | 0.0486            | 1        | 4.54     | 123.26 |
| POLIMERO @ 11.5% | 0.032          | 0.27              | 1        | 4.54     | 5.98   |
|                  | 0.065          | 0.288             | 1        | 4.54     | 11.37  |
|                  | 0.076          | 0.278             | 1        | 4.54     | 13.76  |
|                  | 0.086          | 0.270             | 1        | 4.54     | 16.18  |
| POLIMERO @ 14.5% | 0.10           | 0.288             | 1        | 4.54     | 6.3    |
|                  | 0.21           | 0.360             | 1        | 4.54     | 13.85  |
|                  | 0.24           | 0.346             | 1        | 4.54     | 12.2   |
|                  | 0.28           | 0.324             | 1        | 4.54     | 14.8   |

\* Determinada experimentalmente empleando un viscosímetro tipo Brookfield RV SPINDLE para fluidos Newtonianos y para fluidos pseudoplásticos un Reómetro RV-20 en flujo de deformación simple, empleando la muestra problema utilizada en el estudio de mezclado en el interior del tanque.

TABLA III.6.PARAMETROS DE OPERACION DEL MODELO III,  $V\phi$  y  $Vz$  @ 25 °C.

| COND.<br>OPER.      | $V\phi$<br>m/s | $\mu_a^*$<br>Pa/s | $\alpha$ | $\Gamma$ | Rez    |
|---------------------|----------------|-------------------|----------|----------|--------|
| SILICON<br>OIL      | 0.065          | 0.0043            | 1        | 4.54     | 359.84 |
|                     | 0.076          | 0.0043            | 1        | 4.54     | 419.79 |
|                     | 0.086          | 0.0043            | 1        | 4.54     | 479.77 |
| GLICEROL            | 0.065          | 0.0576            | 1        | 4.54     | 6.93   |
|                     | 0.076          | 0.0525            | 1        | 4.54     | 6.94   |
|                     | 0.086          | 0.0486            | 1        | 4.54     | 10.07  |
| POLIMERO<br>@ 11.5% | 0.032          | 0.274             | 1        | 4.54     | 0.2389 |
|                     | 0.065          | 0.288             | 1        | 4.54     | 0.0240 |
|                     | 0.076          | 0.278             | 1        | 4.54     | 0.0304 |
|                     | 0.086          | 0.270             | 1        | 4.54     | 0.0330 |
| POLIMERO<br>@ 14.5% | 0.10           | 0.288             | 1        | 4.54     | 0.0080 |
|                     | 0.21           | 0.360             | 1        | 4.54     | 0.0170 |
|                     | 0.24           | 0.346             | 1        | 4.54     | 0.0230 |
|                     | 0.28           | 0.324             | 1        | 4.54     | 0.0290 |

\* Determinada experimentalmente empleando un viscosímetro tipo Brookfield RV SPINDLE para fluidos Newtonianos y para fluidos pseudoplásticos un Reómetro RV-20 en flujo de deformación simple, empleando la muestra problema utilizada en el interior del tanque.