

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE MEZCLADO EN CUCHARONES DE ACERO MEDIANTE EL ESTUDIO DE UN MODELO FÍSICO DE AGUA**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por las Brs.: García B., Daneisa Y.  
Loyo A., Yessika R.  
Para optar al Título  
de Ingeniero de Metalúrgico

Caracas, Febrero de 2010

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE MEZCLADO EN CUCHARONES DE ACERO MEDIANTE EL ESTUDIO DE UN MODELO FÍSICO DE AGUA**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Alfonso Bencomo

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por las Brs.: García B., Daneisa Y.  
Loyo A., Yessika R.  
Para optar al Título  
de Ingeniero de Metalúrgico

Caracas, Febrero de 2010

## AGRADECIMIENTOS

Ante todo le doy gracias a Dios por la vida y salud que me ha brindado a mi y a toda mi familia, lo cual me permitió lograr con esfuerzo y dedicación esta meta, gracias a él porque logre desarrollar mi carrera en esta universidad en la cual además de adquirir conocimientos tuve la oportunidad de conocer personas muy especiales que me apoyaron a lo largo de mi carrera.

Agradezco a mi papá y a mi mamá especialmente por su esfuerzo y amor durante toda mi vida y por supuesto por todo el apoyo que me brindaron para obtener este logro, ya que me dieron mucho ánimo cuando lo necesite al igual que Narvik que me condujo a estudiar ingeniería.

Agradezco a la ilustre Universidad Central de Venezuela “La casa que vence las sombras”, especialmente al núcleo de Cagua donde inicie mis estudios y a la Facultad de Ingeniería Metalúrgica, por haberme brindado la oportunidad de desarrollar una carrera profesional y con ello un crecimiento personal.

Agradezco a mi tutor de tesis, el Profesor Alfonso Bencomo por todo su apoyo prestado, por su colaboración y su guía durante el inicio y desarrollo de nuestro trabajo.

Agradezco a mis demás profesores a los cuales aprecio mucho como el profe Freddy Fraudita por su apoyo, especialmente al Prof. Marcial Pérez, Francisco Durán, por su colaboración en el desarrollo de la tesis.

Agradezco a los amigos de la uni con los cuales compartí y nos reímos mucho Luz, Dalitza, Yessika, Angel, Ale, Marcos, Francisco Castillo, mi Yisma y todos los demás por los momentos bonitos.

Daneisa Y. García Brito.

## AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por su fortaleza, por levantarme cada día y por su misericordia por permitir este logro en mi vida. Por su salvación y por su eterno amor y por llenarme cada día para glorificarle a través de este trabajo.

Agradezco a esta casa de estudio como lo es la Universidad Central de Venezuela, especialmente la Facultad de Ingeniería Metalúrgica, donde pude crecer personal y profesionalmente.

Agradezco a mi tutor de tesis, el Profesor Alfonso Bencomo por todo su apoyo prestado, por su colaboración y su guía durante el inicio y desarrollo de nuestro trabajo.

Agradezco a mis padres y familiares por su esfuerzo y dedicación todos estos años, dándome el apoyo para continuar cada día.

A mis demás profesores y amigos por sus enseñanzas, especialmente al Prof. Marcial Pérez, Francisco Durán, por su guía y colaboración prestada.

Y especialmente a Anibal Ortega y sus familiares por su ayuda incondicional, por su enseñanza, guía y fortaleza, quien fue un apoyo importante para mi dedicación y crecimiento en esta casa de estudios.

Yessika R. Loyo A.

## RESUMEN

**García B., Daneisa Y., y Loyo A., Yessika R.**

### **DETERMINACION DEL TIEMPO DE MEZCLADO EN CUCHARONES DE ACERO MEDIANTE EL ESTUDIO DE UN MODELO FÍSICO DE AGUA**

**Tutor académico: Prof. Alfonso Bencomo. Tesis. Caracas, UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Año 2010. 149 p.**

**Palabras Claves: Metalurgia Secundaria, Modelo Físico, Tiempo de Mezcla, Coeficiente de Transferencia de masa.**

Este trabajo tiene como objetivo la elaboración de un modelo físico en plexiglás transparente a escala 1/7 de un cucharón proveniente de La Empresa Minera Loma de Níquel, para estudiar la influencia de las variables: flujo de gas, altura del baño y localización de los inyectores con el fin de mejorar la eficiencia en los procesos de metalurgia secundaria, en especial la remoción de azufre.

La metodología se desarrollo aplicando los criterios de similitud geométrica, cinemática y dinámica de un modelo a escala real y el prototipo, en el cual se simuló el baño metálico con agua, la escoria con aceite y el gas inerte con aire, esto debido a que la viscosidad cinemática del acero a 1600°C es similar a la del agua a temperatura ambiente lo que permitió estudiar el comportamiento del fluido.

Para fines de este trabajo se estudiaron el tiempo de mezcla y la transferencia de masa entre las fases. Para la determinación del tiempo de mezcla se empleó una técnica de muestreo fuera de línea, la cual se basó en medidas de pH monitoreadas por un Software, donde se obtuvo el tiempo de mezcla, que es el tiempo en el que se alcanzó la homogeneización completa del baño, empleando como trazador ácido sulfúrico.

Para la determinación del coeficiente de transferencia de masa, se desarrolló una técnica donde se empleó como trazador ácido benzoico del cual fueron tomadas muestras en intervalos de tiempo, cuyas concentraciones se determinaron titulando con hidróxido de sodio (NaOH).

Finalmente se observó que a medida que el caudal de agitación es mayor, más eficiente es el mezclado dentro del baño, debido a que es más rápida la recirculación del líquido. Se observó que la presencia de escoria para las alturas de baño utilizadas, aumenta el tiempo de mezclado. La inyección excéntrica es más eficiente cuando el caudal es el más elevado.

Se encontró para la configuración excéntrica del tapón poroso, que empleando el mayor caudal afecta disminuyendo la transferencia de masa. Para la configuración excéntrica se observó que a menor altura del baño hay una mayor transferencia de ácido benzoico.

Para la configuración céntrica del tapón poroso se observó que al incrementar el caudal se

produjo una mayor transferencia de masa teniendo mayor influencia cuando la altura del baño es mayor.

Se espera que los valores de transferencia de masa obtenidos en este trabajo se comparen con la cinética de desulfuración a escala industrial, para un mejor control y eficiencia en los procesos de remoción del azufre.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xxvi
CAPITULO I INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
2.1. Procesamiento del Acero	3
2.1.1. Metalurgia Secundaria	5
2.2. Patrón de Flujos en Sistemas Agitados por Inyección de Gas	10
2.2.1. Modos de dispersión del gas	15
2.2.2. Área de Apertura de Ojo	16
2.2.3. Atrape de Escoria	17
2.3. Fenómenos de Transferencia de masa en sistemas agitados por Inyección de Gas	19
2.4. Desulfuración en Cucharones de Acero	21
2.4.1. Metalurgia básica y su escoria de control-basicidad V	26
2.4.2. Desulfuración y otros tratamientos de acero en la cuchara	28
2.4.3. Métodos y reactivos para la desulfuración	31
2.5. Modelado Físico de Cucharas de Acero	36
2.5.1. Similitud y semejanza dimensional	36
2.5.2. Método para determinar el flujo de gas en el modelo de Agua	39
2.5.3. Evaluación de la Eficiencia del Mezclado en Cucharones de Acero	40
2.6. Variables que influyen en la eficiencia del mezclado en cucharones metalúrgicos	41
2.6.1. Influencia del Flujo de gas sobre el mezclado	41
2.6.2. Influencia de la altura del baño en el tiempo de mezcla	42
2.6.3. Influencia de la localización de los inyectores en el Tiempo de mezcla	42

2.7. Métodos para determinar el tiempo de mezcla	43
2.7.1. Medidas cualitativas del tiempo de mezcla	44
2.7.2. Medidas cuantitativas del tiempo de mezcla	44
2.7.3. Procesamiento de la data del tiempo de Mezcla	45
CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO	47
3.1. Elaboración del modelo físico	49
3.1.1. Modelo Físico a Escala 1/7	49
3.2. Determinación del Tiempo de Mezcla	52
3.2.1. Aplicación del Método	52
3.3. Determinación de la transferencia de masa	55
3.3.1. Coeficiente de transferencia de masa	55
3.4. Aplicación de la Metodología	59
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSION	60
4.1. Modelo Físico	60
4.2. Determinación del Tiempo de Mezcla	64
4.2.1. Tiempos de Mezcla obtenidos por el Software de medición de pH	65
4.2.2. Tiempo de Mezcla en función de la Altura del Baño	68
4.2.3. Tiempo de Mezcla en función del Caudal de Agitación	70
4.2.4. Tiempo de Mezcla en función de la localización del Inyector	72
4.2.5. Tiempo de Mezcla en función de la presencia de la fase de escoria	76
4.3. Determinación del Coeficiente de Transferencia de Masa	79
4.3.1. Transferencia de Masa del Ácido Benzoico a la fase escoria	79
4.3.2. Transferencia de Masa en función de las alturas del baño	80
4.3.3. Transferencia de Masa en función del caudal de agitación	83
4.3.4. Transferencia de Masa en función de la localización del Inyector	87
4.3.5. Calculo de la Constante de Transferencia de Masa	90
4.3.6. Calculo del Coeficiente de Transferencia de Masa	92

CAPITULO V CONCLUSIONES	95
RECOMENDACIONES	97
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	98
APÉNDICE A Actividades involucradas en la metodología	100
APÉNDICE B Cálculos involucrados en la determinación de los resultados	103
APÉNDICE C Resultados experimentales de la determinación del tiempo de mezcla	109
APÉNDICE D Imágenes de los ensayos realizados	147

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Principales procesos de fabricación de acero en la industria mundial. Ruta Alto horno-Convertidor al oxígeno y la ruta de Reducción Directa: Chatarra-Horno Eléctrico de arco	3
Figura 2.2. Esquema del proceso de fabricación de acero por el método de Colada Continua	5
Figura 2.3. Inyección de Argón a través de la lanza superior	7
Figura 2.4. Inyección de Argón a través del tapón poroso de la cuchara	8
Figura 2.5. Agitación Electromagnética-EMS	9
Figura 2.6. Características de la región bifásica (pluma bifásica) en sistemas agitados por inyección de gas	12
Fig. 2.7. Modos de dispersión del gas en tapones porosos: a) burbujas discretas, b) coalescencia incipiente, c) coalescencia	15
Fig. 2.8. Variación de la frecuencia de las burbujas con el caudal específico para distintas posiciones por encima del tapón poroso	16
Fig. 2.9. Representación esquemática de una cuchara siderúrgica para un agitado Fuerte	17
Figura 2.10. Representación esquemática del atrape de escoria en el ojo	18
Figura 2.11. Diferentes posiciones de los tapones porosos y el resultado del patrón de flujo por la inyección de gas, con localización céntrica (a) y localización excéntrica (b), de los inyectores respectivamente	43
Figura 2.12. Ejemplo tipo de la dispersión del trazador en el tiempo, empleando la medida de pH para la determinación del tiempo de mezcla	44
Figura 2.13. Definición del Tiempo de Mezcla	46

Figura 3.1 Dimensiones geométricas de un cucharon proveniente de Minera Loma de Níquel empleado para la elaboración del modelo físico a escala laboratorio	47
Figura 3.2. Esquema del procedimiento experimental para la realización del estudio	48
Figura 3.3. Esquema para la Construcción del Modelo Físico	50
Figura 3.4. Esquema del Criterio para simular físicamente el comportamiento del Cucharón de Acero	50
Figura 3.5. Montaje del Modelo Físico (Cucharon). Se observa el Cucharon construido de Plexiglás Transparente, a una altura específica para el baño y la escoria, el compresor de aire (para inyectar el gas de agitación) y el rotámetro para controlar el flujo de gas al baño metálico (agua)	51
Figura 3.6. Modelo Físico (Cucharón), construido de Plexiglás Transparente a Escala 1/7 de un modelo real de Loma de Níquel	51
Figura 3.7. Determinación del Tiempo de Mezcla	53
Figura 3.8. Esquema del procedimiento para la determinación del tiempo de mezcla	53
Figura 3.9. Esquema detallado de las variables estudiadas para determinar el Tiempo de Mezcla y cantidad de pruebas realizadas	54
Figura 3.10. Montaje del Modelo Físico (Cucharon). Se observa adicionalmente al montaje del modelo físico, el electrodo sumergido en el baño metálico para medir la concentración del trazador a través del <i>Software PicoScope</i> que registra la variación de pH con el tiempo	57
Figura 3.11. Montaje del Modelo Físico (Cucharon) con el electrodo que registrara la medida de pH para la determinación del tiempo de mezcla	55
Figura 3.12. Determinación de la Transferencia de Masa en el Modelo Físico	56
Figura 3.13. Esquema detallado de las variables estudiadas para determinar la Transferencia de Masa	56
Figura 3.14. Esquema detallado para determinar la Transferencia de Masa y cantidad de pruebas realizadas	57
Figura 3.15. Montaje del Modelo Físico (Cucharon) para la determinación del Coeficiente de transferencia de masa. Se toman las muestras del baño para ser tituladas con la solución de NaOH a 0,01N y posteriormente por medio de las ecuaciones que relacionan la concentración inicial, en el tiempo y en el equilibrio del acido benzoico en el baño se determina el coeficiente de transferencia de masa	58

Figura 3.16. Montaje del Modelo Físico (Cucharón) para la determinación del Coeficiente de transferencia de masa	58
Figura 3.17. Modelo Físico Construido de Plexiglás Transparente	59
Figura 3.18. En la Figura (a) se muestra las dos localizaciones de inyección de gas (en el centro y a 2/3 del radio) y en (b) se muestra el diseño de los inyectores los cuales simularon la forma del tapón poroso	59
Figura 4.1. Comportamiento del Flujo en el interior del modelo Físico. En (a) Burbujeo sin presencia de escoria, (b) Burbujeo con presencia de escoria, (c) vista superior durante la agitación del baño	60
Figura 4.2. Comportamiento del Flujo en el interior del modelo Físico. (a) Apertura de ojo a una altura del baño de 16 cm, en presencia de escoria, con inyección céntrica, (b) Apertura de ojo a una altura del baño de 20 cm, en presencia de escoria, con inyección céntrica, (c) Apertura de ojo a una altura del baño de 25 cm, en presencia de escoria, con inyección céntrica	61
Figura 4.3. Comportamiento del Flujo en el interior del modelo Físico. En (a) Burbujeo sin presencia de escoria con inyección excéntrica, (b) Apertura de ojo a una altura del baño de 20 cm, en presencia de escoria, con inyección excéntrica, (c) Apertura de ojo a una altura del baño de 25 cm, en presencia de escoria, con inyección excéntrica	62
Figura 4.4. Visualización del comportamiento del Flujo en el interior del Modelo físico. Se observa la Formación de la “Apertura de Ojo” y la forma cónica de la pluma bifásica	64
Figura 4.5. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 16 cm, sin escoria, con una inyección de gas de 1,145 pie <sup>3</sup> /h localizada en el centro del cucharón	65
Figura 4.6. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 16 cm, con escoria, con una inyección de gas de 1,145 pie <sup>3</sup> /h localizada en el centro del cucharón	65
Figura 4.7. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 16 cm, sin escoria, con una inyección de gas de 1,145 pie <sup>3</sup> /h localizada a 2/3 del radio del cucharón	66

Figura 4.8. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 16 cm, con escoria, con una inyección de gas de 1,145 pie <sup>3</sup> /h localizada a 2/3 del radio del cucharón	66
Figura 4.9. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Altura del Baño variando los caudales de inyección de gas. (Inyección Céntrica y Sin Escoria en el sistema)	68
Figura 4.10. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Altura del Baño variando los caudales de inyección de gas. (Inyección Excéntrica y Sin Escoria en el sistema)	68
Figura 4.11. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Altura del Baño variando los caudales de inyección de gas. (Inyección Céntrica y Con Escoria en el sistema)	69
Figura 4.12. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Altura del Baño variando los caudales de inyección de gas. (Inyección Excéntrica y Con Escoria en el sistema)	69
Figura 4.13. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las Alturas del Baño Metálico. (Inyección Céntrica y Sin Escoria en el sistema)	70
Figura 4.14. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las Alturas del Baño Metálico. (Inyección Excéntrica y Sin Escoria en el sistema)	71
Figura 4.15. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las Alturas del Baño Metálico. (Inyección Céntrica y Con Escoria en el sistema)	71
Figura 4.16. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las Alturas del Baño Metálico. (Inyección Excéntrica y Con Escoria en el sistema)	72
Figura 4.17. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las localizaciones de Inyección del gas. (A una altura constante de 0,16 m y Sin Escoria en el sistema)	72

- Figura 4.18. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las localizaciones de Inyección del gas. (A una altura constante de 0,16 m y Con Escoria en el sistema) 73
- Figura 4.19. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las localizaciones de Inyección del gas. (A una altura constante de 0,20 m y Sin Escoria en el sistema) 73
- Figura 4.20. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las localizaciones de Inyección del gas. (A una altura constante de 0,20 m y Con Escoria en el sistema) 74
- Figura 4.21. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las localizaciones de Inyección del gas. (A una altura constante de 0,25 m y Sin Escoria en el sistema) 74
- Figura 4.22. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las localizaciones de Inyección del gas. (A una altura constante de 0,25 m y Con Escoria en el sistema) 75
- Figura 4.23. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las fases en el sistema (Inyección Céntrica, a una altura constante del baño de 0,16 m) 76
- Figura 4.24. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las fases en el sistema (Inyección Excéntrica, a una altura constante del baño de 0,16 m) 76
- Figura 4.25. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las fases en el sistema (Inyección Céntrica, a una altura constante del baño de 0,20 m) 77
- Figura 4.26. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las fases en el sistema (Inyección Excéntrica, a una altura constante del baño de 0,20 m) 77
- Figura 4.27. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las fases en el sistema (Inyección Céntrica, a una altura constante del baño de 0,25 m) 78
- Figura 4.28. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las fases en el sistema (Inyección Excéntrica, a una altura constante del baño de 0,25 m) 78
- Figura 4.29. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo variando las alturas del baño metálico (Inyección Céntrica, A un caudal de  $9.006E^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$ ) 80

- Figura 4.30. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo variando las alturas del baño metálico (Inyección Céntrica, A un caudal de  $1.028E^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$ ) 81
- Figura 4.31. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo variando las alturas del baño metálico (Inyección Excéntrica, A un caudal de  $9.006E^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$ ) 81
- Figura 4.32. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo variando las alturas del baño metálico (Inyección Excéntrica, A un caudal de  $1.028E^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$ ) 82
- Figura 4.33. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo variando el caudal de inyección del gas (Inyección Excéntrica, A una altura de 0,16 m de baño metálico) 83
- Figura 4.34. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo variando el caudal de inyección del gas (Inyección Excéntrica, A una altura de 0,20 m de baño metálico) 84
- Figura 4.35. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo variando el caudal de inyección del gas (Inyección Excéntrica, A una altura de 0,25 m de baño metálico) 84
- Figura 4.36. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo variando el caudal de inyección del gas (Inyección Céntrica, A una altura de 0,16 m de baño metálico) 85
- Figura 4.37. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo variando el caudal de inyección del gas (Inyección Céntrica, A una altura de 0,20 m de baño metálico) 85
- Figura 4.38. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo variando el caudal de inyección del gas (Inyección Céntrica, A una altura de 0,25 m de baño metálico) 86
- Figura 4.39. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo en función de las localizaciones de inyección del gas (A una altura de 0,16 m, a un caudal de  $9,006.10^{-6}$ ) 87
- Figura 4.40. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo en función de las localizaciones de inyección del gas (A una altura de 0,16 m, a un caudal de  $1,028.10^{-5}$ ) 87
- Figura 4.41. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo en función de las localizaciones de inyección del gas (A una altura de 0,20 m, a un caudal de  $9,006.10^{-6}$ ) 88
- Figura 4.42. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo en función de las localizaciones de inyección del gas (A una altura de 0,20 m, a un caudal de  $1,028.10^{-5}$ ) 88

Figura 4.43. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo en función de las localizaciones de inyección del gas (A una altura de 0,25 m, a un caudal de $9,006 \cdot 10^{-6}$ )	89
Figura 4.44. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo en función de las localizaciones de inyección del gas (A una altura de 0,25 m, a un caudal de $1,028 \cdot 10^{-5}$ )	89
Figura 4.45. Gráfica de la Constante de Transferencia de Masa vs Tiempo en función de las alturas del baño metálico (Inyección Excéntrica)	90
Figura 4.46. Gráfica de la Constante de Transferencia de Masa vs Tiempo en función de las alturas del baño metálico (Inyección Céntrica)	91
Figura 4.47. Gráfica del Coeficiente de Transferencia de Masa vs Tiempo en función de las alturas del baño metálico (Inyección Excéntrica)	92
Figura 4.48. Gráfica del Coeficiente de Transferencia de Masa vs Tiempo en función de las alturas del baño metálico (Inyección Céntrica)	94
Figura C.1. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 0,16m-1, sin escoria, con una inyección de gas de $9.006E^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$ localizada en el centro del cucharón	109
Figura C.2. Gráfico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 0,16m-2, sin escoria, con una inyección de gas de $9.006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$ localizada en el centro del cucharón	110
Figura C.3. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 0,16m-3, sin escoria, con una inyección de gas de $9.006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$ localizada en el centro del cucharón	110
Figura C.4. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 0,16m-1, sin escoria, con una inyección de gas de $1.028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$ localizada en el centro del cucharón	111
Figura C.5. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 16-2 cm, sin escoria, con una inyección de gas de $1.028 \cdot 10^{-05}$ localizada en el centro del cucharón	112
Figura C.6. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 16-3 cm, sin escoria, con una inyección de gas de $1.028 \cdot 10^{-05}$ localizada en el centro del cucharón	112

Figura C.7. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 0,20m-1, sin escoria, con una inyección de gas de $9.006.10^{-06}$ m <sup>3</sup> /s localizada en el centro del cucharón	113
Figura C.8. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 0,20m-2, sin escoria, con una inyección de gas de $9.006.10^{-06}$ m <sup>3</sup> /s localizada en el centro del cucharón	114
Figura C.9. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 0,20m-3, sin escoria, con una inyección de gas de $9.006.10^{-06}$ m <sup>3</sup> /s localizada en el centro del cucharón	114
Figura C.10. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 0,20m-1, sin escoria, con una inyección de gas de $1.028.10^{-05}$ m <sup>3</sup> /s localizada en el centro del cucharón	115
Figura C.11. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 0,20m-2, sin escoria, con una inyección de gas de $1.028.10^{-05}$ m <sup>3</sup> /s localizada en el centro del cucharón	115
Figura C.12. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 0, 20m-3, sin escoria, con una inyección de gas de $1.028.10^{-05}$ m <sup>3</sup> /s localizada en el centro del cucharón	116
Figura C.13. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 0,25m-1, sin escoria, con una inyección de gas de $9.006.10^{-06}$ m <sup>3</sup> /s localizada en el centro del cucharón	116
Figura C.14. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 0,25m-2, sin escoria, con una inyección de gas de $9.006.10^{-06}$ m <sup>3</sup> /s localizada en el centro del cucharón	117
Figura C.15. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 0, 25m-3, sin escoria, con una inyección de gas de $9.006.10^{-06}$ m <sup>3</sup> /s localizada en el centro del cucharón	117
Figura C.16. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 0,25m-1, sin escoria, con una inyección de gas de $1.028.10^{-05}$ m <sup>3</sup> /s localizada en el centro del cucharón	118

- Figura C.17. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-2, sin escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón 118
- Figura C.18. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-3, sin escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón 119
- Figura C.19. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-1, sin escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a 2/3 del radio del cucharón 120
- Figura C.20. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-2, sin escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a 2/3 del radio del cucharón 120
- Figura C.21. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-3, sin escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a 2/3 del radio del cucharón 121
- Figura C.22. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-1, sin escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a 2/3 del radio del cucharón 121
- Figura C.23. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-2, sin escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a 2/3 del radio del cucharón 122
- Figura C.24. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-3, sin escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a 2/3 del radio del cucharón 122
- Figura C.25. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-1, sin escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a 2/3 del radio del cucharón 123
- Figura C.26. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-2, sin escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a 2/3 del radio del cucharón 123

- Figura C.27. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-3, sin escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 124
- Figura C.28. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-1, sin escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 124
- Figura C.29. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-2, sin escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 125
- Figura C.30. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-3, sin escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 125
- Figura C.31. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-1, sin escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 126
- Figura C.32. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-2, sin escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 126
- Figura C.33. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-3, sin escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 127
- Figura C.34. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-1, sin escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 127
- Figura C.35. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-2, sin escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 128
- Figura C.36. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-3, sin escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 128

- Figura C.37. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06}$  m<sup>3</sup>/s localizada en el centro del cucharón 129
- Figura C.38. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16-2, con escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06}$  m<sup>3</sup>/s localizada en el centro del cucharón 129
- Figura C.39. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06}$  m<sup>3</sup>/s localizada en el centro del cucharón 130
- Figura C.40. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05}$  m<sup>3</sup>/s localizada en el centro del cucharón 130
- Figura C.41. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-2, con escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05}$  m<sup>3</sup>/s localizada en el centro del cucharón 131
- Figura C.42. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05}$  m<sup>3</sup>/s localizada en el centro del cucharón 131
- Figura C.43. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06}$  m<sup>3</sup>/s localizada en el centro del cucharón 132
- Figura C.44. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-2, con escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06}$  m<sup>3</sup>/s localizada en el centro del cucharón 132
- Figura C.45. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06}$  m<sup>3</sup>/s localizada en el centro del cucharón 133
- Figura C.46. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05}$  m<sup>3</sup>/s localizada en el centro del cucharón 133

- Figura C.47. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-2, con escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05}$  m<sup>3</sup>/s localizada en el centro del cucharón 134
- Figura C.48. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05}$  m<sup>3</sup>/s localizada en el centro del cucharón 134
- Figura C.49. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06}$  m<sup>3</sup>/s localizada en el centro del cucharón 135
- Figura C.50. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-2, con escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06}$  m<sup>3</sup>/s localizada en el centro del cucharón 135
- Figura C.51. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06}$  m<sup>3</sup>/s localizada en el centro del cucharón 136
- Figura C.52. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05}$  m<sup>3</sup>/s localizada en el centro del cucharón 136
- Figura C.53. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-2, con escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05}$  m<sup>3</sup>/s localizada en el centro del cucharón 137
- Figura C.54. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05}$  m<sup>3</sup>/s localizada en el centro del cucharón 137
- Figura C.55. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 138
- Figura C.56. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-2, con escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 138

- Figura C.57. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 139
- Figura C.58. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 139
- Figura C.59. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-2, con escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 140
- Figura C.60. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 140
- Figura C.61. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 141
- Figura C.62. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-2, con escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 141
- Figura C.63. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $9.006.10^{-06}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 142
- Figura C.64. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 142
- Figura C.65. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-2, con escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 143
- Figura C.66. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $1.028.10^{-05}$  m<sup>3</sup>/s localizada a 2/3 del radio del cucharón 143

Figura C.67. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 0,25m-1, con escoria, con una inyección de gas de $9.006.10^{-06}$ m <sup>3</sup> /s localizada a 2/3 del radio del cucharón	144
Figura C.68. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 0,25m-2, con escoria, con una inyección de gas de $9.006.10^{-06}$ m <sup>3</sup> /s localizada a 2/3 del radio del cucharón	144
Figura C.69. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 0,25m-3, con escoria, con una inyección de gas de $9.006.10^{-06}$ m <sup>3</sup> /s localizada a 2/3 del radio del cucharón	145
Figura C.70. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 0,25m-1, con escoria, con una inyección de gas de $1.028.10^{-05}$ m <sup>3</sup> /s localizada a 2/3 del radio del cucharón	145
Figura C.71. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 0,25m-2, con escoria, con una inyección de gas de $1.028.10^{-05}$ m <sup>3</sup> /s localizada a 2/3 del radio del cucharón	146
Figura C.72. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el <i>Software PicoScope</i> para una altura de 0,25m-3, con escoria, con una inyección de gas de $1.028.10^{-05}$ m <sup>3</sup> /s localizada a 2/3 del radio del cucharón	146
Figura D.1. Equipos empleados para la determinación de transferencia de masa	147
Figura D.2. Montaje para la determinación de transferencia de masa	147
Figura D.3. Montaje para la determinación del Tiempo de Mezcla	148
Figura D.4. Apertura de ojo a una altura constante de 16 cm en el centro con escoria	148
Figura D.5. Burbujeo y Apertura de ojo a una altura constante de 16 cm en el centro con escoria	149
Figura D.6. Apertura de ojo a una altura constante de 20 cm en el centro con escoria	149
Figura D.7. Apertura de ojo a una altura constante de 20 cm en el centro con escoria	150
Figura D.8. Apertura de ojo a una altura constante de 25 cm en el centro con escoria	150

Figura D.9. Burbujeo y Apertura de ojo a una altura constante de 25 cm en el centro con escoria	151
Figura D.10. Vista superior del burbujeo en el centro con escoria	151
Figura D.11. Vista superior del burbujeo a $2/3$ del radio con escoria	152
Figura D.12. Apertura de Ojo vista a $2/3$ del radio con escoria	152
Figura D.13. Burbujeo visto a $2/3$ del radio con escoria	152

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Métodos y Reactivos empleados para la desulfurización del Acero dentro del horno-cuchara	31
Tabla 2.2. Parámetros físicos del Agua y el Acero líquido	38
Tabla 2.3. Parámetros físicos de la Escoria y el Aceite y el Acero líquido	39
Tabla 3.1 Esquema General de la Construcción del Modelo Físico	52
Tabla 3.2. Esquema del Criterio para simular físicamente el comportamiento del Cucharón de Acero	53
Tabla 3.3. Esquema del Montaje del Modelo Físico o Cucharón	53
Tabla 3.4. Dimensiones del Modelo Físico y la Cuchara Siderúrgica	55
Tabla 3.5. Determinación del Tiempo de Mezcla	56
Tabla 3.6. Esquema del Procedimiento para la determinación del Tiempo de Mezcla	56
Tabla 3.7. Esquema detallado de las variables estudiadas para determinar el Tiempo de Mezcla y cantidad de pruebas realizadas	57
Tabla 3.8. Determinación de la Transferencia de Masa en el Modelo Físico	59
Tabla 3.9. Esquema detallado de las variables estudiadas para determinar la Transferencia de Masa	59
Tabla 3.10. Esquema detallado para determinar la Transferencia de Masa y cantidad de pruebas realizadas	60
Tabla 4.1. Valores de Tiempo de Mezcla para cada ensayo realizado	70
Tabla 4.2. Resultados Experimentales de la Transferencia de Masa del Acido Benzoico del Agua (Baño Metálico) al Aceite (Escoria), para la localización excéntrica del inyector	82
Tabla 4.3. Resultados Experimentales de la Transferencia de Masa del Acido Benzoico del Agua (Baño Metálico) al Aceite (Escoria), para la localización céntrica del inyector	82

Tabla 4.4. Resultados Experimentales de la Constante de Transferencia de Masa del Acido Benzoico del Agua (Baño Metálico) al Aceite (Escoria), para la localización Excéntrica del inyector	90
Tabla 4.5. Resultados Experimentales de la Constante de Transferencia de Masa del Acido Benzoico del Agua (Baño Metálico) al Aceite (Escoria), para la localización Excéntrica del inyector	91
Tabla 4.6. Resultados Experimentales del Coeficiente de Transferencia de Masa del Acido Benzoico del Agua (Baño Metálico) al Aceite (Escoria), para la localización Excéntrica del inyector	93
Tabla 4.7. Resultados Experimentales del Coeficiente de Transferencia de Masa del Acido Benzoico del Agua (Baño Metálico) al Aceite (Escoria), para la localización Excéntrica del inyector	94
Tabla. A.1 Correlación de Transferencia de masa en un sistema líquido-líquido	100
Tabla. A.2 Datos para el cálculo del Número de Froude Modificado	101
Tabla. A.3 Valores del Número de Froude Modificado ( $N_{Frm}$ ) para del Modelo Físico para los diferentes caudales de inyección de gas ( $9.006 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ y $1.028 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ )	101
Tabla B.1. Concentraciones de Acido para cada volumen de solución de NaOH	103
Tabla B.2. Concentraciones de ácido benzoico para cada tiempo de ensayo, con localización excéntrica del inyector	103
Tabla B.3. Concentraciones de ácido benzoico para cada tiempo de ensayo, con localización céntrica del inyector	103
Tabla B.4. Concentraciones de ácido benzoico para cada tiempo de ensayo, con localización excéntrica del inyector y caudal $9,006 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	104
Tabla B.5. Concentraciones de ácido benzoico para cada tiempo de ensayo, con localización excéntrica del inyector y caudal $1,028 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$	104
Tabla B.6. Concentraciones de ácido benzoico para cada tiempo de ensayo, con localización céntrica del inyector y caudal $9,006 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	104
Tabla B.7. Concentraciones de ácido benzoico para cada tiempo de ensayo, con localización céntrica del inyector y caudal $1,028 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$	104

Tabla B.8. Concentraciones de ácido benzoico para cada tiempo de ensayo, con localización excéntrica del inyector y caudal $9,006 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	105
Tabla B.9. Concentraciones de ácido benzoico para cada tiempo de ensayo, con localización excéntrica del inyector y caudal $1,028 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$	105
Tabla B.10. Concentraciones de ácido benzoico para cada tiempo de ensayo, con localización céntrica del inyector y caudal $9,006 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	105
Tabla B.11. Concentraciones de ácido benzoico para cada tiempo de ensayo, con localización céntrica del inyector y caudal $1,028 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$	105

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

En los últimos 20 años se han realizado varios trabajos de investigación para comprender la fenomenología y el comportamiento de la inyección de gas dentro del horno cuchara de acero y así poder optimizar el proceso, minimizando el tiempo de mezclado <sup>[1]</sup>. La agitación ineficiente y por largos períodos de tiempo afecta adversamente la eficiencia de los procesos. De esta manera, un punto importante en estos procesos es la relación entre el mezclado y la velocidad de las reacciones que tienen lugar. Diversos estudios han demostrado que la rapidez del mezclado en las operaciones del procesamiento de metales depende de la velocidad de agitación. También se han investigado el efecto de la presencia de una capa de escoria en los cucharones metalúrgicos sobre el tiempo de mezcla. Se encontró que el tiempo de mezcla incrementa con la presencia de la escoria. <sup>[2]</sup>

Así mismo se han realizado trabajos donde se varían las condiciones de inyección de gas en los procesos de acería por simulaciones físicas, ya que a nivel industrial es difícil el estudio de estos comportamientos debido a las altas temperaturas y a la opacidad del acero, además de que esto ocasionaría pérdidas económicas importantes en estos procesos.

Es por ello que con el estudio de modelos físicos se logra el análisis del comportamiento del flujo, trayendo mejoras a la eficiencia del mezclado y a la transferencia de masa dentro de los reactores metalúrgicos.

Existe por lo tanto una oportunidad para desarrollar una metodología que permita la elaboración de un modelo físico de un cucharón de acería, y así poder simular físicamente el comportamiento de las fases presentes, basándose en los criterios de similitud dimensional con el fin de relacionar los fenómenos que ocurren en el modelos a escala real y el prototipo, de manera de diseñar un modelo a escala laboratorio que permita realizar dicho estudio. Con esto se ayudará a plantear estrategias para mejorar la eficiencia de los procesos y a partir de estos resultados de simulación física contribuir al diseño de programas a través de la simulación matemática en estos sistemas, que permita un mejor

manejo, control de la productividad y mejoramiento de calidad del acero, y a su vez contribuir al rendimiento de las ferroaleaciones y adiciones de componentes en los procesos de metalurgia secundaria disminuyendo los costos de los procesos de refinación.

El presente trabajo tiene como objetivo principal el desarrollo de una metodología para estudiar el comportamiento del metal en cucharones de acero a través del desarrollo de un modelo físico a escala, elaborado en plexiglás transparente que permita simular la dinámica de flujo de las fases presentes. La metodología permitirá determinar el efecto de algunas de las variables como el flujo de gas, altura del baño y localización de los inyectores de gas, que influyen en el tiempo de mezcla en cucharones de acero, así como en la transferencia de masa de las fases presentes con el fin de mejorar la eficiencia de los procesos, esto debido a que uno de los problemas de mayor interés han sido la disminución de inclusiones<sup>[3]</sup>, ya que al obtener ferroaleaciones con menor contenido de impurezas se mejora del proceso o la calidad del acero y así la obtención de mayores beneficios económicos en la industria siderúrgica.

De este modo es necesario el control de las variables que intervienen en el procesamiento del acero ya que cualquier descontrol de ellas podría afectar de forma adversa la eficiencia del proceso.

Este estudio se realizó en procesos donde la desulfuración es a través de la agitación inferior del baño. De esta manera basándose en criterios de similitud geométrica, cinemática y dinámica, se lleva a cabo el estudio del comportamiento del flujo en los cucharones de acero y así con una disminución del tiempo de homogeneización del baño e incremento en las velocidades de las reacciones tener una mayor eficiencia de los procesos y mejor calidad en la obtención de las ferroaleaciones.

## CAPITULO II

### FUNDAMENTO TEÓRICO

En los procesos relacionados con la producción de acero, la inyección de gas inerte (Ar ó N<sub>2</sub>) se usa en varias de las etapas de refinamiento para incrementar la velocidad de las reacciones químicas, remover partículas y eliminar gradientes térmicos. Si bien sería deseable conocer la velocidad del fundido para mejorar los procesos actuales y desarrollar nuevos, la medición de dicha velocidad es complicada por la severidad de las condiciones experimentales (altas temperaturas, opacidad visual del acero, etc).<sup>[4]</sup>

#### 2.1 Procesamiento del Acero

La producción de acero involucra diversas etapas de procesamiento que incluye la producción de arrabio, metalurgia primaria y secundaria, colada y laminación en caliente. Estos procesamientos derivan en alguno de los siguientes procesos de fabricación: laminación en frío, conformado, forjado, unión, maquinado, revestimiento y/o tratamiento térmico. Los aceros pueden producirse ya sea a partir de materias primas (por ejemplo, mineral de hierro, carbón y piedra caliza) o de chatarra de acero reciclada.

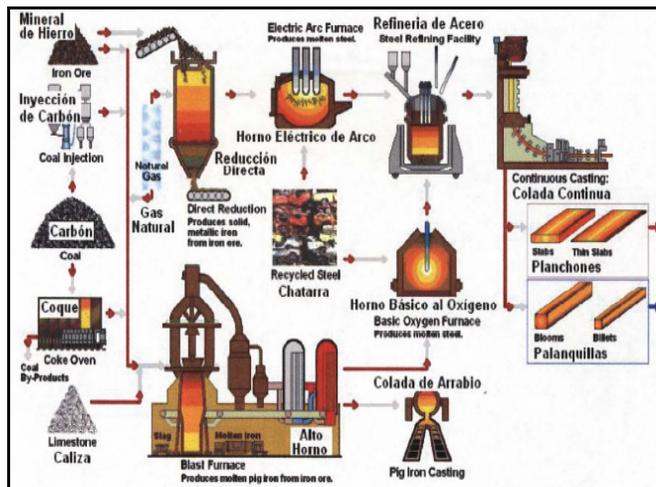


Fig. 2.1. Principales procesos de fabricación de acero en la industria mundial. Ruta Alto horno-Convertidor al oxígeno y la ruta de Reducción Directa: Chatarra-Horno Eléctrico de arco.<sup>[5]</sup>

En respuesta a los requerimientos de la sociedad, el procesamiento del acero está sujeto a innovaciones importantes a fin de reducir costos, mejorar la calidad y minimizar su impacto ambiental.

Estos procesos complejos producen una amplia variedad de composiciones de acero, en muy diferentes formas y tamaños, cada una de ellas a medida de los requerimientos de uso del acero.

En el alto horno el óxido de hierro es reducido por el carbono, en forma de coque, con una inyección de aire caliente. Se agrega piedra caliza para fundir las impurezas en la escoria. El arrabio líquido resultante, conocido como “metal caliente”, tiene una concentración de carbono muy alta para ser útil y se requiere un mayor procesamiento para producir acero a partir de este metal caliente.

En el convertidor LD (BOF) la concentración de carbono en el metal caliente es reducida al nivel requerido mediante la inyección de oxígeno a alta presión. También se agrega algo de chatarra de acero reciclada. Otras adiciones también son necesarias. Su rol es controlar la operación del horno, especialmente el soplado de oxígeno y realizar adiciones apropiadas, antes de colar el acero en una cuchara lista para los procesos de metalurgia secundaria. Las principales funciones del Convertidor LD (BOF) son la descarburación y la eliminación del fósforo del arrabio y la optimización de la temperatura del acero, para que cualquier otro tratamiento, previo a la colada, pueda realizarse con el mínimo recalentamiento o enfriamiento del acero.

En el horno de arco eléctrico (EAF), la chatarra de acero reciclada es fundida por el calor generado a través de potentes arcos eléctricos para producir acero de alta calidad. Su rol es decidir el tipo de chatarra a agregar, cargarla en el horno, fundirla y refinarla, haciendo adiciones apropiadas, antes de colarla en una cuchara lista para los procesos de metalurgia secundaria.<sup>[5]</sup>

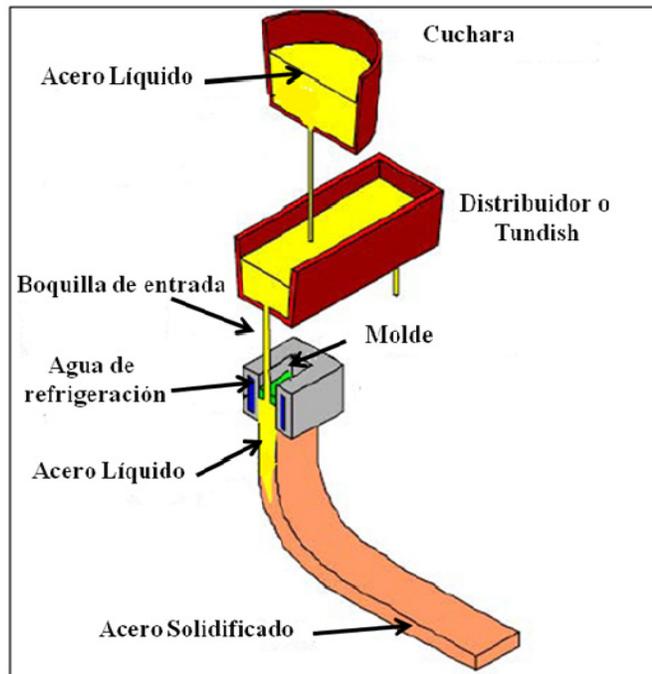


Fig.2.2. Esquema del proceso de fabricación de acero por el método de Colada Continua.<sup>[6]</sup>

### 2.1.1 Metalurgia Secundaria

Al finalizar la metalurgia primaria (ya sea en el Convertidor LD o bien en el Horno de Arco Eléctrico), el acero líquido es “volcado” en la cuchara y transportado a la máquina de colada. Mientras está en la cuchara, el acero podrá someterse a una serie de tratamientos diferentes, tales como ajustes en la composición, agitación, desgasificación y recalentamiento. En su conjunto, esta etapa dentro del proceso de metalurgia se denomina metalurgia secundaria.

La metalurgia secundaria fue desarrollada en respuesta a mayores exigencias de calidad en los aceros. Algunas de las tareas que antiguamente se realizaban en el horno eléctrico fueron desplazadas a la cuchara permitiendo alcanzar más eficientemente los puntos que se mencionan seguidamente.<sup>[5]</sup>

## **Operaciones de la metalurgia secundaria**

La disponibilidad en un establecimiento siderúrgico en particular depende de los tipos de aceros que se fabrican y de la disponibilidad de espacio dentro de la acería. La metalurgia secundaria incluye algunas de las siguientes partes<sup>[5]</sup>:

- ❖ Agitación.
  - a. Lanza.
  - b. Tapón poroso en el fondo de la cuchara.
  - c. Agitación electromagnética (EMS).
- ❖ Horno cuchara.
- ❖ Inyección en la cuchara.
  - a. Polvo.
  - b. Alambre.
- ❖ Desgasificación.
  - a. Tanque desgasificador.
  - b. Desgasificador corriente.
  - c. Desgasificador RH.
  - d. Desgasificador DH.
- ❖ CAS-OB.

### **❖ Agitación y homogeneización**

El proceso de agitación en cuchara es una operación fundamental durante la metalurgia secundaria a fin de:

- a. Homogeneizar la composición química del baño;
- b. Homogeneizar la temperatura del baño;
- c. Facilitar los intercambios entre la escoria y el metal que son esenciales para los procesos tales como la desulfuración;
- d. Acelerar la remoción de inclusiones en el acero.

En la práctica, la agitación se logra mediante:

- a. Inyección de argón a través del acero líquido mediante una lanza sumergida. (Fig. 2.3)
- b. Inyección de Argón mediante tapones porosos en el fondo de la cuchara. (Fig.2.4)
- c. Agitación electromagnética (EMS). (Figura 2.5)

**a. Inyección de argón por abertura a través de una lanza sumergida.**

Ventajas

- ❖ Simple.
- ❖ Buen contacto entre la escoria y el metal, por lo que existe una buena eliminación de azufre y fósforo.
- ❖ Protege el revestimiento de la cuchara.
- ❖ Menor inversión y costos de operación que el EMS.

Desventajas

- ❖ Capa superficial turbulenta.
- ❖ Absorción de nitrógeno y oxígeno.
- ❖ Pérdida y oxidación de aleantes.
- ❖ Reducida limpieza de la aleación.
- ❖ Agitación sólo en la estación de agitación.
- ❖ Efecto de la presión ferrostática levemente menor que la inyección a través del tapón poroso en el fondo de la cuchara.
- ❖ Importantes “zonas muertas” (las zonas muertas son las áreas del baño de acero donde la circulación es escasa o nula).

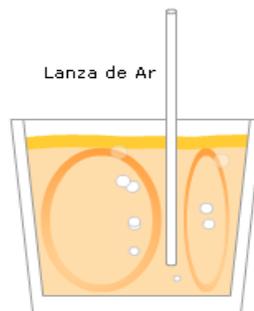


Fig. 2.3. Inyección de Argón a través de la lanza superior.<sup>[5]</sup>

### **b. Inyección de argón por el fondo de la cuchara de acero.**

Actualmente, la mayoría de las cucharas poseen tapones porosos (situados en el fondo de la misma) para la inyección de argón.

#### Ventajas

- ❖ “Zona muertas” minimizadas.
- ❖ Acción de agitación uniformemente dispersa.
- ❖ Efecto de presión ferrostática maximizado.
- ❖ Fuerte circulación descentrada.
- ❖ Excelente contacto entre la escoria y el metal, por lo que existe una buena eliminación de azufre y fósforo.
- ❖ Absorción de hidrógeno y nitrógeno moderada.
- ❖ Acero más limpio.
- ❖ Posibilidad de agitar continuamente la cuchara en cualquier parte.
- ❖ Menor inversión y costos de operación que el EMS.

#### Desventajas

- ❖ Fuerte desgaste localizado en el material refractario.
- ❖ Régimen de construcción más riguroso.
- ❖ Riesgo de “roturas”.

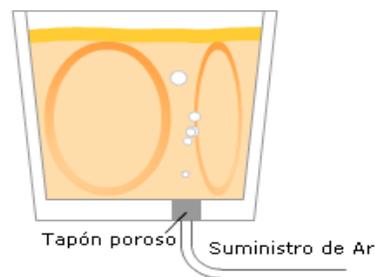


Fig. 2.4. Inyección de Argón a través del tapón poroso de la cuchara.<sup>[5]</sup>

### c. Agitación electromagnética (EMS)

#### Ventajas

- ❖ Salpicadura mínima, lo que implica una menor exposición del acero a la atmósfera y reducción del borde libre (ej. la altura de la pared de la cuchara por encima de la superficie del baño).
- ❖ Flujo uniforme suave.
- ❖ Flujo reversible de gran utilidad cuando se efectúan adiciones de aleación.
- ❖ “Zona muerta” minimizada (las zonas muertas son las áreas del baño de acero donde existe escasa o nula circulación).
- ❖ Mínima absorción de nitrógeno e hidrógeno.
- ❖ Acero más limpio.
- ❖ Bajo índice de pérdida y oxidación de aleantes.
- ❖ Capacidad de agitar en cuchara continuamente utilizando el carro porta-cuchara EMS.
- ❖ Poco desgaste del material refractario.
- ❖ Máxima seguridad y facilidad de construcción.

#### Desventajas

- ❖ Altos costos de operación y capital.
- ❖ Poco contacto entre la escoria y el metal, por lo que habrá una menor eliminación de azufre y fósforo si se lo compara con el burbujeo de argón.<sup>[5]</sup>

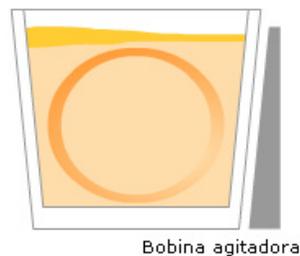


Fig. 2.5. Agitación Electromagnética-EMS. <sup>[5]</sup>

## 2.2 Patrón de Flujo en Sistemas Agitados por Inyección de Gas

En este contexto de elevar la calidad del acero, la metalurgia del horno cuchara juega un papel muy importante en las acerías, donde se practica la desulfuración, desoxidación, ajuste de la composición química y homogeneización de la temperatura que se mencionó anteriormente como metalurgia secundaria.

La cuchara es un recipiente generalmente cilíndrico (con capacidad para 100-300 toneladas de metal fundido) que para ciertos diseños presenta un diámetro superior mayor al inferior, donde el acero proveniente del horno eléctrico (EAF) o del convertidor (BOF) es acondicionado para lograr las características químicas requeridas en el producto final, antes de proceder a su colado.

Para inducir los cambios fisicoquímicos necesarios para la homogeneización, el acero es agitado dentro de la cuchara mediante la inyección de gas inerte. (Usualmente  $0,0015 \text{ Nm}^3/\text{min.ton}$ ) a través de uno o más tapones porosos ubicados en el piso del sistema. Estos tapones tienen forma de cono truncado (para facilitar su recambio), y presenta un diámetro superior que ronda los 100mm y uno inferior de aproximadamente 200mm.

La inyección del gas en el piso de la cuchara (Figura 2.5), produce en la fase líquida un flujo de recirculación que estimula el mezclado e incide en la distribución de tiempos de residencia de los aleantes que pudieran haber sido agregados, en la separación de inclusiones no metálicas, en el grado de emulsificación de la escoria que se encuentran en la superficie del baño, así como en la velocidad de las reacciones que tienen lugar entre las distintas fases: gas, metal fundido y escoria. <sup>[1]</sup> De esta manera durante la operación de la cuchara, los caudales de trabajo pueden ser muy diferentes dependiendo de la tarea a realizar. Por lo tanto, podemos separar el proceso de agitado en dos tipos, en función del caudal a inyectar:

- ❖ **Agitado Fuerte:** permitir la emulsificación de la escoria y acelerar de esta manera la transferencia de masa entre esta y el metal fundido, encontrándose la escoria en forma

de una fina capa que flota por sobre la masa de acero líquido. Aquí hay atrape de escoria en el acero, por lo tanto para esta operación es primordial conocer en forma precisa el patrón de velocidades del líquido para poder predecir el atrape de escoria.

- ❖ **Agitado débil:** para lograr la flotación de impurezas y restos de escoria emulsificados en la etapa anterior, también la homogeneización térmica y/o química del acero, de manera que en éste régimen también es importante predecir las velocidades del líquido pero se suma ahora la necesidad de conocer la distribución de las burbujas de gas y la velocidad con la cual éstas inciden.<sup>[6]</sup>

El ingreso de gas produce la ‘succión’ del líquido adyacente (en la porción inferior del sistema) y su arrastre en dirección vertical. Este fenómeno, conjuntamente con la difusión turbulenta que la fase dispersa experimenta en dirección radial a medida que asciende por el baño, derivan en un aumento del diámetro de la pluma bifásica, que adquiere así una forma cónica característica (ver Fig. 2.6). Por otra parte, en las inmediaciones de la superficie, el gas abandona el sistema y el líquido libre de él se mueve hacia las paredes de la cuchara, descendiendo a través de ellas para cerrar así su circulación a través del baño. Entonces el flujo de líquido va hacia la pluma en el fondo del sistema y hacia la periferia cerca de la superficie libre.<sup>[4]</sup>

La energía con que el gas agita el sistema puede provenir esencialmente de tres fuentes, a saber:

- ❖ El trabajo de expansión que éste realiza debido al calentamiento y a la caída de presión que tienen lugar en la inyección.
- ❖ La transferencia hacia el sistema, en la región próxima al inyector, de la energía cinética con que ingresa el gas.
- ❖ El trabajo de expansión que el gas realiza en la pluma bifásica como consecuencia de una disminución progresiva en la presión estática del sistema.

Asimismo, si se asume que la expansión que sufre el gas, producto de un aumento en su temperatura, es isobárica y reversible (y que, de acuerdo a lo discutido en el párrafo anterior, dicha expansión ocurre contra la presión estática), el trabajo realizado se transfiere

hacia el sistema si el calentamiento tiene lugar debido a la diferencia de temperatura que existe entre las fases, o se consume en la tubería de alimentación si éste ocurre durante el pasaje de la fase dispersa a través del inyector.

Los cálculos de velocidad de calentamiento del gas indican que, nuevamente en sistemas industriales prevalece el segundo de los casos, por lo que el trabajo de expansión por calentamiento tampoco incide apreciablemente en la agitación del sistema.

De la misma forma puede desestimarse el aporte de la ‘succión’ del líquido hacia el jet de gas que se mencionó anteriormente a la generación de turbulencia; ya que si bien la velocidad con que el fluido desciende a través de las paredes es apreciable, se vuelve casi nula en la región cercana al piso de la cuchara (lo que origina la formación de las llamadas zonas muertas), donde, como ya se dijo, dicha ‘succión’ ocurre preferentemente.

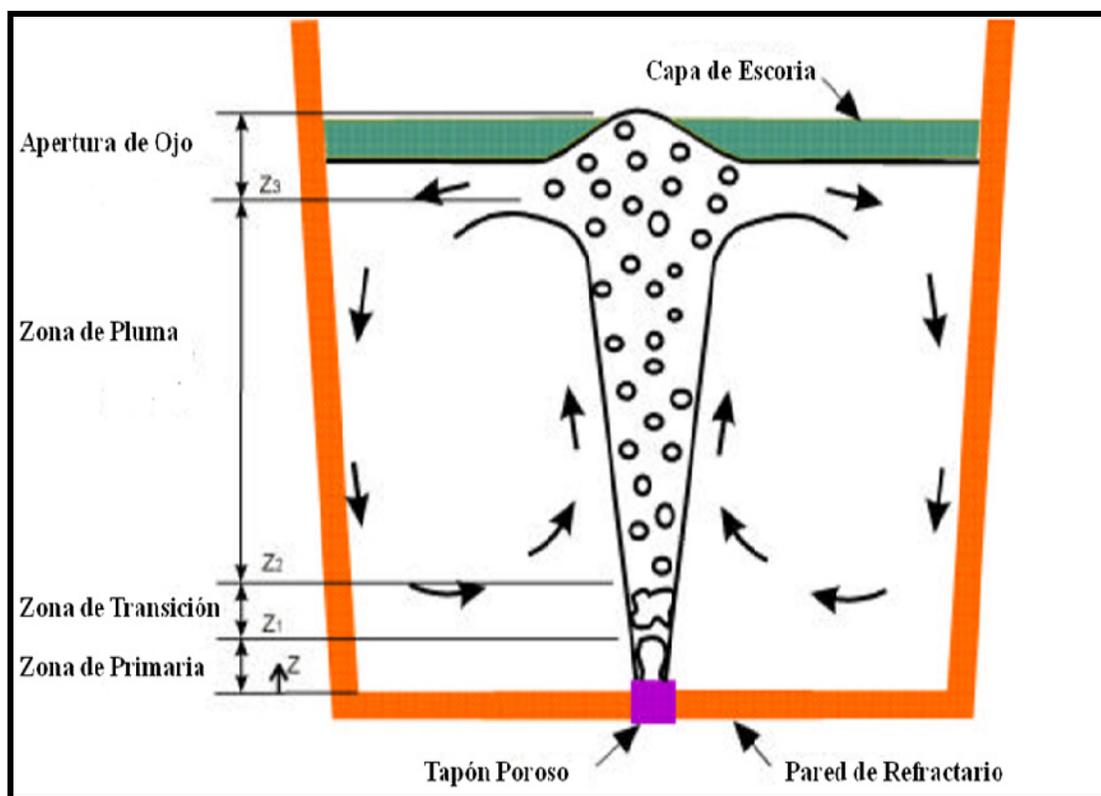


Fig. 2.6. Características de la región bifásica (pluma bifásica) en sistemas agitados por inyección de gas.<sup>[7]</sup>

Por otra parte para un caudal másico de gas inyectado  $w^g$ , la energía cinética transferida al baño por unidad de tiempo, es inversamente proporcional al diámetro del inyector,  $d_o$ , elevado a la cuarta potencia. [4]

$$\dot{E}_{cin} = \frac{8(w^g)^3}{(\rho^g)^2 \pi^2 d_o^4} \quad (2.1)$$

Como en la industria siderúrgica el gas se introduce en el sistema a través de tapones porosos y debido a que el acero no moja el material refractario del cual está hecho, el diámetro involucrado en la expresión anterior es en realidad el del tapón poroso, por lo que la contribución de la energía cinética con la que gas entra al sistema a la agitación del baño puede despreciarse.

Como consecuencia de lo anterior, se concluye que el trabajo de expansión que realiza el gas contra la presión estática, el cual disminuye a medida que este asciende en la pluma bifásica, es la principal fuente de agitación del sistema.

Así la zona de la pluma se puede dividir en cuatro regiones desde el fondo del cucharón, según el comportamiento de las burbujas [7]:

- ❖ Región de Momentum o Zona Primaria, donde el flujo es gobernado por las fuerzas de inercia.
- ❖ Región de Transición, donde el gas pierde su energía cinética y se desintegra en pequeñas burbujas.
- ❖ Zona de Burbuja, donde las burbujas ascienden por el efecto de la diferencia de densidad entre el gas y el acero líquido.
- ❖ Región Superficial, que es la zona más cercana a la superficie.

Así de manera general, se forma una primera región, cercana a la inyección, en la que se produce la pérdida de la energía cinética con que es introducido el gas por transferencia de cantidad de movimiento hacia el líquido (zona de momento); y una

segunda región en la que el flujo está gobernado por la diferencia de densidades que existe entre las fases (zona de flotación).

En la primera zona es predominante el rol que juegan las fuerzas viscosas, ya que, el movimiento de la fase líquida se debe a la transferencia de cantidad de movimiento desde el jet de gas. En la segunda, en cambio, el flujo está gobernado por la fuerza de flotación que actúa sobre las burbujas. Según Mazumdar<sup>[8]</sup> la fluidodinámica de las cucharas en las condiciones en que éstas operan por lo general está regida principalmente por las fuerzas de inercia y no por las viscosas.

La transición de una región a otra puede determinarse a partir de la llamada altura de desarrollo del flujo,  $z$ , que indica la altura de penetración de la zona de momento, o lo que es lo mismo, la distancia a partir de la cual el flujo en la región de flotación se desarrolla completamente.

En base a los resultados experimentales que se encuentran en la bibliografía puede señalarse que:

- ❖ Tanto la fracción volumétrica de gas como la velocidad de líquido en dirección axial disminuyen bruscamente en la región inmediata a la inyección (lo que se explica teniendo en cuenta que, como se dijo, el gas se desacelera en la región más próxima a su lugar de ingreso por transferencia de cantidad de movimiento hacia el líquido) y que para altura medida desde el inyector el módulo de ambas variables se incrementa con el caudal de gas.
- ❖ Los perfiles radiales de velocidad axial de gas y de líquido muestran un máximo sobre el eje de la pluma bifásica, lo que coincide con la posición de las burbujas más grandes. Estos perfiles, así como los parámetros que caracterizan a la fase dispersa (fracción volumétrica de gas,  $\alpha^g$ , y tamaño de burbuja) pueden ser aproximados satisfactoriamente, en la región bifásica, por una distribución gaussiana, excepto en la zona próxima al inyector.

### 2.2.1. Modos de dispersión del gas

La pluma que se genera por sobre el tapón poroso presenta ciertas características para diferentes caudales volumétricos. Conforme se incrementa el caudal de gas suministrado al tapón, podemos distinguir tres modos de dispersión del gas (Fig. 2.7). Siendo que dichos modos guardan relación con la frecuencia axial de las burbujas, se utiliza esta última para caracterizar el modo de burbujeo:

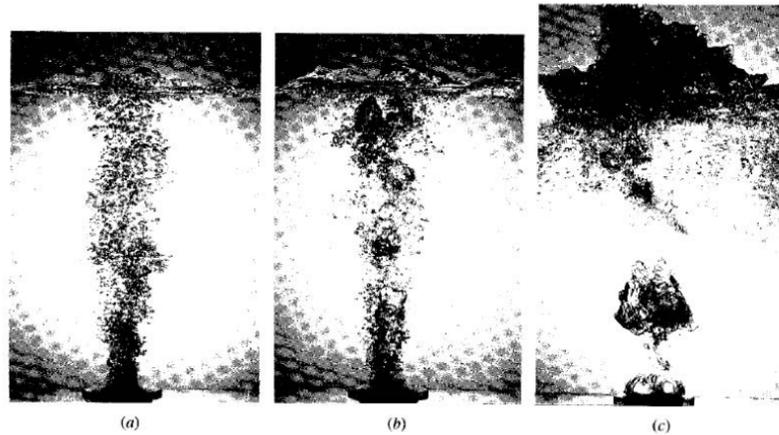


Fig. 2.7. Modos de dispersión del gas en tapones porosos: a) burbujas discretas, b) coalescencia incipiente, c) coalescencia.<sup>[6]</sup>

- ❖ **Modo de burbujas discretas:** este modo comprende el rango  $0-14 \text{ cm}^3/\text{s cm}^2$  de caudal de gas por unidad de superficie del tapón. Como se observa en la figura 2.7, entre los  $0-8 \text{ cm}^3/\text{s cm}^2$  la frecuencia de burbujeo aumenta con el caudal, esto es debido a la activación de poros del tapón con el aumento del suministro de gas. Entre los  $8$  y  $14 \text{ cm}^3/\text{s cm}^2$  la frecuencia se mantiene aproximadamente constante, este rango corresponde al rango de burbujas discretas completamente desarrollado.
- ❖ **Modo de coalescencia incipiente:** entre los  $14$  y  $40 \text{ cm}^3/\text{s cm}^2$  se comienzan a formar agrupaciones de burbujas, algunos de los cuales coalescen en pequeños paquetes, provocando una reducción en la frecuencia. El fenómeno se intensifica hasta los  $40 \text{ cm}^3/\text{s cm}^2$  donde la frecuencia se vuelve estable con el caudal.

❖ **Modo de coalescencia:** corresponde a valores de caudal específico superiores a  $40 \text{ cm}^3/\text{s cm}^2$ . En este modo una gran burbuja se forma sobre el tapón cubriéndolo por completo. Durante su ascenso la burbuja se inestabiliza rompiéndose en burbujas más pequeñas. La frecuencia permanece constante con el caudal reduciéndose con la altura debido a la expansión de la pluma y al aumento de la cantidad de líquido en la zona de dos fases.<sup>[6]</sup>

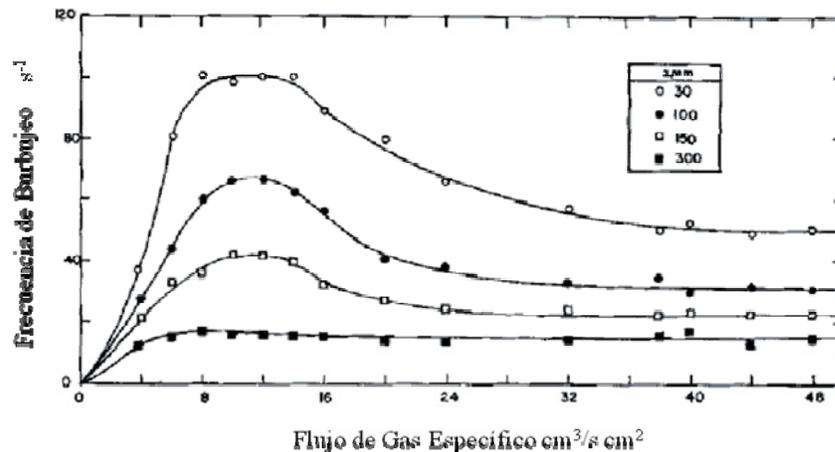


Fig. 2.8. Variación de la frecuencia de las burbujas con el caudal específico para distintas posiciones por encima del tapón poroso.<sup>[6]</sup>

### 2.2.2 Área de apertura de ojo.

El área de apertura del ojo en la escoria está íntimamente asociada al volumen de escoria y afecta en gran medida a la eficiencia del proceso. Por lo que una determinación precisa de la misma es crucial para conocer la cantidad de escoria atrapada durante la etapa de agitado fuerte.

Cuando la capa de escoria es fina y el caudal de gas es elevado (agitado fuerte), el acero líquido que llega a la interfaz acero-escoria desplaza a la escoria en forma radial (Figura 1.8), provocando que el metal se ponga en contacto con la atmósfera. El área de la sección transversal aproximadamente circular expuesta a la atmósfera es lo que se denomina área de apertura del ojo “ $A_o$ ”.<sup>[6,8]</sup>

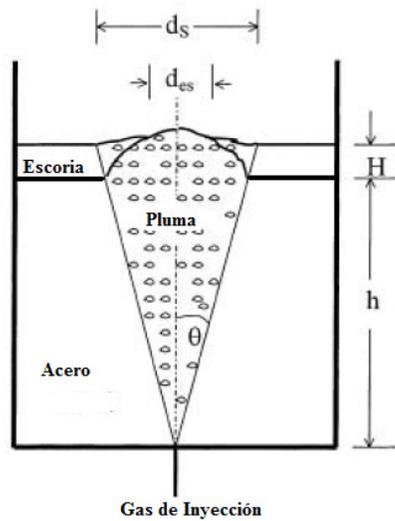


Fig. 2.9. Representación esquemática de una cuchara siderúrgica para un agitado fuerte.<sup>[6]</sup>

### 2.2.3 Atrape de escoria

Las reacciones químicas entre dos líquidos inmiscibles en sistemas agitados por inyección de un gas son de considerable interés en la industria siderúrgica. Un gran número de trabajos experimentales han sido llevados a cabo con la finalidad de clarificar la relación existente entre las reacciones químicas y el atrape de escoria para la interfaz acero-escoria en cucharas siderúrgicas, dado que las mismas influyen considerablemente en la obtención de un acero de buena calidad.

Durante el agitado fuerte, ligamentos y gotas tienden a formarse en la interfaz acero-escoria originando un incremento significativo del área interfacial, afectando por ende a la reacción química.

A continuación presentamos dos métodos que nos permiten estimar la dispersión de escoria en el metal durante el agitado por inyección de argón.<sup>[6]</sup>

#### ❖ Velocidad Crítica de Atrape de Escoria

El atrape de escoria en el acero se presenta en mayor medida en la zona adyacente al ojo (Figura 2.10), donde el acero líquido en su retorno al núcleo arrastra gotas y ligamentos de la capa de escoria debido a las altas tensiones de corte. Por este motivo resulta de interés

práctico poder determinar las velocidades en la interfaz para las distintas condiciones de flujo, pudiendo de esta forma predecir si existe o no atrape.

A continuación se calcula la velocidad interfacial crítica necesaria para remover gotas de la capa de escoria. Dicha velocidad viene dada por<sup>[6]</sup>:

$$V_{Crit}^{Inter} = \left( 48\sigma_{ac,es} g \frac{(\rho_{ac} - \rho_{es})}{\rho_{es}^2} \right)^{1/4} \quad (2.2)$$

donde  $\sigma_{ac,es}$  es la tensión superficial entre el acero y la escoria.

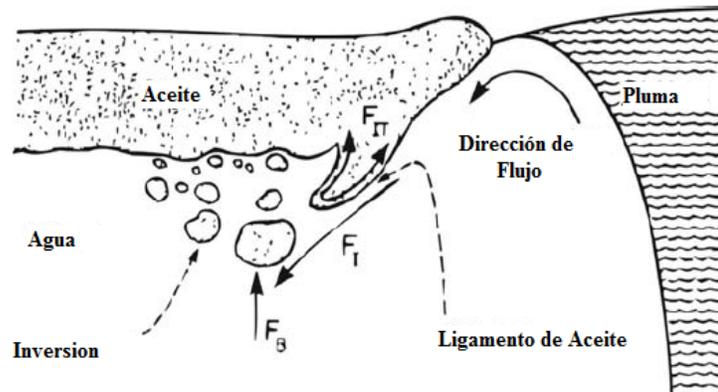


Fig. 2.10. Representación esquemática del atrape de escoria en el ojo.<sup>[6]</sup>

#### ❖ Número de Weber

El número de Weber en torno a la interfaz acero-escoria es utilizado como un indicador del atrape de escoria en el acero. Usando modelos físicos, se ha establecido<sup>[8]</sup> que el atrape de escoria en el acero se inicia cuando el número de Weber es igual a 12,3.

La capa de escoria que está sujeta a las fluctuaciones del flujo de acero líquido puede, bajo ciertas condiciones, deformarse y eventualmente desprender gotas o ligamentos de escoria.

Las fuerzas de inercia que son inducidas por las fluctuaciones tienen un efecto desestabilizador sobre la capa de escoria, mientras que la fuerza debida a la tensión superficial tiene la tendencia de mantener la forma de la capa, o sea, actúa como

mecanismo de estabilización. La relación de estas fuerzas es conocida como número adimensional de Weber que queda definido por<sup>[6]</sup>:

$$We = \frac{u_{r,ac}^2 \rho_{ac}}{\sqrt{\sigma_{ac,es} g (\rho_{ac} - \rho_{es})}}, \quad (2.3)$$

### 2.3 Fenómenos de Transferencia de Masa en Sistemas Agitados por Inyección de Gas

En los procesos relacionados con el ajuste de la composición del acero líquido, que ocurren previos a la etapa de colado, la transferencia de masa se produce, en general, entre el metal fundido y la escoria que cubre la superficie del baño (para impedir su oxidación con la atmósfera), una fase gaseosa, o un sólido no metálico. En la producción de acero sólo resultan relevantes los procesos que involucran más de una fase (procesos heterogéneos), ya que las fases individuales se encuentran comúnmente en equilibrio termodinámico, y por lo tanto, no ocurren reacciones químicas en su interior. Además del agitado, que permite lograr una distribución uniforme de temperatura y composición en el acero (e impedir la solidificación del metal en las paredes), las cucharas funcionan como reactores químicos, en los procesos de desulfurización por agregado de cal,  $\text{CaC}_2$  o Mg; desoxidación por adición de Si o Al; desfosfatización, y desgasificación al vacío o mediante gases de purga.

Los procesos que se llevan a cabo en la cuchara suele tener dos etapas y una duración de 20 a 40 min. Una de agitado fuerte y otra de agitado débil como ya se mencionó anteriormente.

En la mayoría de las cucharas industriales, en las que el flujo es esencialmente turbulento, el mezclado se lleva a cabo mediante dos mecanismos: convección y difusión turbulenta. El tiempo característico del fenómeno convectivo en estos sistemas es de apenas unos pocos segundos (las dimensiones típicas varían entre 2 a 3 m de diámetro y 2 a 4 m de altura, y las velocidades usuales alcanzan los 0,3 m/s).

Por lo tanto, el fenómeno de mezclado está limitado por difusión turbulenta a través de las distintas líneas de corriente, lo que está de acuerdo con el hecho de que éste fenómeno depende en gran medida de la energía total que haya sido impartida al sistema (proviene de la expansión del gas en la pluma bifásica).

Muchas de las operaciones metalúrgicas tienen como objetivo la remoción de algún componente indeseado en el metal mediante la inyección de un reactante específico. Para que el proceso resulte eficiente, se requieren por un lado altos coeficientes de transferencia de materia en la región en la que se produce la reacción (que generalmente pueden asociarse con altos niveles de turbulencia); y por otro un transporte convectivo eficaz que permita a los reactivos llegar hacia estas regiones.

En este sentido, las cucharas agitadas por inyección de gas inerte representan una solución ideal, porque la energía cinética turbulenta es alta en la pluma bifásica y en la interfase metal-escoria, donde las reacciones tienen lugar. Por otra parte, el transporte convectivo de materia en el seno del líquido es lo suficientemente eficiente como para proveer los reactivos a la zona de reacción.

Contrariamente a lo que ocurre con la eliminación de Si, Mn, S y P; la remoción de gases disueltos en el acero (por ejemplo, nitrógeno) generalmente no puede lograrse mediante reacciones metal-escoria, requiriéndose, en estos casos, procesos especiales como el denominado tanque desgasificador, que básicamente consiste en la inyección de una corriente de gas inerte (argón) dentro de una cuchara cuya superficie se encuentra a presión reducida (desgasificación al vacío).

En estos casos, la extracción de gases disueltos puede explicarse si se tiene en cuenta que en la región inferior de la cuchara (donde ocurre la inyección de argón) la presión parcial de estos gases en las burbujas de argón resulta nula, lo que constituye la fuerza impulsora para la transferencia de las especies disueltas hacia la corriente de gas inyectado. Sin embargo, los altos valores de presión ferrostática que existen en la región inferior del sistema, hacen que esta transferencia ocurra apreciablemente sólo en los 50 cm

más próximos a la superficie libre, donde esta presión resulta menor y donde la expansión de las burbujas, que surge como consecuencia del evacuado de la superficie, acelera el mecanismo de transferencia.

La zona que resulta más activa para la remoción de gases disueltos es entonces la región de la cuchara cercana a la superficie libre, mientras que, por las mismas razones, la región termodinámicamente más favorable para la absorción de gases es la que se sitúa en las proximidades del inyector. El proceso de desgasificación al vacío fue desarrollado en la década del 50 para reducir el contenido de hidrógeno en aceros destinados a forja. Desde entonces, se han desarrollado otros procesos que incluyen la remoción de N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, y C (como CO). El más importante de estos procesos es la descarburización al vacío, en la que un acero de bajo contenido de carbono (0.05% C) y altos niveles de oxígeno disuelto se somete a presiones superficiales inferiores a 1 mbar. Las concentraciones de estas dos especies en el metal fundido descienden durante el tratamiento, debido a que las mismas se combinan químicamente según:



La reacción se ve favorecida a bajas presiones y generalmente, está limitada por la transferencia de carbono u oxígeno hacia la interfaz gas-líquido. El CO (g) es extraído del sistema mediante una corriente de gas inerte, pudiéndose obtener, como resultado, niveles de C inferiores a 20 ppm en el producto final. [4]

## **2.4. Desulfuración en Cucharones de Acero**

El Azufre (S) tiene un aspecto muy negativo en las propiedades de los productos de acero. El azufre en el hierro proviene principalmente del coque, y del gas natural tradicionalmente el azufre es controlado en los altos hornos, muy pocas cantidades de azufre son eliminadas en la metalurgia primaria, debido al ambiente oxidante, una excepción es en los hornos de arco eléctrico (EAF), donde aceros de bajo azufre son producidos por las dos estaciones de refinación. Pero la alta demanda de Aceros ULS, y la incapacidad de los altos hornos llevaron a realizar una desulfuración externa del hierro

liquido en el cucharón, durante la transferencia en el procesamiento del acero. La desulfuración se ha logrado empleando escoria sintética (EXOSLAG), y en otros casos el emplear solo Silicato de Calcio produce aceros ULS.<sup>[9]</sup>

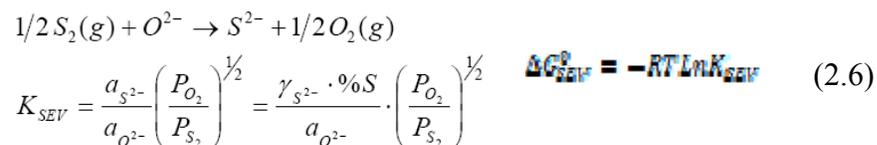
Durante la solidificación el S puede combinarse con el Fe dando lugar a la formación de FeS.



Este sulfuro de hierro tiene un bajo punto de fusión (1188 °C) por lo que durante la laminación en caliente estos precipitados están líquidos, provocando la generación de desgarres en el producto laminado.

Este problema se soluciona agregando Mn al acero, de manera que al solidificar, el S precipite como MnS. Estas inclusiones tienen un mayor punto de fusión que el FeS por lo que se encuentran sólidas durante la laminación. No obstante, estas partículas son fácilmente deformables, dando origen a inclusiones alargadas en el producto final. Estas inclusiones alargadas son responsables de las fracturas inducidas por hidrógeno (HIC), típicas en productos de acero que trabajan en medios con altos contenidos de ácido sulfhídrico (sour service), como por ejemplo algunos pozos de petróleo y gas. Es evidente, entonces, la importancia de lograr una buena desulfuración, y este objetivo ha sido uno de los grandes impulsores del desarrollo de la metalurgia secundaria<sup>[9]</sup>.

Para analizar la termodinámica de la desulfuración se considera la siguiente reacción de equilibrio entre la escoria y su vapor:



Donde:

$K_{SEV}$ : constante de equilibrio de la reacción.

$P_{O_2}$ : presión parcial del oxígeno.

$P_{S_2}$ : presión parcial del azufre.

$\gamma_{S_2}$ : coeficiente de actividad del S disuelto en la escoria.

%S: porcentaje en peso del S en la escoria.

Dado que no es posible determinar experimentalmente los valores de  $K_{SEV}$ , y  $a_{O^{2-}}$ , entonces se define la capacidad de sulfuro respecto al equilibrio escoria-vapor,  $C_S$ , como muestra la ecuación siguiente:

$$C_S = K_{SEV} \cdot \frac{a_{O^{2-}}}{\gamma_{S^{2-}}} = \%S \cdot \left( \frac{P_{O_2}}{P_{S_2}} \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

Los valores de %S,  $P_{O_2}$ ,  $P_{S_2}$  se pueden medir en el laboratorio por lo que se puede determinar el valor de  $C_S$  para distintas composiciones de escoria y temperatura. Usando esta metodología se han desarrollado en la literatura distintos modelos para calcular  $C_S$  [9].

La ecuación (2.8) considera el equilibrio del azufre entre vapor y escoria. Alternativamente, se puede plantear el equilibrio metal-escoria como muestra la ecuación (2.9):



$$K_{SME} = \frac{a_{S^{2-}} \cdot a_{\underline{O}}}{a_{O^{2-}} \cdot a_{\underline{S}}} \quad (2.9)$$

Siendo:

$a_{S^{2-}}$ : actividad del ión  $S^{2-}$  en la escoria

$a_{\underline{O}}$ : actividad de oxígeno en el acero

$a_{O^{2-}}$ : actividad del ión  $O^{2-}$  en la escoria

$a_{\underline{S}}$ : actividad del azufre en el acero

$K_{SME}$ : constante de equilibrio de la reacción (10).

De manera similar se puede definir la capacidad de sulfuro respecto al equilibrio metal-escoria ( $C_s'$ ) como muestra la siguiente ecuación:

$$C_s' = K_{SME} \cdot \frac{a_{O^{2-}}}{\gamma_{S^{2-}}} = \%S \cdot \frac{a_O}{a_S} \quad (2.10)$$

Asimismo, se han desarrollado distintos modelos que permiten calcular el valor de  $C_s'$  en función de la composición de la escoria y de su temperatura.

Es importante destacar que los valores de  $C_s$  y  $C_s'$  están relacionados entre sí. Esta relación se puede establecer usando las reacciones de equilibrio del O y S entre metal y vapor:



Sumando (2.6), (2.11) y (2.12) se obtiene la ecuación (2.10) de esta manera se puede obtener la relación entre las variaciones de energía libre de Gibbs como muestra (2.13)

$$\Delta G_{SME}^{\circ} = \Delta G_{SEV}^{\circ} + \Delta G_S^{\circ} + \Delta G_O^{\circ} \quad (2.13)$$

Sabiendo que:

$$K_i = \exp \frac{-\Delta G_i}{RT} \quad (2.14)$$

Tendremos que (2.13) se transforma en:

$$\ln K_{SME} = \ln K_{SEV} + \ln K_S + \ln K_O \quad (2.16)$$

Reemplazando (2.9) y (2.10) en (2.16) obtenemos la relación entre  $C_s$  y  $C_s'$  buscada

$$\ln C_s' = \ln C_s + \ln K_S + \ln K_O \quad (2.17)$$

Volviendo a la ecuación (2.10) podremos reagrupar los términos de la siguiente forma:

$$C_{S'} = \%S \cdot \frac{a_O}{a_S} = \%S \cdot \frac{a_O}{f_S \cdot \underline{S}} \quad (2.17)$$

$$\frac{\%S}{\underline{S}} = \frac{C_{S'} \cdot f_S}{a_O} = L_S \quad (2.18)$$

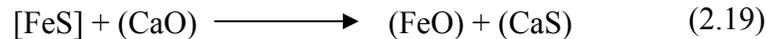
Siendo:

$f_S$ : coeficiente de actividad del S en el acero

$L_S$ : partición de azufre

Como se puede ver de la Ecuación 2.18, obtener una buena desulfuración en el acero, significa tener  $L_S$  lo más alto posible. Para lograr esto el valor de  $C_{S'}$  debe ser alto, lo que significa una escoria básica; y una baja actividad de O en el acero, por lo tanto este debe estar correctamente desoxidado <sup>[3]</sup>.

La desulfuración aparece entonces como un problema complejo. La reacción que se forma es:



Este es un proceso muy endotérmico ya que requieren una temperatura alta para que la reacción proceda a la formación de  $\text{CaS}$ . También depende del contacto entre el sulfuro disuelto en el baño de acero y la cal en la escoria, por lo tanto requiere de una fuerte agitación, como la obtenida durante la descarburación, cuando el monóxido de carbono escapa del baño y da un fuerte "burbujeo" en el horno de arco eléctrico o de hogar abierto (siendo el oxígeno un agitador excelente).

Además, otras dos consideraciones de desulfuración son:

- ❖ La solubilidad del  $\text{CaS}$  en la escoria es bajo, raras veces, más de 0,15% S puede ser disuelto en una escoria de acero. Así, un límite en el nivel de desulfuración puede llegar cuando no hay caída de azufre en el baño a pesar de una alta temperatura y de la buena

agitación. Por un momento, las pruebas hechas en el laboratorio obtenidas en el baño reportaron, por ejemplo: 0,035; 0,032; 0,030; 0,029; 0,029%; el contenido de azufre en la escoria se ha alcanzado bajo la temperatura y las condiciones de oxidación. La única alternativa, entonces, es hacer más escoria para aumentar el contenido de azufre, lo que significa un aumento del uso de cal y fluorita, más combustible y oxígeno para que sean la solución, dentro del espacio del horno.

- ❖ El FeO se presenta como un producto, en el lado derecho de la ecuación, ya que la siderurgia es básicamente el proceso de oxidación, mucho FeO se genera en el transcurso de un calentamiento normal. Así la descarburación eficiente crea las condiciones menos favorables para la buena eliminación de azufre. Para decirlo de otra manera, descarburación, desiliconización, y defosforización por un lado y desulfuración por el otro son incompatibles<sup>[3]</sup>.

#### **2.4.1 Metalurgia básica y su escoria de control-basicidad IBv**

La oxidación en todos los casos, excepto en el carbono, es seguida por la neutralización de un óxido ácido por un óxido básico: la cal. También se necesita cal para la desulfuración. Si tenemos en cuenta el viejo principio de que la neutralización de un ácido (no metálico) por una base de óxido (metálico) resulta en la formación de una sal con un punto de fusión más bajo que cualquiera de los óxidos originales, pero dos de óxidos ácidos o dos óxidos básicos no interactúan, el significado del término "básico" es bien claro: dado que el material de cal, muy básico, es el flujo principal de la siderurgia, los revestimientos del horno debe ser de una base o también serían disueltos por la cal necesaria para eliminar el silicio, fósforo y azufre del baño de acero. Así, todos los revestimientos de los hornos en la fabricación de acero en el proceso básico se basan en óxido de magnesio (MgO).

Se hizo referencia al exceso de cal para neutralizar los óxidos ácidos y mantenerlos en la escoria<sup>[3]</sup>:



Una medida de la basicidad de la escoria es su "relación de basicidad (IB<sub>v</sub>)". Este número representa un exceso de ácidos y bases, en la mayoría simplemente se define como (CaO)/(SiO<sub>2</sub>). Sin embargo, esta expresión no es suficientemente precisa, pero otra es:

$$\text{IB}_v = \text{CaO} / (\text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5) \quad (2.21)$$

Esta expresión se utiliza con frecuencia en la práctica, ya que el MgO por ser un desulfurizador débil suele ser ignorado.

Formulaciones más precisas, muestran un valor más complejo de la basicidad (IB<sub>v</sub>). Y se basan en que parte de los óxidos que son anfotéricos: en un medio fuertemente básico se comportan como los ácidos y en un medio ácido como las bases. Por lo tanto los óxidos anfóteros pueden consumir un poco de cal, combinado con esto actúan como ácidos. La alúmina y óxido de hierro son ejemplos de este comportamiento.

Por lo tanto Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, con unos coeficientes menores que la unidad, puede aparecer en el denominador de la ecuación de basicidad (IB<sub>v</sub>). En la práctica, una proporción mínima de 2,2 IB<sub>v</sub> se necesita para neutralizar la sílice y pentóxido de fósforo, y sólo con IB<sub>v</sub> superior a 3 la desulfuración se convierte efectiva. Por otra parte, escorias, con mayores tasas de alrededor de 4,5 IB<sub>v</sub> que son pesadas, viscosas, no se mezclan fácilmente con el acero, por lo tanto no son muy eficientes.<sup>[6]</sup>

#### **2.4.2 Desulfuración y otros tratamientos de acero en la cuchara**

El desarrollo del "Cucharon Metalúrgico" fue causado por las crecientes demandas de mejorar las propiedades del acero, como la alta resistencia al impacto a baja

temperatura; rendimiento uniforme a lo largo, ancho, espesor e incluso a través de las secciones, excelente soldabilidad, entre otros.

La mayoría de estos requiere la reducción de la cantidad de inclusiones, principalmente sulfuros, cambiando la forma y el cumplimiento de estos objetivos, los procesos normales de producción de acero dieron lugar a graves sobreesfuerzos de los hornos con la pérdida consiguiente de su productividad y los costos aumentaron bruscamente. Así, una vez que estas posibilidades se hicieron realidad, un cambio en el proceso de la refinación del horno a la cuchara comenzó a tener lugar. El segundo factor fue el deseo de extender la colada continua de moderado a alto grado de calidad. Una vez más se podría conseguir mucho por la sobrecarga severa de los hornos, pero gran parte de la refinación necesaria para producir productos de alta calidad por colada continua se puede hacer en la cuchara.

Un factor que rara vez se reconoce en el desarrollo de la metalurgia de cuchara fue la necesidad de compensar la reducción del radio del acero semiacabado proveniente de la colada continua para el producto terminado.

Una fuerte reducción del tamaño del laminado o forjado promueve la destrucción de la estructura original, reparto desigual y la ruptura de las inclusiones. Así, para usar un ejemplo: 2 pulgadas (50mm) de espesor de una placa laminada de 30 pulgadas (762 mm) de espesor de lingotes que podría tener propiedades adecuadas para la aplicación solicitada, la relación de reducción es del 15%. La misma placa laminada de 8 pulgadas (203 mm) de espesor constante de losas de concreto, con una tasa de reducción de sólo el 4%, es probable que no superen las pruebas a menos que la mayoría de los ensayos mecánicos del acero fueran de mejor calidad que el de los lingotes de acero.

Se mencionó que la metalurgia de la cuchara, se ocupa principalmente de la desulfuración seguido por la modificación de los sulfuros que queda habitualmente de tipo alargado fibrosa o formas redondeadas. Además, a menudo se desea cambiar el carácter de los sulfuros de fácil alargamiento a tipos no deformables.

La Desulfuración simple puede ser muy fácilmente obtenida por tratamiento del acero con cal o mezcla de cal que se inyecta en la cuchara. Sin embargo, la modificación de sulfuro requiere la presencia de metales que tienen una alta afinidad por el azufre y la producción de sulfuros refractarios duros y discretos. Además, para asegurar una buena dispersión, los sulfuros deben tener la energía de superficie baja para minimizar su coagulación. El titanio, circonio, y especialmente los metales de las tierras raras tienen estas propiedades, pero el calcio (es decir, cal y fluorita) y sodio, no.

En la mayoría de los procesos de desulfuración la modificación se realiza mediante inyección de gas. Esto más o menos vuelca la mayor parte del hidrógeno no deseado. Sin embargo, los aceros de bajo contenido de azufre, por debajo de 0,005% de azufre, parecen mostrar una mayor susceptibilidad al agrietamiento por hidrógeno o una mayor tendencia a absorber el hidrógeno a partir de cualquier fuente disponible. Una explicación convincente de estos fenómenos se carece en la actualidad.

Hay que destacar que todos los procesos metalúrgicos llevados a cabo en la cuchara requieren un control en el aumento de temperatura de acero, lo que significa un mayor uso de combustible o de energía y mayor consumo de refractarios <sup>[3]</sup>.

Debería ser obvio a partir de consideraciones elementales de la reacción de desulfuración, que dos condiciones son un requisito previo para el éxito:

- ❖ El acero debe estar completamente muerto, a los niveles bajos de oxígeno, no sólo por la exigencia de la reacción de  $\text{FeS} + \text{CaO}$ , sino también porque todos los desulfurizadores y modificadores tienen una alta afinidad por el oxígeno, y por lo tanto actúan como desoxidantes costosos antes de atacar el azufre. El acceso de aire a la cuchara en la que el tratamiento se lleva a cabo es a menudo minimizada por el uso de una cubierta, con o sin un flujo de algún gas inerte.
- ❖ El entorno debe ser básico para que los desulfurizadores y modificadores de sulfuro no se pierdan por neutralización (disolución) de los materiales refractarios ácidos.

Por lo tanto los mejores y más consistentes resultados, se obtienen cuando el tratamiento cucharones revestidos es a base de ladrillos o al menos neutral, y alta alúmina. Estos revestimientos no sólo son costosos, sino que pesan mucho más que la arcilla refractaria y puede superar la capacidad de elevación de la grúa. Una manera de evitar esto es reducir el peso con la pérdida de calor evidente de la productividad. Además, los refractarios se ocupan de la conductividad térmica y la expansión térmica de los ladrillos básicos, dando fuertes pérdidas térmicas y graves pérdidas de ladrillo derivados de craqueo térmico (desprendimiento), el revestimiento debe estar respaldado con una capa aislante que reduce aún más la capacidad de cuchara, y las cucharas deben mantener el uso de calentadores de gran capacidad.

En general, el costo de los revestimientos en la cuchara es a menudo cinco veces superior a la de arcilla refractaria normal.

Debería ser obvio la exigencia de ausencia de oxígeno ya que la oxidación normal del acero en la escoria en la cuchara debe ser reducido al mínimo, para evitar que el fuerte desoxidante, desulfurizador y modificador, entre en contacto con esta escoria durante el tratamiento. Esto significa una escoria desoxidante en el horno, que consume mucho tiempo, un poco impredecible, y conduce a la reversión de fósforo, o interrumpir el flujo de escoria tan pronto como se desprende de la caldera. Sin embargo, una gruesa capa de escoria básica es necesaria tanto como una manta térmica y un recipiente para eliminar el azufre del acero. Así, la cuchara se cubre generalmente con ricas mezclas de cal o ligeramente cal exotérmica, después de que el flujo de escoria del horno se ha detenido. <sup>[6]</sup>

### 2.4.3 Métodos y reactivos para la desulfuración.

Muchas variantes se encuentran en existencia y se puede resumir en la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Métodos y reactivos empleados para la desulfuración del acero dentro del horno-cuchara.<sup>[3]</sup>

<b>Método de Tratamiento</b>	<b>Herramientas Necesarias</b>	<b>Reactivos usados</b>
<b>Revaciado o Vaciado Sucesivo</b>	Dos o tres cucharones	CaO+CaF <sub>2</sub> (+Al)
<b>Gas de Agitación por el tope</b>	Lanza o tubo inmerso dentro del cucharón	N o Ar; Posibles Adición a la Escoria de CaO+CaF <sub>2</sub> (+Al)
<b>Gas de Agitación por el fondo</b>	Uno o dos taponos porosos presentes en el fondo del cucharón	N o Ar;
<b>Inmersión de un reactivo</b>	Contenedor inmerso del reactivo con sujetador, sumergido dentro de todo el cucharón	Tierras raras o sus Siliciuros
<b>Inyección de Reactivos en Polvo</b>	Adición de elementos fluidizantes e inyección de reactivos en polvos inmersos en lanzas dentro del cucharón	CaO+CaF <sub>2</sub> (+Mg+Al)Res, ReSi, CaBaSi, CaC <sub>2</sub>
<b>Inyección de Reactivos en Polvo con calentamiento</b>	Igual que lo anterior mas electrodos o resistores en la cubierta del cucharón, la desgasificación al vacío puede ser empleada antes durante o después del tratamiento.	Igual que lo anterior
<b>Inyección de Reactivos Sólidos</b>	Máquina para inyectar un alambre o tubo o disparar proyectiles de reactivo dentro del cucharón	Al, Ca

Como se mencionó, todos estos tratamientos requieren un suministro de gas inerte y una elevación de la temperatura del acero para permitir las pérdidas de temperatura durante el tratamiento. La mano de obra es costosa para la mayoría de inyección de gas, sólo la simple agitación de la parte superior está casi libre de mano de obra. Instalaciones de inyección son costosas de construir y operar.

### ❖ El Revaciado

Es muy antiguo, en este método, el acero acabado en la cuchara se vierte en otro cucharón que contiene una gran cantidad de una mezcla de desulfurizante, generalmente cal y fluorita en la proporción de 3:1 o menos. Cerca de 10 lb/ton (5 kg/ton) o más debe ser utilizada. Para garantizar la ausencia (reducción) de óxido de hierro, como pueden ser formados durante re- vertimiento del acero de una cuchara a otra cuchara, algo de aluminios a menudo se agrega a la mezcla.

La Desulfuración es asistida permitiendo que el acero en la cuchara permanezca en el segundo cucharón sin perturbación de 10 a 20 minutos para permitir que los no metales floten. En casos excepcionales el revaciado se realiza dos veces. Los resultados son de regular a buenos, reducir a la mitad el contenido de azufre es común en el revaciado único y la obtención de 0,005% de azufre, o incluso menos usando revaciado doble.

### ❖ Gas de Agitación

La dificultad de este tratamiento es la agitación del acero a fin de promover la temperatura y la homogeneización de productos químicos sin tener la "ebullición" tan violenta que rompa la superficie de escoria, y cuando esto sucede, la absorción de nitrógeno, hidrógeno, se hace posible, y la reoxidación puede ser evidente. Así, la presión del gas sólo debe ser lo bastante alta como para penetrar en el baño, es decir, la presión debe ser un poco superior a la presión ferrostática (oposición cerca de un cuarto de libra por pulgada de altura o el 0,7 atm/m), pero lo suficientemente baja para evitar un "burbujeo" fuerte.

Una clara disminución de la temperatura aparente, medida por una termocupla inmersa desde la parte superior de cuchara, se produce en el primer o segundo minuto, lo que es la igualación de temperatura, el acero frío de la cuchara del fondo que se despertó en el cuerpo del acero. Este fenómeno se utiliza a menudo en la colada continua, sin la intención de cambiar las propiedades del acero. Más agitación puede conllevar al

aglomerado de inclusiones, pero también a la reducción real de la temperatura del acero y, posiblemente, a usar más la cuchara.

Un tubo de cubierta resistente al tratamiento (generalmente una varilla tapón cuchara) se baja en la cuchara después de que el flujo de gas está bien establecido a la presión deseada (de lo contrario el orificio de salida se congela). Romper las burbujas de gas lo más pequeñas posibles, es conveniente para reducir los inconvenientes señalados de romper la escoria. Sin embargo el uso de varios puertos pequeños en vez de un agujero vertical no parece haber dado una mejora consistente en los resultados. De ésta manera realizando la agitación a través de una clavija porosa de refractarios (MgO) la cual es insertada en la parte inferior de la cuchara, rompe el flujo de gas en pequeñas burbujas y, por lo tanto es más fácil controlar el movimiento de la escoria, evitando así el atrape de impurezas.

#### ❖ **Tratamiento por inmersión**

El reactivo se embala en un tambor que se adhiere al final de una floración larga o tocho. Este es recogido por la grúa y el dispositivo se sumerge en la cuchara llena a 1 pie (30 cm) de la parte inferior de la cuchara. La dispersión de los reactivos es asistida por un poco de gas que producen los componentes del reactivo, generalmente de magnesio 2 a 4%. Esto tiende a dar un fuerte "burbujeo", por lo tanto, por lo menos 1 pie (30 cm) debe ser permitido. Metales de tierras raras (mishmetal) y sus siliciuros fueron añadidos por esta técnica. Metales de calcio o magnesio, no se puede añadir de esta manera porque en su evaporación son "explosivos en la cuchara", posiblemente con resultados desastrosos.

#### ❖ **Tratamiento por inyección de polvo de reactivo**

Uno de los problemas de los reactivos en polvo es la pérdida de tiempo y temperatura cuando se impulsa en la cuchara el desulfurizador algunos con un gas, normalmente nitrógeno, que es mucho más barato que el argón. No hay poca o ninguna recogida de

nitrógeno. Al parecer, el corto tiempo de residencia del gas en el baño todavía no es suficiente para disociar los átomos en las moléculas de nitrógeno que se disuelven fácilmente en el acero. La ebullición del acero resultante requiere protecciones especiales, de 1 a 2 pies de espacio en la cuchara, incluso cuando tan sólo el 0,1 pies cúbicos de gas que se usa por libra del desulfurizador. Numerosos desulfurizadores fueron procesados: los mejores conocidos son una aleación de hierro, calcio, silicio y carburo de calcio. Los primeros resultados en la absorción (pick-up) de importantes cantidades de silicio por los de acero, la segunda causa una recarburización significativa. O es a menudo inaceptable para la especificación del acero.

El polvo de magnesio es un excelente desulfurizador porque vaporiza casi instantáneamente a temperaturas del acero dando una excelente dispersión y violenta agitación que aumenta la frecuencia de las colisiones de las partículas de azufre y desulfurizador.



Sin embargo, causa problemas: al reducir la fuerte ebullición, a veces el magnesio aleado con aluminio que actúa como retardante en la corriente de un material no violento, como la cal.

La cal es económica y rara vez se usa sola. A menudo se añade mezclas de desulfuración (por ejemplo, el polvo de magnesio + cal), pero es mucho menos eficiente que la de magnesio: como regla general, de 1 a 2 libras por tonelada de magnesio (% a 1 kg/ton) reduce el azufre la concentración en la mitad al igual que 10 libras/tonelada (5 kg/ton) de calcio-silicio o carburo de calcio y 20 libras / tonelada (10kg/ton) de la cal. Dado que la velocidad de inyección está limitada por la acción de ebullición de los fuertes gases de propulsión,. Se necesita el doble de tiempo para inyectar la cal necesaria, ya que toma de calcio-silicio o carburo, y la pérdida de temperatura del acero es correspondientemente mayor. También el volumen de escoria generada por la cal es mucho mayor que la de otros desulfurizadores y la escoria resultante puede exceder la capacidad de cuchara. Es ineficaz como una forma de modificador de sulfuro.

#### ❖ **Tratamiento por inyección con calentamiento de la tapa del cucharón.**

Este tipo de instalación es compleja y costosa, su operación es delicada, y aunque se reportaron buenos resultados metalúrgicos, es evidente que estos tratamientos son económicos para superaceros solamente.

#### ❖ **Tratamiento de inyección de reactivos sólidos**

El método más común es la inyección de un cable que contiene el reactivo en polvo usando un alimentador de alta velocidad, similares a los utilizados en la soldadura automática. El cable es actualmente un pequeño tubo formado que se llena con el reactivo, calcio, tierras raras, y, posiblemente, magnesio. Este método se utiliza más para el tratamiento del acero en el distribuidor de una máquina de colada continua en las cucharas de acero. La inyección de alambre de aluminio sólido en la cuchara llena se convierte en generalizada.

El segundo método es utilizar un muelle o aire comprimido y disparar proyectiles con el reactivo a través de la capa de escoria en la cuchara. La bala de acero debe entrar en la profundidad suficiente para disolver antes de emerger, pero no lo suficientemente profunda para golpear el fondo de la cuchara. Un suministro consistente de los reactivos en la forma adecuada y proyectiles calibrados puede ser difícil de mantener. Las objeciones a la utilización de tal instrumento sobre la base de la seguridad se deben tomar en cuenta. El tema de los tratamientos de la cuchara es muy complejo y en un estado de rápido desarrollo. Las técnicas varían de simples a complejos. Obviamente, un mayor desarrollo y difusión de estos métodos será una función de la gama de productos de acero, los requisitos del cliente, y las condiciones locales. <sup>[3]</sup>

En los últimos 20 años se han realizado varios trabajos de investigación para comprender la fenomenología y el comportamiento de la inyección de gas dentro del horno cuchara de acero y, así poder optimizar el proceso, minimizando el tiempo de mezclado

(tiempo durante el cual todo el baño líquido llega al rango de concentraciones de  $\pm 5\%$  de equilibrio, cuyo valor ha sido usado por varios investigadores dependiendo de la precisión del medidor. En estas investigaciones se han estudiado varios fenómenos como transferencia de calor, transferencia de masa, mezclado del baño líquido, ascenso de las burbujas, formación de una pluma de flujo turbulento, entre otras.

Los diferentes estudios se han basado en:<sup>[4]</sup>

- ❖ Estudios de modelado físico basados en criterios de similitud geométrica, dinámica y cinemática y que se han abocado a estudiar la fluido-dinámica de hornos de cuchara agitados con gas, usando modelos acrílicos y agua (simulando acero) y aire (simulando argón).
- ❖ Estudios de modelados matemáticos, los cuales resuelven las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía para flujos bifásicos.
- ❖ Estudios de modelado físico y matemático que han combinado ambas modelaciones para validar los modelos matemáticos.

## **2.5 Modelado Físico de Cucharas de Acero**

### **2.5.1 Similitud y Semejanza dimensional**

Dado que el número de problemas que se puede resolver en forma puramente analítica es pequeño, la gran mayoría requiere algún grado de resultados empíricos o experimentales. Lo anterior es particularmente cierto en el ámbito de la mecánica de fluidos, cuyo desarrollo ha dependido fuertemente de resultados experimentales.

Por otro lado, los resultados obtenidos en forma experimental deben ser lo más generales posibles y extrapolables a situaciones fuera de las condiciones “ideales” en las que se realizaron. El análisis dimensional ofrece un método para reducir problemas físicos complejos a su forma funcional más simple antes de obtener una respuesta cuantitativa acerca del problema. Permite, por lo tanto, tener una visión general del problema y las variables (adimensionales) relevantes involucradas.

En el corazón del análisis dimensional se encuentra el concepto de similitud o semejanza. En términos matemáticos, la similitud se refiere a una transformación de variables que llevan a una reducción en el número de variables independientes que especifican un problema. Aquí la pregunta natural es, que tipo de transformación es necesaria hacer y en cuanto se pueden reducir el número de variables independientes.

El análisis dimensional es una herramienta que responde estas preguntas. Su utilidad principal radica en la capacidad de representar en forma más reducida la forma funcional de relaciones físicas involucradas en un fenómeno dado. Un problema que en un principio puede parecer complejo, puede a veces resolverse con un esfuerzo pequeño a través del análisis dimensional.

Como se mencionó anteriormente el término similitud o semejanza física se refiere a la equivalencia entre dos fenómenos. Es decir, las condiciones que deben ser satisfechas para que los resultados de un fenómeno obtenido en un laboratorio mediante un modelo a escala sean aplicables a un prototipo a escala real. Dicho de otra manera, cuales son las condiciones a satisfacer para que la función entre los números adimensionales, obtenidos para el modelo, sea la misma que para el prototipo.

Para que se cumpla la similitud entre un modelo y un prototipo debe existir:

- ❖ **Semejanza geométrica:** El modelo debe ser una versión a escala lo más detalladamente posible del prototipo.
- ❖ **Semejanza cinemática:** Dos flujos son cinemáticamente semejantes cuando las velocidades en puntos equivalentes tienen la misma dirección y la razón entre las magnitudes de la velocidad y la aceleración es constante para todo el flujo, es decir,

$$v_m/v_p = \text{constante} \quad (2.23)$$

$$a_m/a_p = \text{constante} \quad (2.24)$$

Donde:  $v_m$ ,  $v_p$ ,  $a_m$ ,  $a_p$  es la velocidad y la aceleración para el modelo y el prototipo respectivamente.

Flujos cinemáticamente semejantes tienen líneas de corriente geoméricamente semejantes y como el contorno del cuerpo corresponde a una línea de corriente se

desprende que la semejanza cinemática implica necesariamente la semejanza geométrica.

- ❖ **Semejanza dinámica:** Si la distribución de fuerzas en dos flujos es tal que en puntos correspondientes y para fuerzas del mismo tipo (cortante, presión, etc.) las fuerzas son paralelas y la razón entre sus módulos es constante para todos los puntos equivalentes y para los diversos tipos de fuerzas presentes, se dice que los flujos son dinámicamente semejantes. Por lo tanto, en el caso de semejanza dinámica entre dos flujos existirá una relación sencilla y de fácil calculo entre fuerzas correspondientes. Esto es de gran importancia, por ejemplo, para evaluar las fuerzas de arrastre y sustentación, a las que estaría sometido un prototipo, a partir de las determinadas en un modelo a escala en un laboratorio. En términos prácticos lo anterior se traduce en que, asegurada la semejanza geométrica, la semejanza dinámica se obtiene si los grupos adimensionales involucrados en el fenómeno son iguales, es decir, tienen el mismo valor para el modelo y el prototipo.<sup>[10]</sup>

Para llevar a cabo el estudio de la fluidodinámica de los cucharones de acero a escala industrial se trabaja entonces con un modelo a escala laboratorio, haciendo uso de la teoría de similitud y semejanza dimensional. Esto basado principalmente en los parámetros físicos mostrados en la Tabla 2.2, que muestran la comparación de los valores de viscosidad cinemática para el acero a 1600°C y para el agua a 25°C, que justifican el estudio de los modelos en frío para analizar tales fenómenos y parámetros de flujo en los cucharones de acero.

Tabla 2.2. Parámetros físicos del Agua y el Acero líquido<sup>[11]</sup>.

	Densidad $\rho$ (kg m <sup>-3</sup> )	Tensión Superficial $\sigma$ (N m <sup>-1</sup> )	Viscosidad $\nu$ (m <sup>2</sup> /s)
Acero Líquido	7000	1,89	0.91x10 <sup>-6</sup> (1600°C)
Agua	1000	0,073	1x10 <sup>-6</sup> (25°C)

Además en la Tabla 2.3, se muestran los parámetros físicos de las escorias en los cucharones en comparación con los valores de viscosidad del aceite empleado en el modelo físico.

Tabla 2.3. Parámetros físicos de la Escoria y el Aceite<sup>[12,13]</sup>.

	Densidad $\rho$ (kg m <sup>-3</sup> )	Tensión Superficial $\sigma$ (dyn/cm)	Viscosidad $\mu$ (cP)
Escoria	3061	360	71,02
Aceite		32	15-18

### 2.5.1. Método para determinar el flujo de gas en el modelo de agua

El número de Froude modificado ( $N_{Frm}$ ) es considerado como criterio de similitud para correlacionar el flujo de gas entre el modelo a escala y el prototipo. El número de Froude es un número adimensional que representa la energía cinética y la energía potencial de la agitación del gas, representa la relación entre las fuerzas de inercia y la fuerza de gravedad.<sup>[2,13]</sup>

$$N_{Frm} = \frac{u^2}{Lg} \left[ \frac{\rho_g}{\rho_l} \right] \quad (2.25)$$

El número de Froude representa la relación entre las fuerzas y la fuerza de gravedad.

Donde:

$\rho_g$  es la densidad del gas (g cm<sup>-3</sup>)

$\rho_l$  es la densidad del líquido (g cm<sup>-3</sup>)

$u$  es la velocidad del gas (cm s<sup>-1</sup>)

$g$  es la aceleración debido a la gravedad (cm s<sup>-2</sup>)

$L$  es la altura del líquido (cm)

Al emplear el número de froude como criterio de similitud, e igualando el número de froude en el modelo real (prototipo), con el modelo a escala (modelo de agua), entonces:

$$N_{Frm(Prototipo)} = N_{Frm(Modelo\ de\ Agua)} \quad (2.26)$$

Así:

$$Q_m = \lambda^{5/2} Q_{fs} \quad (2.27)$$

Donde:

$Q_m$  es el flujo de gas que opera en el modelo de agua ( $L \text{ min}^{-1}$ )

$Q_{fs}$  es el flujo de gas en el prototipo (escala real) ( $L \text{ min}^{-1}$ )

$\lambda$  es el factor de escala

### 2.5.2 Evaluación de la Eficiencia del Mezclado en Cucharones de Acero

En los estudios realizados para analizar el mezclado en cucharones, se ha aplicado la cinética de las reacciones químicas para investigar los fenómenos de transferencia de masa entre el baño metálico y la escoria durante los procesos de agitación. La transferencia de masa lineal se expresa como sigue <sup>[13]</sup>:

$$dw/dt = -k_w A(C_i - C_b) \quad (2.28)$$

Donde:

$w$  es la masa del trazador/reactivo (g)

$t$  es el tiempo de reacción

$k_w$  es el coeficiente de transferencia de masa ( $\text{cm s}^{-1}$ )

$A$  es el área de contacto de las dos fases ( $\text{cm}^2$ )

$C_i$  es la concentración inicial ( $\text{g cm}^{-3}$ )

$C_b$  es la concentración de equilibrio ( $\text{g cm}^{-3}$ )

También,

$$w = C_w V_w \quad (2.29)$$

Donde:

$C_w$  es la concentración del trazador/reactivo en el agua (ppm)

$V_w$  es el volumen de la fase de agua ( $\text{cm}^3$ )

Así la ecuación inicial puede ser modificada como:

$$dC_w/dt = -k_w A/V_w(C_w - C'_w) \quad (2.30)$$

Donde:

$C'w$  es la concentración del Trazador/reactivo en equilibrio en el agua (ppm).

Así finalmente Asai y otros colaboradores<sup>[14]</sup> propusieron una ecuación empírica que describe la relación entre el flujo de gas  $Q$  y la transferencia de masa  $k_wA$  para la transferencia de masa en las dos fases en el modelo de agua. Según:

$$k_wA \propto Q^n \quad (2.31)$$

Donde:

$n$  es el factor de agitación del flujo de gas.

Como  $n$  se incrementa el flujo de gas  $Q$  tiene un efecto importante en la transferencia de masa. <sup>[13]</sup>

La transferencia de masa del baño metálico a la fase de escoria se calcula como:

$$\ln \frac{C_t - C_e}{C_1 - C_e} = -kt \quad (2.32)$$

$$k = \frac{bA}{V} \quad (2.33)$$

Donde:

$C_t$  es la concentración del trazador en el tiempo  $t$

$C_e$  es la concentración en el equilibrio

$C_1$  es la concentración inicial del trazador en el baño

$K$  es la constante de transferencia de masa(L/T)

$b$  es el coeficiente de transferencia de masa (L/T)

$A$  es el área interfacial ( $L^2$ )

$V$  es el volumen del líquido ( $L^3$ )

## **2.6 Variables que influyen en la eficiencia del mezclado en cucharones metalúrgicos.**

### **2.6.1 Influencia del Flujo de Gas sobre el Mezclado.**

Al mantener la altura del baño constante, y como el flujo de gas es incrementado, la velocidad en el centro de la pluma aumenta, resultando así una rápida recirculación que mejora el mezclado, una elevación del flujo de gas incrementa el ángulo del cono de la

pluma, por lo tanto se incrementa el radio de la pluma en la superficie, y con esto se aumenta efectivamente el volumen de la pluma en el baño y mejora la circulación. De otra manera, más allá de una inyección de gas crítica y algún incremento en el radio de la pluma, hará lento el incremento de la velocidad de la pluma por la propagación radial de todos los componentes de velocidad a lo largo de la pluma sobre la superficie, adversamente influenciando en la recirculación del baño. Por encima de un flujo crítico de gas, la reducción del promedio de la velocidad de la pluma comienza dominando, y esto es esperando que el tiempo de mezcla pueda incrementarse. Brimacombe y otros, determinaron que una parte de la energía cinética de la pluma es liberada al ojo de la pluma en la superficie, lo cual se traduce en un aumento en la energía y así un incremento en el flujo de gas. <sup>[2]</sup>

### **2.6.2 Influencia de la altura del baño en el tiempo de mezcla**

A una inyección de gas constante, el tiempo de mezcla incrementa con un incremento en la altura del baño, posiblemente debido a zonas muertas formadas cerca de la región inferior del cucharón a grandes radios. Este fenómeno podría ser explicado por una múltiple circulación del modelo, en el cual el baño consiste en grandes celdas de circulación, en la dirección axial, lo cual hace al mezclado por el flujo másico inefectivo.

### **2.6.3. Influencia de la localización de los inyectores en el tiempo de mezcla.**

Ha sido estudiado el efecto que tiene variar las posiciones del inyector, empleando una posición céntrica, y excéntrica (a  $2/3$  del radio) en el fondo del reactor.

Se ha determinado que con inyecciones céntricas hay dos recirculaciones en la parte superior del reactor y el fondo está estancado. En los casos de inyección excéntrica (a  $2/3$  del radio) se aprecian comportamientos similares: ocurre una recirculación en el sentido de las manecillas del reloj y, a medida que el tapón poroso se acerca a la pared, se observa que las velocidades altas en el líquido están más cerca de ella, lo cual presumiblemente pudiera ocasionar rozamiento y por consiguiente una pérdida de cantidad de movimiento del líquido. Es previsible que ocurriera mayor desgaste del refractario debido a la erosión ocasionada por la fricción con el líquido en movimiento sobre esa pared.

En cuanto al flujo de gas, se ve con claridad, a partir de los estudios, que al inyectar más gas se reduce notablemente el tiempo de mezclado.

Al inyectar concéntricamente se producen dos recirculaciones, pero en el fondo del reactor hay zonas muertas, donde el líquido está prácticamente estancado y sin turbulencia, no siendo así en los casos de inyección excéntrica, donde existe una sola recirculación en todo el reactor, la cual promueve el mezclado del soluto por convección y una mejor distribución de la viscosidad cinemática turbulenta, es decir, sin zonas muertas. Por tanto, al comparar la inyección concéntrica con los casos de inyección excéntrica, el caso de inyección concéntrica es el que tarda más en mezclar al baño líquido, siendo mucho menores los tiempos de mezclado con inyecciones excéntricas.<sup>[1]</sup>

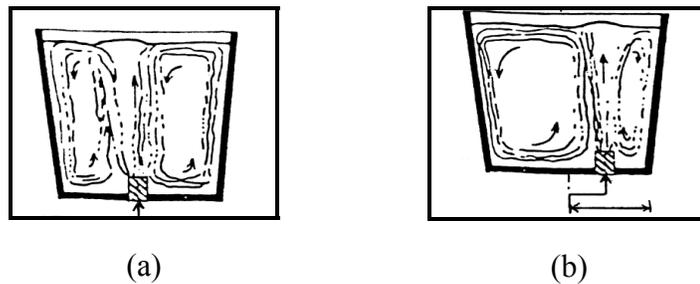


Fig. 2.11. Diferentes posiciones de los tapones porosos y el resultado del patrón de flujo por la inyección de gas, con localización céntrica (a) y localización excéntrica (b), de los inyectores respectivamente <sup>[14]</sup>.

## 2.7 Métodos para determinar el tiempo de mezcla.

La técnica más comúnmente usada es conocida como la decolorización, donde el contenido del cucharón es colorado empleando un químico, entonces un segundo químico es adherido para remover el color.<sup>[15]</sup>

Dos de las reacciones más comúnmente usadas son las de cambio de pH, con un indicador apropiado.

❖ **Indicador Acido-Base:** un indicador como azul de bromofenol o fenolftaleína es adherido a la masa del líquido.

Todas las técnicas del tiempo de mezcla consisten en la adición de un químico con diferente propiedad que la masa del líquido, el decaimiento de las propiedades del material se emplea para medir el tiempo de mezcla del sistema. Es importante entonces la posición

de la toma de muestras para obtener la información más relevante posible sobre el mezclado, esto es, posicionando en las zonas de poca o mucha agitación en el sistema.

Las técnicas más comúnmente empleadas para la medición del tiempo de mezcla son:

### 2.7.1 Medidas Cualitativa del Tiempo de Mezcla

❖ **Decolorización:** esta técnica consiste en la coloración de todo el contenido del cucharón usando un primer químico, luego un segundo químico es añadido para remover el color. Una región de pobre mezclado resalta como una pequeña área colorida, después de que el resto del cucharón se haya aclarado.

### 2.7.2 Medida Cuantitativa del Tiempo de Mezcla

❖ **Muestreo Fuera de Línea (Off-line sampling):** a través de la adición de una sal, un colorante, o un ácido al cucharón. Las muestras son removidas o tomadas regularmente. Midiéndose la concentración del marcador y el grado de uniformidad se infiere a través de estas medidas. La instalación de un sistema de muestreo apropiado puede ser difícil, y esta técnica no es apropiada cuando los tiempos de mezcla son muy cortos, debido a que generalmente habrá un tiempo de muestreo finito.

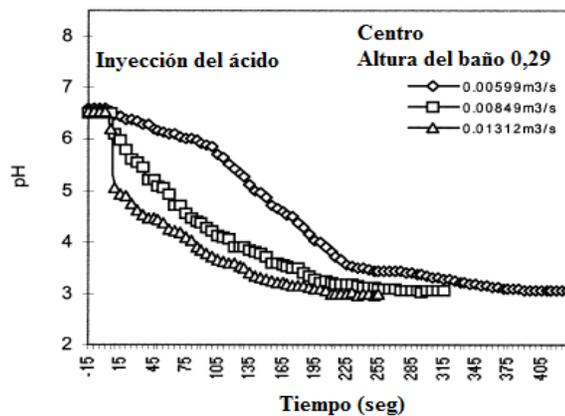


Figura 2.12. Ejemplo tipo de la dispersión del trazador en el tiempo, empleando la medida de pH para la determinación del tiempo de mezcla.<sup>[2]</sup>

- ❖ **Medidas de mezclado basadas en el efecto *Schlieren*:** esta técnica está basada en la dispersión de luz que ocurre cuando dos líquidos con diferentes índices de refractividad son mezclados. Esta luz alumbrada a través del cucharón es dispersada por las capas de diferentes líquidos y el tanque se opaca. Cuando el tanque es totalmente mezclado, comienza aclararse una vez más, dando un tiempo de mezcla. Esta técnica requiere la adición de líquidos transparentes, con diferentes índices de refractividad y a causa de esto podrán tener diferentes propiedades físicas.
  
- ❖ **Medidas de mezclado empleando Termocuplas:** esta prueba puede ser realizada con la adición de un líquido que tenga diferentes temperaturas de la masa. La temperatura en los diferentes puntos del cucharón de mezclado es monitoreada sobre tiempo, y la data de las pruebas, son usadas para calcular el tiempo de mezcla. Esta técnica puede ser usada empleando un líquido opaco y/o no conductor. Una desventaja de esta técnica es que puede no ser apropiada si las propiedades físicas de la masa líquida son muy sensibles a los cambios de temperatura debido a que la viscosidad sería entonces una función de la temperatura (y concentración) del líquido añadido.
  
- ❖ **Prueba de Conductividad:** esta técnica usa un electrolito en el líquido que es añadido como marcador, así es monitoreada la conductividad local en función del tiempo. Si la concentración del electrolito es baja la conductividad es directamente proporcional a la concentración. La data de las pruebas son procesadas para calcular el tiempo de mezcla del sistema en consideración. Esta técnica no es apropiada en sistemas no conductores, y no puede ser usada en sistemas donde las propiedades reológicas de la masa son sensibles a los cambios de concentración de sales. Sin embargo esta técnica es económica y fácil de usar. Y la data de las medidas de conductividad es colectada en un computador que emplea una tarjeta convertidora usando un software especializado.<sup>[15]</sup>

### 2.7.3 Procesamiento de la data del tiempo de mezcla

La data colectada por técnica de conductividad, termocuplas, o medidas de pH, deben ser procesadas para obtener el tiempo de mezcla del sistema en estudio.

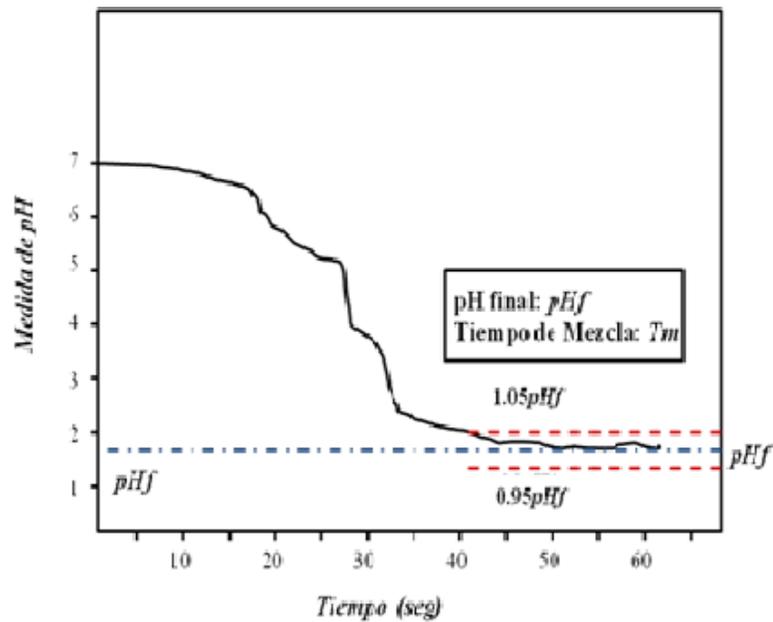


Fig. 2.13. Definición del Tiempo de Mezcla <sup>[16]</sup>.

La data se obtiene cuando un valor de cero inicial es tomado justo con la adición del trazador y por último el reporte de un valor final estable, medido después de haberse completado el ensayo. Estos valores son típicamente obtenidos por mediciones del ensayo sobre 30 segundos.

El tiempo de mezcla es definido como el tiempo requerido para la normalización del ensayo que queda entre 105% y 95% (5%) del valor final de equilibrio. Y el corte de esto con la curva de  $pH$  vs  $Tiempo$  se obtiene el Tiempo de Mezcla como se muestra en la Figura 2.12. <sup>[16]</sup>

## CAPITULO III

### MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se presenta en forma detallada la metodología utilizada y demás actividades realizadas para el desarrollo del presente trabajo. La Figura 3.2 muestra los pasos seguidos durante el desarrollo de este estudio.

Debido a la dificultad del estudio de patrones de flujo en las condiciones normales de los procesos en los hornos cuchara, como las elevadas temperaturas del acero líquido y la opacidad del mismo, se desarrolló un modelo físico empleando el criterio de similitud y semejanza dimensional, a manera de relacionar las propiedades físicas del modelo real con el modelo a escala, basándose en las teorías de similitud cinemática, dinámica y geométrica del modelo de estudio.

Con el fin de obtener ferroaleaciones con menor cantidad de impurezas, se tomó como modelo real un cucharón proveniente de Minera Loma de Níquel, cuya geometría era similar a la de los estudios realizados. Las dimensiones de diámetro y longitud del cucharón son como se muestra en la figura 3.1, las cuales fueron llevadas a escala 1:7.

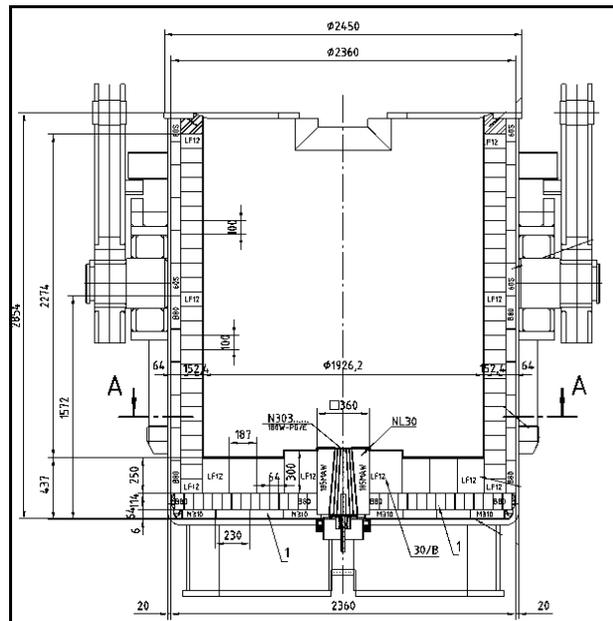


Fig. 3.1 Dimensiones de un cucharón proveniente de la Empresa Minera Loma de Níquel.

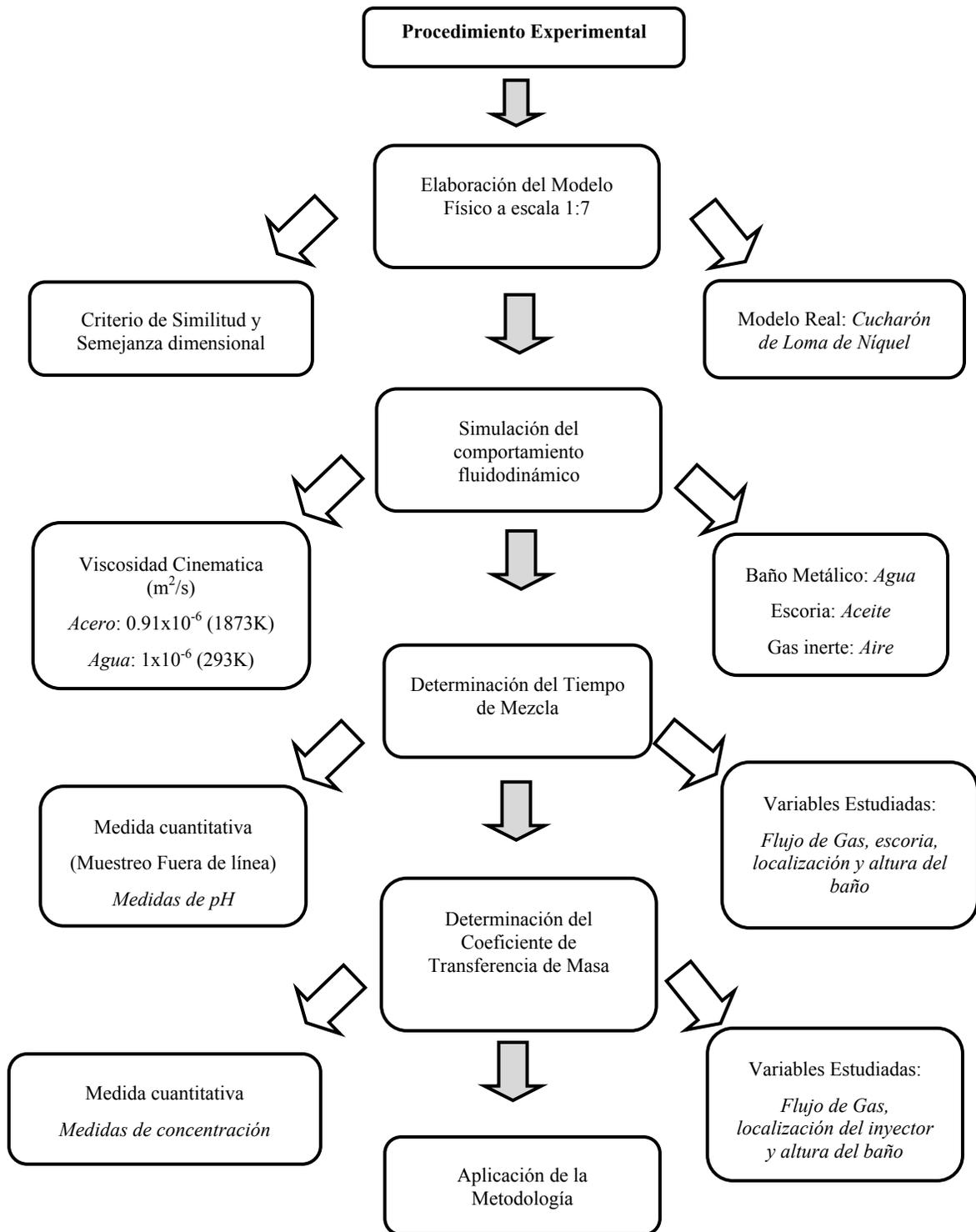


Fig. 3.2. Esquema del procedimiento experimental para la realización del estudio.

En la etapa de la investigación se realizó la revisión en la literatura asociado con los problemas de remoción de las inclusiones en la fabricación de ferroaleaciones, que no es más que la desulfuración en la metalurgia secundaria. Además se revisaron los conceptos asociados al estudio de la simulación física en los cucharones metalúrgicos, como el comportamiento fluidodinámico, el mezclado, flujos bifásicos, la inyección de gas, así como técnicas cuantitativas aplicadas para la determinación del tiempo de mezcla y transferencia de masa, las cuales sirvieron de base para la elaboración de la metodología de diagnóstico. La revisión bibliográfica se llevó a cabo con el propósito de lograr recopilar y resumir los principios involucrados en el tema de estudio y que fueron utilizados en el presente trabajo. Para ello, se realizó una revisión de los trabajos de investigación desarrollados por especialistas en el área de estudio. Al igual que se revisaron algunos de los Trabajos Especiales de Grado provenientes de la Universidad de Buenos Aires.

### **3.1 Elaboración del modelo físico**

En esta etapa, se determinó los materiales empleados para la elaboración del modelo físico. Para esta identificación se utilizó información proveniente de trabajos de investigación de diferentes revistas metalúrgicas altamente reconocidas. Y es de allí la base para realizar el modelo a escala laboratorio, aplicando el criterio de similitud y semejanza dimensional (similitud geométrica, dinámica y cinemática). Para ello, primeramente se realizaron las actividades descritas a continuación, con el objetivo de limitar el sistema de estudio.

#### **3.1.1 Modelo físico a escala 1:7**

Se construyó el modelo físico a escala 1:7, tomando como modelo real un cucharón proveniente de la Empresa Minera Loma de Níquel, cuyas medidas llevadas a escalas (modelo físico) son: 27,5cm de diámetro y 40 cm de altura, elaborado con plexiglás transparente. Para la inyección de gas se empleó aire, el cual fue suministrado a través de un compresor de aire de 110 voltios, frecuencia de 60 Hz y potencia 750 W, 1hp. Para graduar el caudal de gas inyectado se empleó un rotámetro (Lab Crest) cuyo flujo era medido en  $\text{pie}^3/\text{h}$ , dicho caudal fue calculado en función del caudal del modelo real y el factor de escala (ver apéndice A.1). Adicionalmente en la parte inferior del cucharón se

elaboraron dos localizaciones del inyector, una en el centro y la otra a 2/3 del radio, a los cuales se le hicieron ocho agujeros de 1mm de diámetro para simular la inyección de gas a través de un tapón poroso.

Las conexiones para el paso de aire del compresor al rotámetro y de allí al cucharón fue por medio de mangueras de alta presión y las uniones fueron hechas empleando válvulas de gas a manera de controlar la entrada de aire. Basándose en la teoría de semejanza dimensional, se empleó agua para simular el baño metálico, aceite parafinado para la escoria y aire para el gas inerte.

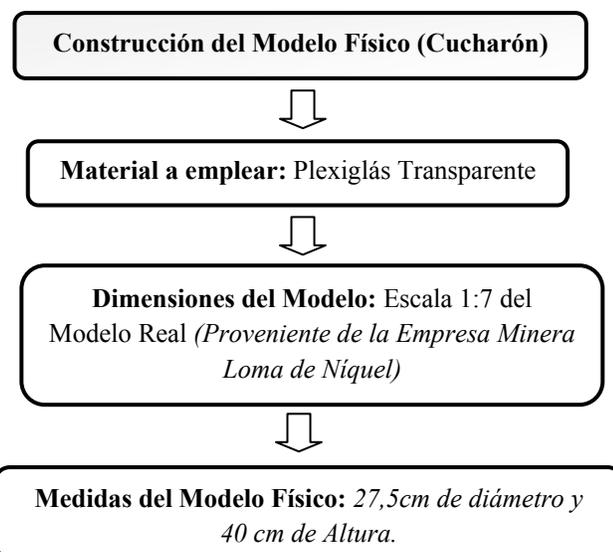


Fig. 3.3. Esquema para la Construcción del Modelo Físico

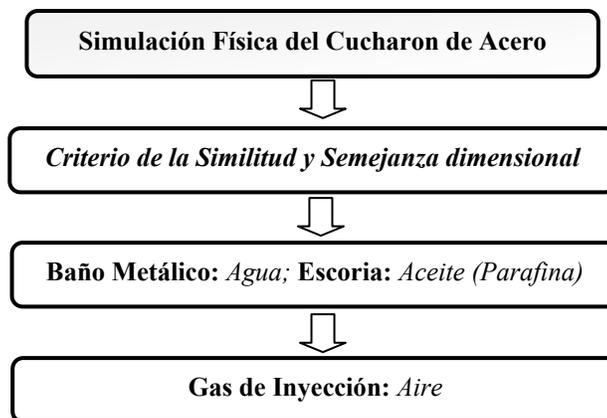


Fig. 3.4. Esquema del Criterio para simular físicamente el comportamiento del Cucharón de Acero

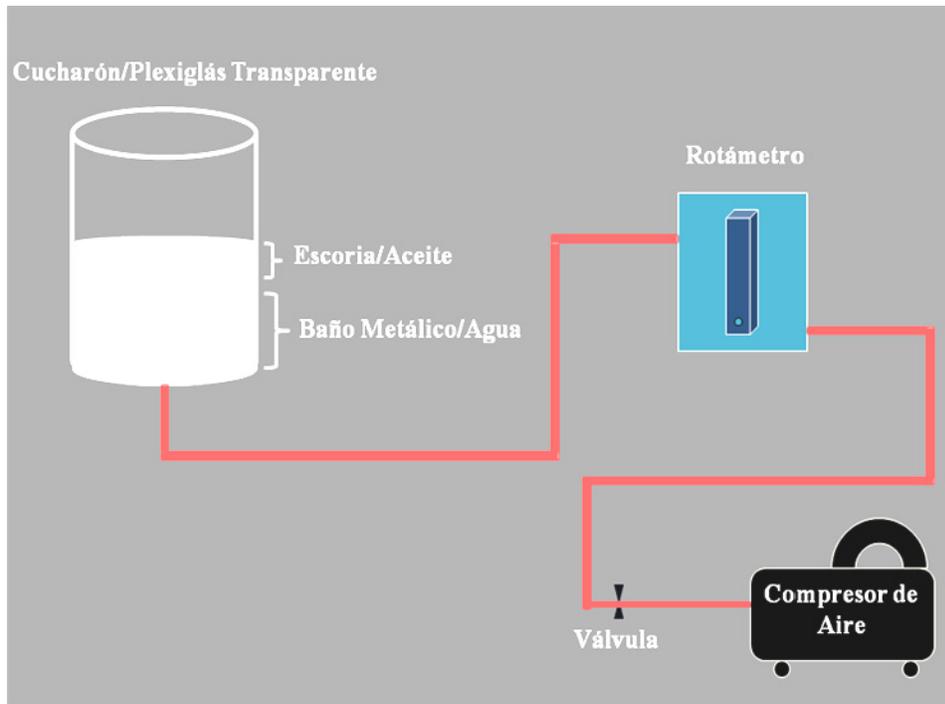


Fig. 3.5. Montaje del Modelo Físico (Cucharón). Se observa el Cucharón construido de Plexiglás Transparente, a una altura específica para el baño y la escoria, el compresor de aire (para inyectar el gas de agitación) y el rotámetro para controlar el flujo de gas al baño metálico (agua).

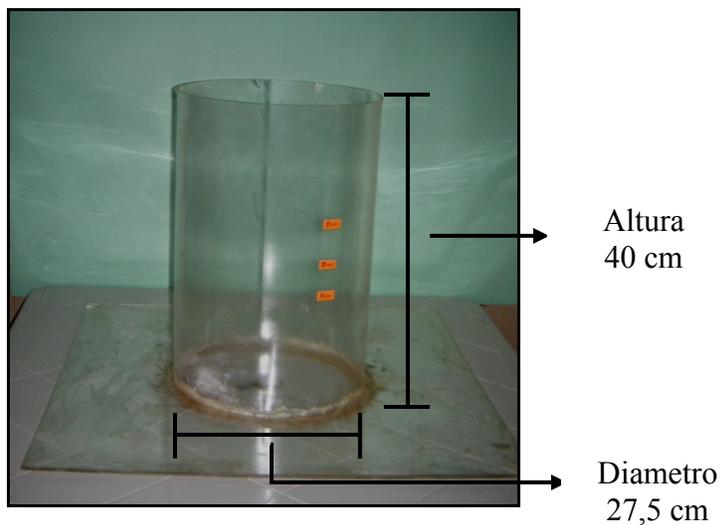


Fig. 3.6. Modelo Físico (Cucharón), construido de Plexiglás Transparente a Escala 1:7 de un modelo real de Loma de Níquel.

## 3.2 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE MEZCLA.

En esta etapa se desarrolló el método para la medición del tiempo de mezcla, en base a los estudios de investigaciones anteriores. Se seleccionó la técnica cuantitativa para la medida del tiempo de mezcla, la cual se basó en medidas de pH, debido a que las otras técnicas requerían de mayor instrumentación, generando mayores costos. Siendo la medida de pH, una técnica viable que genera resultados confiables para el análisis posterior.

### 3.2.1 Aplicación del Método

Se determinó el tiempo de mezcla empleando una técnica cuantitativa basada en las medidas de pH. Para la determinación del tiempo de mezcla se empleó como trazador una solución de Ácido Sulfúrico al 97%. Y la concentración del trazador en el sistema fue monitoreada usando un electrodo, el cual estaba unido a un Software (*PicoScope*), que capturaba las medidas arrojando una grafica de pH en función del tiempo.

Para el desarrollo de la técnica se adicionó 5 ml de ácido sulfúrico a 5 cm de la pared opuesta a la localización del electrodo, después de una circulación estable del baño. El tiempo de mezcla fue el tiempo en el cual la concentración de ácido sulfúrico en el agua alcanzó un 5% de la concentración de equilibrio. Luego el electrodo era sumergido a 10 cm de la parte superior y a 5 cm de la pared del cucharón.

Dichos ensayos se llevaron a cabo variando tres alturas del baño: 0,16; 0,20 y 0,25m; dos caudales de inyección:  $9,006 \cdot 10^{-6}$  y  $1,028 \cdot 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/s y dos localizaciones de inyección de gas: una céntrica y una excéntrica (a 2/3 del radio). Para cada altura se realizaron tres pruebas con los diferentes caudales y localizaciones de inyección de gas, para un total de 36 pruebas sin escoria, y 36 con escoria a una altura constante de 2 cm.

Tabla 3.1. Dimensiones del Modelo Físico y la Cuchara Siderúrgica.

Cucharón	Altura del Cucharón (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Capacidad (Ton)
Loma de Níquel	2,854	0,00116 – 0,0013	40-50
Modelo Físico	0,40	$9,006 \cdot 10^{-6}$ – $1,028 \cdot 10^{-5}$	5-8

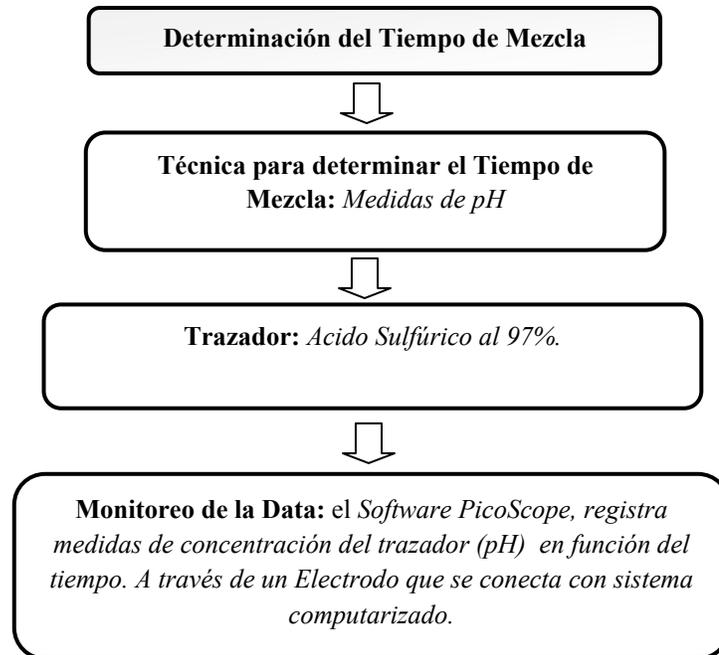


Fig. 3.7. Determinación del Tiempo de Mezcla

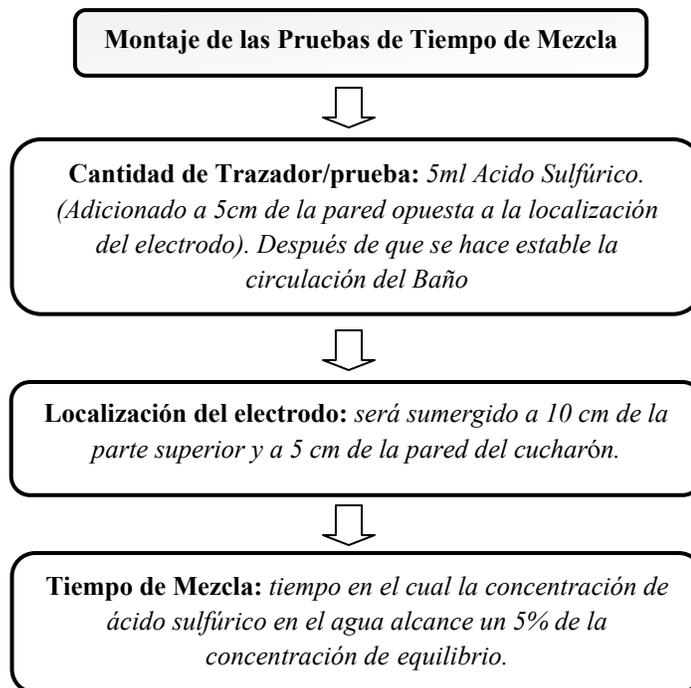


Fig. 3.8. Esquema del procedimiento para la determinación del tiempo de mezcla

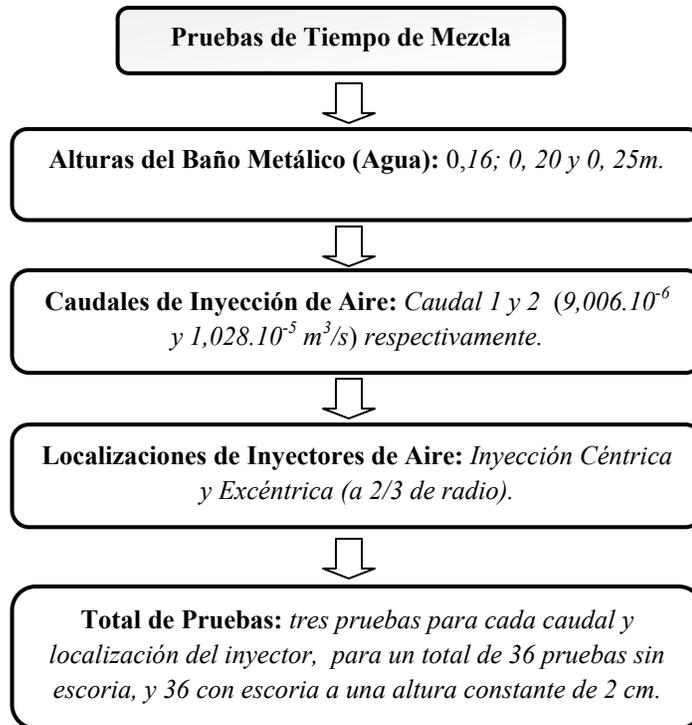


Fig. 3.9. Esquema detallado de las variables estudiadas para determinar el Tiempo de Mezcla y cantidad de pruebas realizadas.

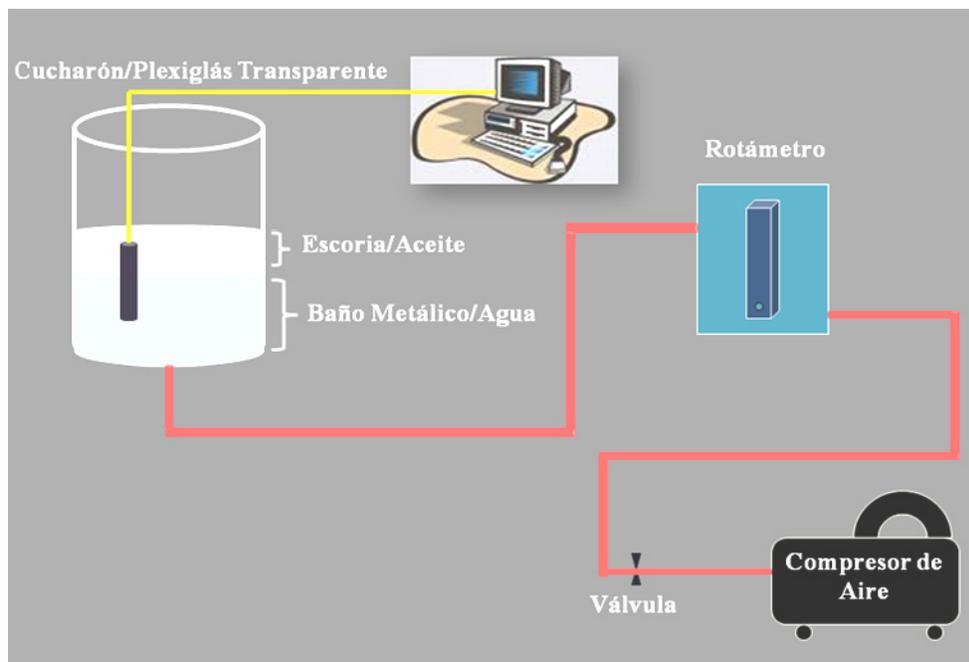


Fig. 3.10. Montaje del Modelo Físico (Cucharón). Se incluye adicionalmente al montaje del modelo físico, el electrodo sumergido en el baño metálico para medir la concentración del trazador a través del *Software PicoScope* que registra la variación de pH con el tiempo.



Fig. 3.11. Montaje del Modelo Físico (Cucharón) con el electrodo que registrara la medida de pH para la determinación del tiempo de mezcla.

### 3.3 DETERMINACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE MASA.

En esta etapa la transferencia de masa fue analizada a través de una técnica cuantitativa basada en medidas de concentración de ácido benzoico (*trazador*) en el baño metálico. En estudios anteriores se realizaba el análisis de dichas concentraciones empleando como trazadores timol, iodo y ácido benzoico. De los cuales, este último presenta menos riesgo en cuanto al manejo y salubridad. Es por ello que para el alcance de este trabajo se desarrolló la técnica haciendo uso del ácido benzoico.

#### 3.3.1 Coeficiente de Transferencia de masa

Para la determinación del coeficiente de transferencia de masa, se empleó ácido benzoico disuelto en agua a una concentración constante entre 1.3 a 1.5 g/L por cada experimento realizado. Debido a la solubilidad del ácido benzoico fue necesario el calentamiento de la solución a 65°C para obtener una completa disolución del ácido en el agua. Para cada ensayo se tomaron cuatro muestras a intervalos de 30 segundos, a una altura de 5 cm de la parte superior, las muestras fueron analizadas a través de titulaciones con una solución de NaOH (0.01N), empleando fenolftaleína (0.1%) como indicador. (ver apéndice A.4)

A partir de dichas titulaciones se determinó la concentración de ácido benzoico en el agua y con estos valores se obtiene el coeficiente de transferencia de masa. Se utilizaron

tres alturas del baño: 0,16; 0,20 y 0,25m; dos caudales de inyección:  $9,006 \cdot 10^{-6}$  y  $1,028 \cdot 10^{-5}$   $m^3/s$  y dos localizaciones de inyección de gas: una céntrica y una excéntrica (a 2/3 del radio). Cada ensayo fue repetido tres veces, para cada altura, caudal y localización del inyector, empleando una altura de escoria de 2 cm, para un total de 144 titulaciones.

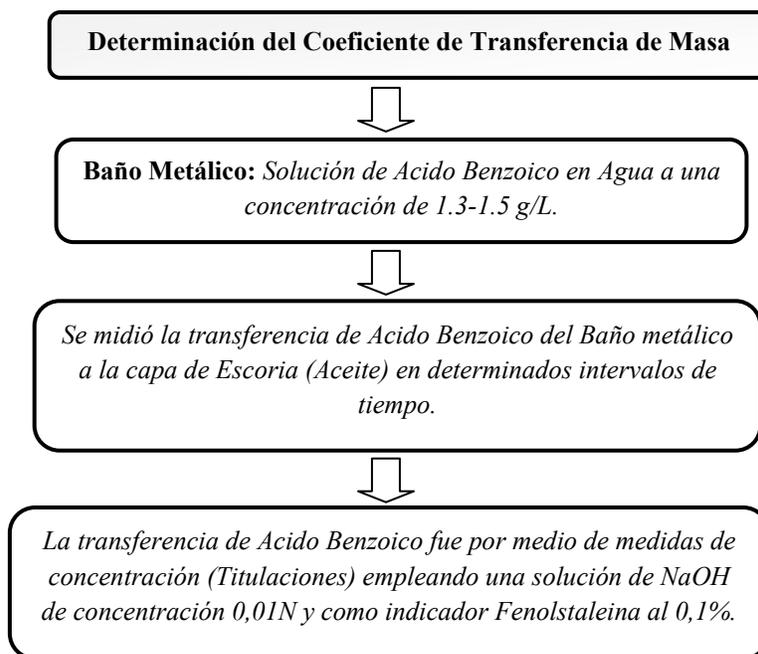


Fig. 3.12. Determinación de la Transferencia de Masa en el Modelo Físico.

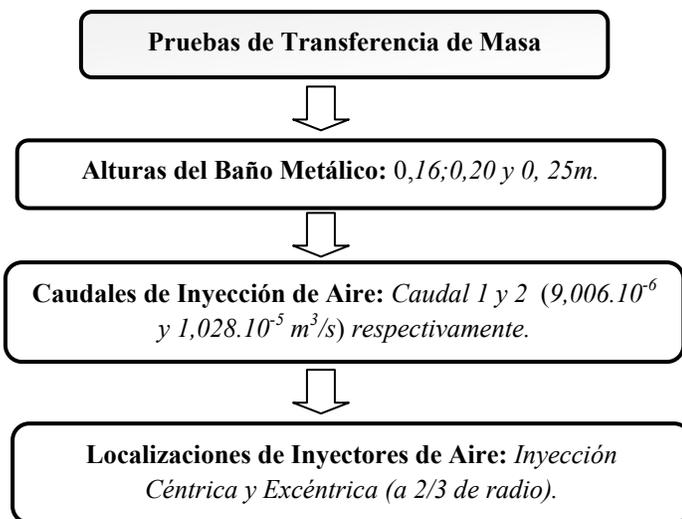


Fig. 3.13. Esquema detallado de las variables estudiadas para determinar la Transferencia de Masa.

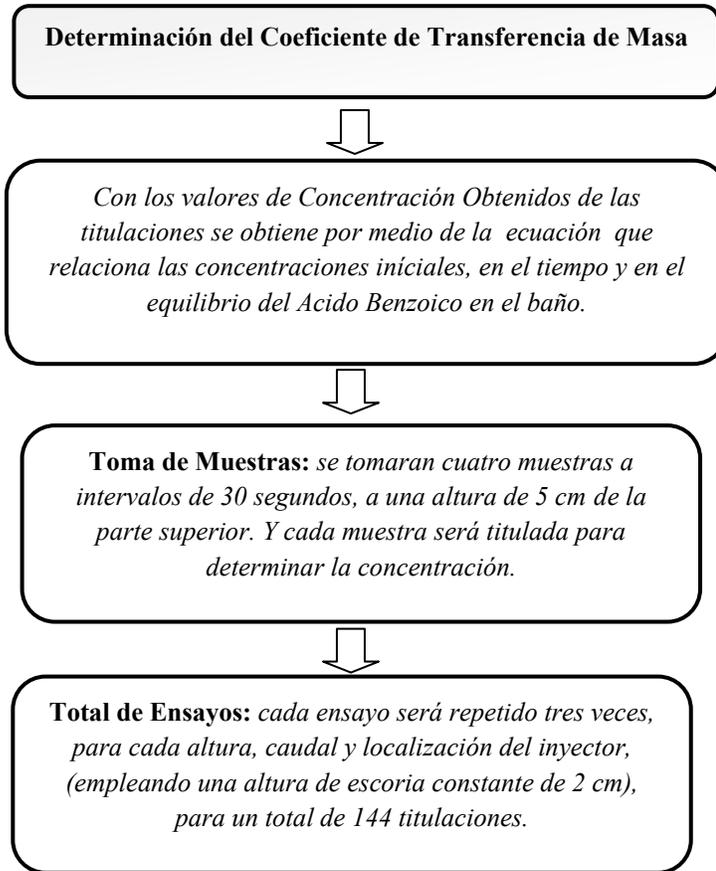


Fig. 3.14. Esquema detallado para determinar la Transferencia de Masa y cantidad de pruebas realizadas.

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de masa se emplearon las siguientes ecuaciones, que relacionan las concentraciones del trazador en el sistema:

$$\ln \frac{C_t - C_e}{C_1 - C_e} = -kt \quad (\text{Ec. 3.1})$$

$$k = \frac{bA}{V} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

$C_t$  es la concentración del trazador en el tiempo  $t$

$C_e$  es la concentración en el equilibrio

$C_1$  es la concentración inicial del trazador en el baño

$K$  es la constante de transferencia de masa(L/T)

b es el coeficiente de transferencia de masa (L/T)

A es el área de la interfaz ( $L^2$ )

V es el volumen del líquido ( $L^3$ )

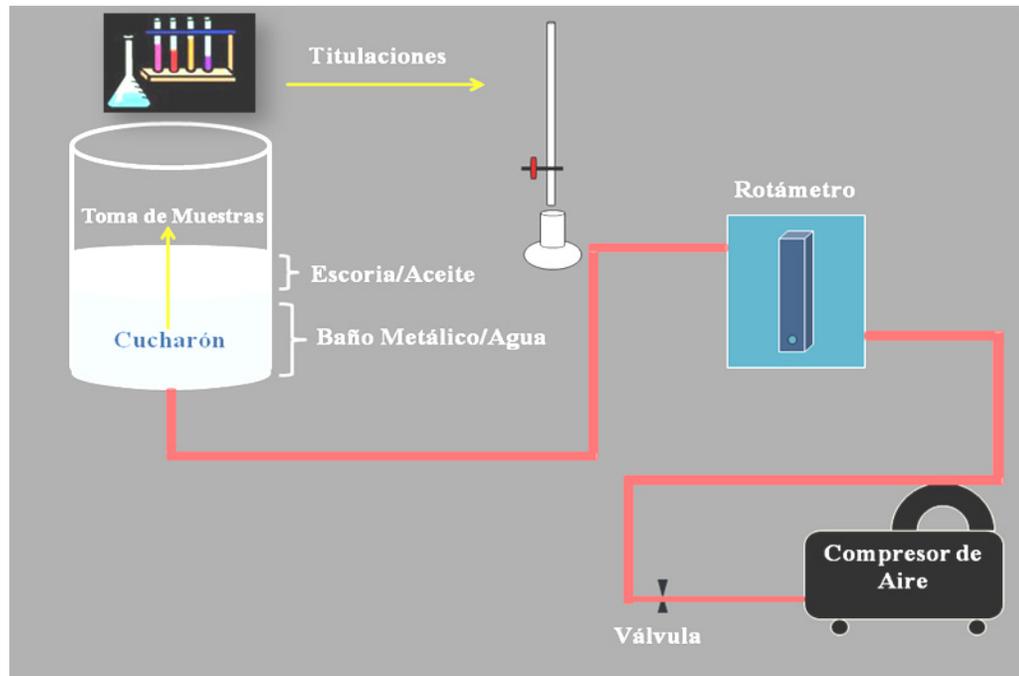


Fig. 3.15. Montaje del Modelo Físico (Cucharón) para la determinación del Coeficiente de transferencia de masa. Se toman las muestras del baño para ser tituladas con la solución de NaOH a 0,01N y posteriormente por medio de las ecuaciones que relacionan la concentración inicial, en el tiempo y en el equilibrio del ácido benzoico en el baño se determina el coeficiente de transferencia de masa.

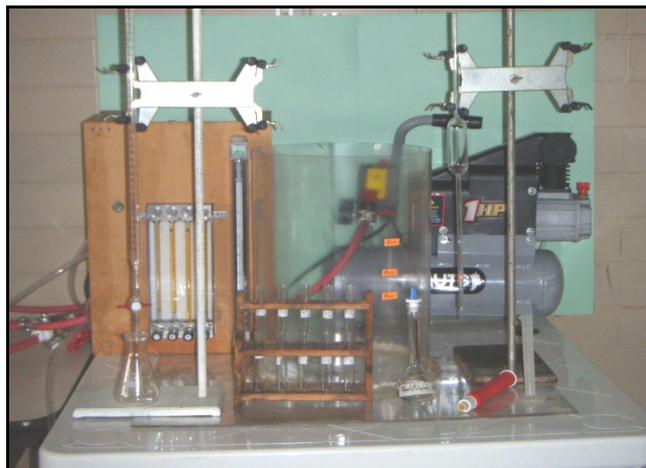


Fig. 3.16. Montaje del Modelo Físico (Cucharón) para la determinación del Coeficiente de transferencia de masa

### 3.4 Aplicación de la Metodología

Siguiendo cada uno de los pasos mencionados en la sección 3.1, se inició con la elaboración del modelo físico (cucharón), el cual fue elaborado de plexiglás transparente a manera de visualizar las fases presentes, el comportamiento del flujo con la agitación del baño, haciendo uso de todos los equipos se hizo el montaje del cucharón el cual, se muestra a continuación:

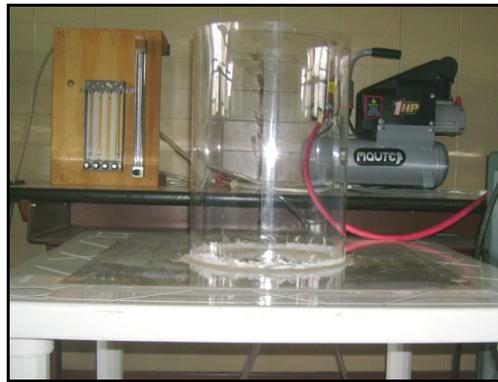


Fig. 3.17. Modelo físico construido en plexiglás transparente

En la siguiente figura se observan las dos inyecciones de gas que fueron hechas en la parte inferior del cucharón (figura 3.18 (a)). Una localización céntrica y una excéntrica a  $2/3$  del radio, con el objetivo de ver cuál de estas posiciones de inyección podría ser la más eficiente. En ambos inyectores fueron hechos 8 agujeros como se ilustra en la figura 3.18 (b), a manera de simular el comportamiento del tapón poroso en los cucharones a escala real.



Fig. 3.18. En la Figura (a) se muestra las dos localizaciones de inyección de gas (en el centro y a  $2/3$  del radio) y en (b) se muestra el diseño de los inyectores los cuales simularon la forma del tapón poroso.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos en cada una de las etapas del trabajo realizado, utilizando la metodología descrita en el capítulo III.

#### 4.1 Modelo Físico

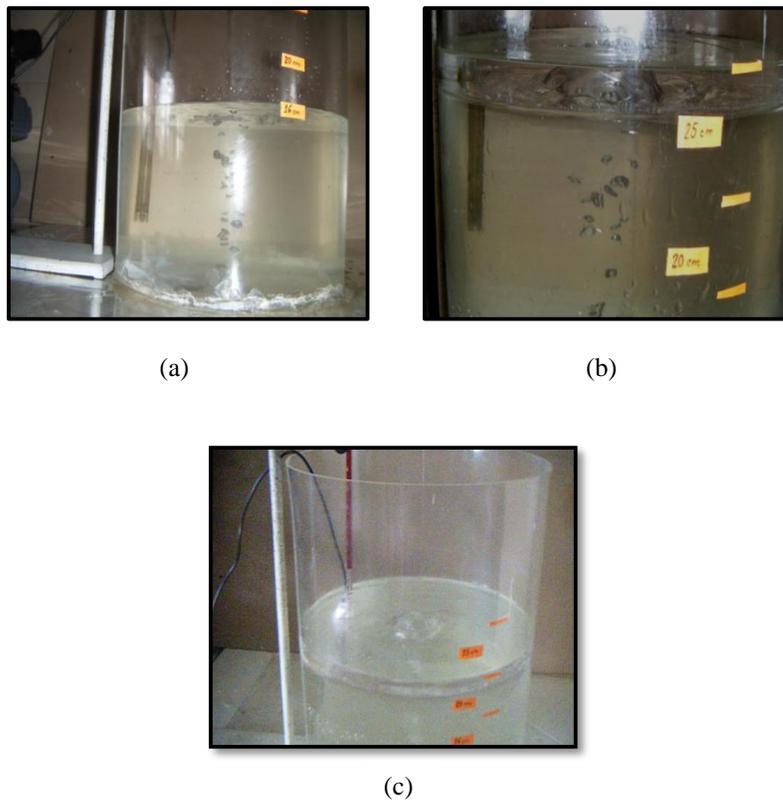
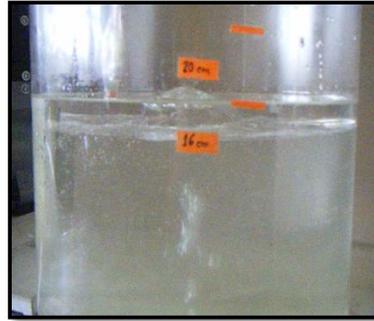


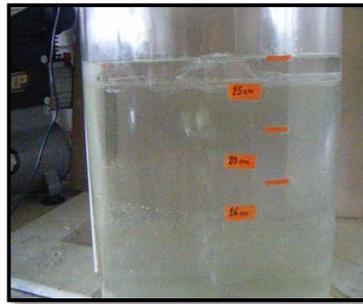
Fig. 4.1. Comportamiento del flujo en el interior del modelo físico. En (a) burbujeo sin presencia de escoria, (b) burbujeo con presencia de escoria, (c) vista superior durante la agitación del baño.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.2. Comportamiento del flujo en el interior del modelo físico. (a) Apertura de ojo a una altura del baño de 16 cm, en presencia de escoria, con inyección céntrica, (b) Apertura de ojo a una altura del baño de 20 cm, en presencia de escoria, con inyección céntrica, (c) Apertura de ojo a una altura del baño de 25 cm, en presencia de escoria, con inyección céntrica

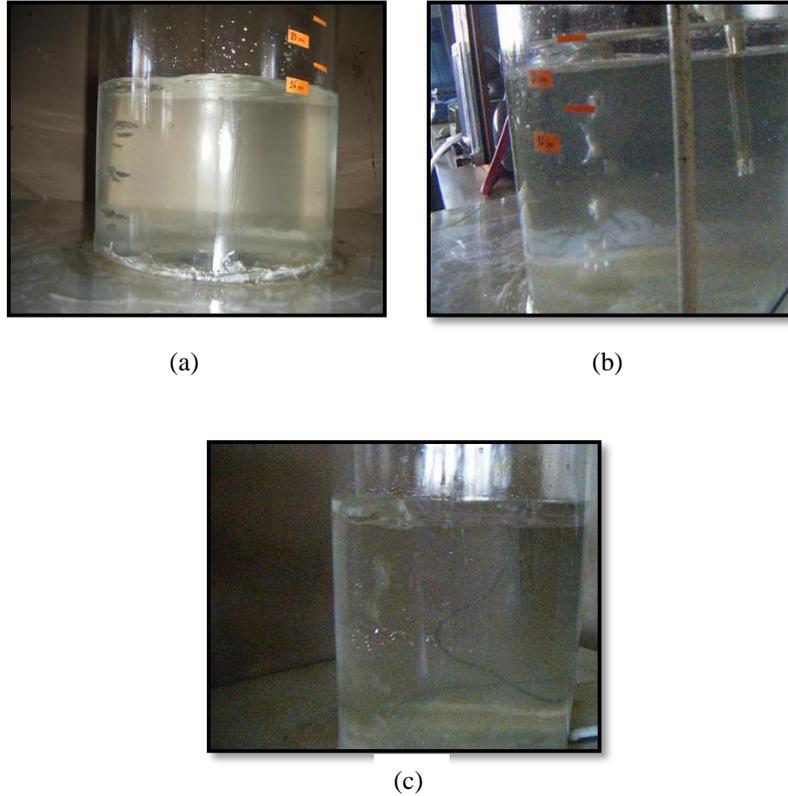


Fig. 4.3. Comportamiento del flujo en el interior del modelo físico. En (a) Burbujeo sin presencia de escoria con inyección excéntrica, (b) Apertura de ojo a una altura del baño de 20 cm, en presencia de escoria, con inyección excéntrica, (c) Apertura de ojo a una altura del baño de 25 cm, en presencia de escoria, con inyección excéntrica.

La pluma que se genera sobre el tapón poroso, presenta diversas características según sea el caudal de inyección de gas empleado, en este estudio se observó que el sistema en presencia de una o dos fases, aun empleando dos caudales diferentes de inyección ( $9,006 \cdot 10^{-6}$  y  $1,028 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ ), tuvo un comportamiento de burbujeo discreto debido a la cercanía de dichos caudales, como se aprecia en las figuras 4.1 (a), (b) y 4.3 (a).

Describiendo este comportamiento para este estudio se observó que la activación de los poros y la frecuencia del burbujeo dependía directamente del suministro de gas, al inyectar un mayor caudal, aumentaba la activación de los poros la cual no fue completa en toda su extensión, igualmente a este caudal se presentó la formación de pequeñas

aglomeraciones de burbujas las cuales llegaron a la superficie del sistema, formando lo que se conoce como “Apertura de Ojo”.

Con la inyección de gas al sistema se produce el arrastre del líquido y su recirculación, en un sistema bifásico ocurre la reducción del diámetro de la pluma, generándose así una forma cónica de la misma.

Fueron observables las diferentes regiones de la pluma bifásica, donde la zona primaria corresponde a la cercana a la inyección en la cual predominan las fuerzas de inercia. La zona de transición donde las burbujas comienzan a desintegrarse discretamente, seguidamente las burbujas se expanden donde predominan las fuerzas de flotación, y así se inicia la recirculación en el baño y finalmente la región donde las burbujas ascienden a la superficie formándose la apertura de ojo.

Para inyecciones concéntricas de gas, se aprecia la simetría en el plano de inyección debido a la formación de dos recirculaciones en la parte superior del cucharón, y el fondo queda estancado y sin turbulencia, formándose zonas muertas. Por otra parte para la inyección excéntrica se forma una sola recirculación la cual abarca todo el reactor, la cual promueve el mezclado del soluto por convección y una mejor distribución de la viscosidad cinemática turbulenta<sup>[12]</sup>, es decir, sin zonas muertas. A medida que el tapón poroso se acerca a la pared, se observa que las velocidades altas en el líquido están más cerca de ella, lo cual presumiblemente pudiera ocasionar rozamiento y por consiguiente una pérdida de cantidad de movimiento del líquido.

Por tanto, comparando la inyección concéntrica con la inyección excéntrica, el caso de inyección concéntrica es el que tardó más en mezclar al baño líquido, siendo mucho menores los tiempos de mezclado con inyecciones excéntricas.

En las figuras 4.2 (a), (b) y (c), se observó la simetría en la recirculación del baño, para inyecciones céntricas. Mientras que en las figuras 4.3 (b) y (c), se aprecia una sola recirculación para la inyección a  $2/3$  del radio.

Igualmente se observó la formación de la Apertura de ojo en el ascenso de las burbujas, la cual fue mayor a medida que el caudal de inyección de gas aumentaba, esto es debido a que es mayor el contacto de metal con la atmósfera.

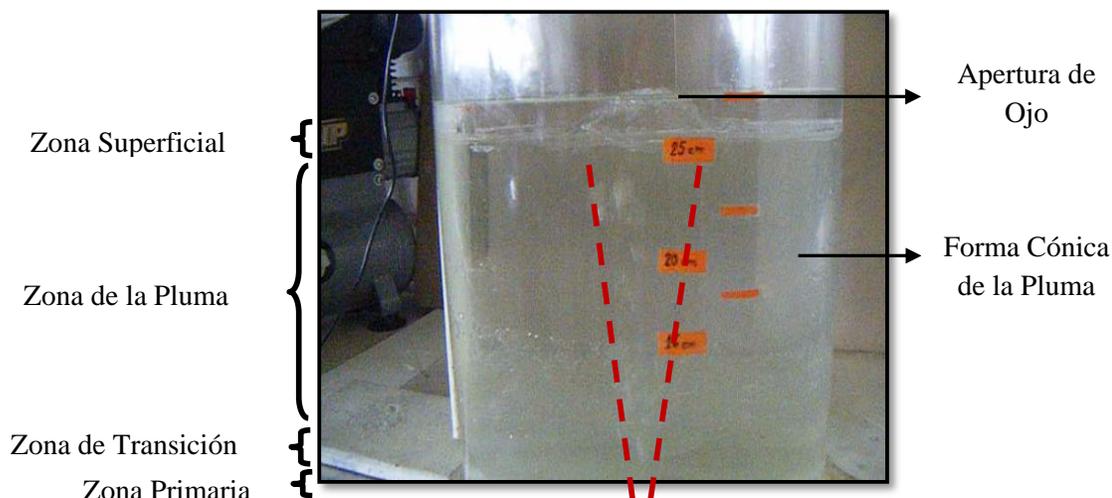


Fig. 4.4. Visualización del comportamiento del flujo en el interior del modelo físico. Se observa la Formación de la “Apertura de Ojo” y la forma cónica de la pluma bifásica, y las distintas regiones de la pluma bifásica a un caudal de  $9,01 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 4.2 DETERMINACION DEL TIEMPO DE MEZCLA

El Tiempo de Mezcla para fines de esta investigación es aquel en el cual todo el baño líquido llega al rango de concentraciones de  $\pm 5\%$  de equilibrio. Fue posible obtener estos resultados con la ayuda del Software *PicoScope* el cual proporciono la data de pH en función del tiempo.

Como fue descrito en el Capítulo anterior, para cada altura del baño, caudal y localización de los inyectores de gas, fueron hechas tres pruebas a manera de corroborar la exactitud de los resultados obtenidos. Basándonos en la similitud de dichos resultados se mostrara una gráfica representativa de cada prueba realizada. Y la data restante se encontrará en el Apéndice C.

#### 4.2.1. Tiempos de Mezcla obtenidos por el Software de medición de pH.

A continuación se muestran los gráficos correspondientes a las medidas de  $pH$  en función del tiempo presentados por el software:

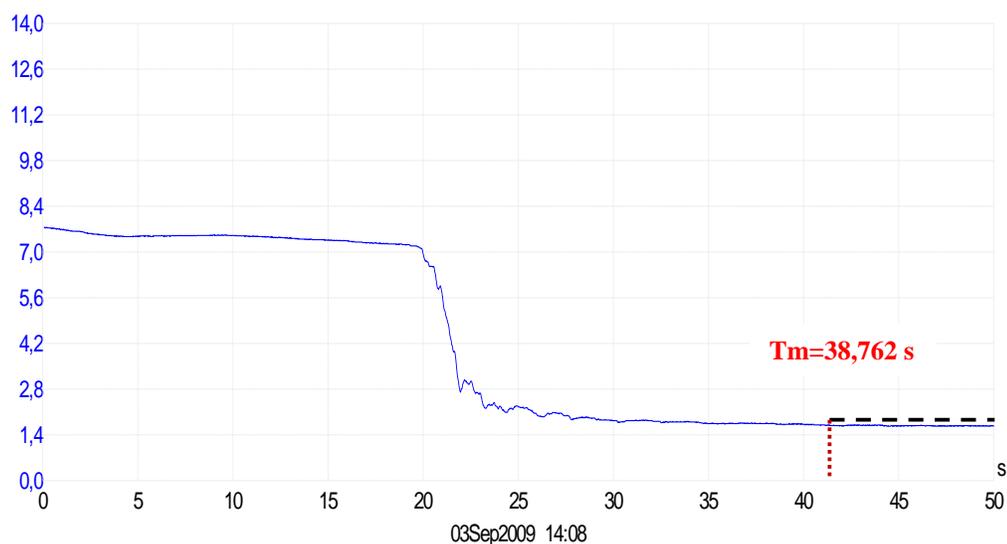


Fig. 4.5. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m, sin escoria, con una inyección de gas de  $9,01 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

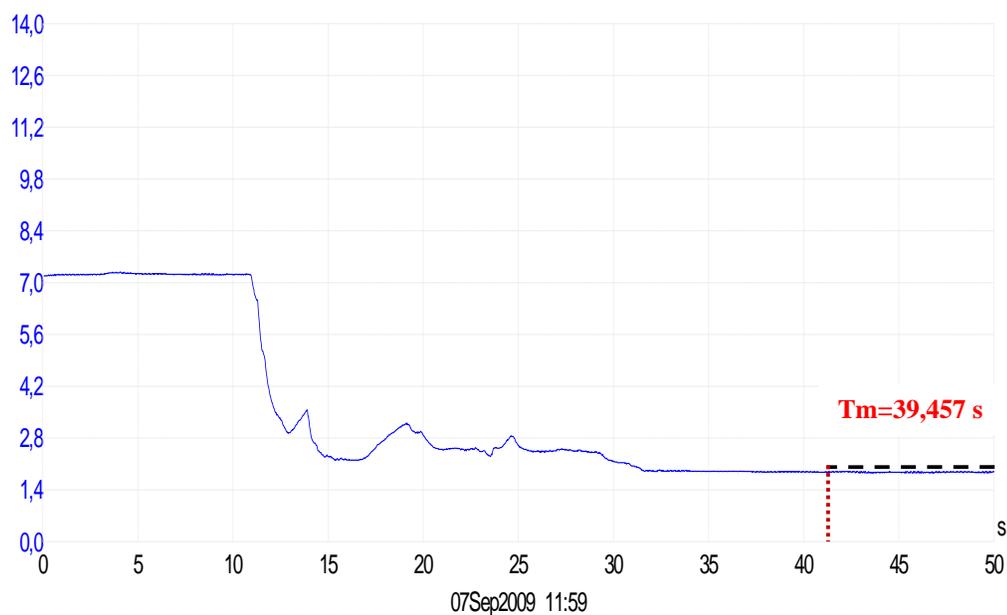


Fig. 4.6. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m, con escoria, con una inyección de gas de  $9,01 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

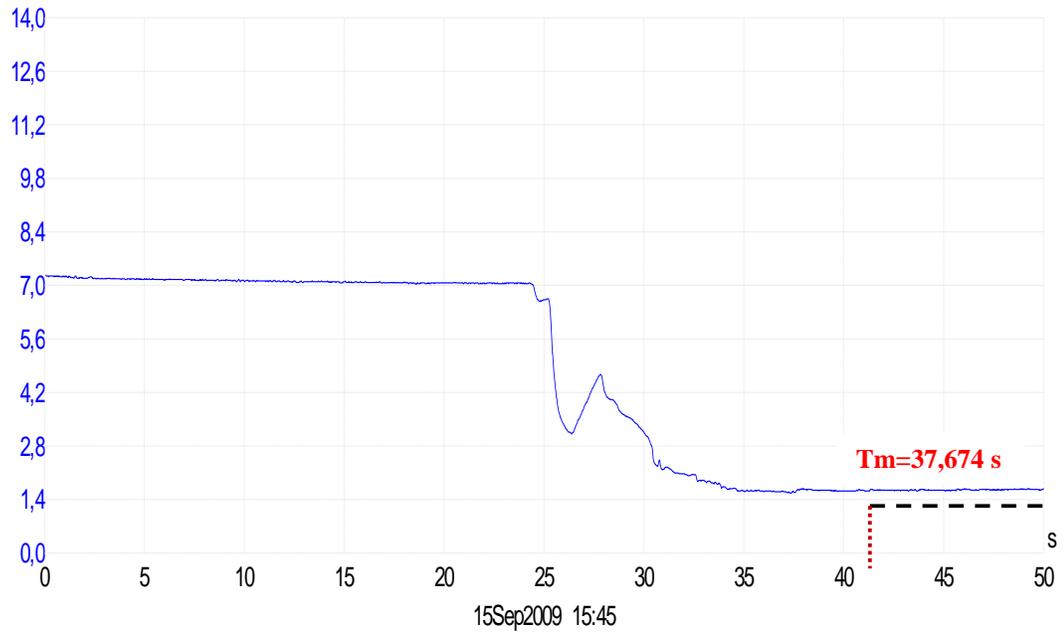


Fig. 4.7. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m, sin escoria, con una inyección de gas de  $9,01 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

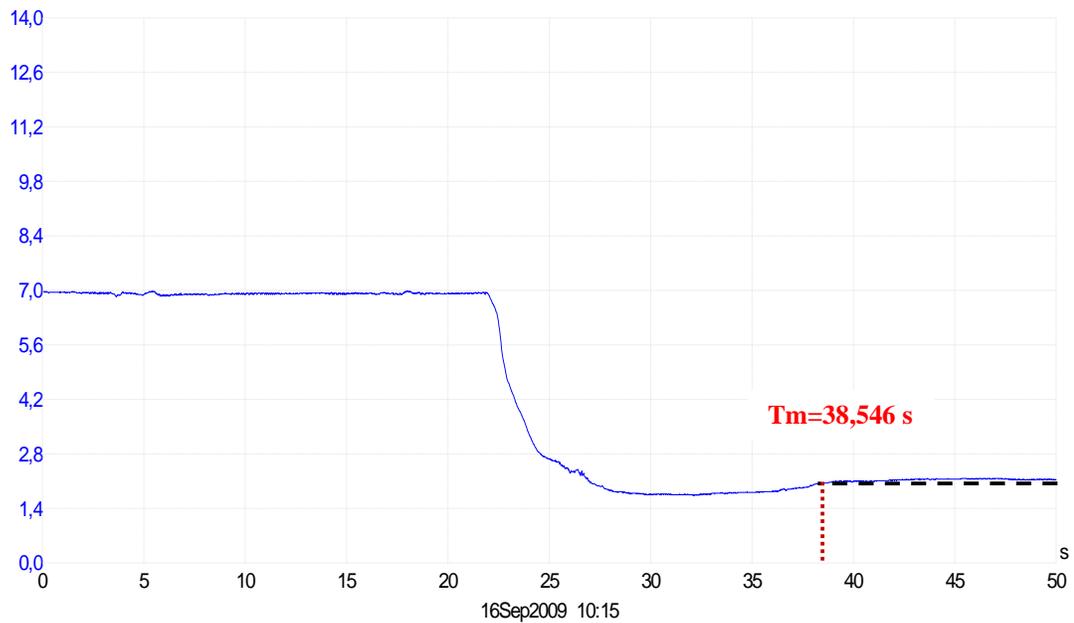


Fig. 4.8. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m, con escoria, con una inyección de gas de  $9,01 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

De las gráficas obtenidas, se tomaron los valores de tiempo de mezcla de acuerdo al procesamiento de dicha data la cual fue referida en el Capítulo II.

A continuación se muestra una tabla que muestra todos los valores de tiempo de mezcla obtenidos para cada una de las variables estudiadas en los ensayos realizados:

Tabla 4.1. Valores de Tiempo de Mezcla para cada ensayo realizado.

TIEMPOS DE MEZCLA (s)								
			Caudal 1= $9,01 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$			Caudal 2= $1,03 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$		
		Nº de Ensayos	0,16 m	0,20 m	0,25 m	0,16m	0,20 m	0,25 m
SIN ESCORIA	INYECCION CENTRICA	1	36,56	37,42	41,20	35,68	39,02	41,12
		2	38,76	39,34	43,15	36,40	36,88	41,09
		3	36,79	37,56	41,31	34,81	35,64	39,16
		Promedio	37,36	38,11	41,25	35,63	37,18	40,46
		Error	0,70	0,62	2,90	0,46	0,99	0,65
	INYECCION EXCENTRICA	1	37,87	38,19	37,31	36,03	36,02	38,70
		2	37,80	37,68	38,33	36,08	37,62	37,1
		3	36,96	36,98	39,53	36,95	37,46	37,89
		Promedio	37,55	38,02	38,31	36,35	37,03	37,90
		Error	0,29	0,45	0,64	0,30	0,51	0,46
CON ESCORIA	INYECCION CENTRICA	1	40,98	45,85	38,57	39,46	39,98	41,19
		2	39,42	41,96	45,45	39,01	40,59	41,93
		3	38,84	37,68	42,04	38,66	39,85	41,61
		Promedio	39,75	41,85	42,02	39,04	40,14	41,57
		Error	0,64	2,36	1,99	0,23	0,23	0,21
	INYECCION EXCENTRICA	1	38,55	39,55	40,99	38,99	38,26	40,01
		2	37,41	40,28	42,18	37,53	38,51	38,62
		3	39,10	41,02	42,58	37,13	38,29	39,14
		Promedio	38,35	40,28	41,92	37,88	38,35	39,25
		Error	0,50	0,42	0,48	0,56	0,08	0,40

#### 4.2.2. Tiempo de Mezcla en función del Caudal de Agitación.

Con los valores de tiempo de mezcla para cada ensayo, se realizó una serie de comparaciones a manera de determinar cuáles son las variables que permiten una mejor eficiencia en los procesos de los cucharones de acero.

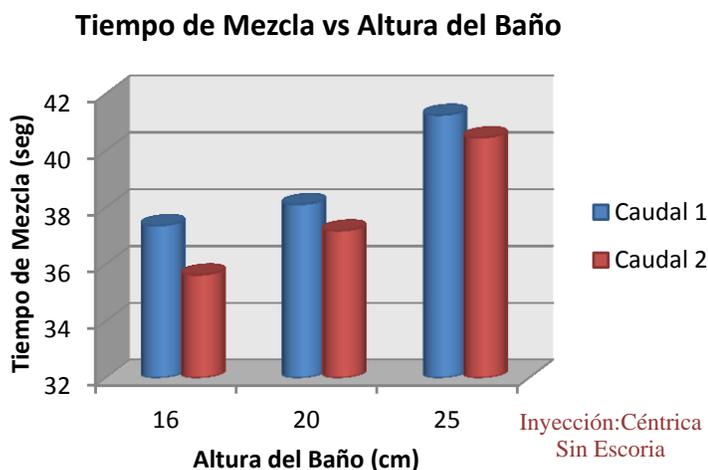


Fig. 4.9. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Altura del Baño variando los caudales de inyección de gas. (Inyección Céntrica y Sin Escoria en el sistema)

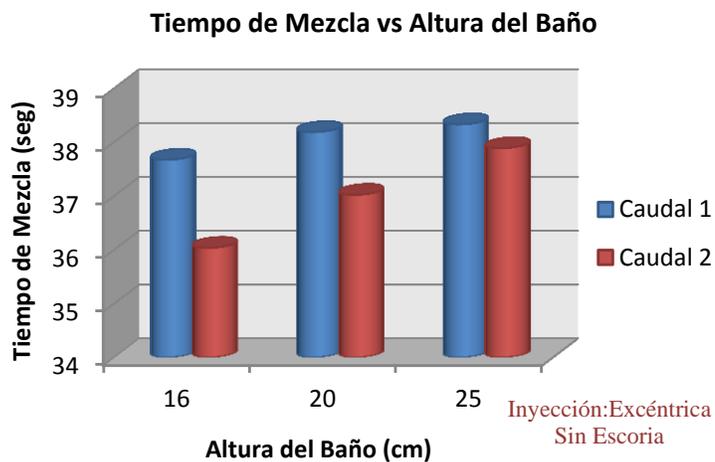


Fig. 4.10. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Altura del Baño variando los caudales de inyección de gas. (Inyección Excéntrica y Sin Escoria en el sistema)

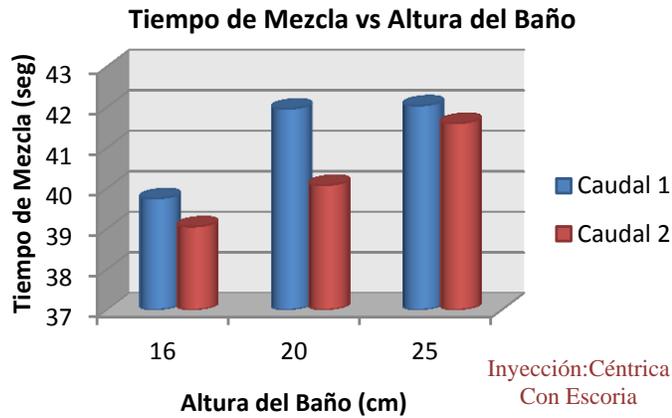


Fig. 4.11. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Altura del Baño variando los caudales de inyección de gas. (Inyección Céntrica y Con Escoria en el sistema)

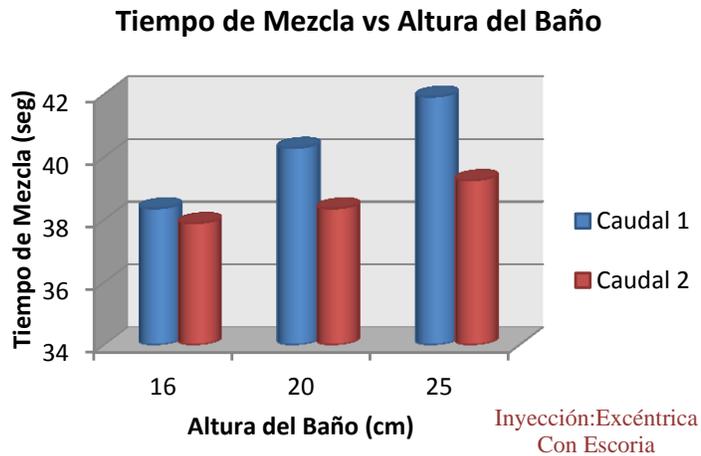


Fig. 4.12. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Altura del Baño variando los caudales de inyección de gas. (Inyección Excéntrica y Con Escoria en el sistema)

Las gráficas de las Figuras 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12, se ilustran los resultados obtenidos del tiempo de mezcla en función de las alturas del baño (0,16; 0,20 y 0,25m) y su comportamiento con respecto a cada caudal de inyección. De forma general se observó que para inyecciones céntrica y excéntrica, empleando una sola fase (baño) y dos fases (escoria y baño), el tiempo de mezcla presentó la misma tendencia, donde a menor caudal de inyección este fue mayor, retardándose más la homogeneización en el baño metálico.

Por otro lado se observó que a medida que incrementa el caudal de inyección de gas, el tiempo de mezcla disminuye, lo cual hace más eficiente proceso.

Se observa que mientras más gas se inyecte (más burbujas), mayor será la masa líquida arrastrada, se aprecia como a mayor flujo de gas, mayor será la dispersión de la fase gaseosa y, por tanto, la pluma de gas se ensancha y, por ello, se pegará más a la pared del reactor. En esos mismos planos circulares se ve que, a medida que el gas asciende, mayor es la dispersión de este. El gas acumulado dentro del reactor es directamente proporcional al flujo de gas, es decir, aumentando el flujo de gas aumenta el mezclado, ya que la presencia de mayor número de burbujas incrementa la turbulencia y consecuentemente mejora el mezclado. Al aumentar el flujo de gas, el mezclado mejora, debido a que al inyectar más gas existen mayores velocidades en el líquido y mayor turbulencia, por lo que se promueve una agitación más intensa en el reactor.

#### 4.2.3. Tiempo de Mezcla en función de las Alturas del baño.

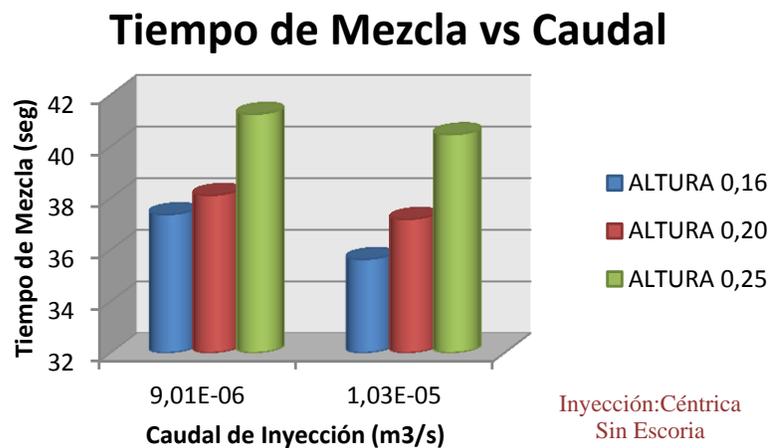


Fig. 4.13. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las Alturas del Baño Metálico. (Inyección Céntrica y Sin Escoria en el sistema)

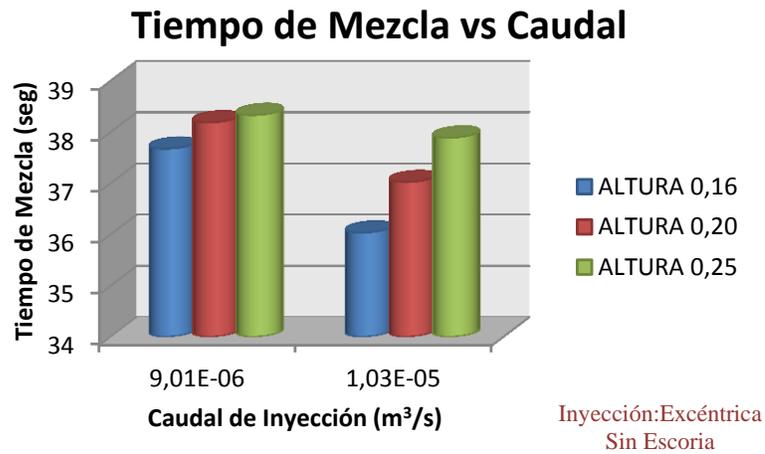


Fig. 4.14. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las Alturas del Baño Metálico. (Inyección Excéntrica y Sin Escoria en el sistema)

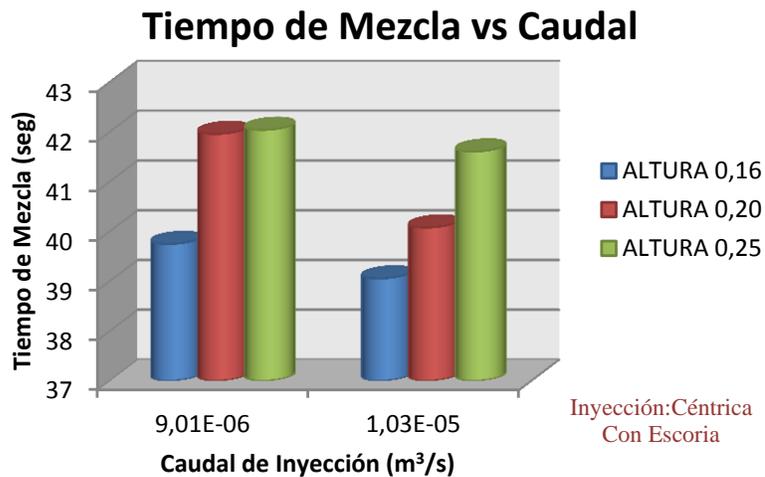


Fig. 4.15. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las Alturas del Baño Metálico. (Inyección Céntrica y Con Escoria en el sistema)

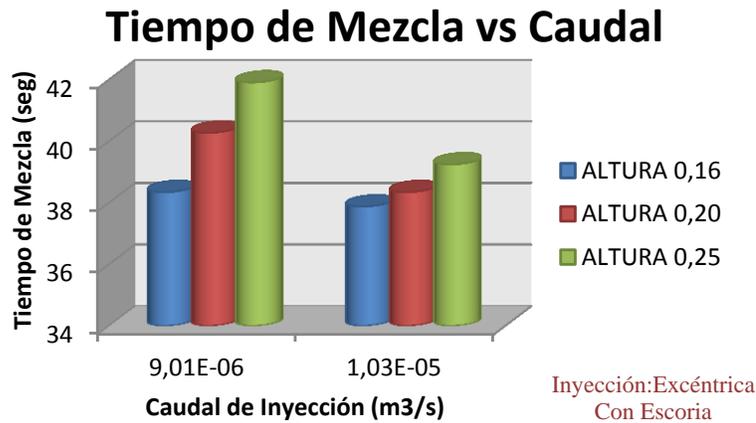


Fig. 4.16. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las Alturas del Baño Metálico. (Inyección Excéntrica y Con Escoria en el sistema)

Las gráficas de las Figuras 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16, ilustran los resultados obtenidos del tiempo de mezcla en función de los dos caudales de inyección de gas empleados, y su comportamiento con respecto a las alturas del baño (0,16; 0,20 y 0,25m). De forma general se observó que para inyecciones céntrica y excéntrica, empleando una sola fase (baño) y dos fases (escoria y baño), el tiempo de mezcla presentó la misma tendencia, donde a menor altura en el baño este fue menor, siendo más rápida la homogeneización en el baño metálico. Esto es debido a que el volumen del baño es menor facilitando así el mezclado.

#### 4.2.4. Tiempo de Mezcla en función de la localización del Inyector.

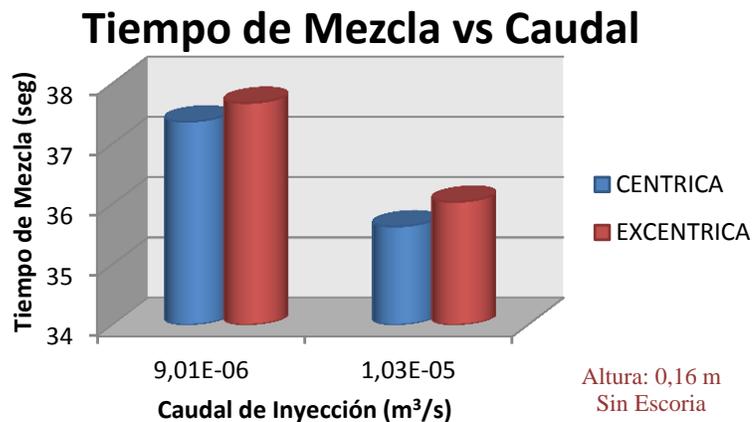


Fig. 4.17. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las localizaciones de Inyección del gas. (A una altura constante de 0,16 m y Sin Escoria en el sistema)

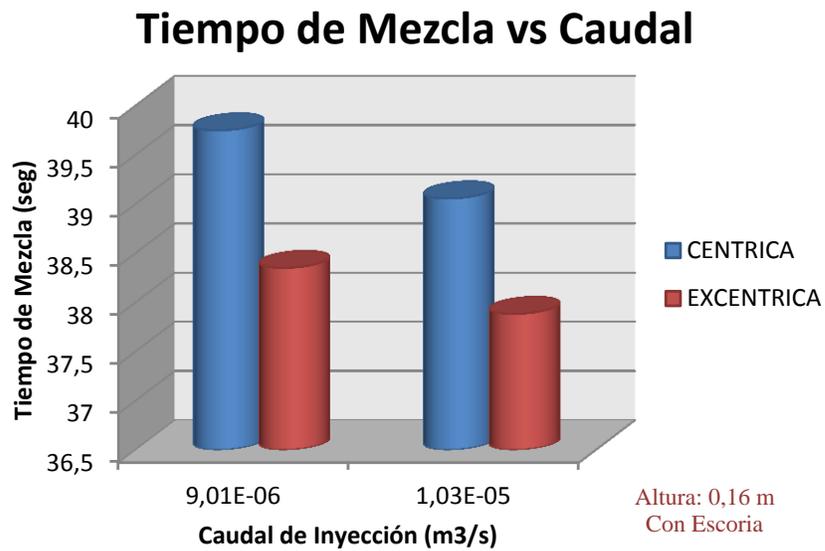


Fig. 4.18. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las localizaciones de Inyección del gas. (A una altura constante de 0,16 m y Con Escoria en el sistema)

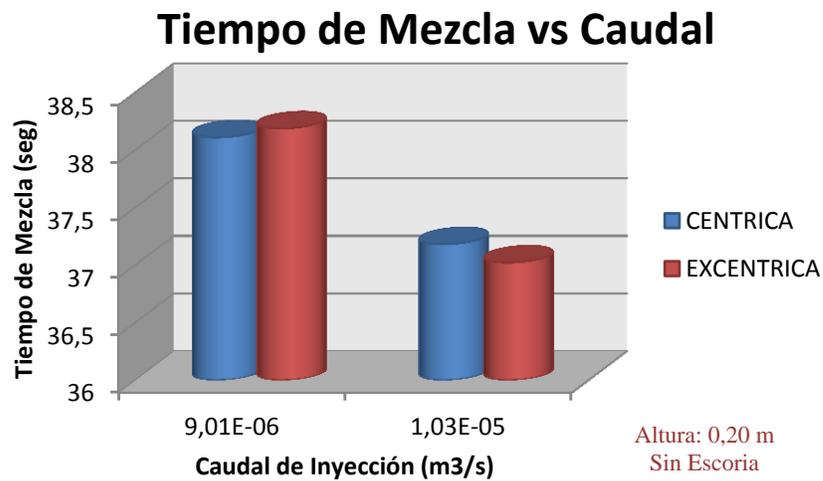


Fig. 4.19. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las localizaciones de Inyección del gas. (A una altura constante de 0,20 m y Sin Escoria en el sistema)

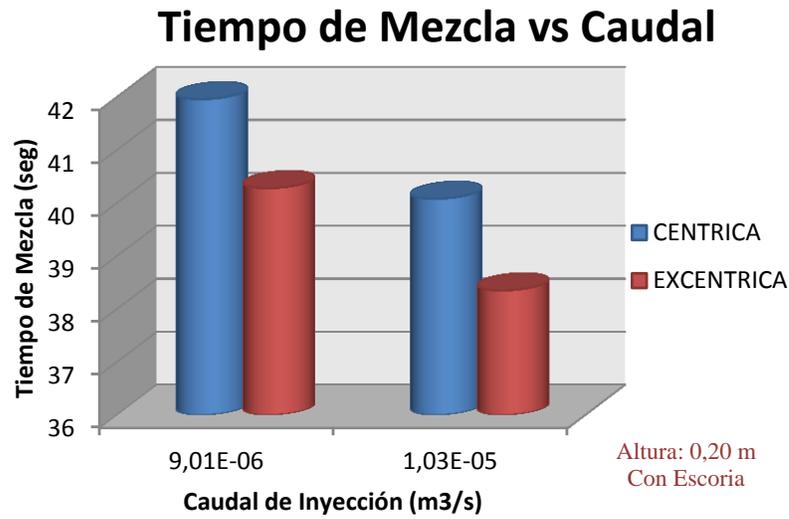


Fig. 4.20. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las localizaciones de Inyección del gas. (A una altura constante de 0,20 m y Con Escoria en el sistema)

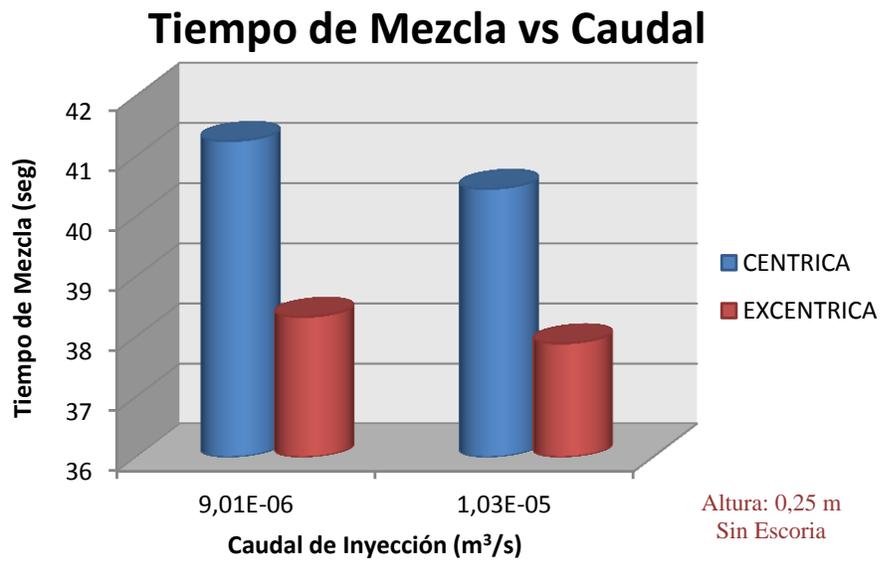


Fig. 4.21. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las localizaciones de Inyección del gas. (A una altura constante de 0,25 m y Sin Escoria en el sistema)

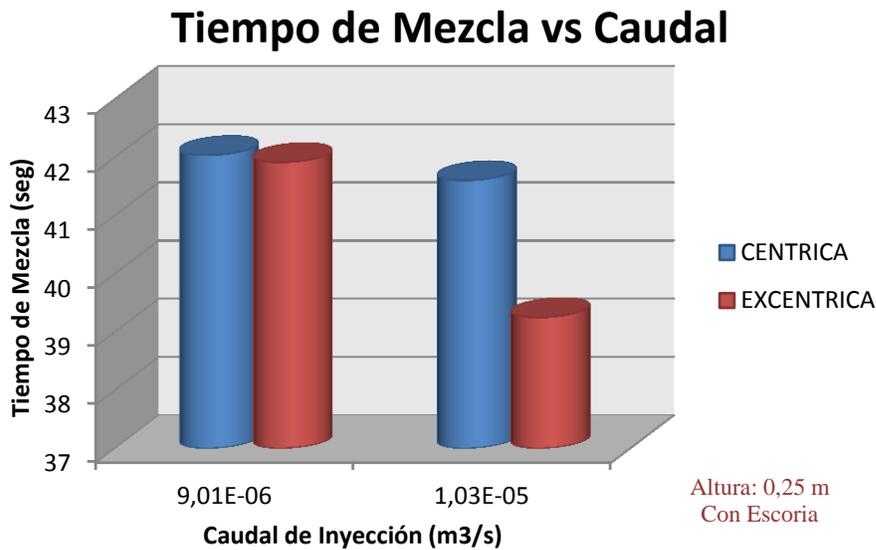


Fig. 4.22. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las localizaciones de Inyección del gas. (A una altura constante de 0,25 m y Con Escoria en el sistema)

Las gráficas de las Figuras 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21 y 4.22, ilustran los resultados obtenidos del tiempo de mezcla en función del los dos caudales de inyección de gas empleados, y su comportamiento con respecto a la localización del inyector ( céntrica y excéntrica), manteniendo las alturas constantes del baño (0,16; 0,20 y 0,25 m).

De forma general se observó que para inyecciones céntricas el tiempo de Mezcla fue mayor en comparación con las inyecciones de gas a 2/3 del radio. A excepción de la altura del baño metálico de 0,16m, en la cual la localización céntrica presento menor tiempo de mezcla, sin embargo la diferencia entre los valores para cada localización es mínima. Un caso similar se presentó para la altura de 0,20 m, ambos casos sin la presencia de escoria. Esto puede haberse debido a que sin escoria hay mayor facilidad del líquido a ser agitado dentro del volumen del baño.

#### 4.2.5. Tiempo de Mezcla en función de la presencia de la fase de escoria.

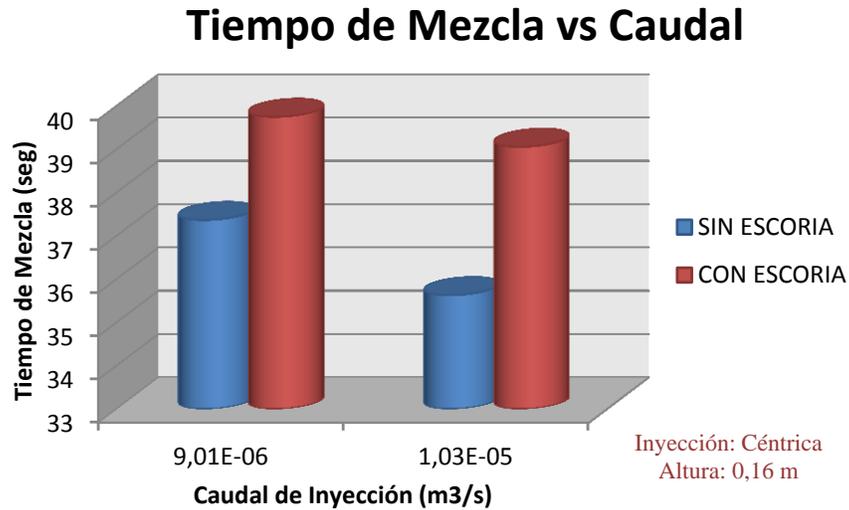


Fig. 4.23. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las fases en el sistema (Inyección Céntrica, a una altura constante del baño de 0,16 m)

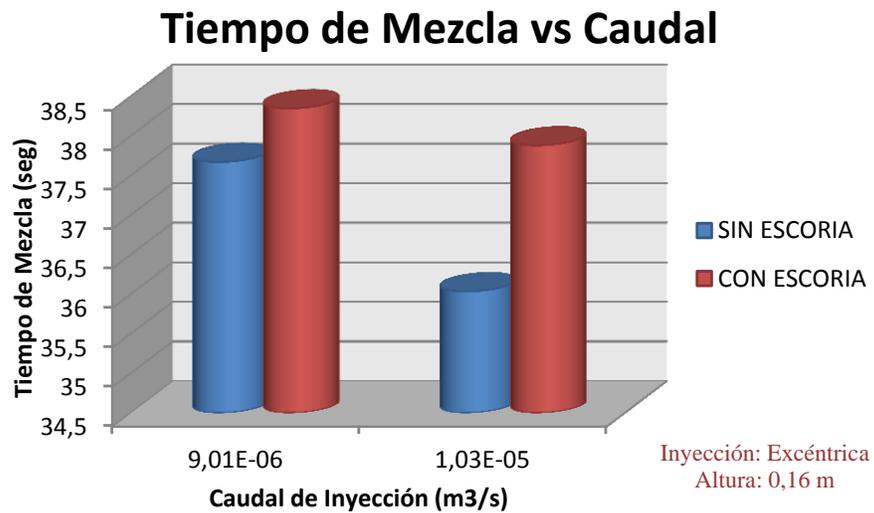


Fig. 4.24. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las fases en el sistema (Inyección Excéntrica, a una altura constante del baño de 0,16 m)

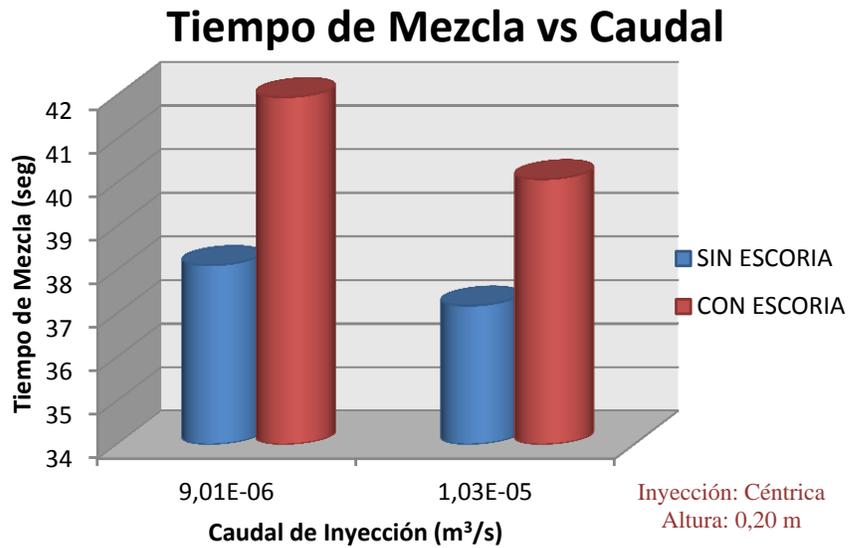


Fig. 4.25. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las fases en el sistema (Inyección Céntrica, a una altura constante del baño de 0,20 m)

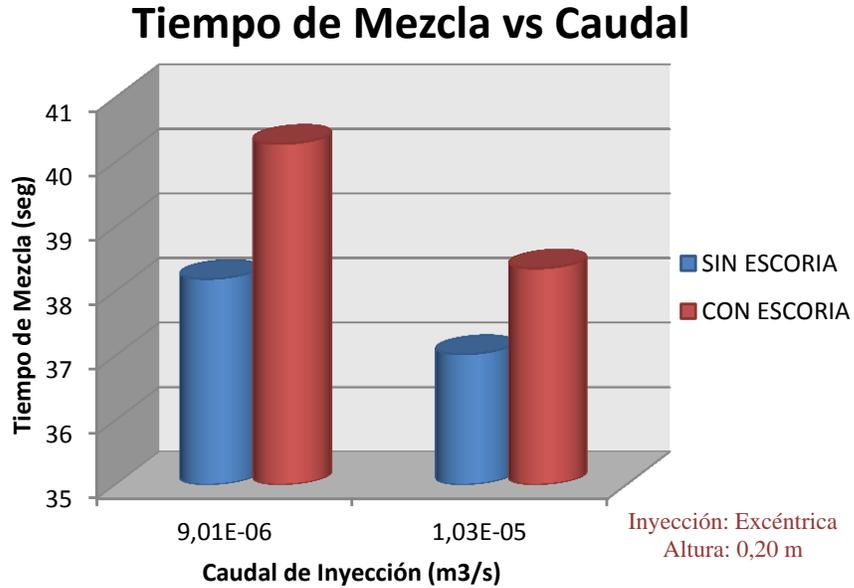


Fig. 4.26. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las fases en el sistema (Inyección Excéntrica, a una altura constante del baño de 0,20 m)

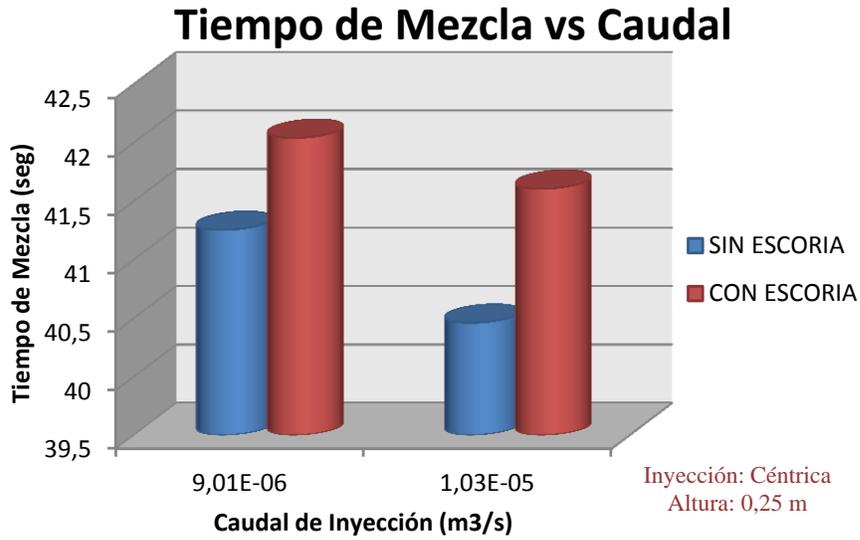


Fig. 4.27. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las fases en el sistema (Inyección Céntrica, a una altura constante del baño de 0,25 m)

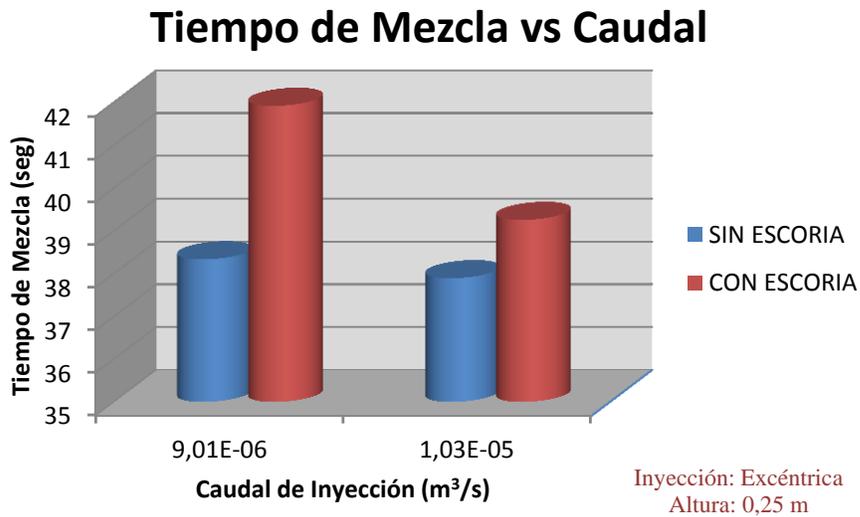


Fig. 4.28. Gráfica del Tiempo de Mezcla vs Caudal de Inyección variando las fases en el sistema (Inyección Excéntrica, a una altura constante del baño de 0,25 m)

Las gráficas de las Figuras 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27 y 4.28, ilustran los resultados obtenidos del tiempo de mezcla en función de los caudales de inyección de gas empleados, y su comportamiento con respecto a la presencia y ausencia de la escoria. En estos ensayos que fueron realizados manteniendo una altura constante del baño, se observa un

comportamiento similar, donde en presencia de escoria los tiempos de mezclas son más altos. Esto es debido a que la masa que tiene que arrastrar el gas de inyección es mayor, haciendo más lenta la homogeneización del baño. De esta manera la presencia o no de escoria en el baño es de gran influencia en el comportamiento y en la distribución de los componentes dentro del sistema.

### 4.3 DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA

#### 4.3.1. Transferencia de Masa del Ácido Benzoico a la fase escoria.

En esta investigación se obtuvo el coeficiente de transferencia de masa a partir de medidas de concentración de ácido benzoico, como se mencionó en el capítulo anterior. A partir de las titulaciones se determinó la concentración de muestras tomadas del baño, que contenían la solución marcadora. A continuación se muestran los valores obtenidos de los coeficientes de transferencia de masa para cada ensayo realizado:

Tabla 4.2. Resultados Experimentales de la Transferencia de Masa del Acido Benzoico del Agua (Baño Metálico) al Aceite (Escoria), para la localización excéntrica del inyector.

	Configuración Excéntrica					
	Altura del Baño 0,16 m		Altura del Baño 0,20 m		Altura del Baño 0,25 m	
	Flujo ( $m^3/s$ )		Flujo ( $m^3/s$ )		Flujo ( $m^3/s$ )	
Tiempo	$9,006 \cdot 10^{-06}$	$1,028 \cdot 10^{-05}$	$9,006 \cdot 10^{-06}$	$1,028 \cdot 10^{-05}$	$9,006 \cdot 10^{-06}$	$1,028 \cdot 10^{-05}$
(seg)	$C_t/C_1$	$C_t/C_1$	$C_t/C_1$	$C_t/C_1$	$C_t/C_1$	$C_t/C_1$
0	1	1	1	1	1	1
30	0.98198	1	0.98198	1	0.99099	1
60	0.97297	0.99099	0.96396	0.99099	0.97297	0.99099
90	0.96396	0.96396	0.96396	0.99099	0.94594	0.99099
120	0.96396	0.96396	0.96396	0.99099	0.94594	0.99099

Tabla 4.3. Resultados Experimentales de la Transferencia de Masa del Acido Benzoico del Agua (Baño Metálico) al Aceite (Escoria), para la localización céntrica del inyector.

	Configuración Céntrica					
	Altura del Baño 0,16 m		Altura del Baño 0,20 m		Altura del Baño 0,25 m	
	Flujo ( $m^3/s$ )		Flujo ( $m^3/s$ )		Flujo ( $m^3/s$ )	
Tiempo	$9,006 \cdot 10^{-06}$	$1,028 \cdot 10^{-05}$	$9,006 \cdot 10^{-06}$	$1,028 \cdot 10^{-05}$	$9,006 \cdot 10^{-06}$	$1,028 \cdot 10^{-05}$
(seg)	$C_t/C_1$	$C_t/C_1$	$C_t/C_1$	$C_t/C_1$	$C_t/C_1$	$C_t/C_1$
0	1	1	1	1	1	1
30	0.91891	0.95495	0.96396	0.94594	1	0.96396
60	0.9099	0.93694	0.95495	0.92792	0.99099	0.95495
90	0.9009	0.9009	0.94594	0.91891	0.97297	0.93694
120	0.9009	0.9009	0.94594	0.91891	0.97297	0.93694

#### 4.3.2. Transferencia de Masa en función de las alturas del baño.

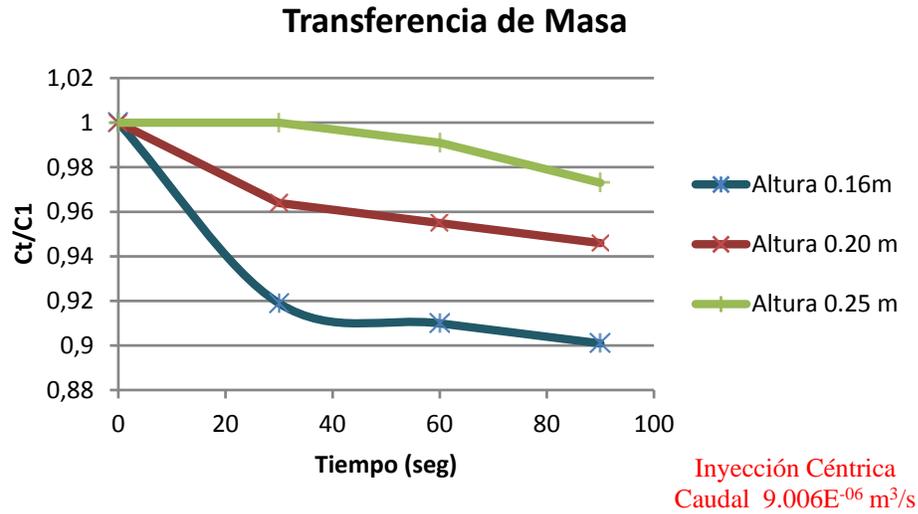


Fig. 4.29. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo variando las alturas del baño metálico (Inyección Céntrica, A un caudal de  $9,006 \cdot 10^{-06} m^3/s$ )

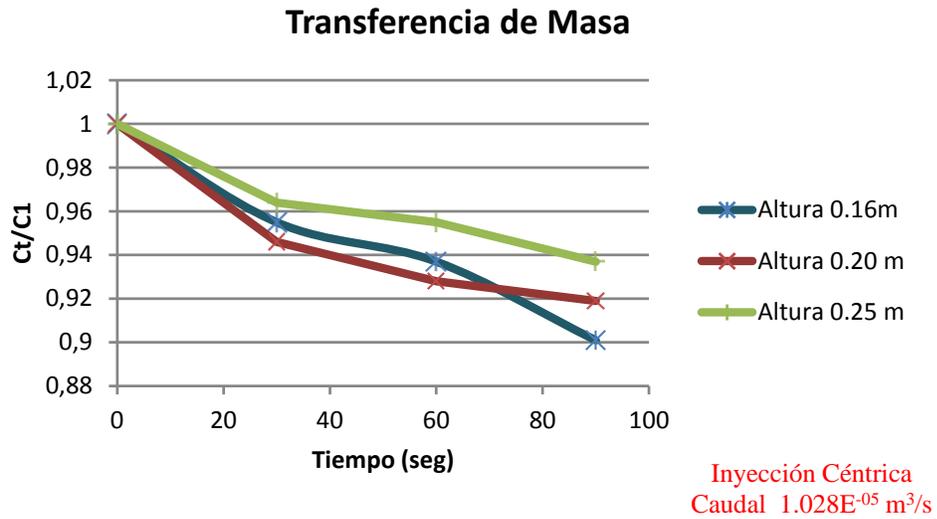


Fig. 4.30. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo variando las alturas del baño metálico (Inyección Céntrica, A un caudal de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$ )

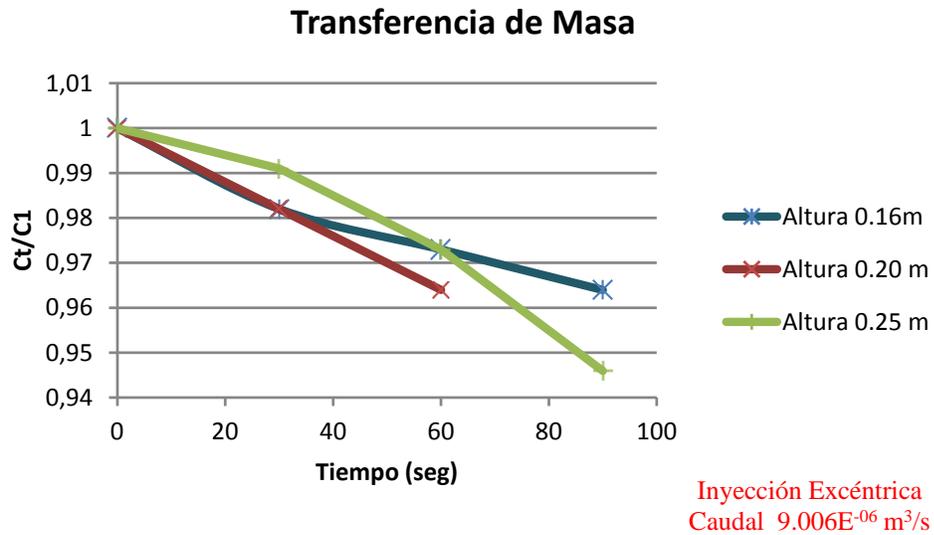


Fig. 4.31. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo variando las alturas del baño metálico (Inyección Excéntrica, A un caudal de  $9.006E^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$ )

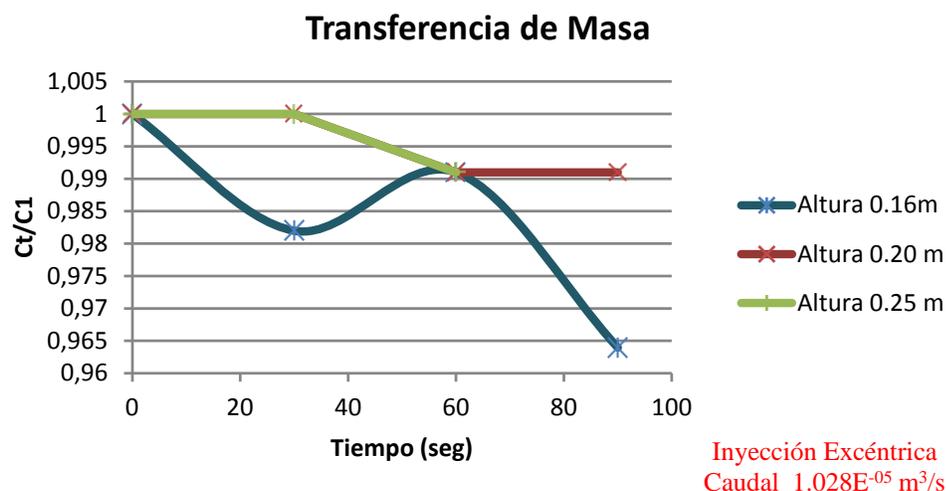


Fig. 4.32. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo variando las alturas del baño metálico (Inyección Excéntrica, A un caudal de  $1.028E^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$ )

Las muestras fueron tomadas cada treinta segundos, los resultados se muestran en función de la relación de concentración en el tiempo  $C_t$  (30, 60, 90 segundos) y la concentración de ácido inicial  $C_1$ , en la figura 4.29 se observa que a mayor altura la relación  $C_t/C_1$  es mayor lo que significa que mayor es la concentración de ácido presente en el baño (agua) y por ende menor es la transferencia de masa.

A medida que transcurrió el tiempo para la toma de muestras el coeficiente de transferencia de masa fue descendiendo, esto es debido a que durante el inicio la agitación del baño produce un rápido movimiento del flujo promoviendo la rápida transferencia, y al transcurrir el tiempo va quedando en la escoria toda la masa que fue transferida del baño.

En la figura 4.30, se ve un comportamiento similar, a excepción de los valores de concentraciones para las alturas de 0,16m y 0,20m donde se obtuvo que a 0,20m menor fue la concentración de ácido, y solo a los 90 segundos en la altura de 0,16m se obtuvo una mayor concentración lo que quiere decir una mayor transferencia de masa.

Para todas las alturas ensayadas no se produjo transferencia de masa a los 120 segundos. Es decir que no se halló ningún cambio apreciable en la concentración de ácido benzoico, medida a través de las titulaciones.

En la figura 4.31 se obtuvieron concentraciones de ácido más altas a mayor altura, y solo a 0,25m la concentración de ácido fue menor en el baño en comparación con las alturas restantes y esto ocurrió a los 90 segundos.

Por lo general a medida que transcurrió el tiempo de toma de las muestras la relación de concentración  $C_t/C_1$  fue mayor a mayor altura del baño metálico (agua), esto corrobora los resultados obtenidos en tiempo de mezcla donde a menor altura existe mayor homogeneización del baño. Y con menores alturas del baño fue mejor la agitación en el interior del modelo lo que aceleró la transferencia de ácido de la fase del metal (agua) a la fase escoria (aceite).

Estas pruebas de transferencia de masa se realizaron en estos cortos intervalos de tiempo ya que así se obtuvieron valores diferenciables en las titulaciones, esto quizás es porque con la metodología seguida en este trabajo la técnica resulta ser muy poco sensible para la determinación de las concentraciones por medio de la titulación.

#### 4.3.3. Transferencia de Masa en función del caudal de agitación.

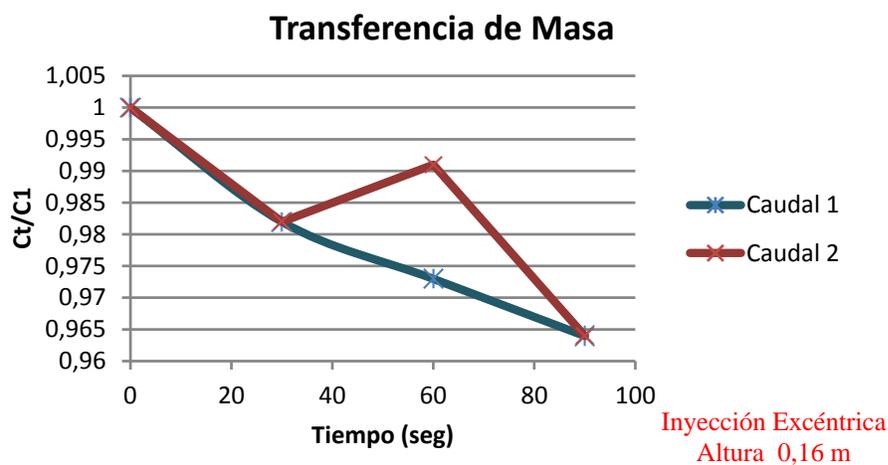


Fig. 4.33. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo variando el caudal de inyección del gas (Inyección Excéntrica, A una altura de 0,16 m de baño metálico)

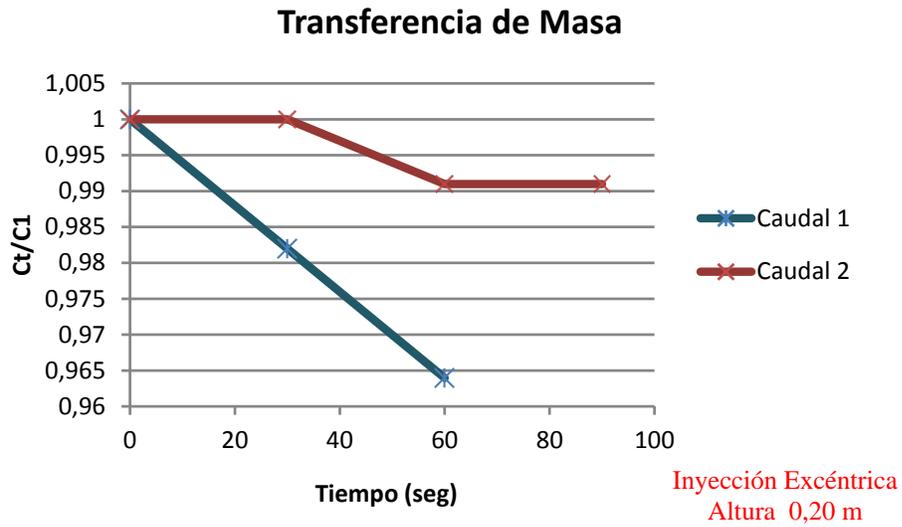


Fig. 4.34. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo variando el caudal de inyección del gas (Inyección Excéntrica, A una altura de 0,20 m de baño metálico)

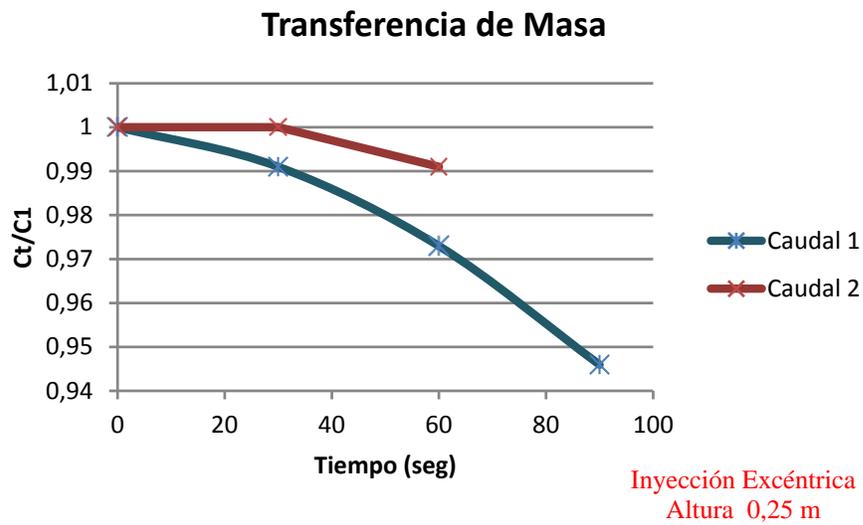


Fig. 4.35. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo variando el caudal de inyección del gas (Inyección Excéntrica, A una altura de 0,25 m de baño metálico)

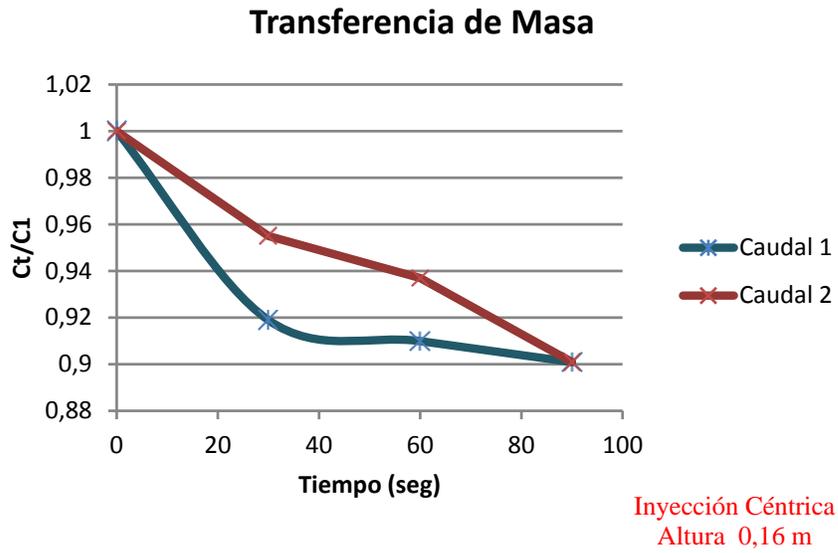


Fig. 4.36. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo variando el caudal de inyección del gas (Inyección Céntrica, A una altura de 0,16 m de baño metálico)

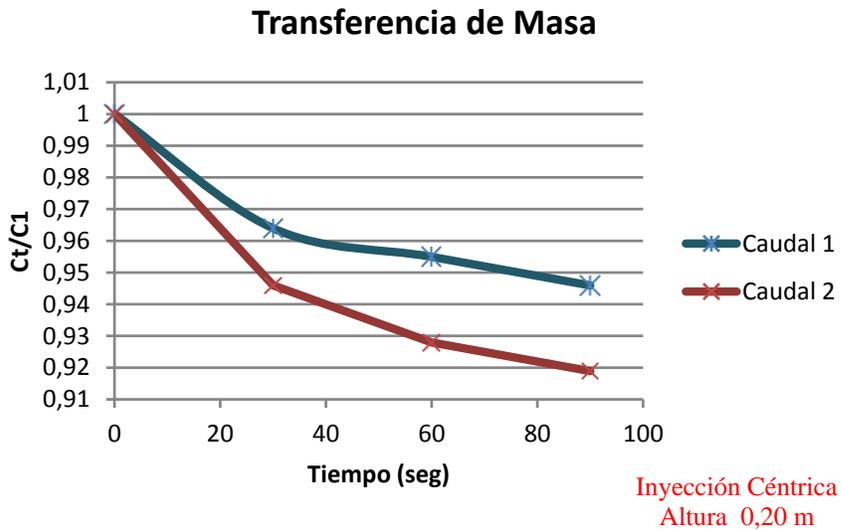


Fig. 4.37. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo variando el caudal de inyección del gas (Inyección Céntrica, A una altura de 0,20 m de baño metálico)

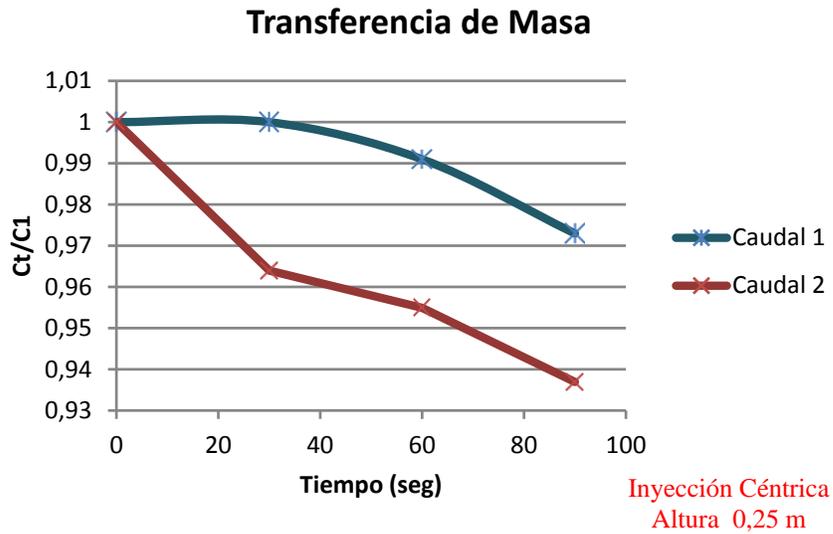


Fig. 4.38. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo variando el caudal de inyección del gas (Inyección Céntrica, A una altura de 0,25 m de baño metálico)

En cuanto a los caudales de inyección se obtuvo que a mayor agitación (mayor caudal) mayor es la transferencia de masa, en la figura 4.33 se observa que a 90 segundos para el caudal 2 no se obtiene valor de transferencia en función de las concentraciones y para las figuras 4.34, 4.35, 4.36, 4.37, 4.38 a 120 segundos tampoco se obtienen valores de transferencia, las figuras donde se presentó un resultado contrario al esperado fueron la 4.37, 4.38, donde con el caudal 1 se obtienen mayor transferencia de ácido al aceite.

#### 4.3.4. Transferencia de Masa en función de la localización del Inyector.

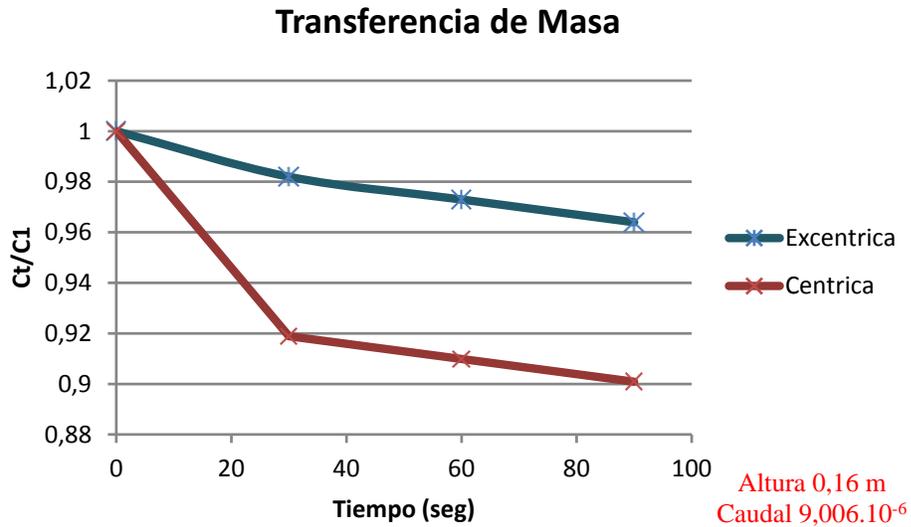


Fig. 4.39. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo en función de las localizaciones de inyección del gas (A una altura de 0,16 m, a un caudal de  $9,006 \cdot 10^{-6}$ )

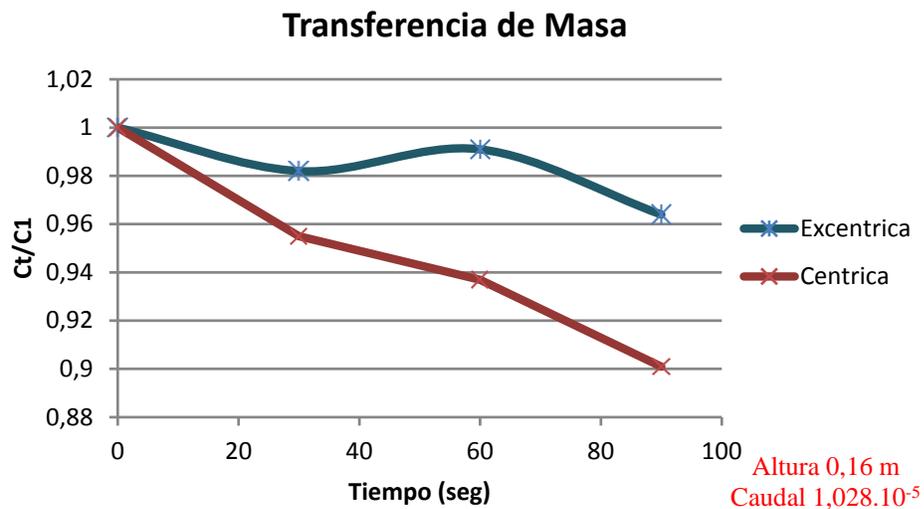


Fig. 4.40. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo en función de las localizaciones de inyección del gas (A una altura de 0,16 m, a un caudal de  $1,028 \cdot 10^{-5}$ )

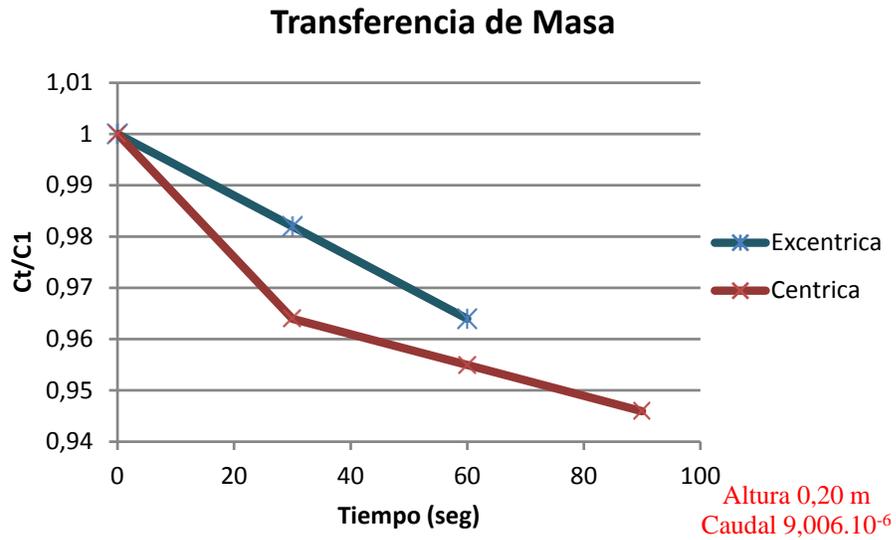


Fig. 4.41. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo en función de las localizaciones de inyección del gas (A una altura de 0,20 m, a un caudal de  $9,006 \cdot 10^{-6}$ )

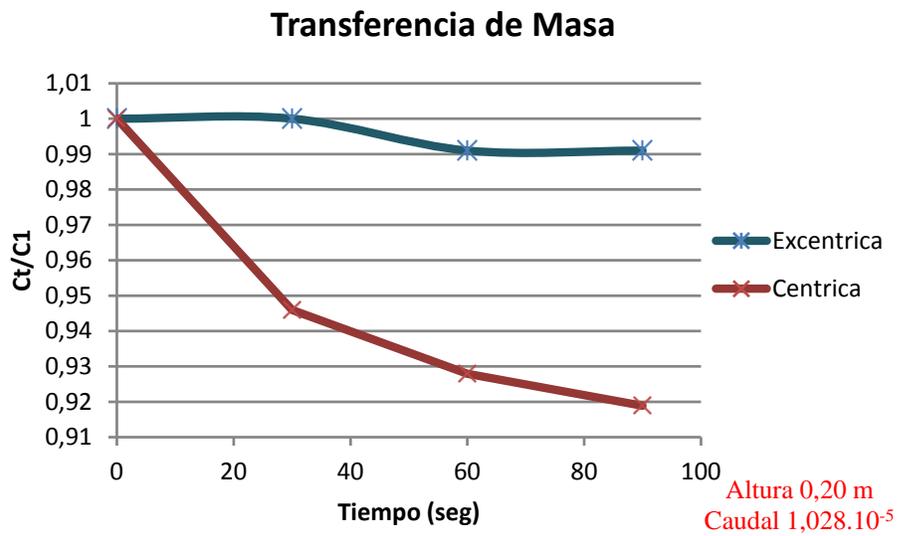


Fig. 4.42. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo en función de las localizaciones de inyección del gas (A una altura de 0,20 m, a un caudal de  $1,028 \cdot 10^{-5}$ )

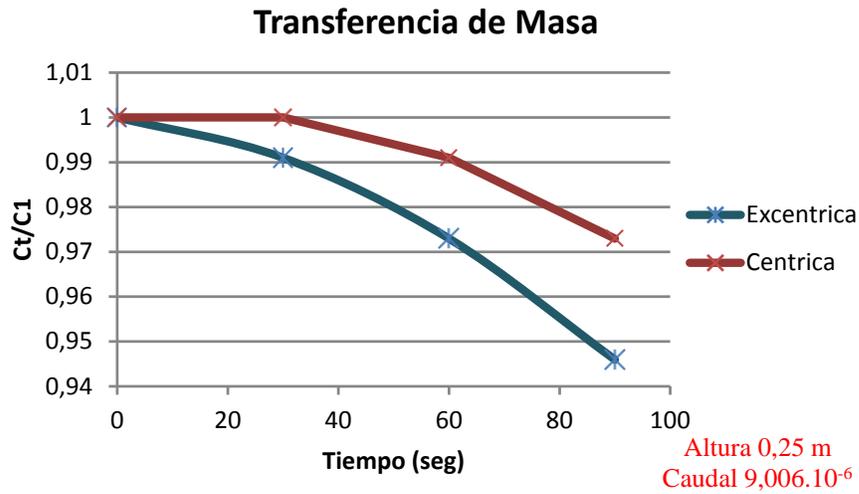


Fig. 4.43. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo en función de las localizaciones de inyección del gas (A una altura de 0,25 m, a un caudal de  $9,006 \cdot 10^{-6}$ )

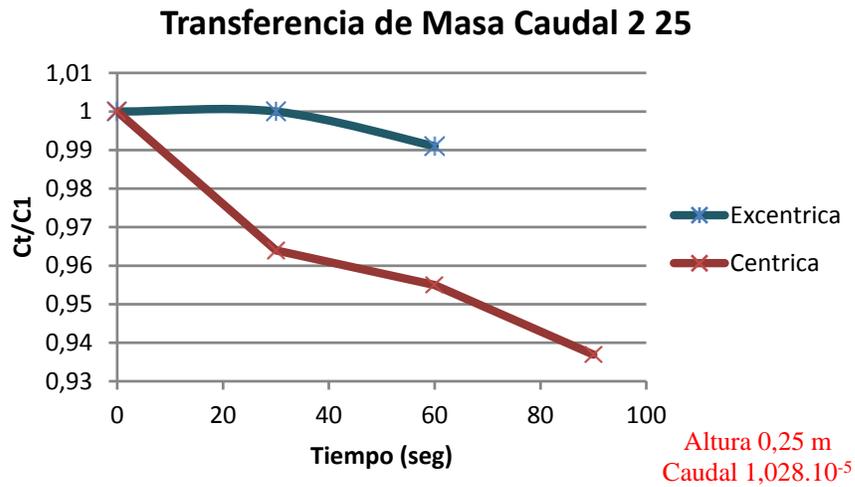


Fig. 4.44. Gráfica de la Transferencia de Masa vs Tiempo en función de las localizaciones de inyección del gas (A una altura de 0,25 m, a un caudal de  $1,028 \cdot 10^{-5}$ )

Comparando cual de las localizaciones de inyección de gas fue la más eficiente en este estudio bajo estas condiciones de trabajo, se observa que en las figuras 4.39, 4.40, 4.41, 4.42 y 4.44 que a inyecciones céntricas se obtiene una menor concentración de ácido en el baño lo que implica una mayor transferencia de masa a la fase escoria (aceite).

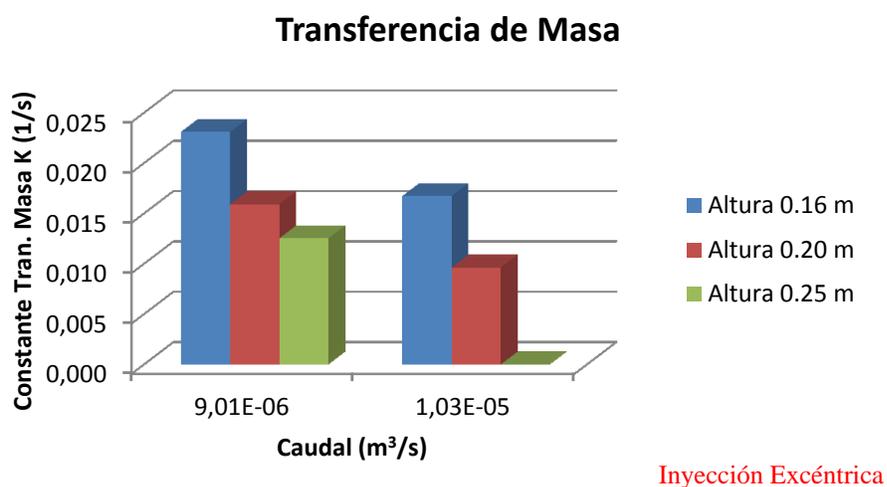
Solo en la figura 4.43 se observa un comportamiento contrario donde para inyecciones excéntricas hay mayor transferencia de masa, y esto fue al emplear la mayor altura del baño y el menor caudal de agitación.

Sin embargo la técnica empleada para la determinación de la transferencia de masa da resultados que muestran que para inyecciones céntricas existe una mejor transferencia de masa que para inyecciones excéntricas.

#### 4.3.5. Cálculo de la Constante de Transferencia de masa

Tabla 4.4. Resultados Experimentales de la Constante de Transferencia de Masa del Acido Benzoico del Agua (Baño Metálico) al Aceite (Escoria), para la localización Excéntrica del inyector.

<b>Configuración Excéntrica</b>			
Constante de Transferencia de Masa K (1/s)			
Flujo (m <sup>3</sup> /s)	Altura del Baño 0,16 m	Altura del Baño 0,20 m	Altura del Baño 0,25 m
9,01.10 <sup>-06</sup>	0,023 ± 2,13.10 <sup>-16</sup>	0,016 ± 0,002	0,013 ± 0,001
1,03.10 <sup>-05</sup>	0,017 ± 0,001	0,010 ± 0,002	0

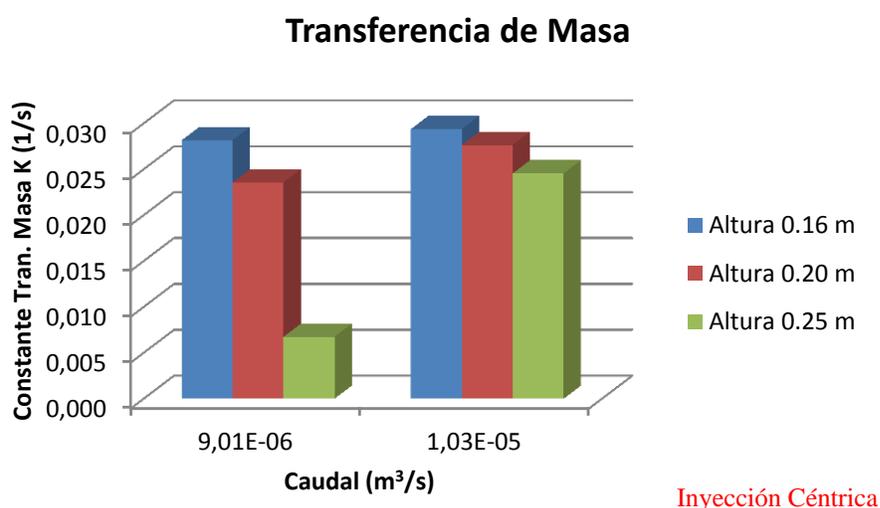


Inyección Excéntrica

Fig. 4.45. Gráfica de la Constante de Transferencia de Masa vs Tiempo en función de las alturas del baño metálico (Inyección Excéntrica)

Tabla 4.5. Resultados Experimentales de la Constante de Transferencia de Masa del Acido Benzoico del Agua (Baño Metálico) al Aceite (Escoria), para la localización Excéntrica del inyector.

<b>Configuración Céntrica</b>			
Constante de Transferencia de Masa K (1/s)			
Flujo (m <sup>3</sup> /s)	Altura del Baño 0,16 m	Altura del Baño 0,20 m	Altura del Baño 0,25 m
9,01.10 <sup>-06</sup>	0,028± 0,006	0,024± 0,002	0,007± 1,27.10 <sup>-9</sup>
1,03.10 <sup>-05</sup>	0,029± 0,004	0,028± 0,001	0,025± 0,002



Inyección Céntrica

Fig. 4.46. Gráfica de la Constante de Transferencia de Masa vs Tiempo en función de las alturas del baño metálico (Inyección Céntrica)

La constante de transferencia de masa se calcula en función de las concentraciones de ácido y es función del tiempo que tarda el ácido en transferirse a la fase escoria (aceite).

Al hacer el cálculo de la constante de transferencia de masa se obtiene que para inyecciones excéntricas con el caudal 2, se obtuvieron valores menores siendo menor la transferencia de masa que a menor caudal, y en relación con las alturas fue mayor la transferencia de ácido a menor altura.

Sin embargo para inyección céntrica se obtuvieron valores más elevados en comparación con inyecciones excéntricas, y con el caudal 2 los valores de la constante de

transferencia fueron mayores. En relación con los resultados es de esperarse que a mayor caudal la transferencia de masa sea mayor y por tanto la constante de transferencia sea mayor en comparación con caudales menores, esto debido a que al mismo volumen del baño la agitación es mayor a caudal más elevado lo que hace más rápido la transferencia de especies.

A continuación se determino los valores del Coeficiente de transferencia de masa para cada caso estudiado.

#### 4.3.6. Cálculo del Coeficiente de Transferencia de masa

Tabla 4.6. Resultados Experimentales del Coeficiente de Transferencia de Masa del Acido Benzoico del Agua (Baño Metálico) al Aceite (Escoria), para la localización Excéntrica del inyector.

	<b>Configuración Excéntrica</b>					
	Altura del Baño 0,16 m		Altura del Baño 0,20 m		Altura del Baño 0,25 m	
	Flujo (m <sup>3</sup> /s)		Flujo (m <sup>3</sup> /s)		Flujo (m <sup>3</sup> /s)	
Coef. Trans. Masa K (m/s)	9,01.10 <sup>-06</sup>	1,03.10 <sup>-05</sup>	9,01.10 <sup>-06</sup>	1,03.10 <sup>-05</sup>	9,01.10 <sup>-06</sup>	1,03.10 <sup>-05</sup>
	0,00370	0,00268	0,00318	0,00193	0,00313	

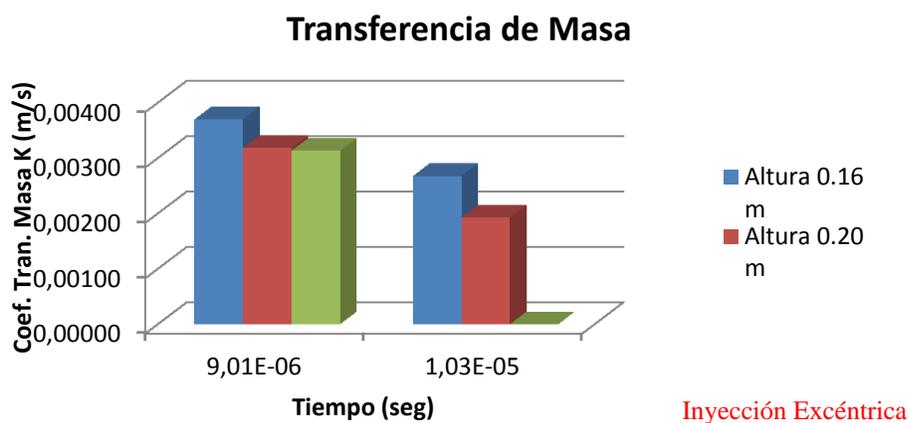


Fig. 4.47. Gráfica del Coeficiente de Transferencia de Masa vs Tiempo en función de las alturas del baño metálico (Inyección Excéntrica)

Al determinar los valores del coeficiente de transferencia de masa para cada uno de los ensayos realizados, se observa que tanto las alturas del líquido como el caudal influyen en la transferencia de masa del ácido a la fase escoria (aceite), para la configuración excéntrica del inyector a mayor caudal menor es la transferencia de masa. Y en relación con las alturas a menor altura mayor transferencia de masa debido al menor volumen del líquido en el baño. Sin embargo cuando la configuración es céntrica los valores de transferencia de masa aumentan a mayor caudal.

Para inyecciones Excéntricas el coeficiente de transferencia de masa estuvo entre 0,00193-0,00370 m/s, el valor más pequeño se obtuvo a 0,20 m de altura del baño y el más alto se obtuvo cuando la altura del baño fue de 0,16 m.

Y para inyecciones Céntricas el rango del coeficiente de transferencia de masa fue mayor ubicado entre 0,00169-0,00553 m/s donde el menor valor se obtuvo a 0,25 m debido a que es mayor el volumen del líquido lo que retarda la transferencia de la especie, cabe destacar que los mayores valores de coeficiente de transferencia de masa se obtuvieron para las alturas de 0,20 y 0,25 m lo que es algo poco probable ya que a estas alturas es más lento el movimiento del líquido, sin embargo en otros trabajos encontrados en la literatura <sup>[2]</sup> no se obtiene una misma tendencia en el comportamiento de la transferencia de masa en función del caudal y la altura, ya que igualmente en algunos de los valores allí reportados el coeficiente de transferencia de masa disminuye con el caudal y en relación con la altura en algunos valores de transferencia aumentaron a mayor altura del líquido.

Tabla 4.7. Resultados Experimentales del Coeficiente de Transferencia de Masa del Acido Benzoico del Agua (Baño Metálico) al Aceite (Escoria), para la localización Excéntrica del inyector.

	<b>Configuración Céntrica</b>					
	Altura del Baño 0,16 m		Altura del Baño 0,20 m		Altura del Baño 0,25 m	
	Flujo (m <sup>3</sup> /s)		Flujo (m <sup>3</sup> /s)		Flujo (m <sup>3</sup> /s)	
Coef. Trans. Masa K	9,01.10 <sup>-06</sup>	1,03.10 <sup>-05</sup>	9,01.10 <sup>-06</sup>	1,03.10 <sup>-05</sup>	9,01.10 <sup>-06</sup>	1,03.10 <sup>-05</sup>
(1/s)	0,00451	0,00470	0,00472	0,00553	0,00169	0,00614

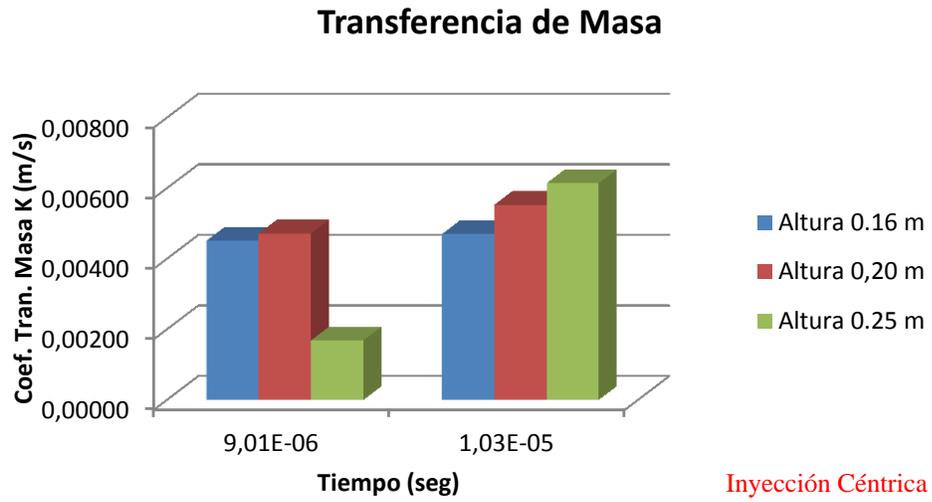


Fig. 4.48. Gráfica del Coeficiente de Transferencia de Masa vs Tiempo en función de las alturas del baño metálico (Inyección Céntrica).

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló un modelo físico basado los criterios de similitud dimensional para estudiar el comportamiento del flujo, mezclado y la transferencia de masa en un cucharón agitado con gas, para observar el efecto que produce variar el flujo de gas, la posición de inyección y las alturas del baño. Las principales conclusiones de este trabajo son:

- ❖ Cuando la inyección de gas se localiza en el centro, el mezclado es muy pobre al formarse enormes zonas muertas en la parte inferior de la cuchara.
- ❖ Cuando la inyección de gas se localiza a  $2/3$  del radio se mejora notablemente el mezclado, eliminando las zonas muertas gracias a que este tipo de inyección realiza una recirculación del líquido a través de toda la cuchara.
- ❖ Al aumentar las alturas del baño se observó un incremento en el tiempo de mezcla, debido a que el volumen del líquido presente es mayor y esto hace más lento el movimiento del fluido y con ello retarda la homogeneización del trazador dentro del baño.
- ❖ A medida que el caudal de gas de inyección es mayor, más eficiente es el mezclado dentro del baño, debido a que es más rápida la recirculación del líquido.
- ❖ La presencia de escoria para las alturas de baño utilizadas, aumenta el tiempo de mezclado.
- ❖ La inyección excéntrica es más eficiente cuando el caudal es el más elevado ( $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$ ).
- ❖ La transferencia del ácido benzoico depende de la inyección del gas, altura del baño, y configuración de los inyectores.
- ❖ Las alturas del baño y el caudal de inyección influyen en la transferencia de masa del ácido benzoico a la escoria (aceite).

- ❖ Para la configuración excéntrica el incremento del caudal ( $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$ ) afectó negativamente disminuyendo la transferencia de masa.
- ❖ Para la configuración excéntrica se observó que a menor altura del baño hubo una mayor transferencia de ácido benzoico.
- ❖ Para este estudio la toma de muestras en la determinación de la transferencia de masa fue significativa hasta los 90 segundos, ya que en los 120 segundos no se apreció ningún cambio en la concentración del ácido en el agua, lo cual puede ser posible debido a la temprana saturación del baño.

## RECOMENDACIONES

- ❖ Comparar los valores de transferencia de masa del ácido benzoico obtenidos en este trabajo con la cinética de desulfuración a escala industrial, para un mejor control y eficiencia en los procesos de remoción del azufre.
- ❖ A partir de estos resultados de simulación física contribuir al diseño de programas a través de la simulación matemática, que permitan un mejoramiento en la calidad del acero, y a su vez contribuir al rendimiento de las ferroaleaciones y adiciones de componentes en los procesos de metalurgia secundaria abaratando los costos de los procesos de refinación.
- ❖ La aplicación de una técnica de transferencia de masa más eficiente, con la que se logre resultados más precisos ya que la técnica desarrollada en este trabajo presento gran dificultad por la poca solubilidad del ácido benzoico en el agua.
- ❖ Estudio de otras geometrías así como también otras configuraciones con mayor número de inyectores para corroborar u obtener mejores resultados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Ramirez M. (2006). “Modelación matemática del mezclado en hornos-cucharas agitadas con gas”, Revista de Metalurgia, Vol. 42, 2006, pp. 56-75.
- [2] Akdogan G. y Eric R. (1999). “Model Study on Mixing and Mass Transfer in Ferroalloy Refining Processes”, Metall. Mater. Trans., Vol. 30B, pp. 231-239.
- [3] Peters, A. (1982). “Ferrous Production Metallurgy”, Editorial John Wiley & sons. Chicago-Indiana, pp 93-98.
- [4] Venturini, G. (2004). “Modelado del patrón de flujo y la transferencia de masa en sistemas agitados por inyección de gas”. Tesis de Ingeniería Química, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires-Argentina.
- [5] World Steel Association y MATTER. (2002). Procesamiento del Acero. Referencia Electrónica: Recuperado 14 Julio, 2009.  
<http://www.steeluniversity.org/content/html/spa/default.asp?catid=3&pageid=65026988>
- [6] Zanotti, A. y otros. (2005). “Simulación numérica del flujo multifásico turbulento en una cuchara siderúrgica”. Mecánica Computacional. Editor Larreteguy. Vol. XXIV. pp. 1231-1259.
- [7] Goldsmith, M. y otros. (2007). “Influence of no-drag forces on inertia-gravity dominated stirring flows in steel ladles”. Metallurgical and Materials Transactions B. pp. 1–39.
- [8] Mazumdar D. y Guthrie R. (1995). “The Physical and Mathematical Modelling of Gas Stirred Ladle Systems,” ISIJ International, 35, (1), 1-20.
- [9] ESPINOSA, Constantino. (2005). “Evolución de las inclusiones no metálicas en el proceso de elaboración del acero”. Tesis de Ingeniería Mecánica, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires-Argentina.
- [10] GHERARDELLI, C. (2007). Análisis dimensional y semejanza. Referencia Electrónica: Recuperado 7 Julio, 2009.  
[https://www.ucursos.cl/ingenieria/2007/2/ME33A/1/material\\_docente/objeto/138196](https://www.ucursos.cl/ingenieria/2007/2/ME33A/1/material_docente/objeto/138196)
- [11] Lifeng, Z. (2000). “Mathematical simulation of fluid flow in gas-stirred liquid systems”. Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. Vol. 8. pp. 463–476.

- [12] Martin, M y otros. (2003). “Gas-Liquid Mass-Transfer Coefficients in steel converters”. *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol. 42. pp. 911–912.
- [13] Ajmani, S. y Chatterjee, A. (2005). “Cold model studies of mixing and mass transfer in steelmaking vessels”. *Ironmaking and Steelmaking*. Vol. 32. N° 6. pp. 195-202.
- [14] Chou, J. y otros. (2003). “Effects of Process conditions on mixing between molten iron and slag in smelting reduction vessel via water model study”, *Ironmaking and steelmaking*, Vol. 30, pp. 195-202.
- [15] Ghosh, A. (2001). “Secondary Steelmaking Principles and Applications”. CRC. Cap. 3 pp 14-20.
- [16] Paul, E. y otros. (2003). “Handbook of Industrial mixing”, Editorial Wiley Interscience, pp. 200
- [17] Takatsuka, Y. y Iguchi, M. (2001). “Effect of Swirl Motion on Mixing Time in Water Bath Agitated by Upward Gas Injection”. *ISIJ International*, Vol. 41, N° 2, pp. 124–127.
- [18] Launder, B. y Spalding, D. (1974). *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 3. pp 269-289.

**APENDICE A**  
**ACTIVIDADES INVOLUCRADAS EN LA METODOLOGÍA**

Tabla. A.1 Correlación de Transferencia de masa en un sistema líquido-líquido.

Sistema	Agitación	Reacción	Correlación
Parafina Líquida-Agua	Aire	Desulfurización	$30 < Q < 80$

*Donde:* Q es el caudal en l/min

**A.1. Cálculo del caudal para la determinación del tiempo de mezcla**

A partir de la siguiente ecuación que relaciona el caudal del modelo real con el factor de escala:

$$Q_m = \lambda^{5/2} Q_{fs} \quad (A.1)$$

Donde:

$Q_m$  es el flujo de gas que opera en el modelo de agua ( $L \text{ min}^{-1}$ )

$Q_{fs}$  es el flujo de gas en el prototipo (escala real) ( $L \text{ min}^{-1}$ )

$\lambda$  es el factor de escala

Siendo el caudal del modelo real tomado de loma de níquel 70 l/min y en buscas de mejoras del proceso se selecciono un caudal de 80 l/min el cual representa el máximo caudal para este tipo de sistemas, conjuntamente con el factor de escala a 1/7 del modelo real, se efectuaron los cálculos de los caudales a emplear en el presente trabajo.

**Conversiones:**  $1L=1.10^{-3} \text{ m}^3$        $1\text{min}=60 \text{ s}$

**Cálculo de los Caudales:**

$$Q_{m1} = (1/7)^{5/2} \cdot 70 \text{ l/min} = 0,539 \text{ l/min} = 9,006 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{m2} = (1/7)^{5/2} \cdot 80 \text{ l/min} = 0,617 \text{ l/min} = 1,028 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

## A.2. CÁLCULO DEL NÚMERO DE FROUDE MODIFICADO PARA EL MODELO FÍSICO

$$N_{Frm} = \frac{\rho_g}{\rho_l} \times \frac{U^2}{gL}$$

$$Q = U \times A$$

Donde:

$N_{Frm}$  = Número de Froude Modificado

$\rho_g$  = Densidad del Gas (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_l$  = Densidad del Líquido (kg/m<sup>3</sup>)

$U$  = Velocidad del Gas (m/s)

$g$  = Aceleración debida a la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

$L$  = Altura del Líquido (m)

$A$  = Área de la sección transversal (m<sup>2</sup>)

Tabla. A.2 Datos para el cálculo del Número de Froude Modificado.

Área $A$ (m <sup>2</sup> )	0,0594
Caudal $Q$ (m <sup>3</sup> /s)	9,006.10 <sup>-6</sup> y 1,028.10 <sup>-5</sup>
Velocidad $U$ (m/s)	1,52.10 <sup>-4</sup> y 1,73.10 <sup>-4</sup>
Altura del Líquido $L$ (m)	0,16; 0,20 y 0,25
Densidad del gas $\rho_g$ (kg/m <sup>3</sup> )	1,176
Densidad del líquido (kg/m <sup>3</sup> )	997,54
Aceleración debida a la Gravedad (m/s <sup>2</sup> )	9,8

Tabla. A.3 Valores del Número de Froude Modificado ( $N_{Frm}$ ) para del Modelo Físico para los diferentes caudales de inyección de gas (9.006E-6 m<sup>3</sup>/s y 1.028E-5 m<sup>3</sup>/s).

Caudal (9,006.10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /s)	
Altura del Líquido (m)	$N_{Frm}$
0,16	1,730.10 <sup>-11</sup>
0,2	1,384.10 <sup>-11</sup>
0,25	1,107.10 <sup>-11</sup>
Caudal (1,028.10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> /s)	
Altura del Líquido (m)	$N_{Frm}$
0,16	2,261.10 <sup>-11</sup>
0,2	1,809.10 <sup>-11</sup>
0,25	1,447.10 <sup>-11</sup>

### A.3. Cálculo del error

La determinación del promedio de tiempo de mezcla para las tres pruebas realizadas por cada variable de estudio, lleva consigo un error el cual fue calculado a partir de la siguiente ecuación de desviación estándar media:

$$S_{mx} = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{N(N-1)}} \quad (\text{A.2})$$

Donde:

$S_{mx}$  Desviación Estándar Media

N Número de mediciones

$x_i$  Valor de cada medida

$\bar{x}$  Promedio Aritmético

**A.4. Preparación de las soluciones para la determinación del coeficiente de transferencia de masa.**

**A.4.1. Solución de Hidróxido de Sodio (NaOH 0,01N)**

- ❖ Se preparo una ampolla MERCK de NaOH (0,1N), la cual tiene una concentración de 4g/l.
- ❖ Dicha solución fue diluida a una concentración de 0,01N.

**A.4.2. Preparación del Indicador de la solución titulante.**

- ❖ Se empleo como indicador Fenolftaleina (0,1%) en 100ml de etanol.
- ❖ Para determinar la masa de fenolftaleína se empleo la siguiente ecuación:

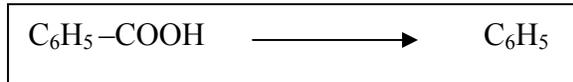
$$\% \text{Peso Fenolftaleina} = \frac{\text{Peso Fenolftaleina}}{\text{Fenolftaleina} + \text{Peso Etanol}} * 100$$

Así:

Peso Fenolftaleina = 0,1g que serán disueltos en 100 ml de etanol para preparar el indicador.

**APENDICE B**  
**CÁLCULOS INVOLUCRADOS EN LA DETERMINACIÓN DE LOS**  
**RESULTADOS**

❖ **Ácido Benzoico**



$$PE_{ac} = (7 \cdot 12) + (6 \cdot 1) + (2 \cdot 16) = 122 \text{ g/mol} \quad N_{base} = 0,01 \text{ N}$$

$$N = \text{Eqgramos} / V(L) \longrightarrow \text{Eqgramos} = N \cdot V(L)$$

$$N_{base} \cdot V_{base} = N_{ac} \cdot V_{ac}$$

$$\text{Eqgramos}_{ac} = \text{gramos}_{ac} / PE_{ac}$$

$$\text{Eqgramos}_{ac} = N_{base} \cdot V_{base}(L)$$

$$\text{gramos}_{ac} / PE_{ac} = N_{base} \cdot V_{base}(L) \longrightarrow \text{gramos}_{ac} = N_{base} \cdot V_{base}(L) \cdot PE_{ac} \quad (\text{para } 10 \text{ ml de muestra})$$

A partir de esta ecuación se hacen los cálculos de concentración inicial, tal como se muestra:

$$Ci = N_{base} \cdot V_{base}(L) \cdot PE_{ac} \cdot (1000 / 10 \text{ ml})$$

$$Ci = 0,01 \text{ N} \cdot 11,1 \cdot 10^{-3} \text{ l} \cdot 122 \text{ g/mol} \cdot 100 = 1,354 \text{ g/l}$$

Donde:

*N<sub>base</sub>* = Normalidad de la base (NaOH)

*V<sub>base</sub>* = Volumen de la base

*PE<sub>ac</sub>* = Peso Equivalente del ácido

*Ci* = Concentración inicial del ácido

A continuación se muestran los volúmenes obtenidos por las titulaciones con sus respectivas concentraciones de ácido.

Tabla B.1. Concentraciones de Acido para cada volumen de solución de NaOH.

Vsal ( $\pm 0,05$ ml)	C <sub>Acido</sub> (g/L)
9.8	1.1956
9.9	1.2078
10	1.22
10.1	1.2322
10.2	1.2444
10.3	1.2566
10.4	1.2688
10.5	1.281
10.6	1.2932
10.7	1.3054
10.8	1.3176
10.9	1.3298
11	1.342
11.1	1.3542
11.2	1.3664

Tabla B.2. Concentraciones de ácido benzoico para cada tiempo de ensayo, con localización excéntrica del inyector.

	Altura 0,16m	Altura 0,20m	Altura 0,25m
Caudal $9,006 \cdot 10^{-6}$	1.3054	1.281	1.281
Caudal $1,028 \cdot 10^{-5}$	1.2932	1.3298	1.342

Tabla B.3. Concentraciones de ácido benzoico para cada tiempo de ensayo, con localización céntrica del inyector.

	Altura 0,16m	Altura 0,20m	Altura 0,25m
Caudal $9,006 \cdot 10^{-6}$	1.1956	1.2688	1.3176
Caudal $1,028 \cdot 10^{-5}$	1.2566	1.2322	1.2688

Tabla B.4. Concentraciones de ácido benzoico para cada tiempo de ensayo, con localización excéntrica del inyector y caudal  $9,006 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ .

	Caudal $9,006 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$		
t	Altura 0,16m	Altura 0,20m	Altura 0,25m
30	1.3298	1.3298	1.3298
60	1.3176	1.3054	1.3176
90	1.3054	1.281	1.281
120	1.3054	1.281	1.281

Tabla B.5. Concentraciones de ácido benzoico para cada tiempo de ensayo, con localización excéntrica del inyector y caudal  $1,028 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ .

	Caudal $1,028 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$		
t	Altura 0,16m	Altura 0,20m	Altura 0,25m
30	1.3298	1.3176	1.3542
60	1.3176	1.342	1.342
90	1.3054	1.3298	1.3176
120	1.2932	1.3298	1.3176

Tabla B.6. Concentraciones de ácido benzoico para cada tiempo de ensayo, con localización céntrica del inyector y caudal  $9,006 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ .

	Caudal $9,006 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$		
t	Altura 0,16m	Altura 0,20m	Altura 0,25m
30	1.2444	1.3054	1.3054
60	1.2322	1.2932	1.2932
90	1.22	1.281	1.2688
120	1.1956	1.2688	1.2688

Tabla B.7. Concentraciones de ácido benzoico para cada tiempo de ensayo, con localización céntrica del inyector y caudal  $1,028 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ .

	Caudal $1,028 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$		
t	Altura 0,16m	Altura 0,20m	Altura 0,25m
30	1.2932	1.281	1.3542
60	1.281	1.2566	1.342
90	1.22	1.2444	1.342
120	1.2566	1.2322	1.342

Tabla B.8. Concentraciones de ácido benzoico para cada tiempo de ensayo, con localización excéntrica del inyector y caudal  $9,006 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ .

t	Caudal $9,006 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$		
	Altura 0,16m	Altura 0,20m	Altura 0,25m
30	0.023	0.0135	0.0135
60	0.023	0.0183	0.0116
90			
120			
Promedio	0.023	0.016	0.013

Tabla B.9. Concentraciones de ácido benzoico para cada tiempo de ensayo, con localización excéntrica del inyector y caudal  $1,028 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ .

t	Caudal $1,028 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$		
	Altura 0,16m	Altura 0,20m	Altura 0,25m
30	0.017	0.012	
60	0.015	0.008	
90	0.018		
120			
Promedio	0.017	0.010	0.000

Tabla B.10. Concentraciones de ácido benzoico para cada tiempo de ensayo, con localización céntrica del inyector y caudal  $9,006 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ .

t	Caudal $9,006 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$		
	Altura 0,16m	Altura 0,20m	Altura 0,25m
30	0.039	0.028	0.007
60	0.024	0.021	0.007
90	0.021	0.022	
120			
Promedio	0.028	0.024	0.007

Tabla B.11. Concentraciones de ácido benzoico para cada tiempo de ensayo, con localización céntrica del inyector y caudal  $1,028 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ .

t	Caudal $1,028 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$		
	Altura 0,16m	Altura 0,20m	Altura 0,25m
30	0.033	0.031	0.028
60	0.035	0.027	0.021
90	0.021	0.026	0.025
120			
Promedio	0.029	0.028	0.025

❖ Cálculo de los Volúmenes del baño metálico (agua)

A partir de la siguiente fórmula, que representa el volumen de un cilindro, la cual corresponde a la geometría del cucharón, se determino los volúmenes de agua empleados para cada altura del baño.

$$V = \pi r^2 h$$

Donde:

$r = 0,1375 \text{ m}$  ;  $h =$  altura del baño

$h_1 = 0,16 \text{ m}$

$h_2 = 0,20 \text{ m}$

$h_3 = 0,25 \text{ m}$

$$V = \pi r^2 h$$

$$V_1 = \pi * (0,1375 \text{ m})^2 * 0,16 \text{ m} = 9503,3 \text{ m}^3$$

$$V_2 = \pi * (0,1375 \text{ m})^2 * 0,20 \text{ m} = 11879,2 \text{ m}^3$$

$$V_3 = \pi * (0,1375 \text{ m})^2 * 0,25 \text{ m} = 14848,9 \text{ m}^3$$

❖ Calculo del Coeficiente de Transferencia de Masa

Partiendo de las siguientes ecuaciones, se calcula el coeficiente de transferencia de masa.

(Ec. B.1)

De la Ec. B.1. se despeja la constante de transferencia de masa K, como sigue:

$$k = -\frac{1}{t} \ln\left(\frac{C_t - C_e}{C_i - C_e}\right)$$

(Ec. B.2)

$$b = \frac{kV}{A}$$

(Ec. B.3)

De la Ec. B.3. se despeja el coeficiente de transferencia de masa b

$$b = \frac{kV}{A}$$

(Ec. B.4)

Finalmente, sustituyendo la Ec. B.2 en la Ec. B.4 se obtiene el coeficiente de transferencia de masa  $b$ :

$$b = -\frac{V}{tA} \ln\left(\frac{C_t - C_e}{C_i - C_e}\right) \quad (\text{Ec. B.5})$$

Donde:

$C_t$  es la concentración del trazador en el tiempo  $t$

$C_e$  es la concentración en el equilibrio

$C_i$  es la concentración inicial del trazador en el baño

$K$  es la constante de transferencia de masa (L/T)

$b$  es el coeficiente de transferencia de masa (L/T)

$A$  es el área interfacial ( $L^2$ )

$V$  es el volumen del líquido ( $L^3$ )

## APENDICE C

### RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA DETERMINACION DEL TIEMPO DE MEZCLA

- ❖ Resultados Experimentales de la determinación del Tiempo de Mezcla por el Software *PicoScope*

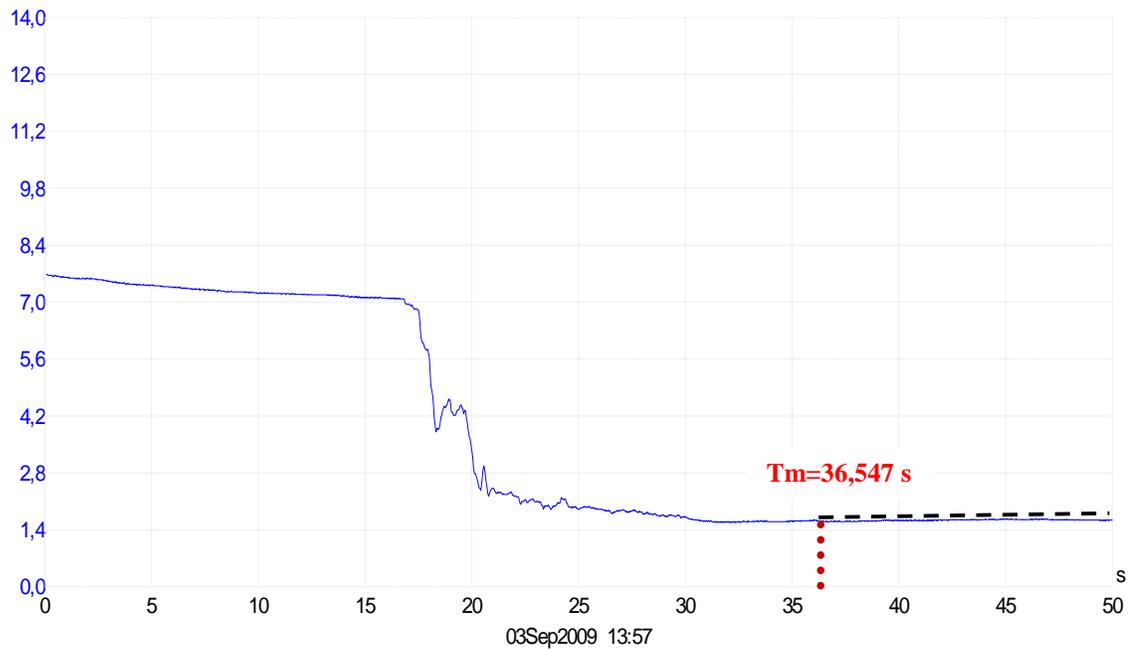


Fig. C.1. Gráfico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-1 , sin escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

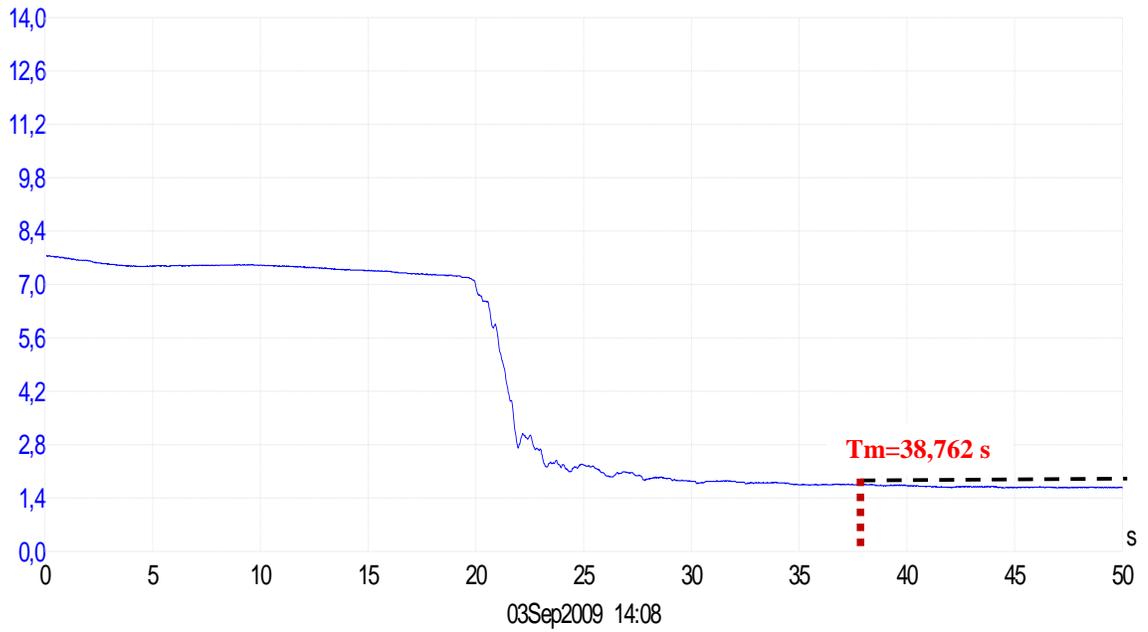


Fig. C.2. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-2 , sin escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

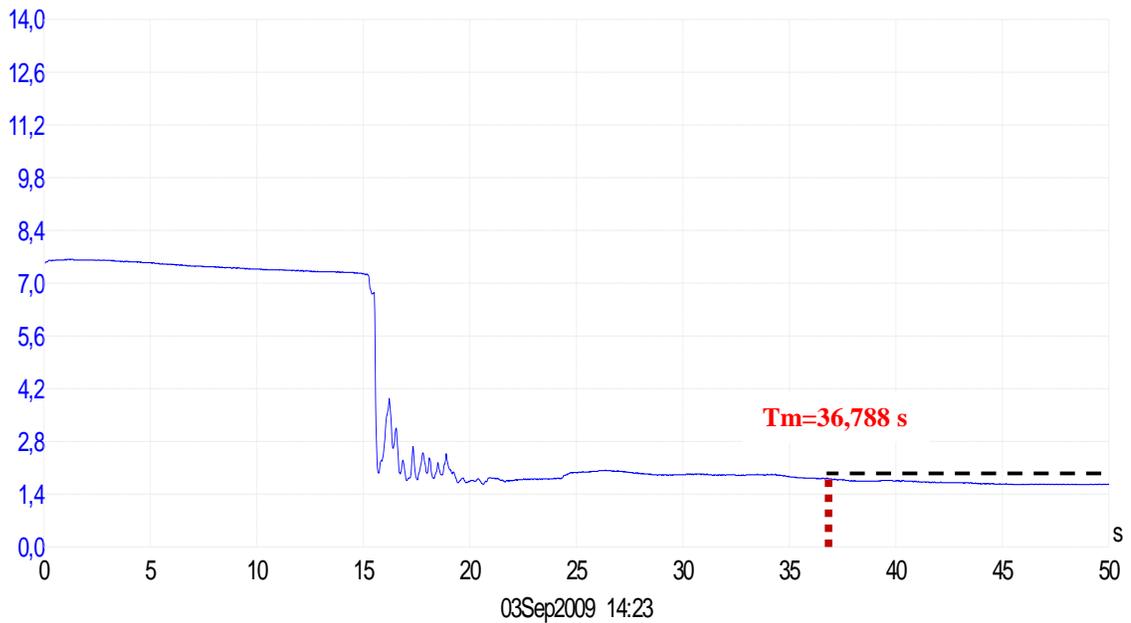


Fig. C.3. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-3 , sin escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

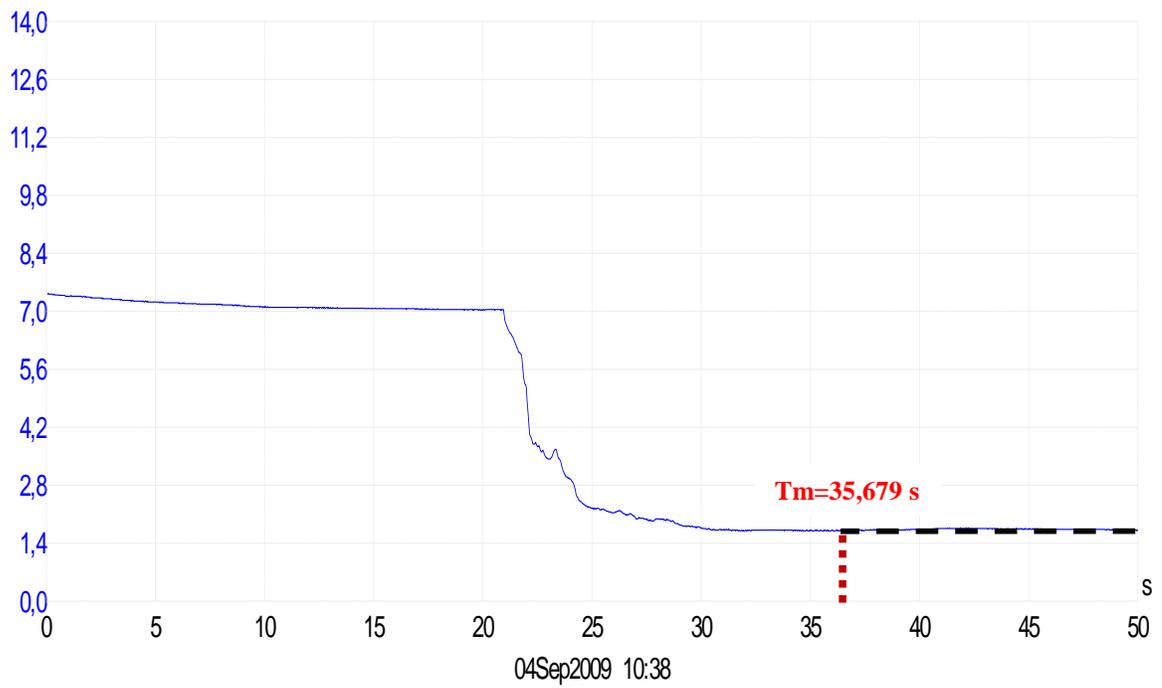


Fig. C.4. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-1, sin escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

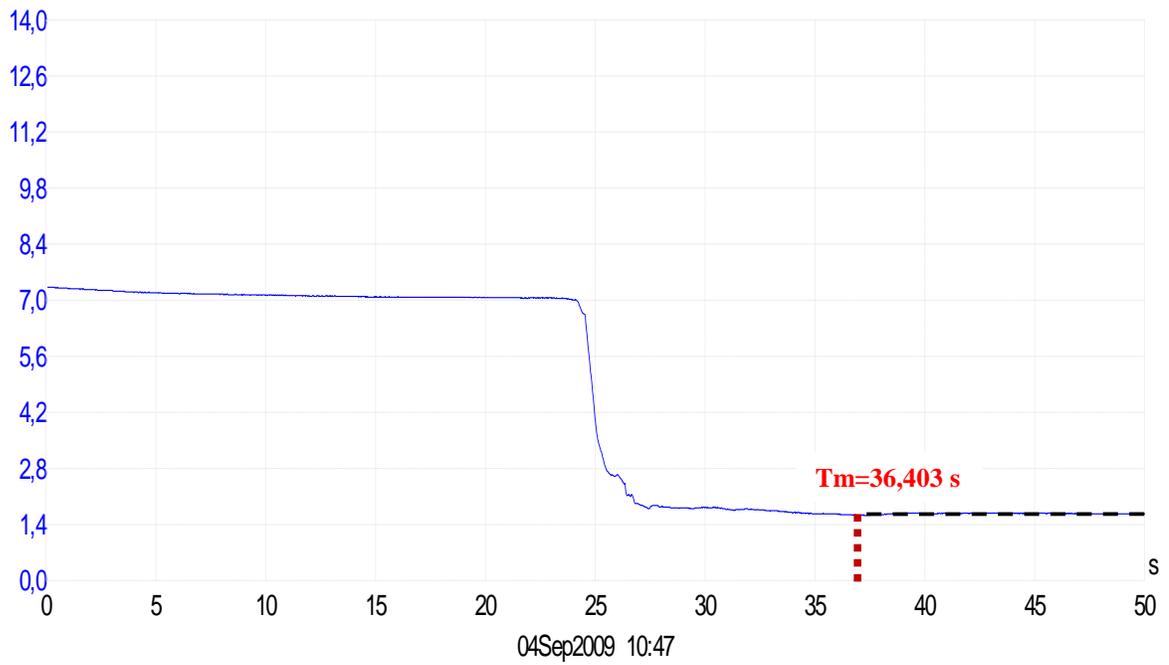


Fig. C.5. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-2, sin escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

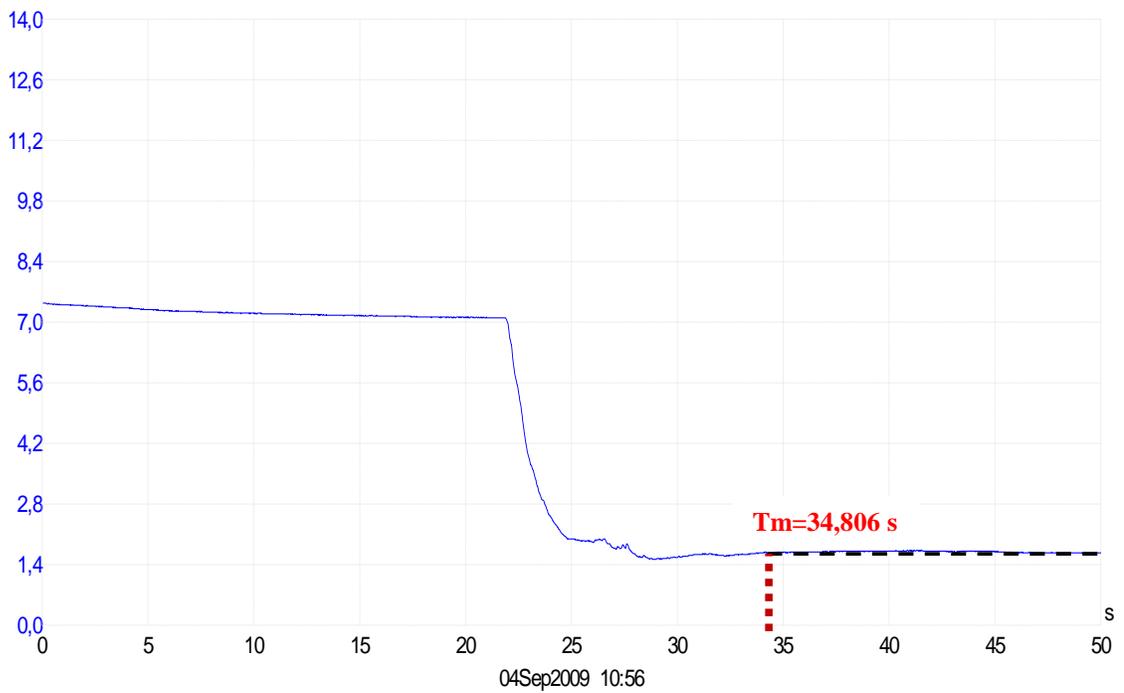


Fig. C.6. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-3, sin escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

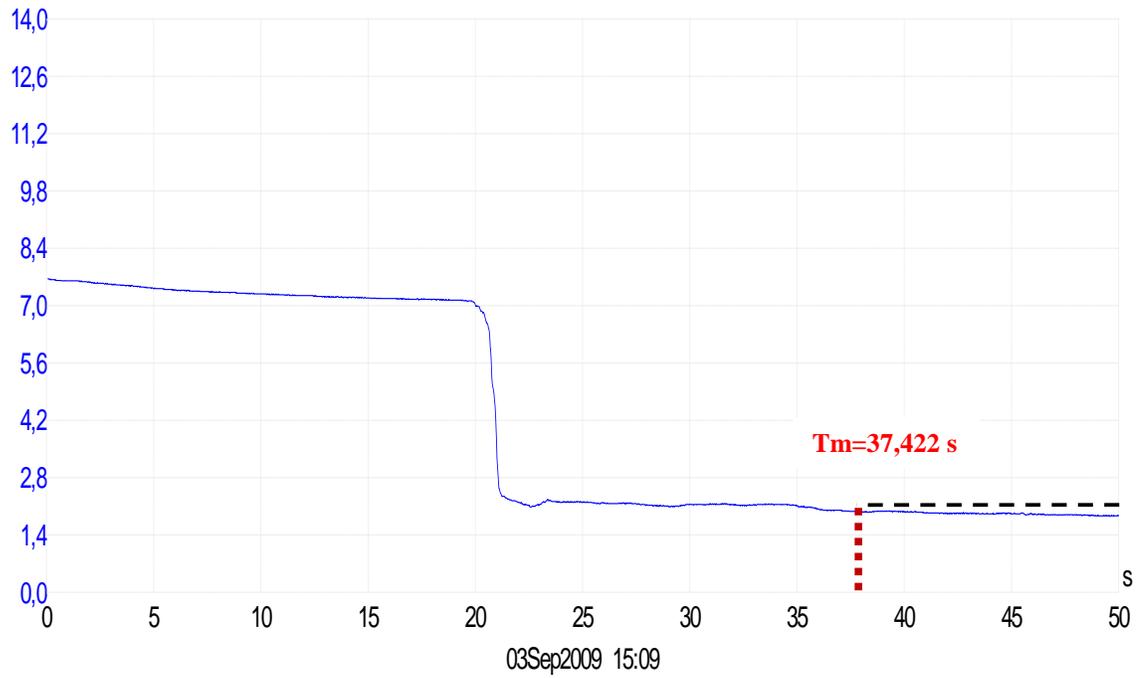


Fig. C.7. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-1, sin escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

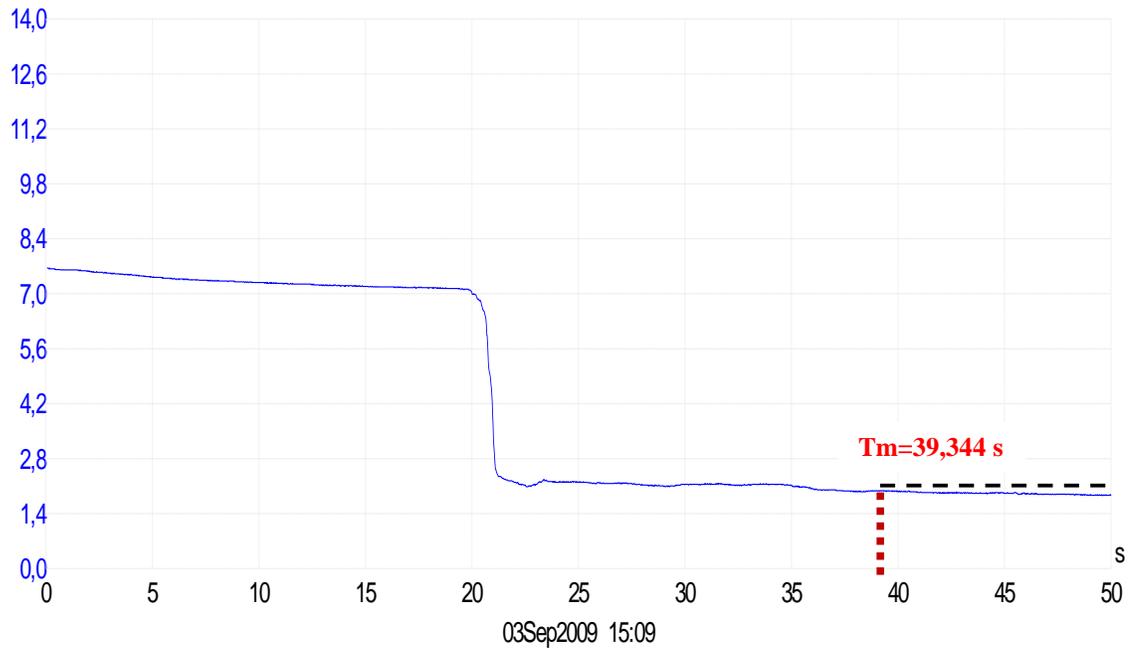


Fig. C.8. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-2, sin escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

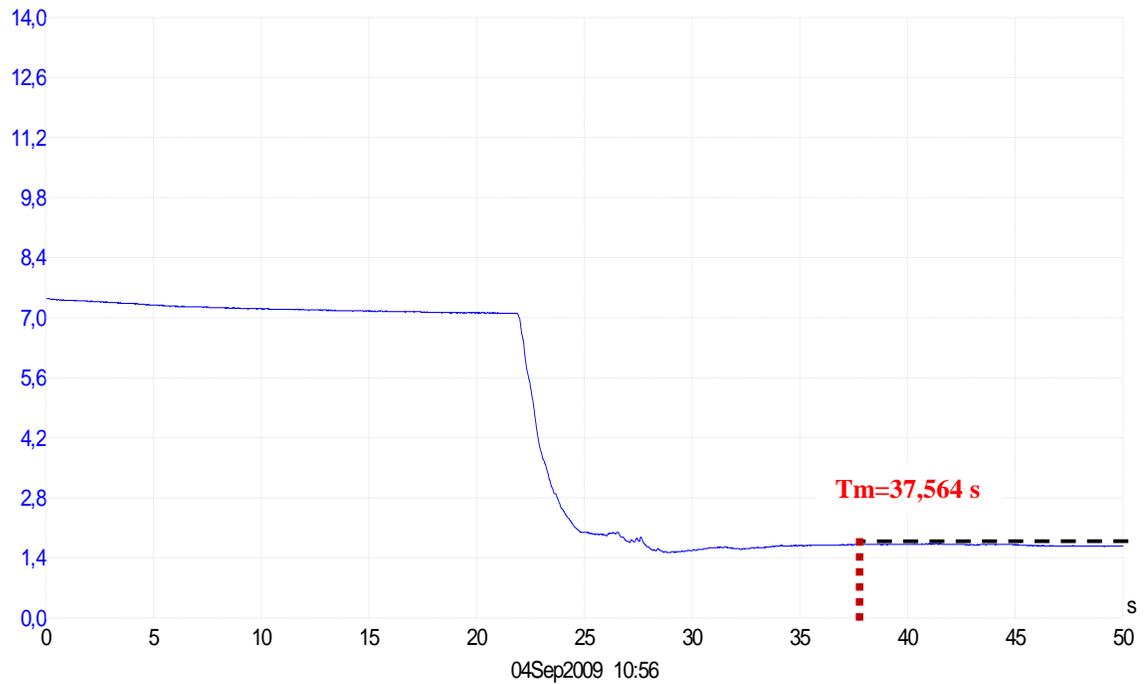


Fig. C.9. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-3, sin escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

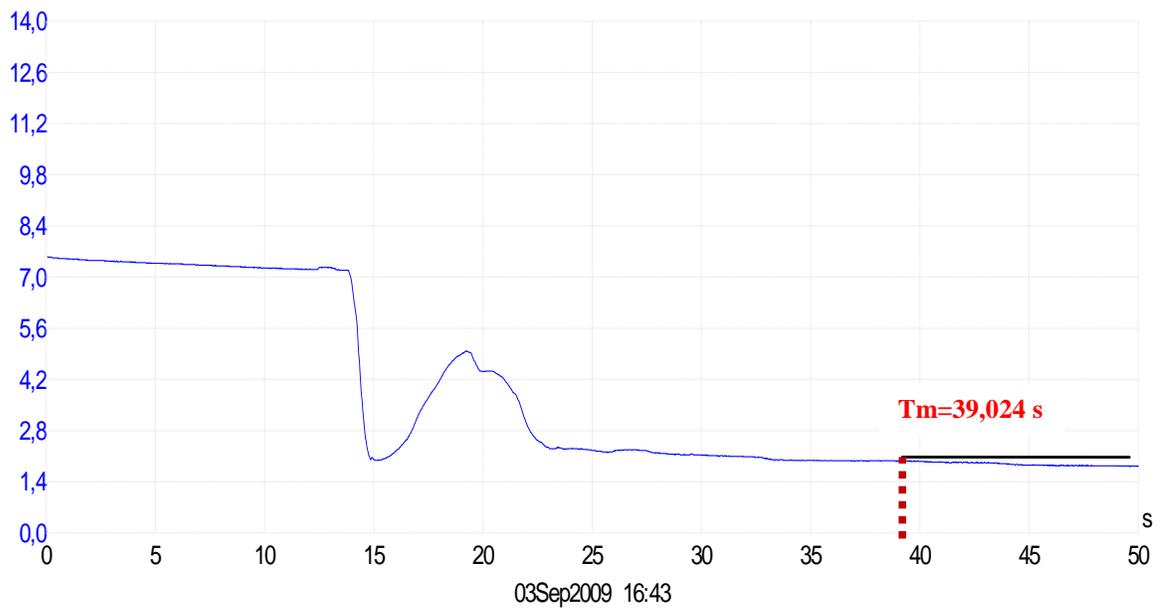


Fig. C.10. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-1, sin escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

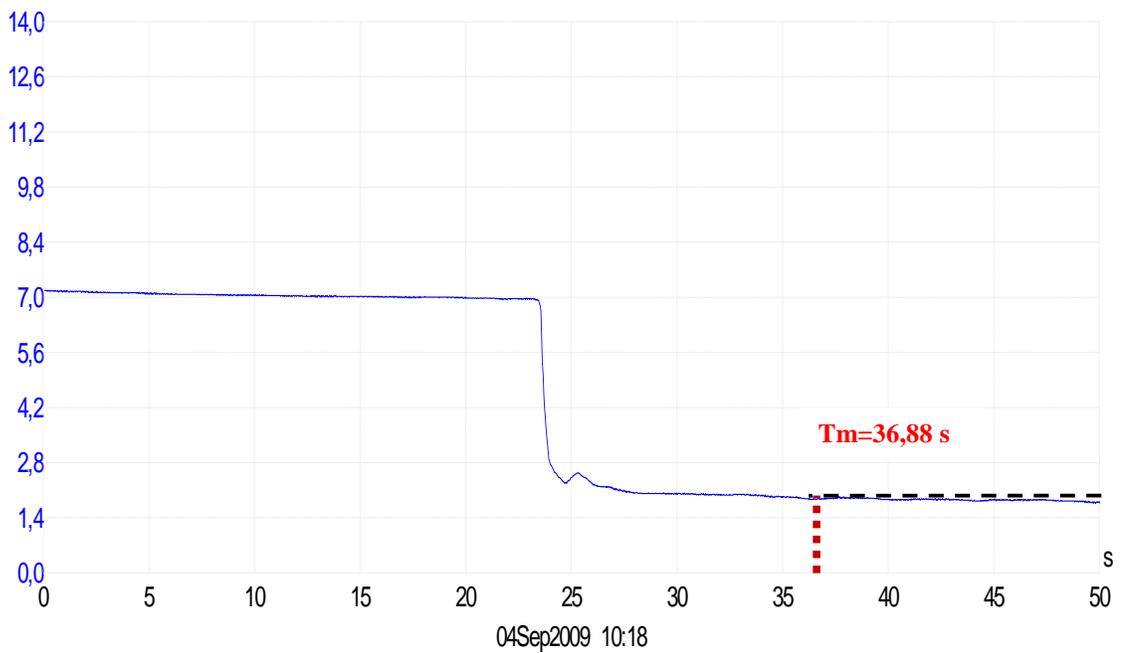


Fig. C.11. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-2, sin escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

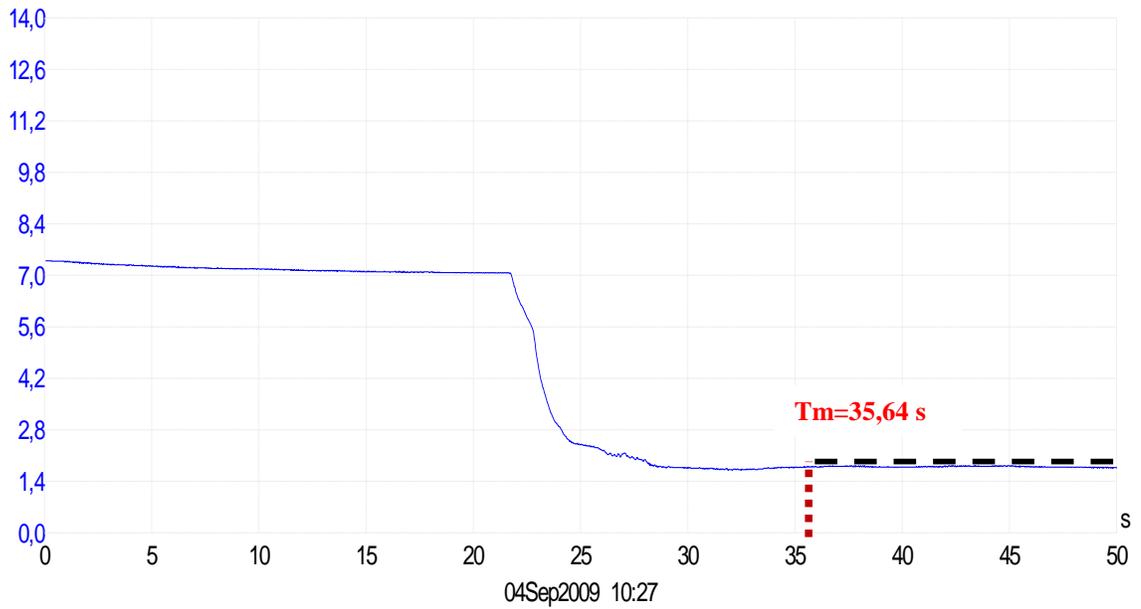


Fig. C.12. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0, 20m-3, sin escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

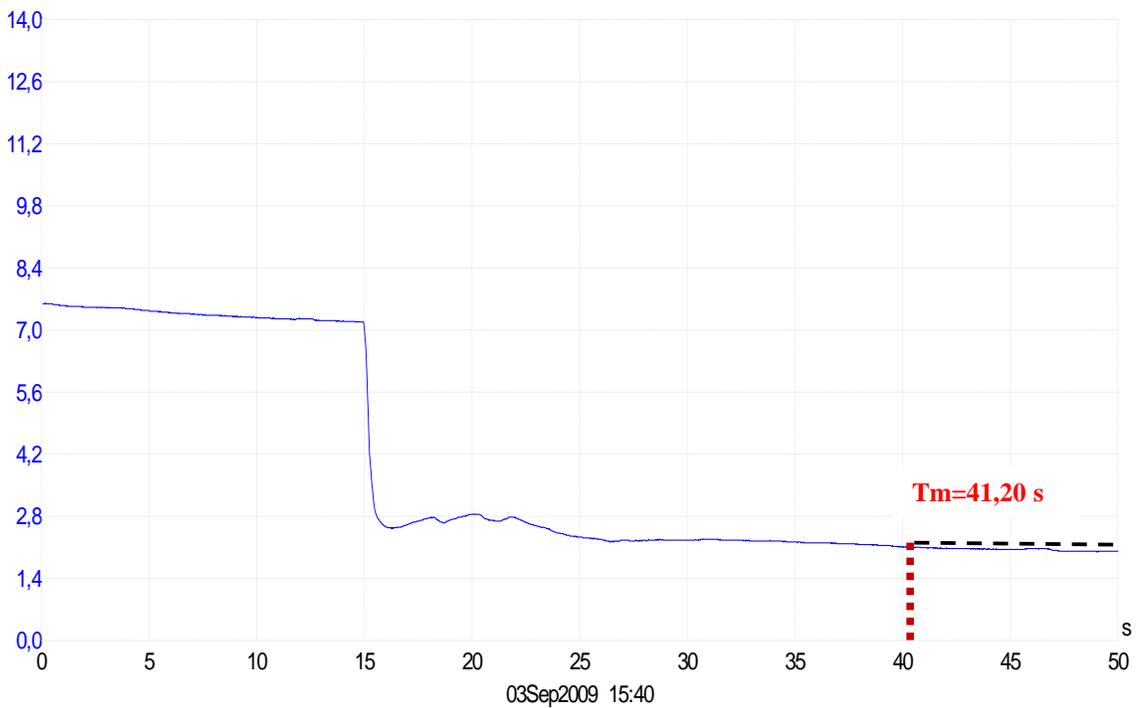


Fig. C.13. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-1, sin escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

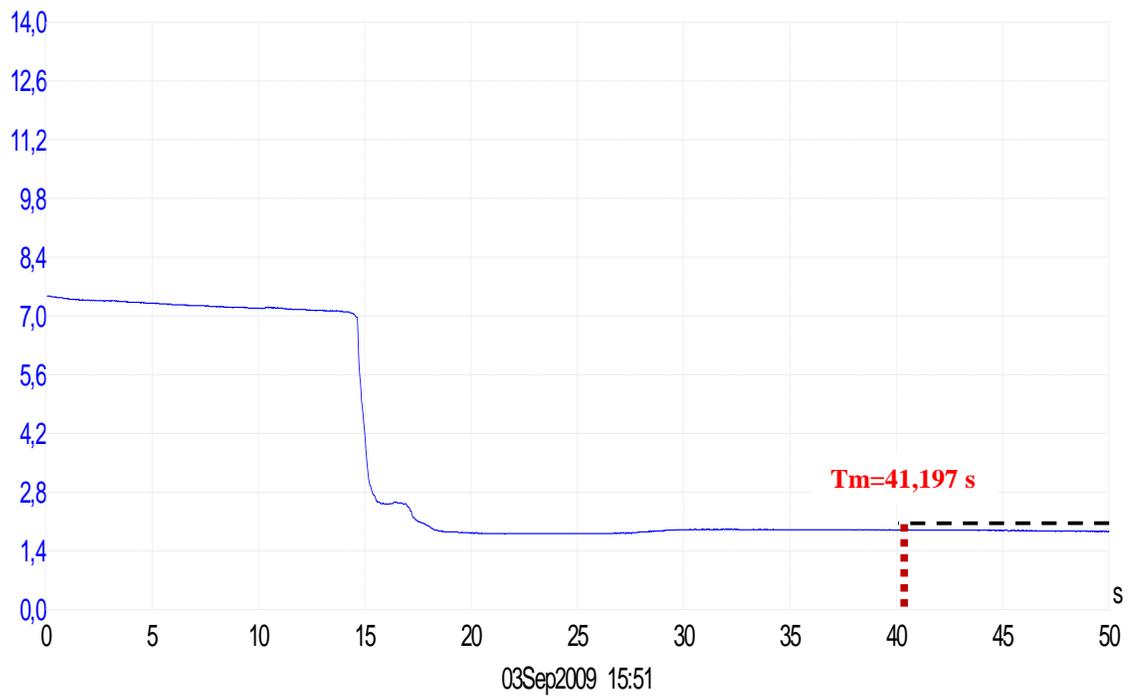


Fig. C.14. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-2, sin escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

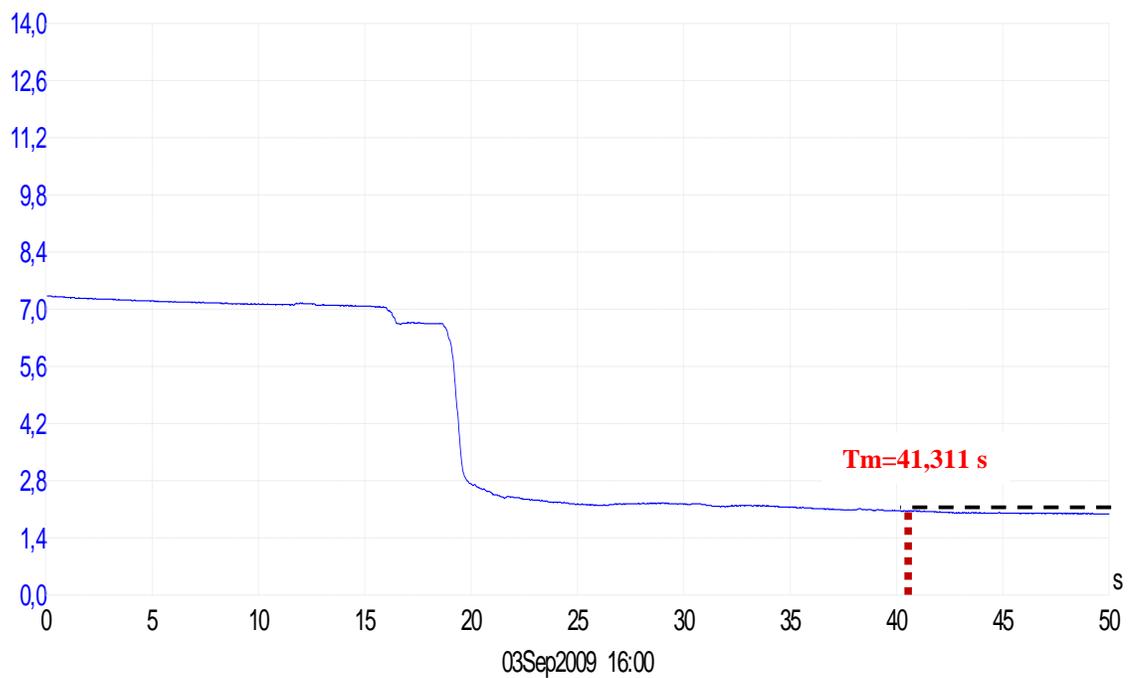


Fig. C.15. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0, 25m-3, sin escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

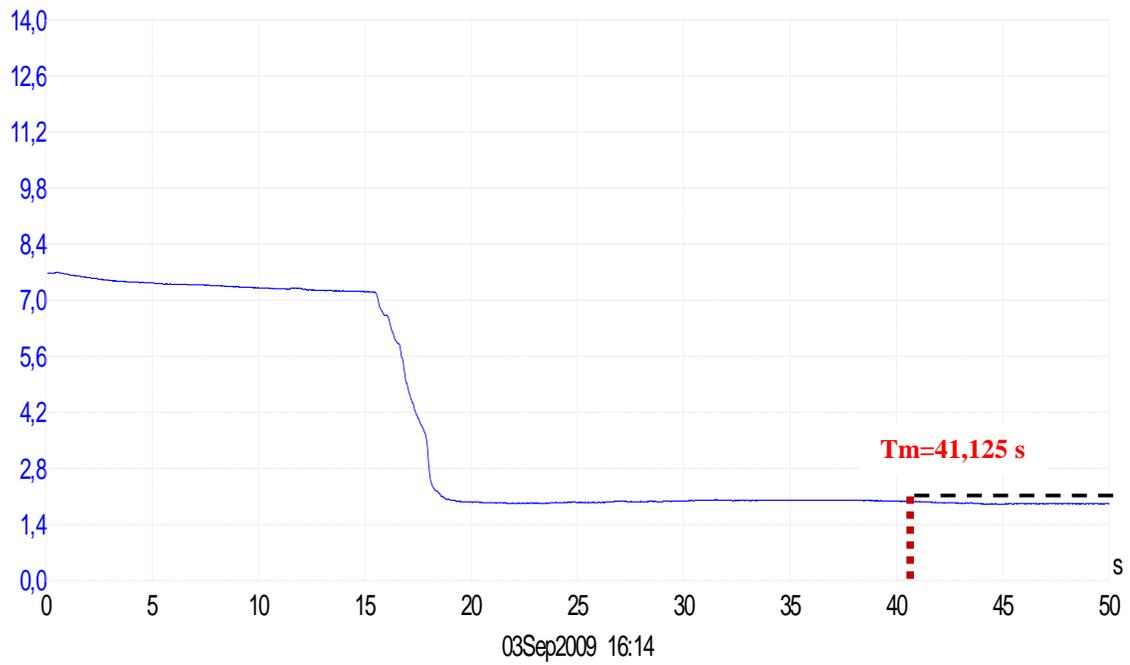


Fig. C.16. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-1, sin escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

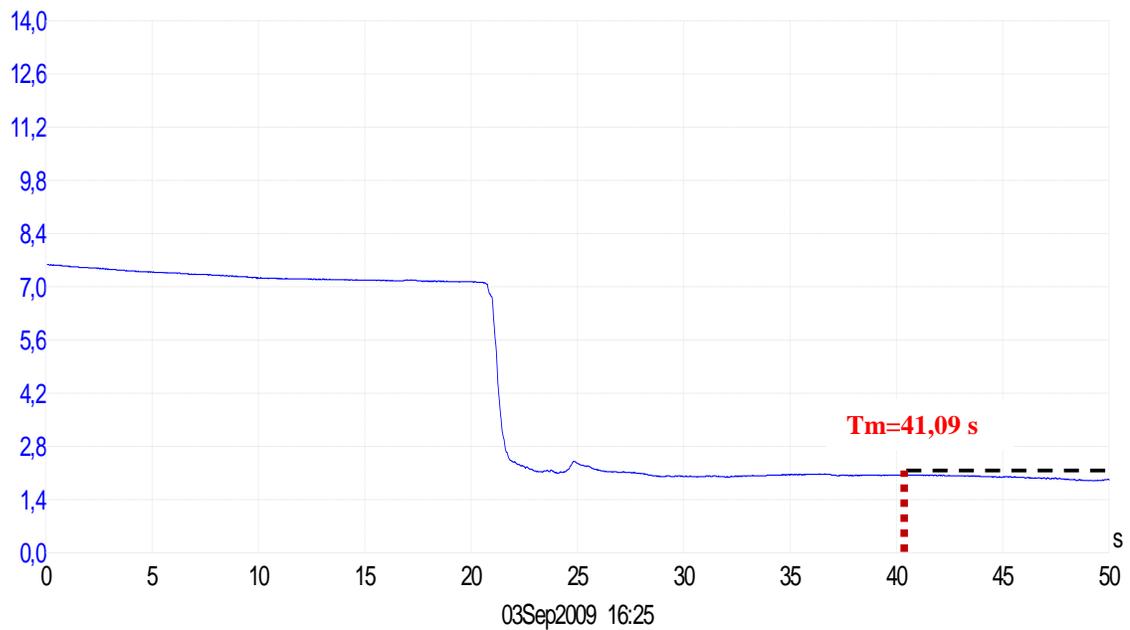


Fig. C.17. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-2, sin escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

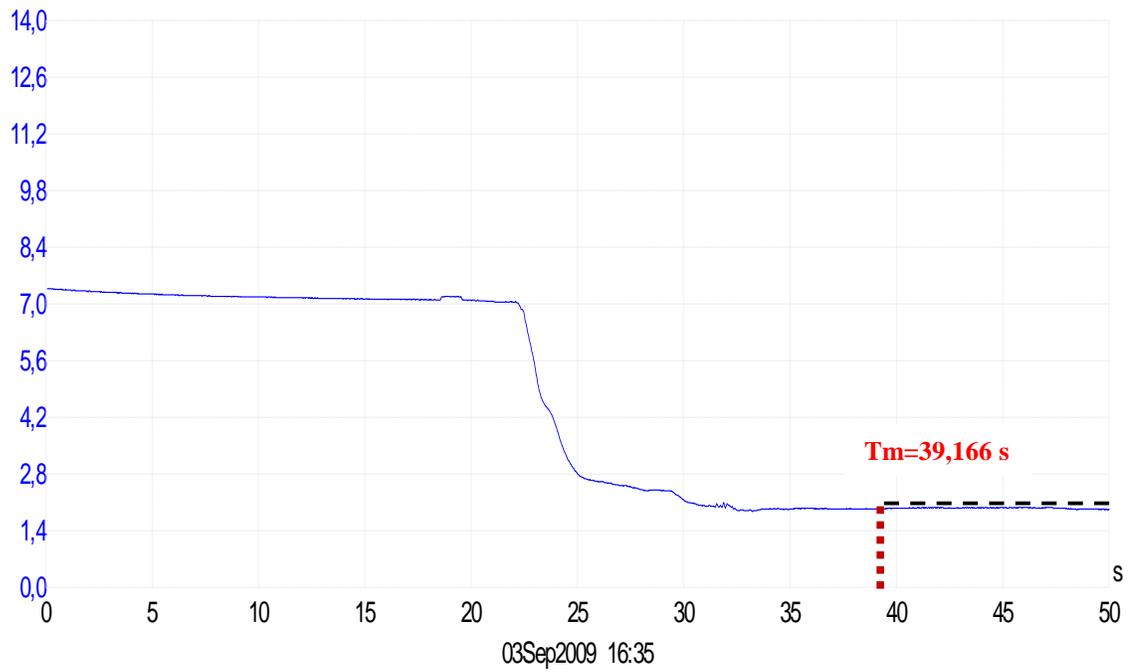


Fig. C.18. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-3, sin escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

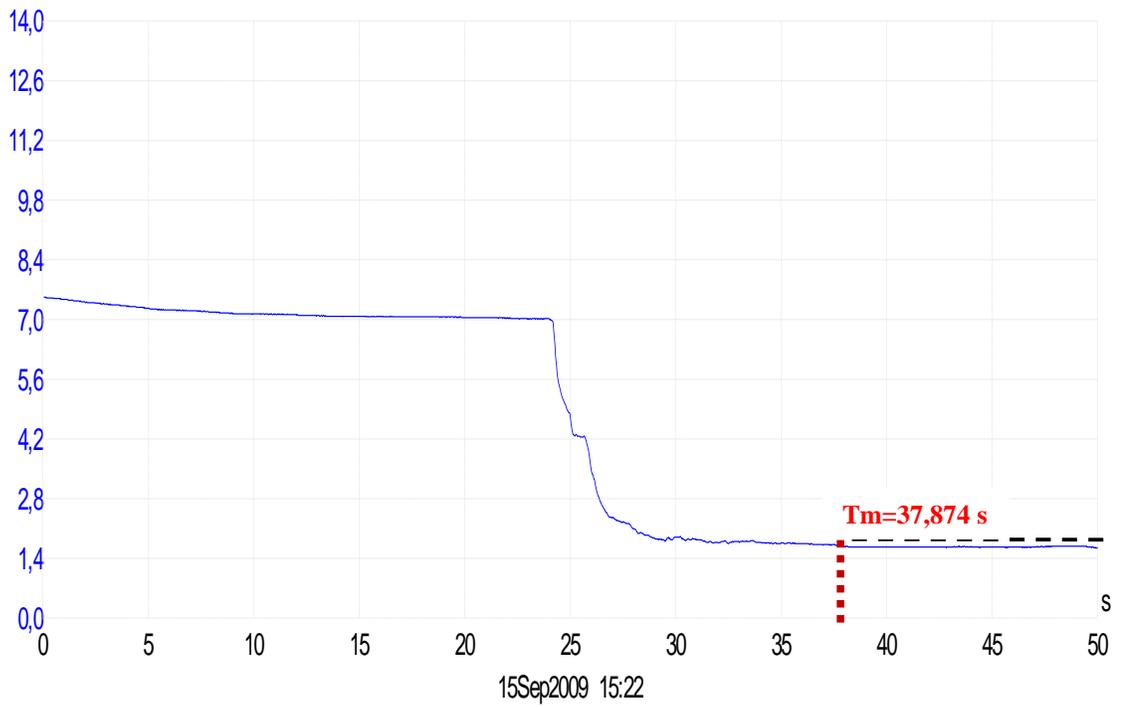


Fig. C.19. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-1, sin escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

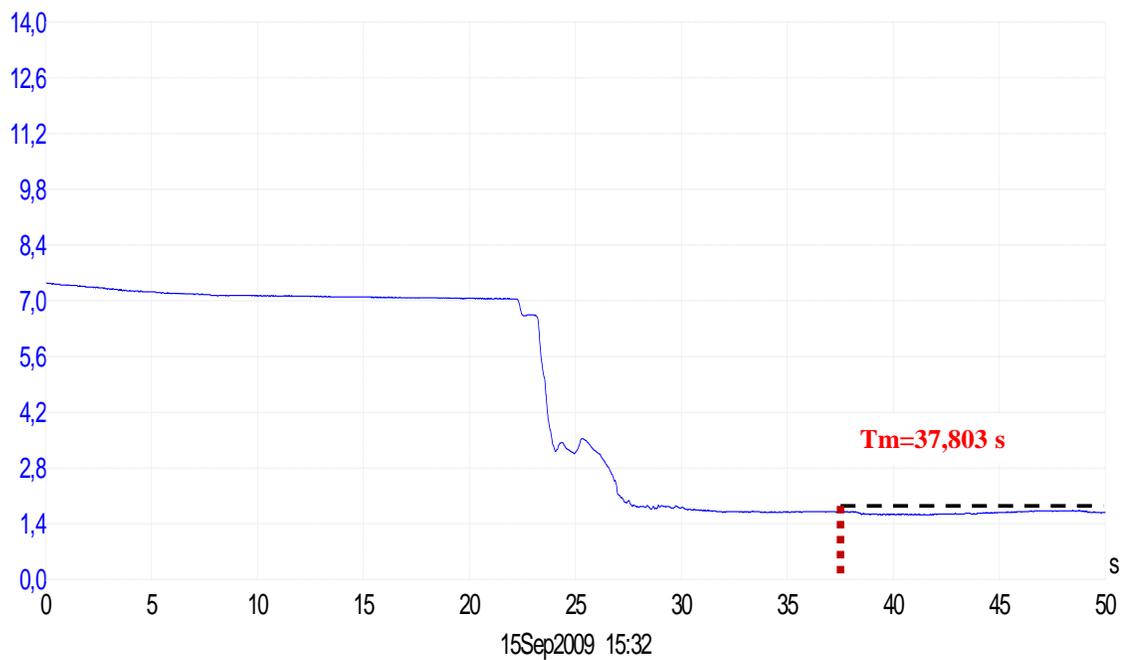


Fig. C.20. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-2, sin escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

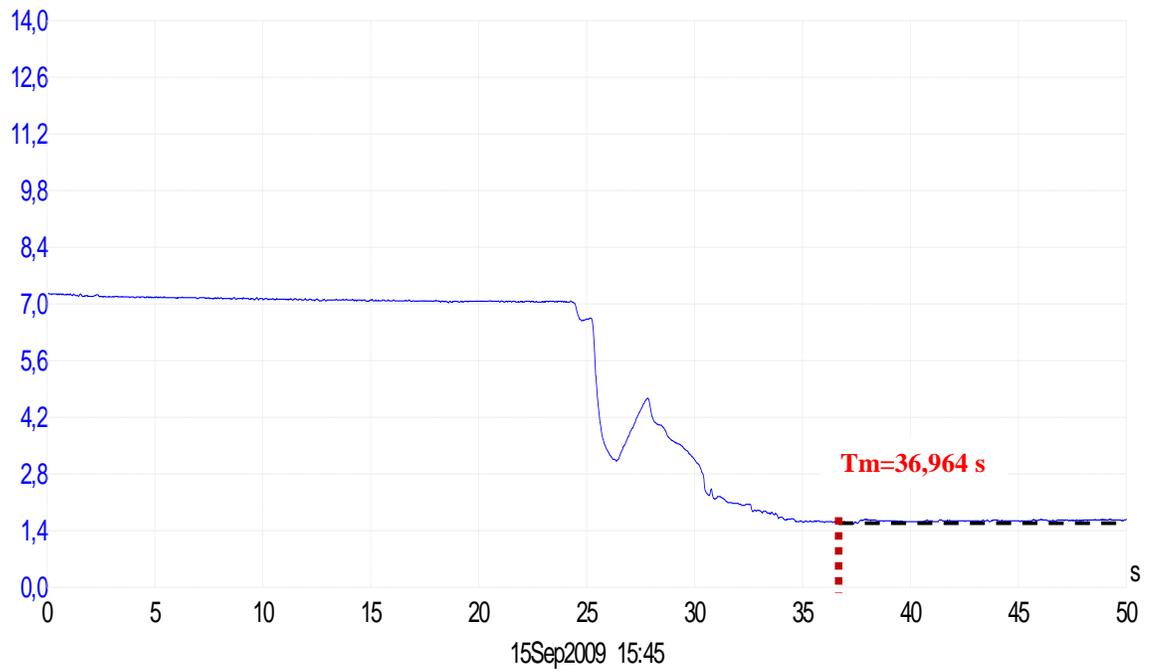


Fig. C.21. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-3, sin escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a 2/3 del radio del cucharón.

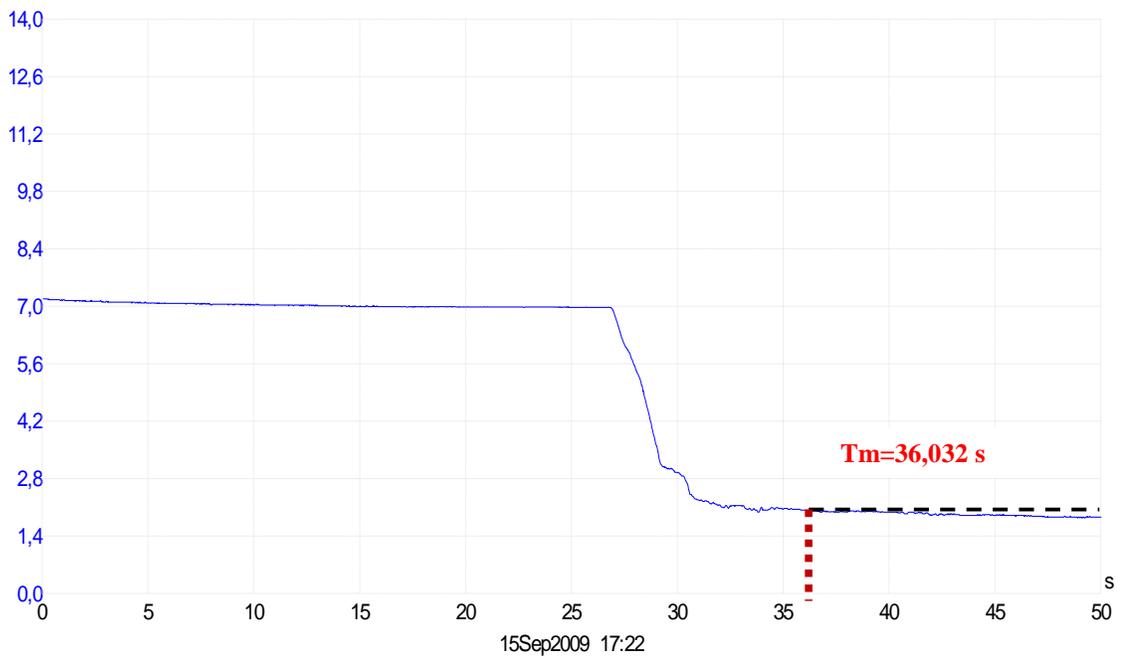


Fig. C.22. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-1, sin escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a 2/3 del radio del cucharón.

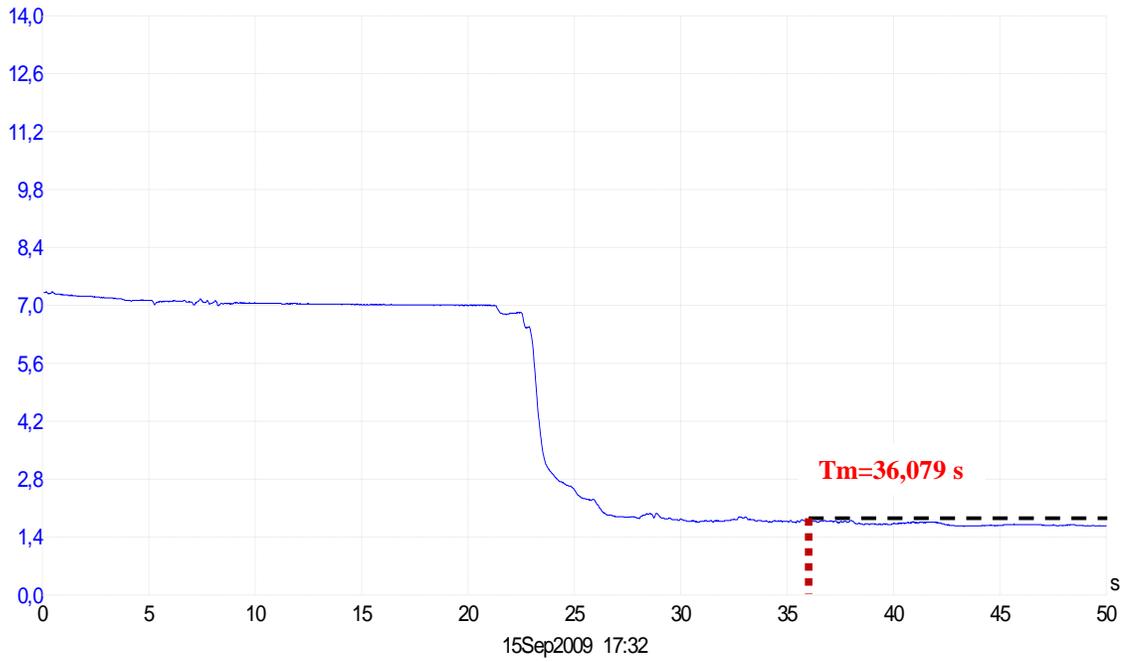


Fig. C.23. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-2, sin escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

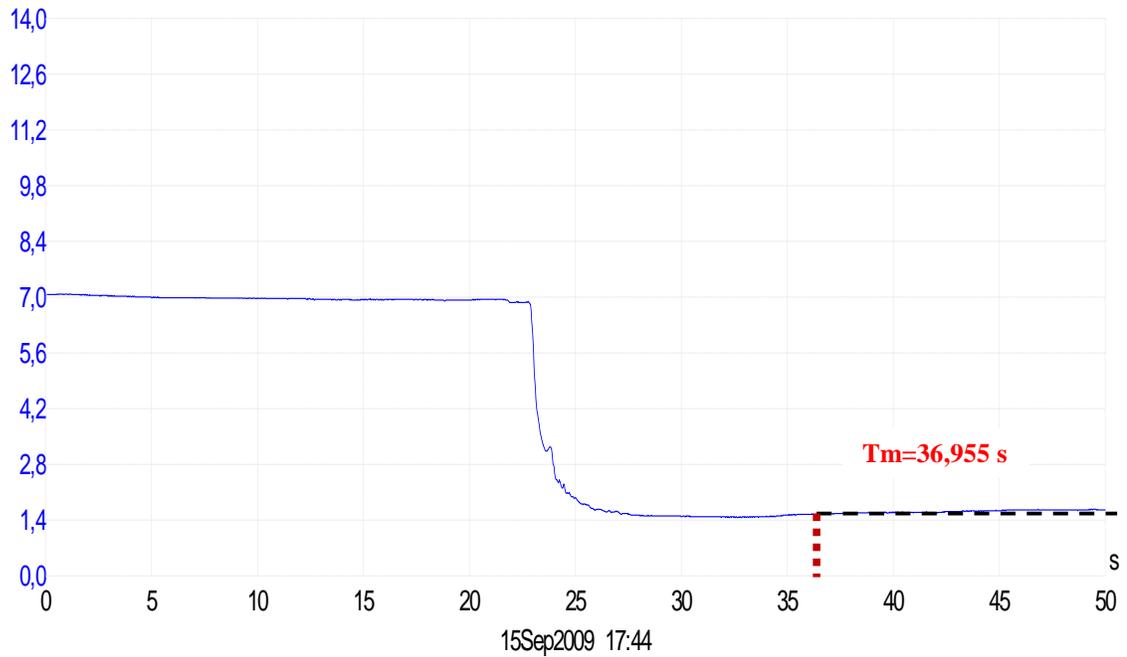


Fig. C.24. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-3, sin escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

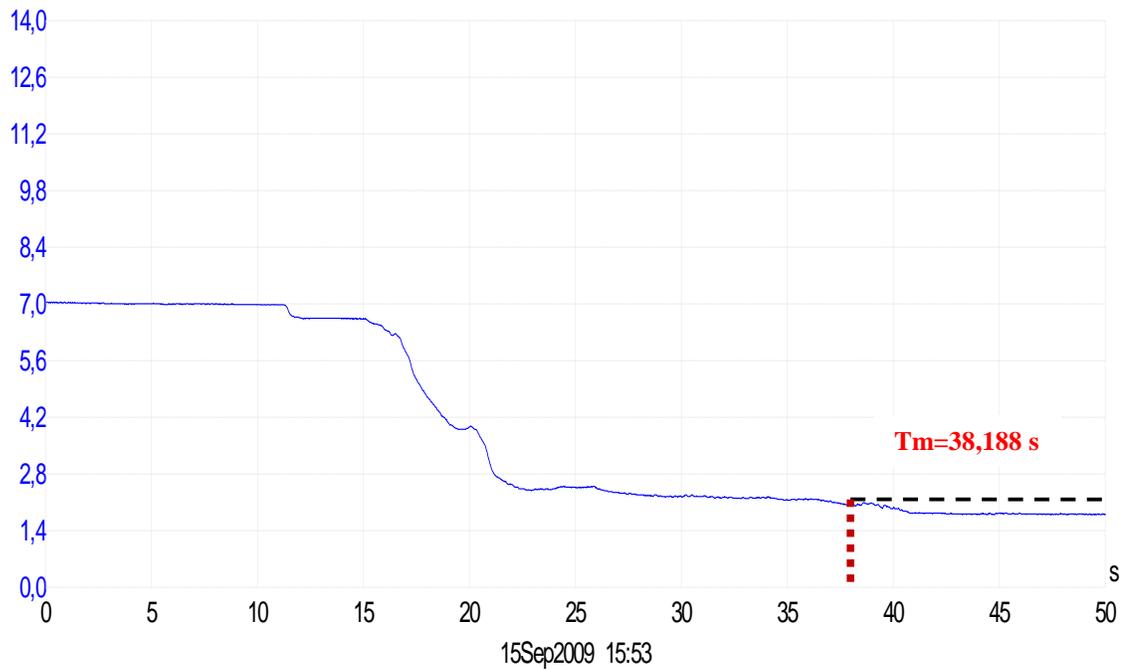


Fig. C.25. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-1, sin escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

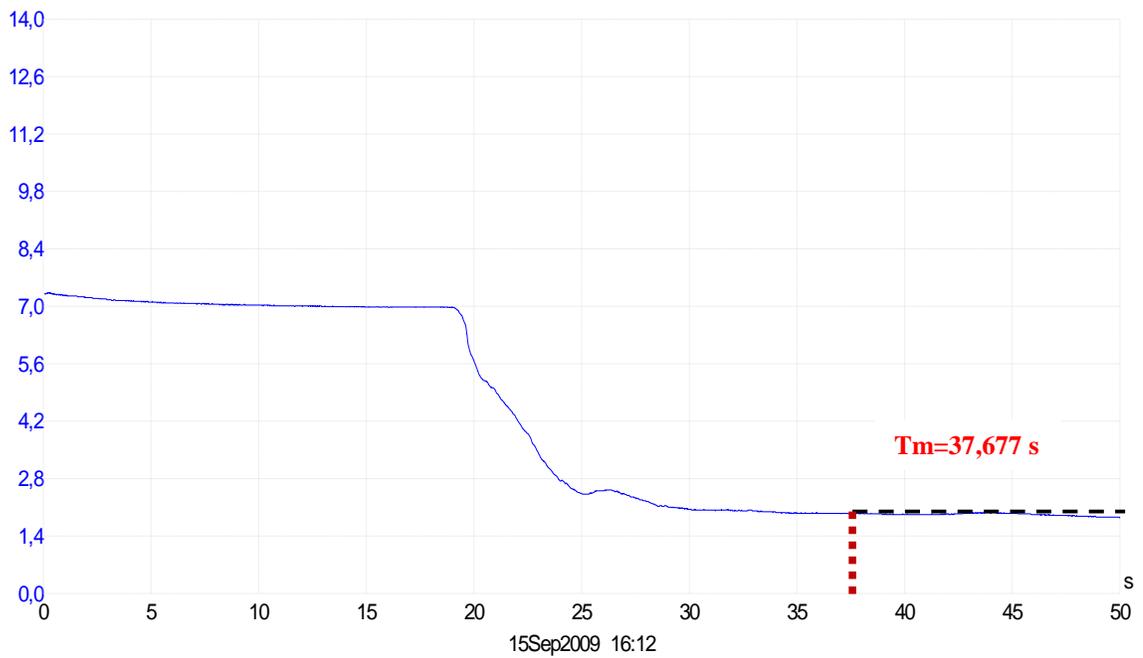


Fig. C.26. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-2, sin escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

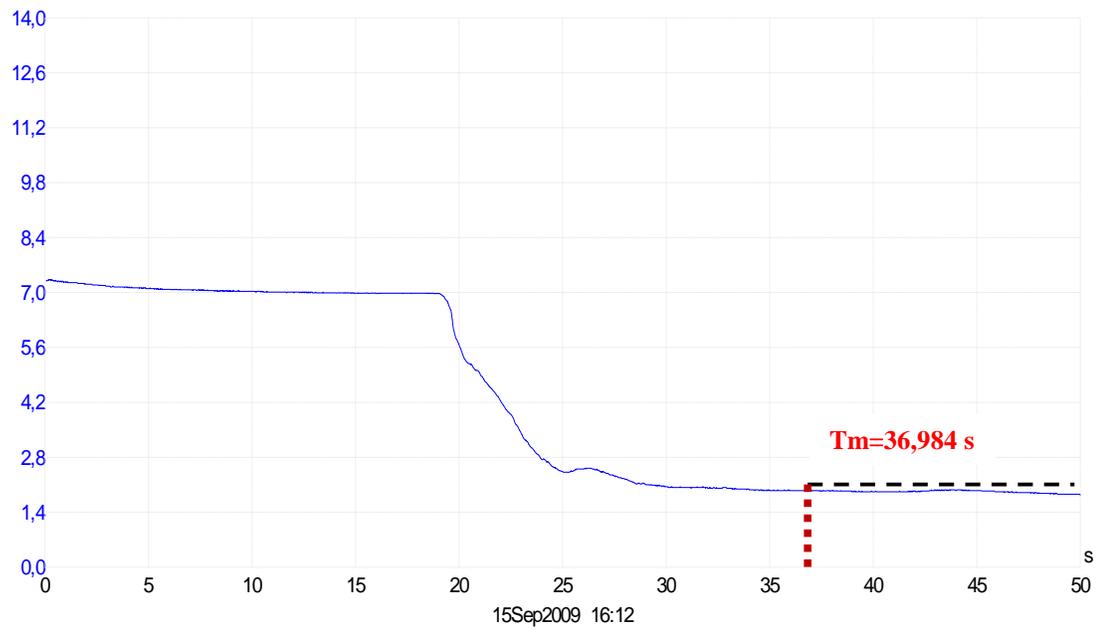


Fig. C.27. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-3, sin escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

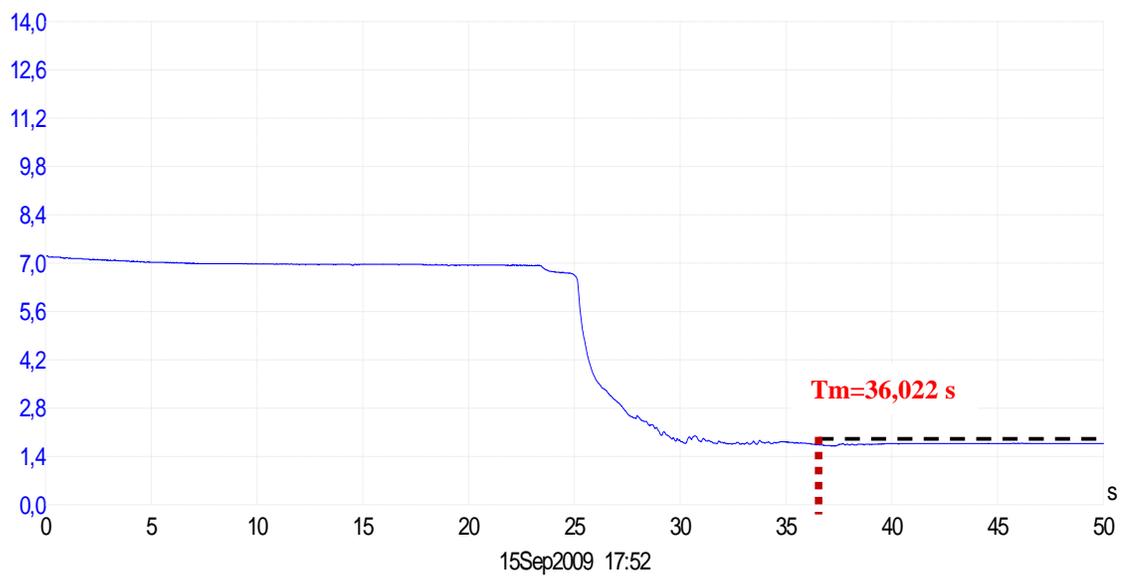


Fig. C.28. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-1, sin escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

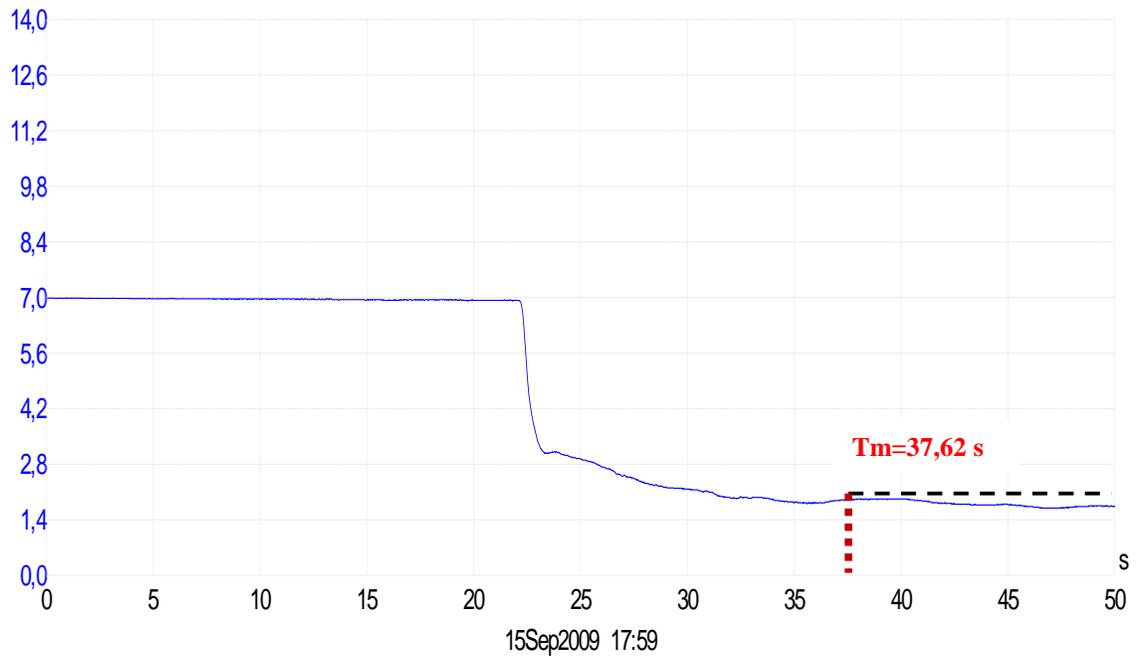


Fig. C.29. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-2, sin escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

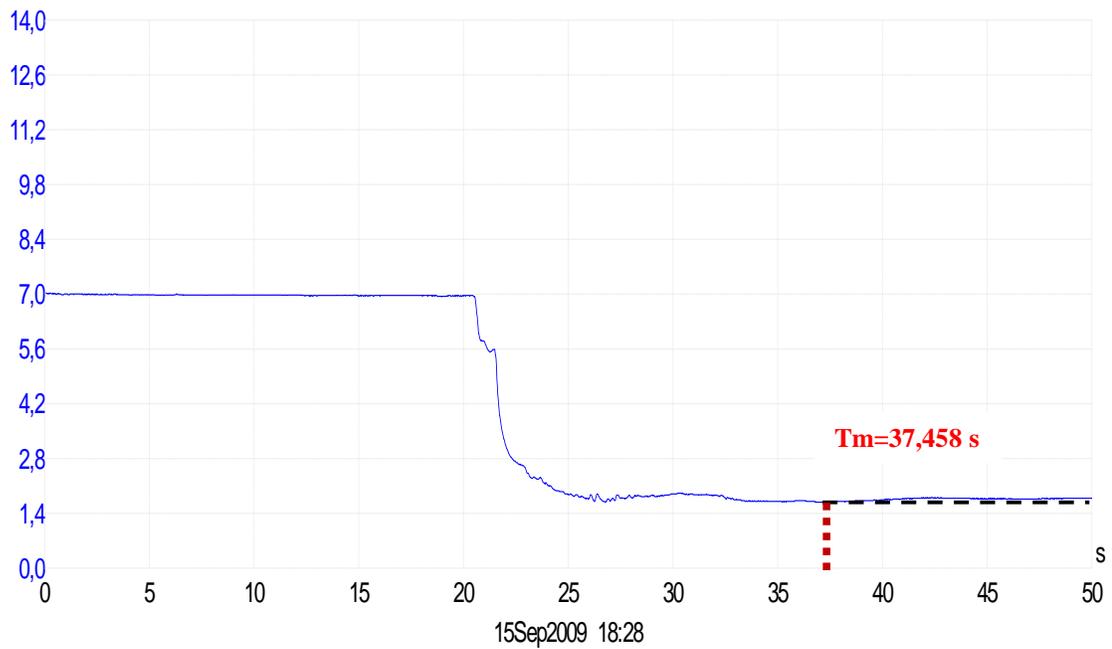


Fig. C.30. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-3, sin escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

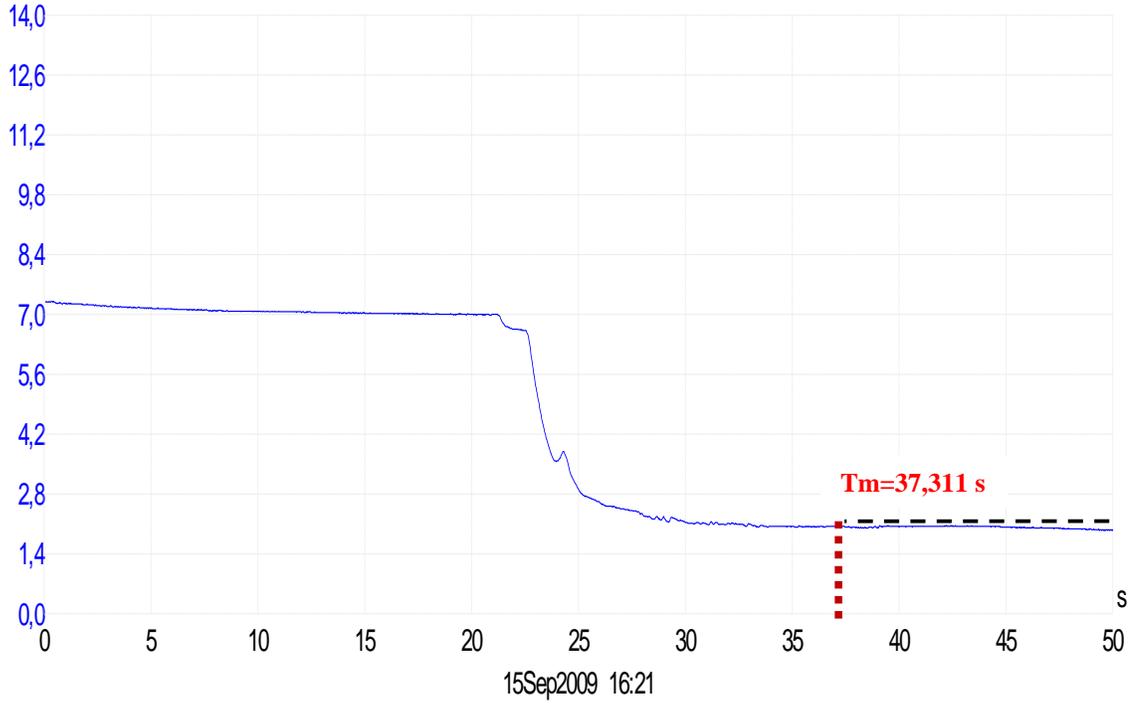


Fig. C.31. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-1, sin escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

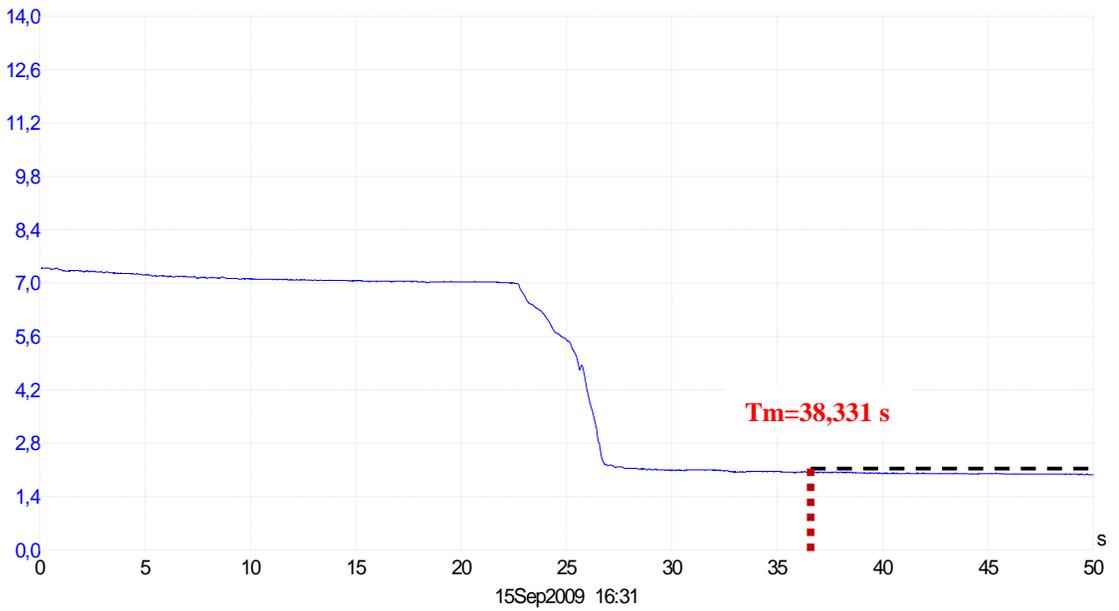


Fig. C.32. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-2, sin escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

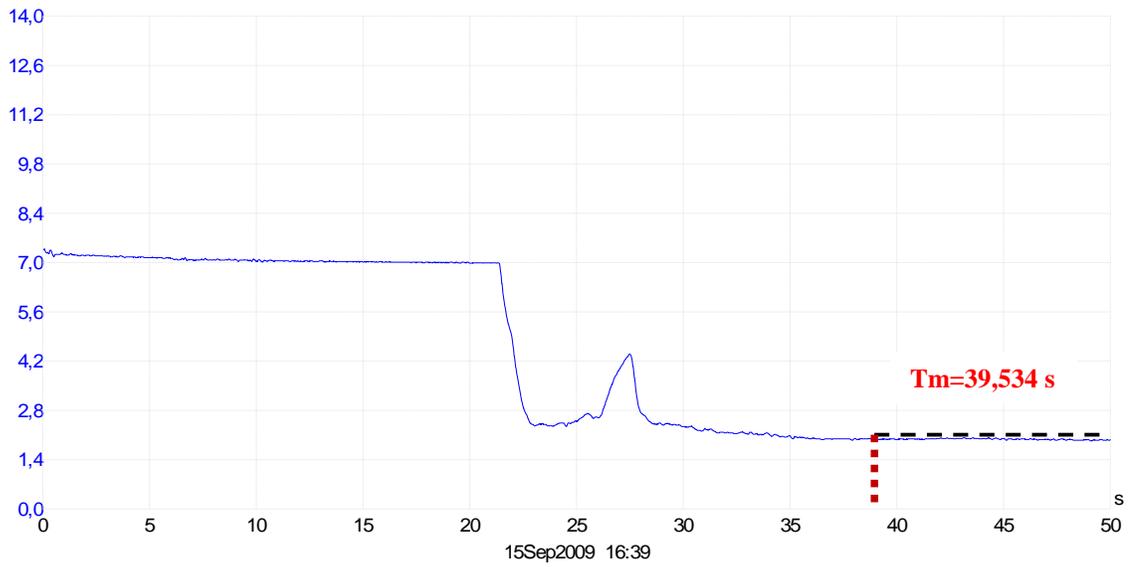


Fig. C.33. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-3, sin escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a 2/3 del radio del cucharón.

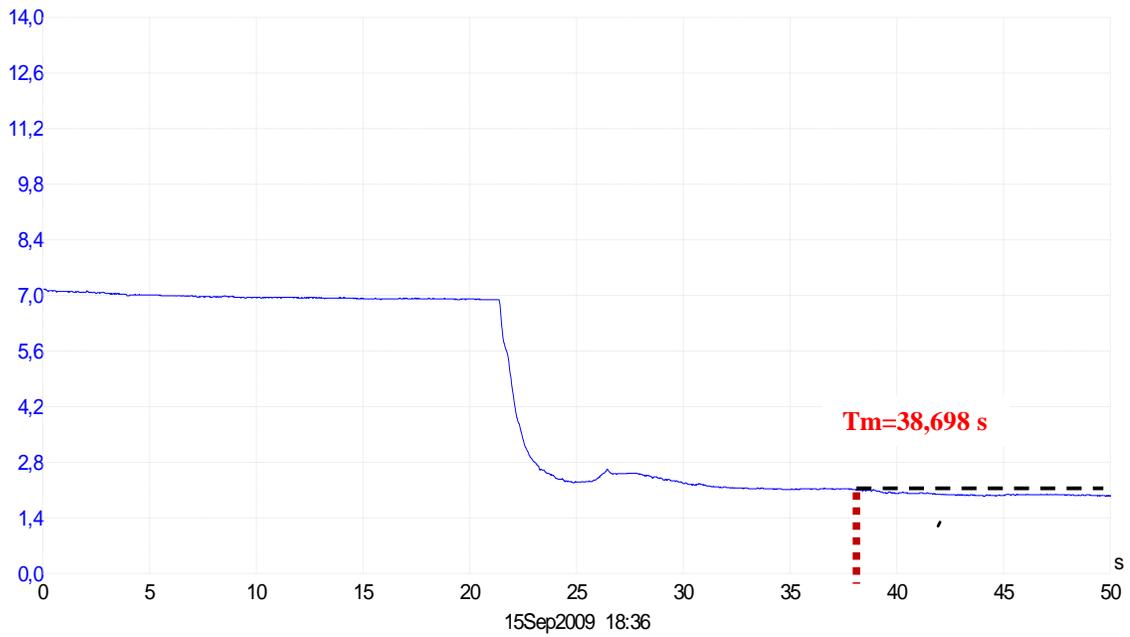


Fig. C.34. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-1, sin escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a 2/3 del radio del cucharón.

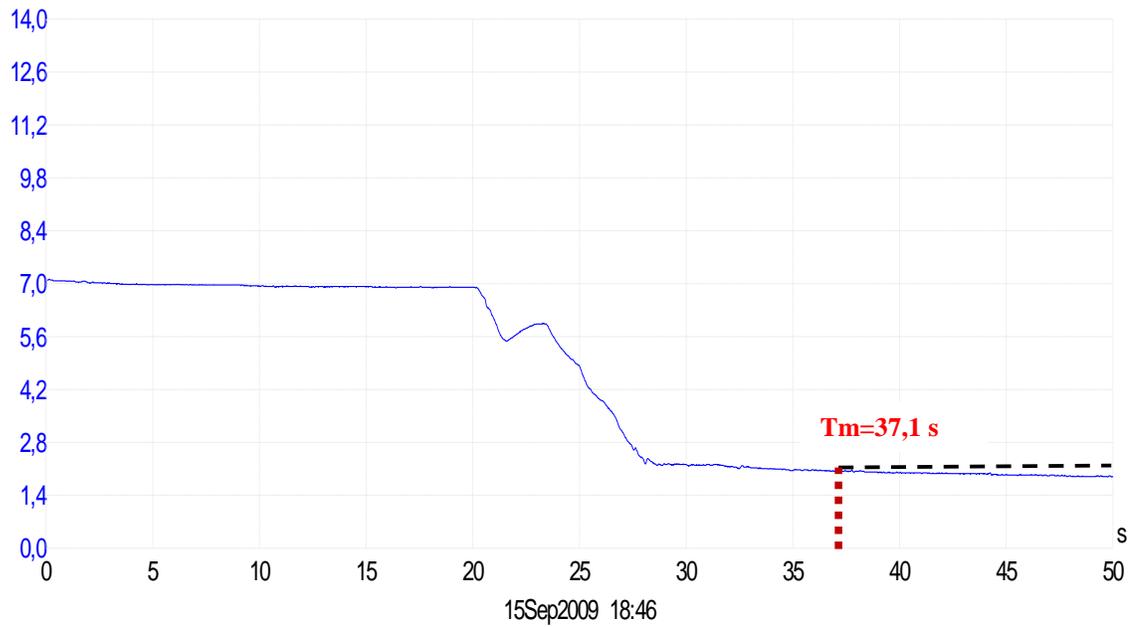


Fig. C.35. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-2, sin escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a 2/3 del radio del cucharón.

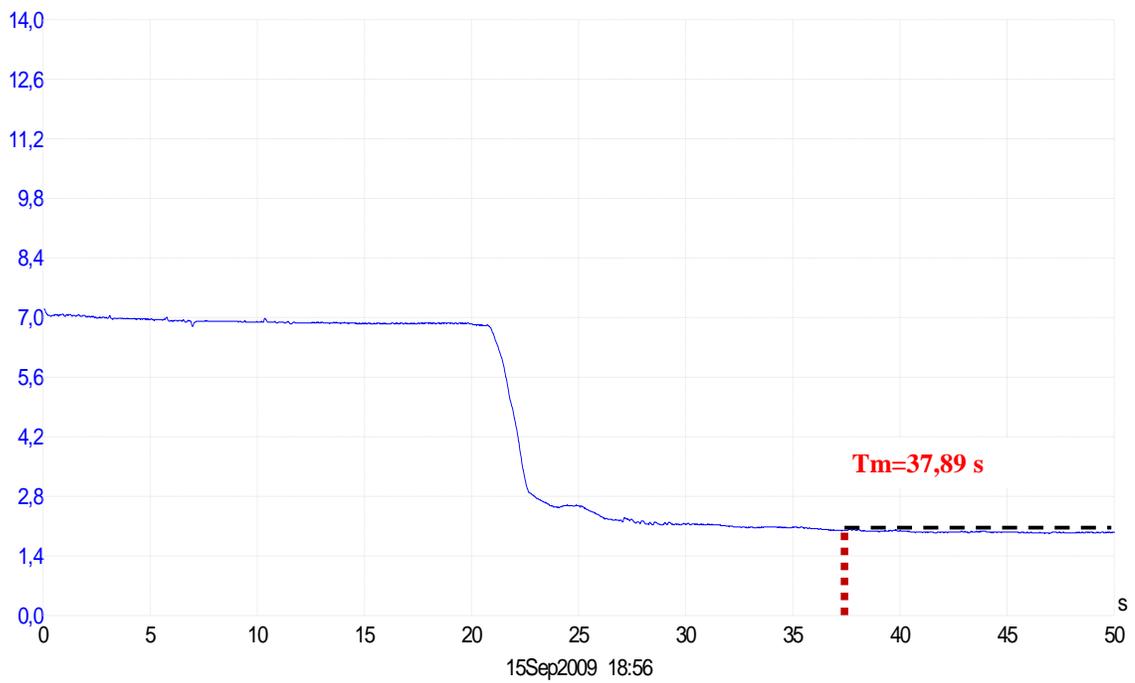


Fig. C.36. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-3, sin escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a 2/3 del radio del cucharón.

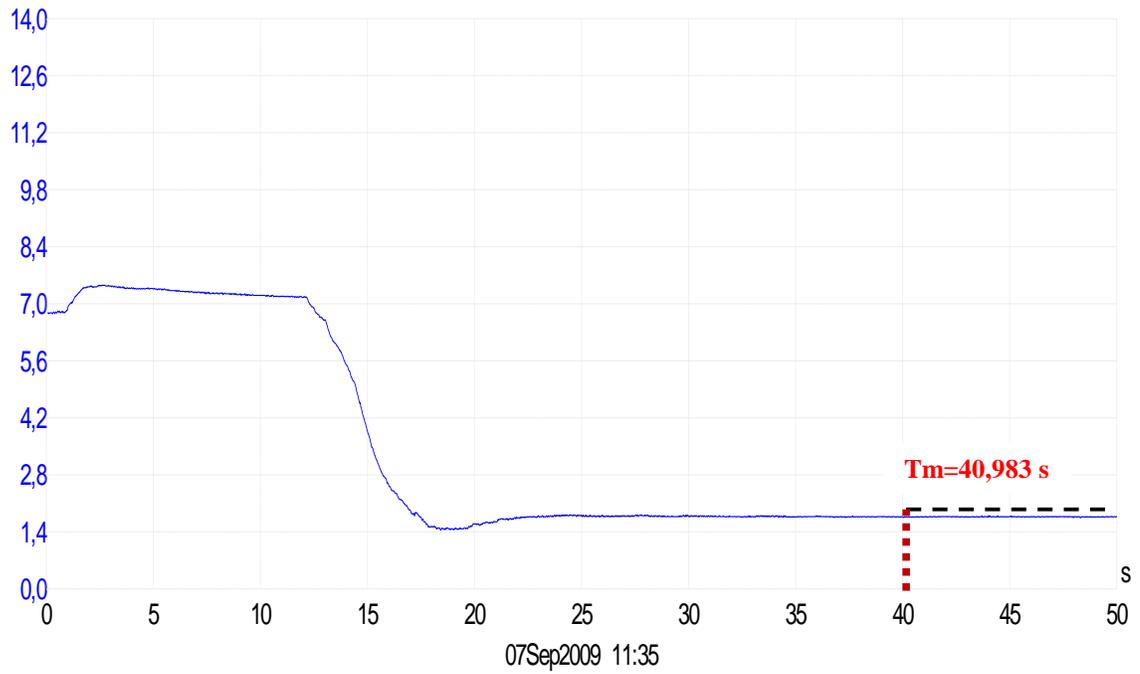


Fig. C.37. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

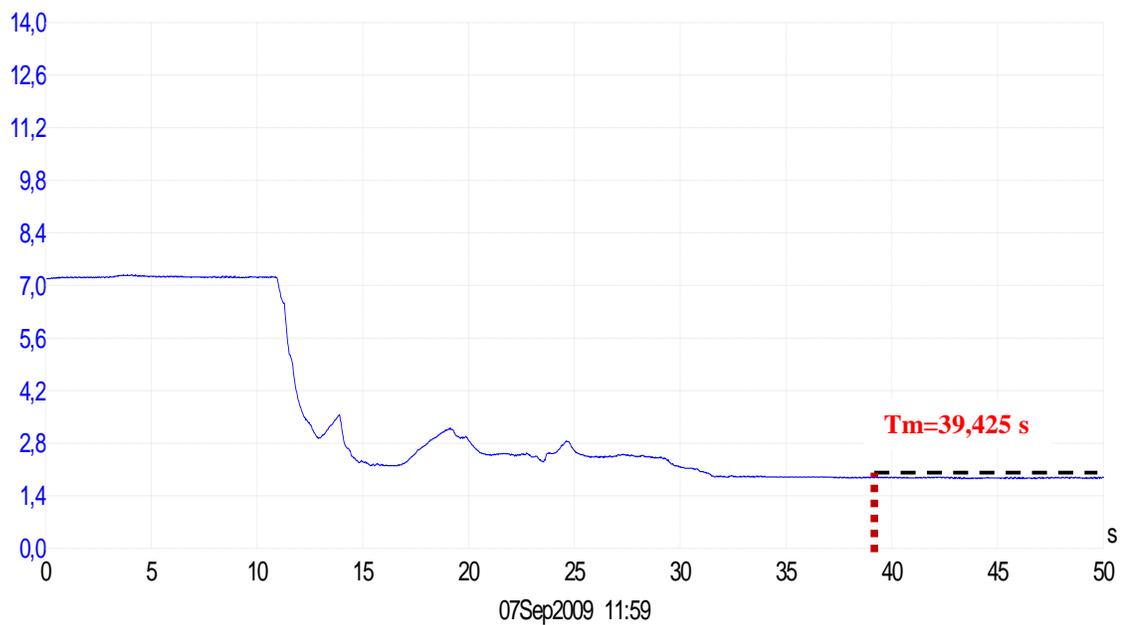


Fig. C.38. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16-2, con escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

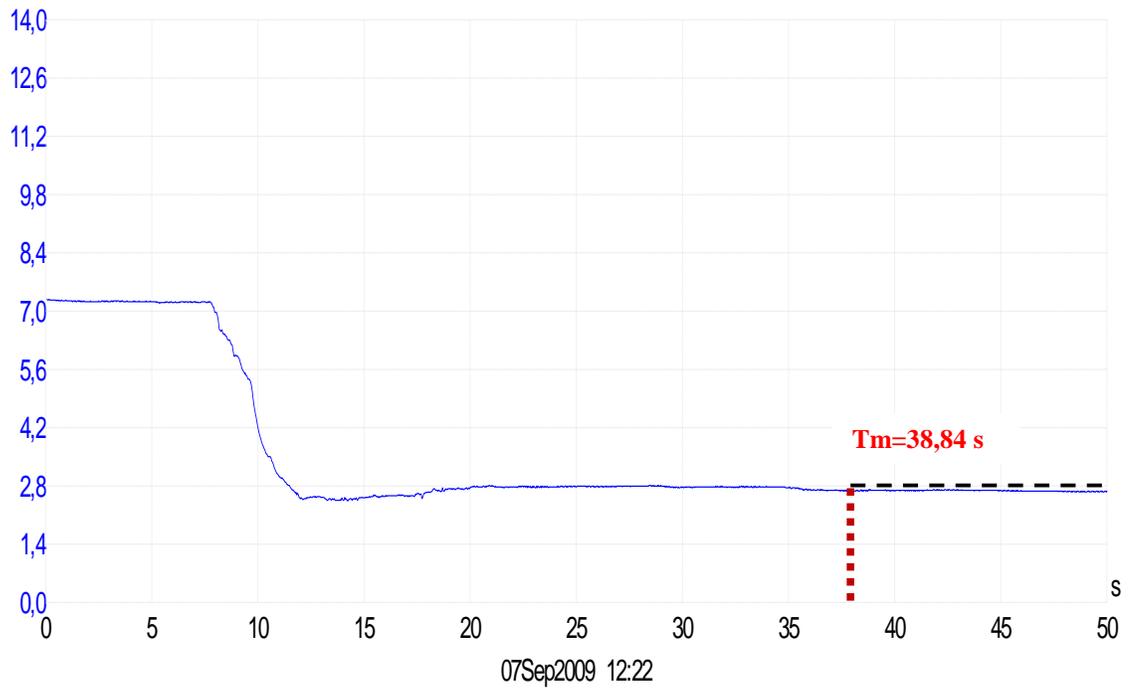


Fig. C.39. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

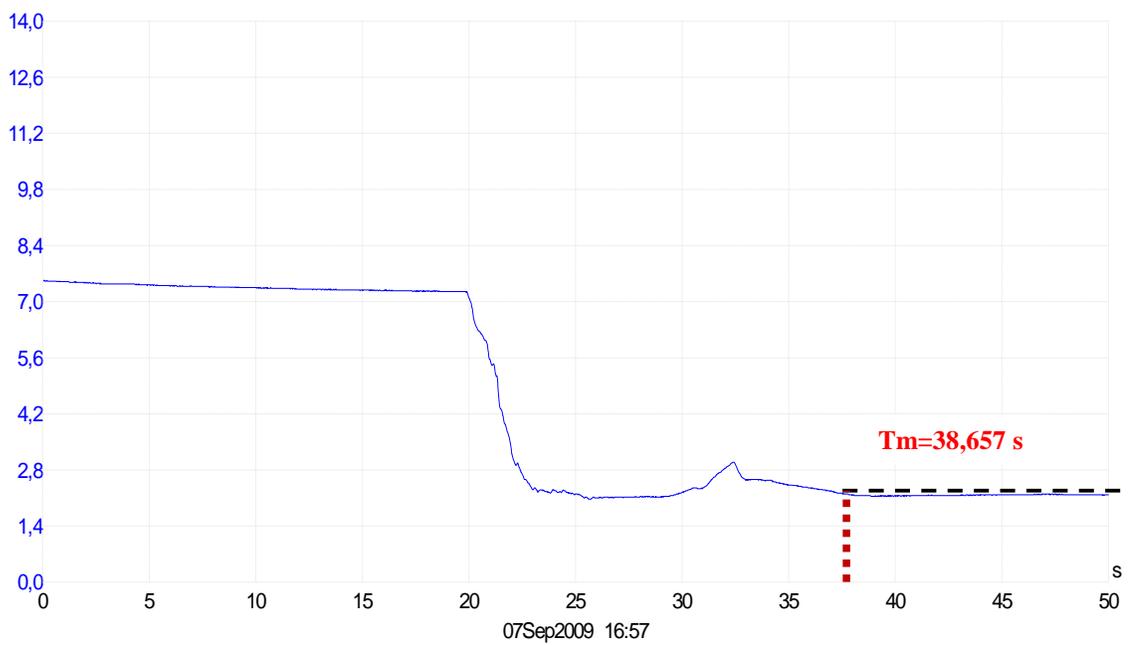


Fig. C.40. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

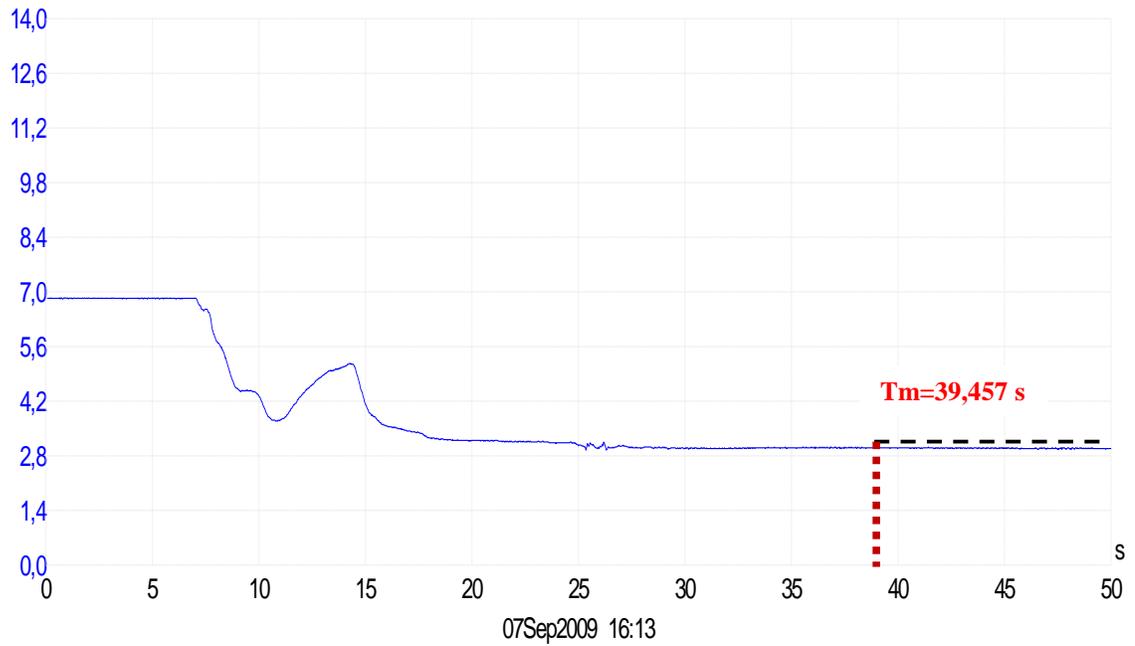


Fig. C.41. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-2, con escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

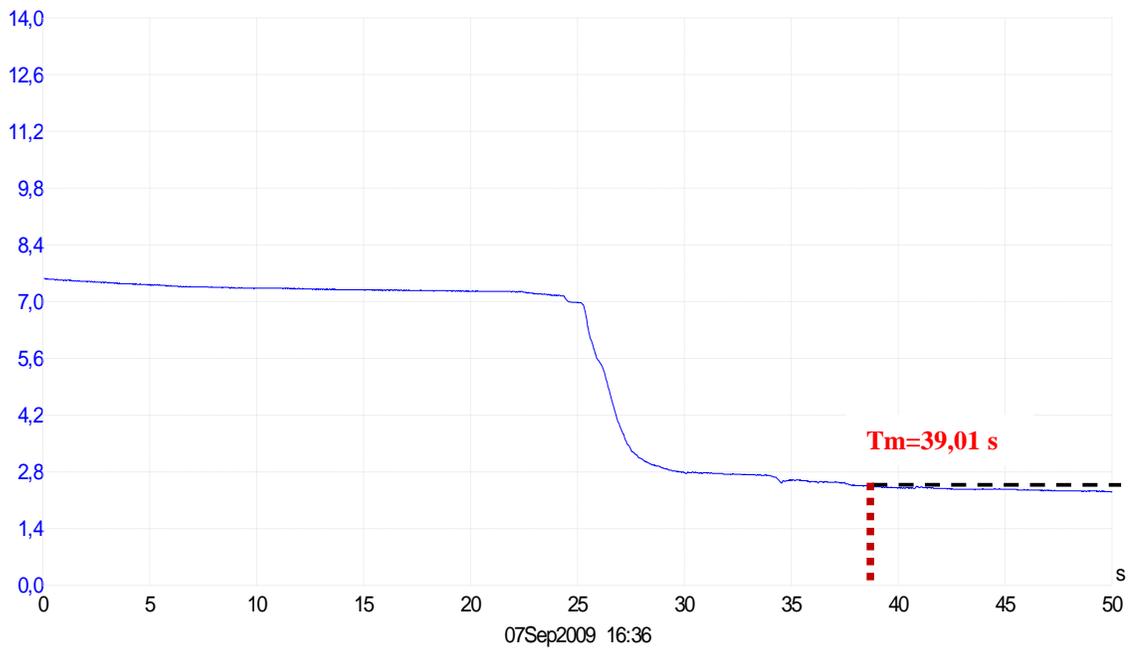


Fig. C.42. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

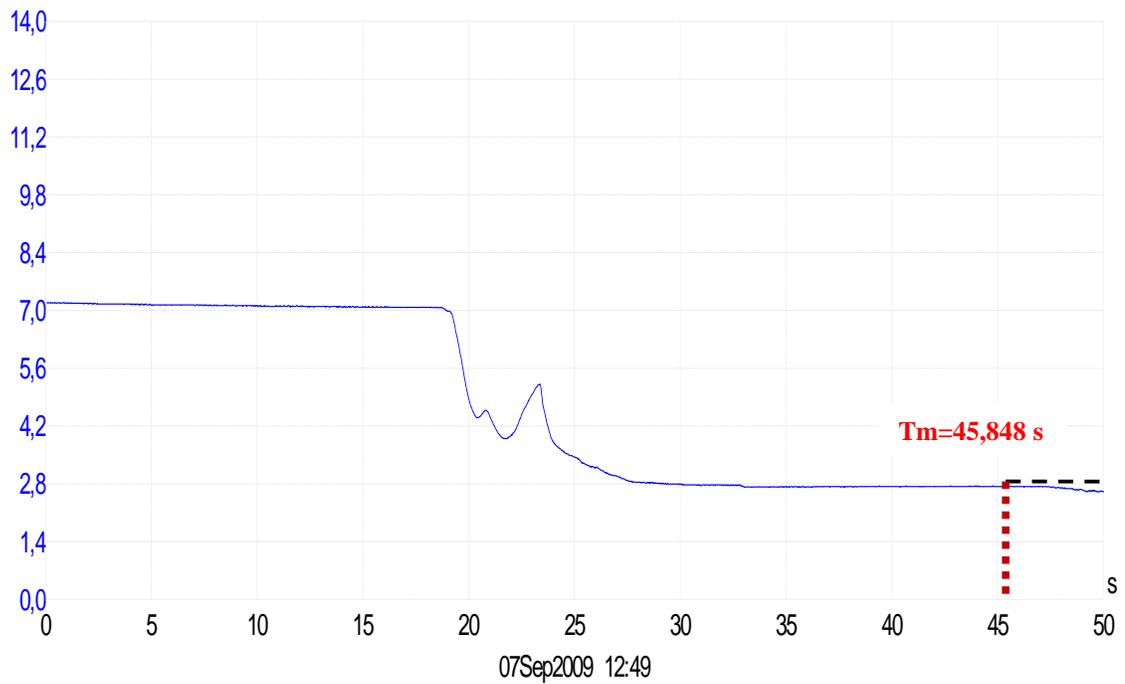


Fig. C.43. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

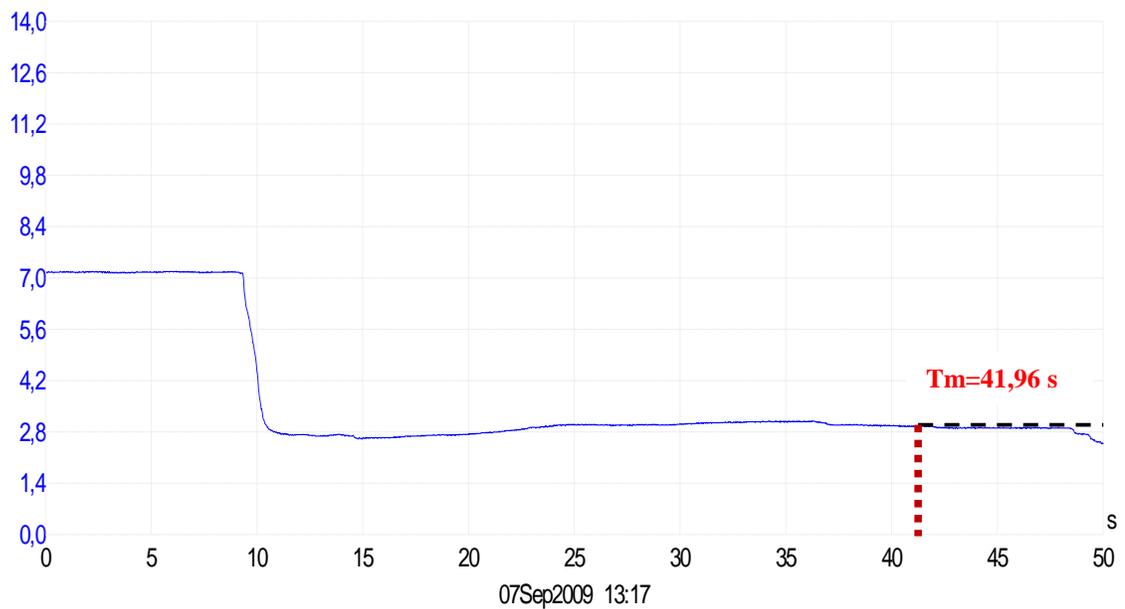


Fig. C.44. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-2, con escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

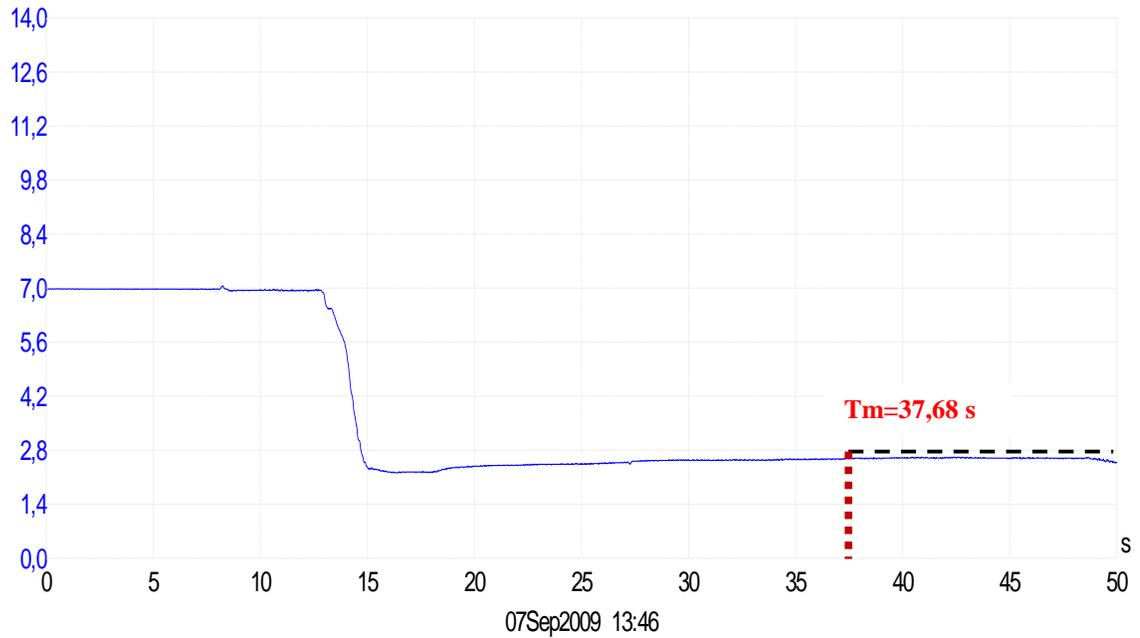


Fig. C.45. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

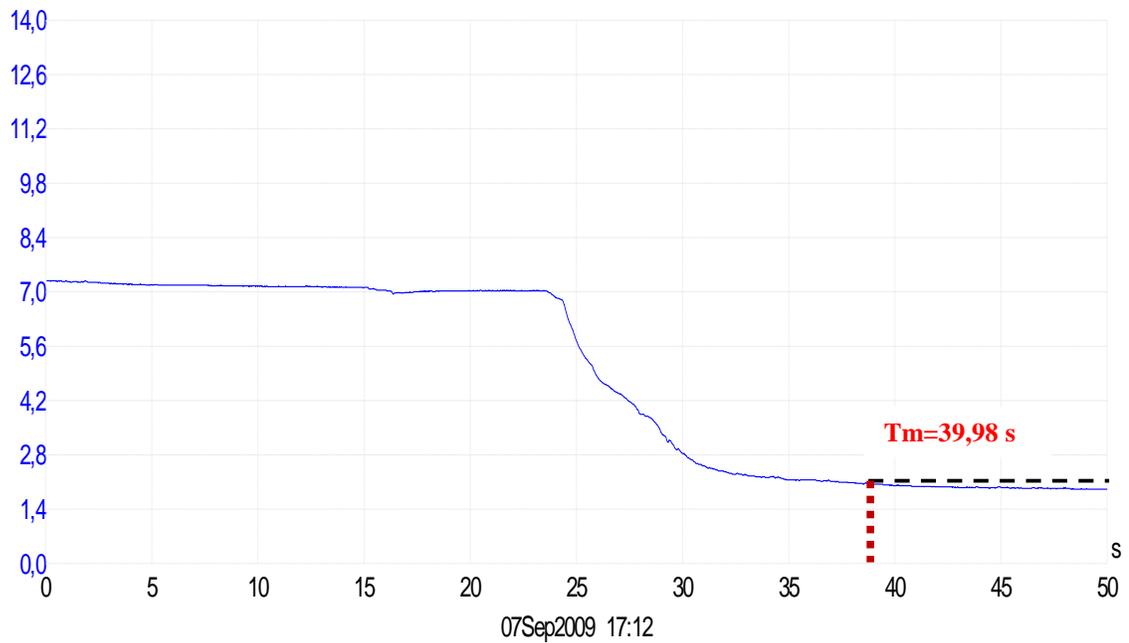


Fig. C.46. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

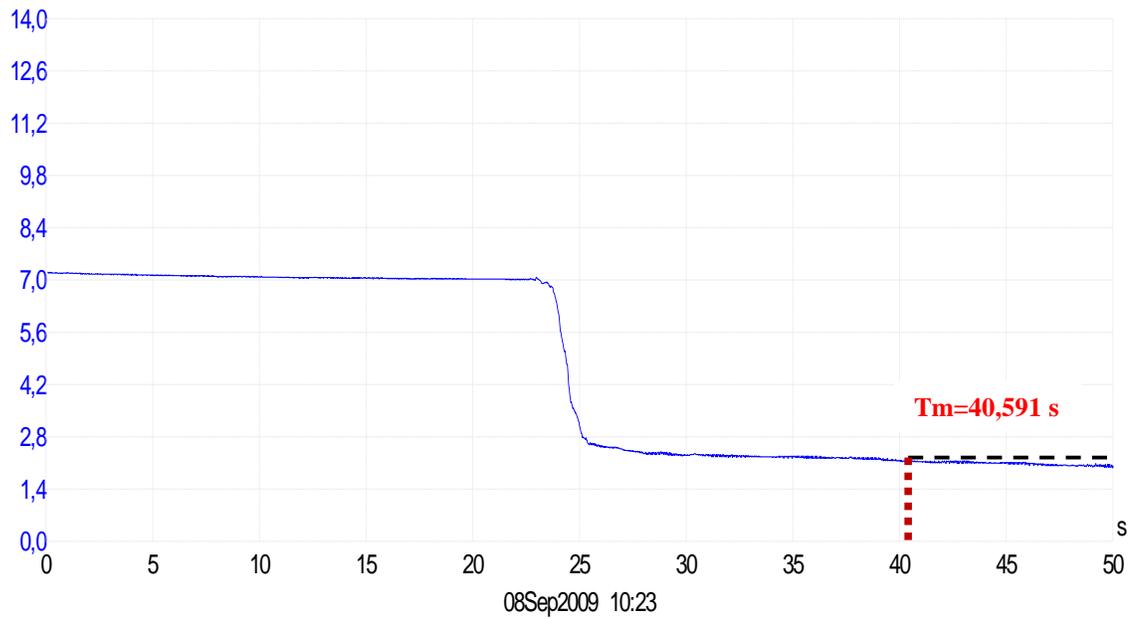


Fig. C.47. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-2, con escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

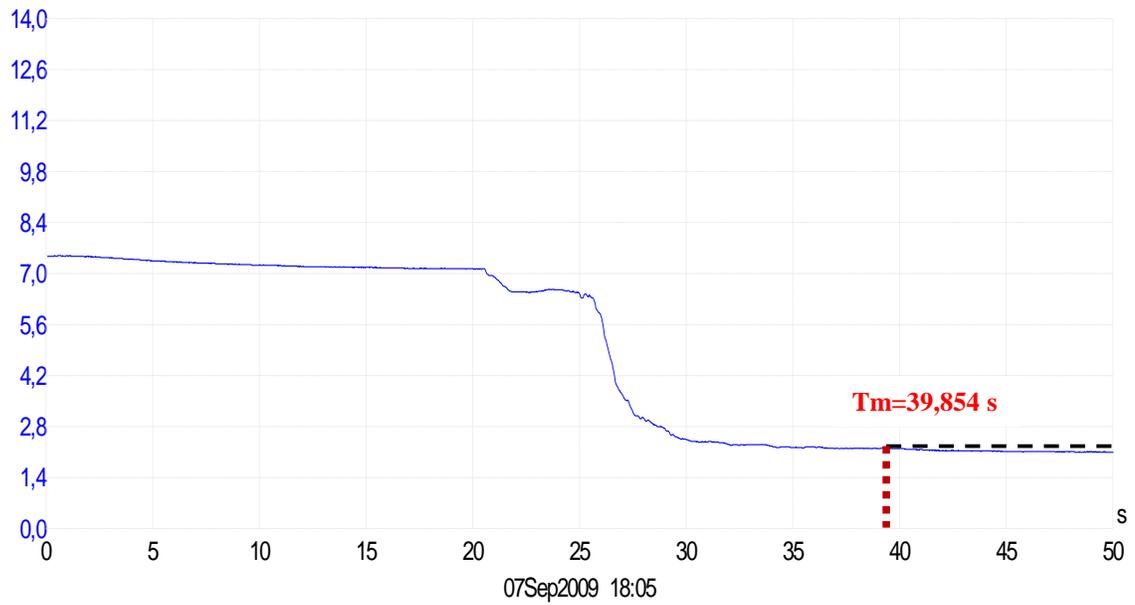


Fig. C.48. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

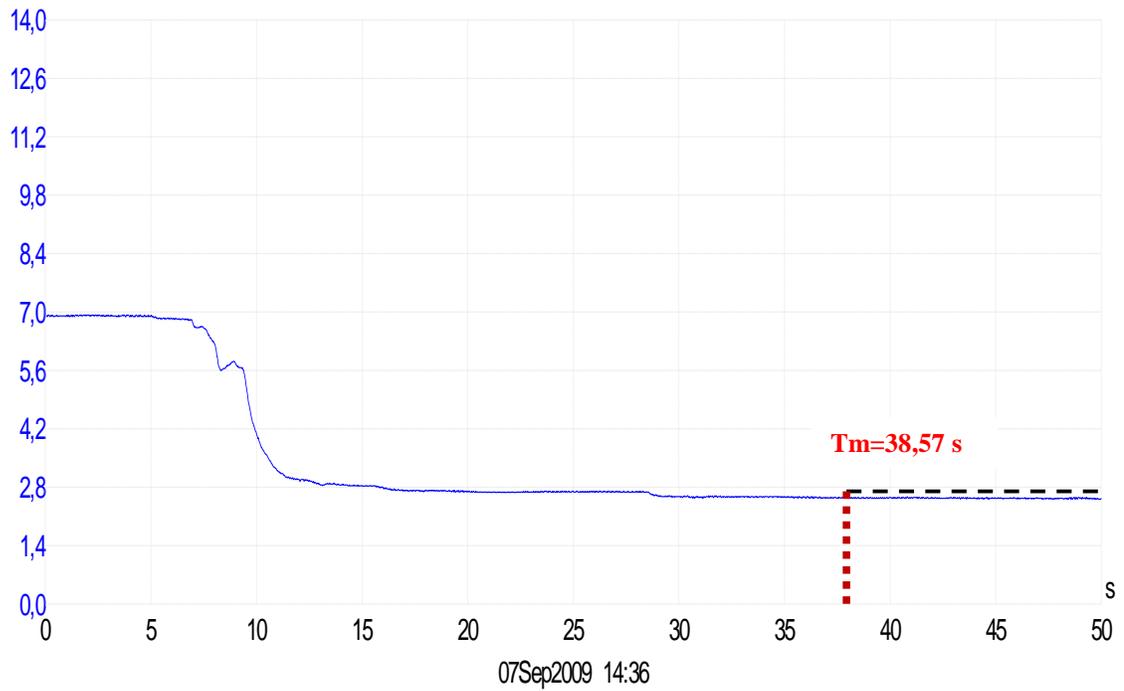


Fig. C.49. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

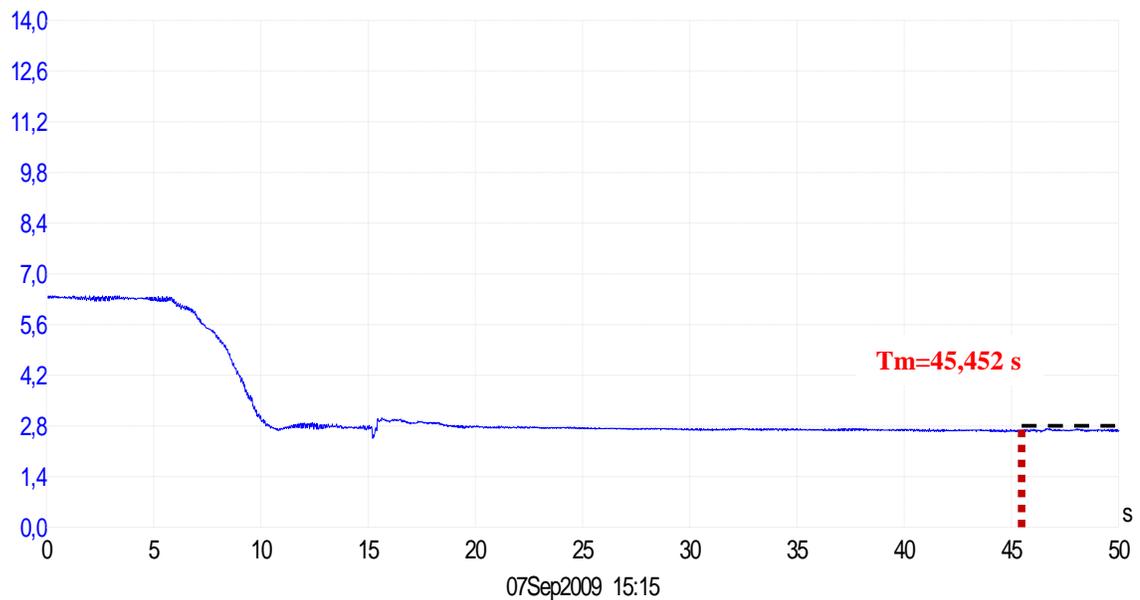


Fig. C.50. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-2, con escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

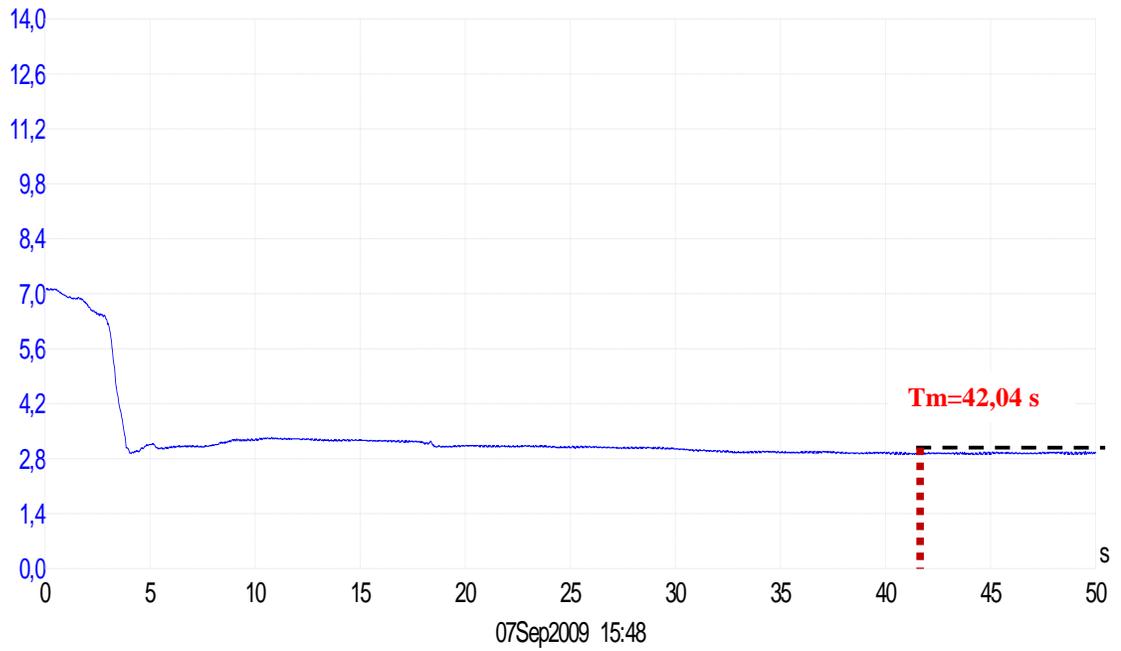


Fig. C.51. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

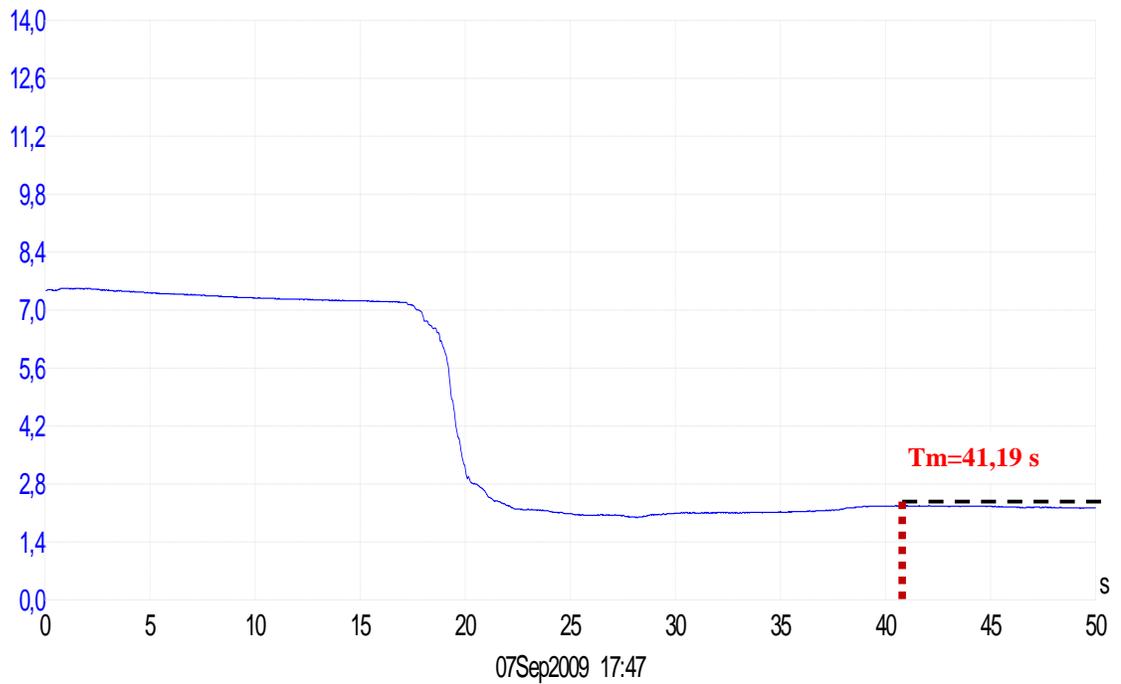


Fig. C.52. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

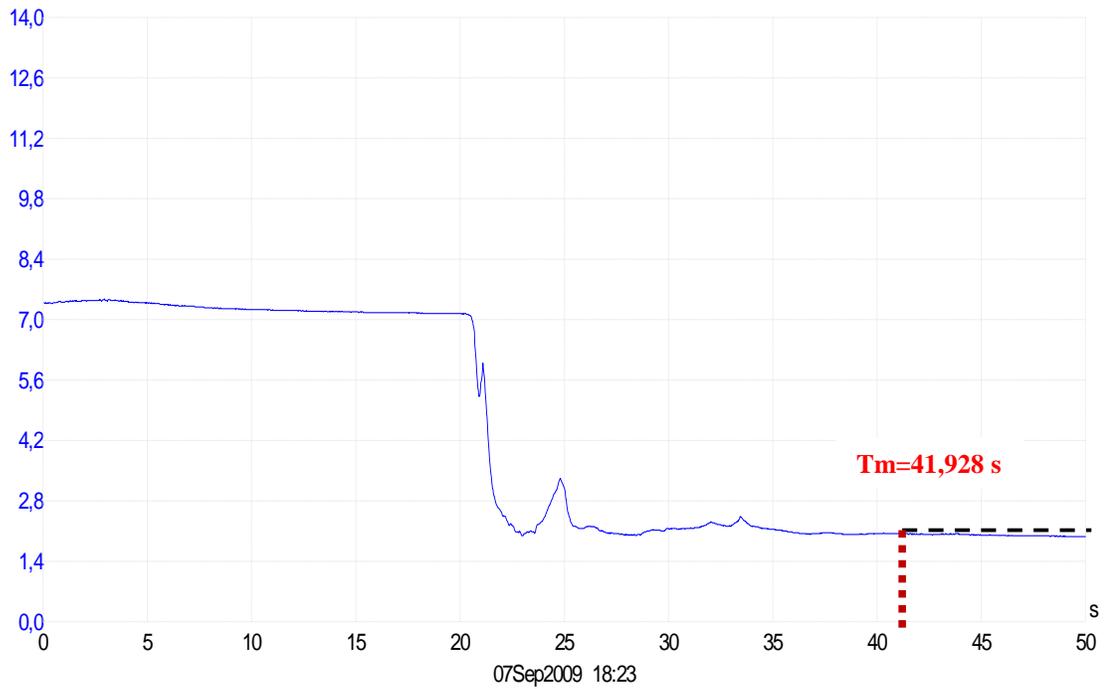


Fig. C.53. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-2, con escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

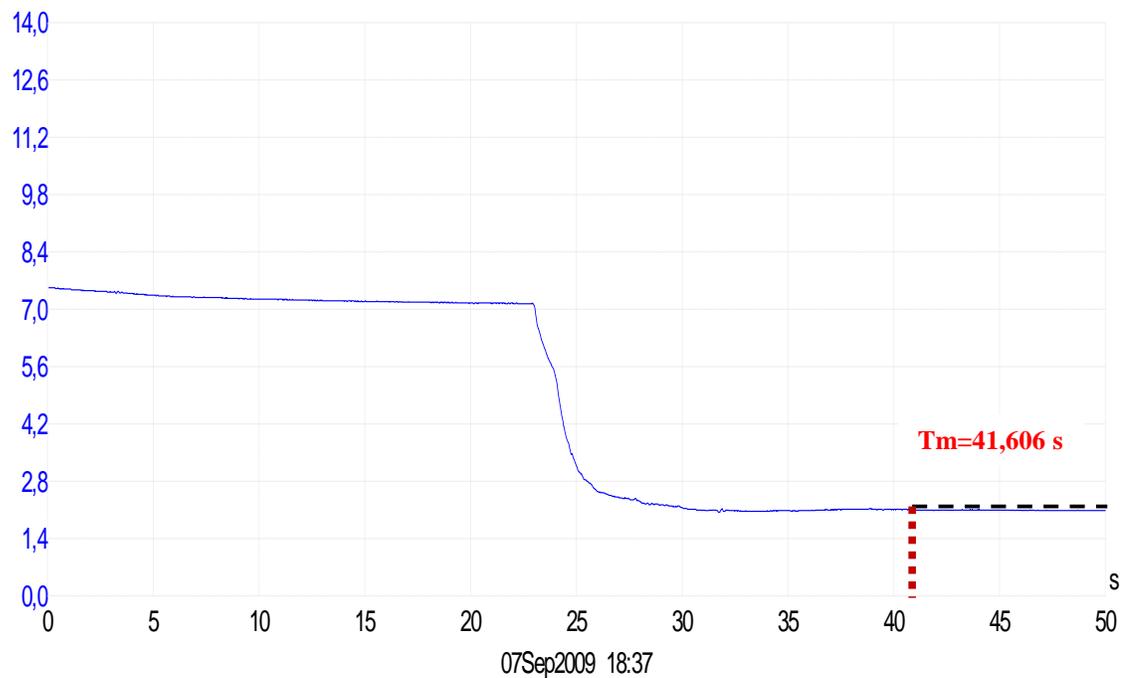


Fig. C.54. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada en el centro del cucharón.

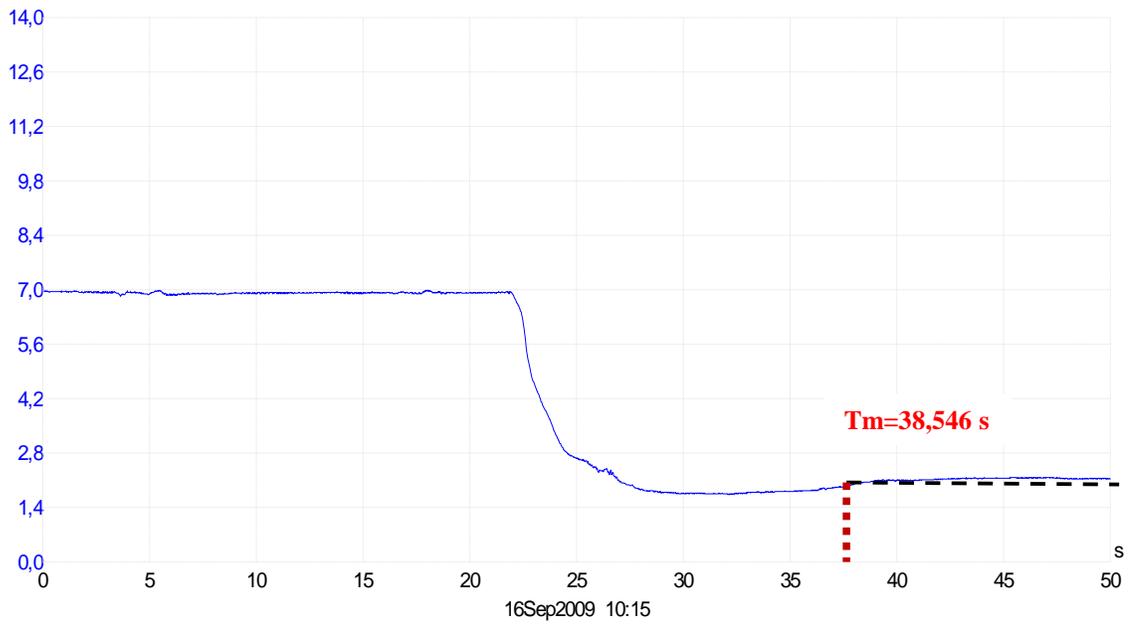


Fig. C.55. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

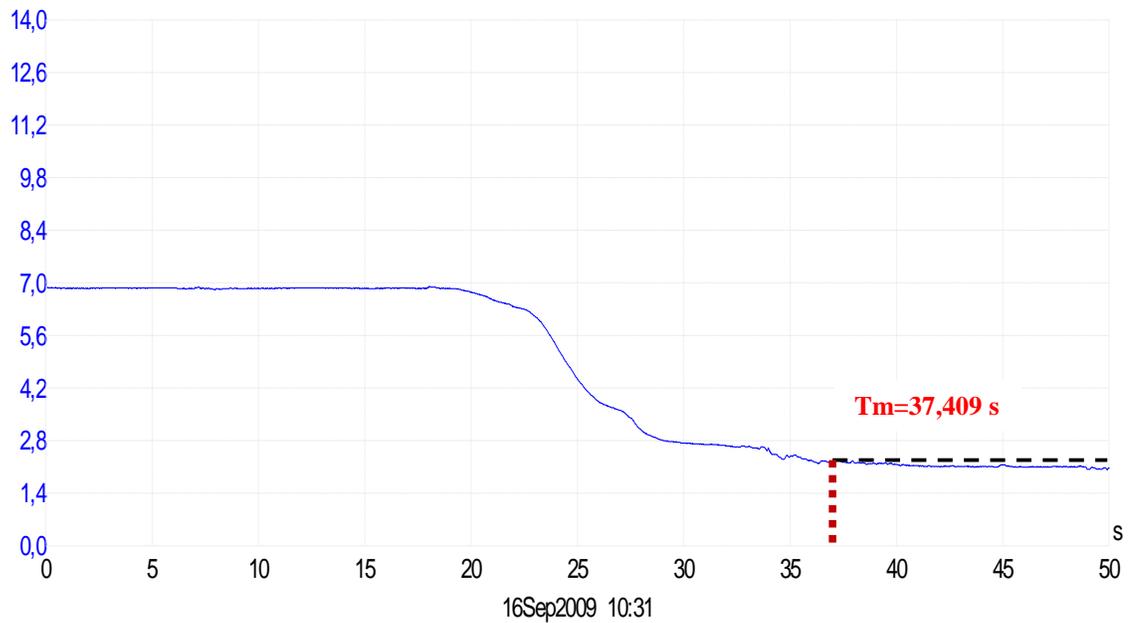


Fig. C.56. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-2, con escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

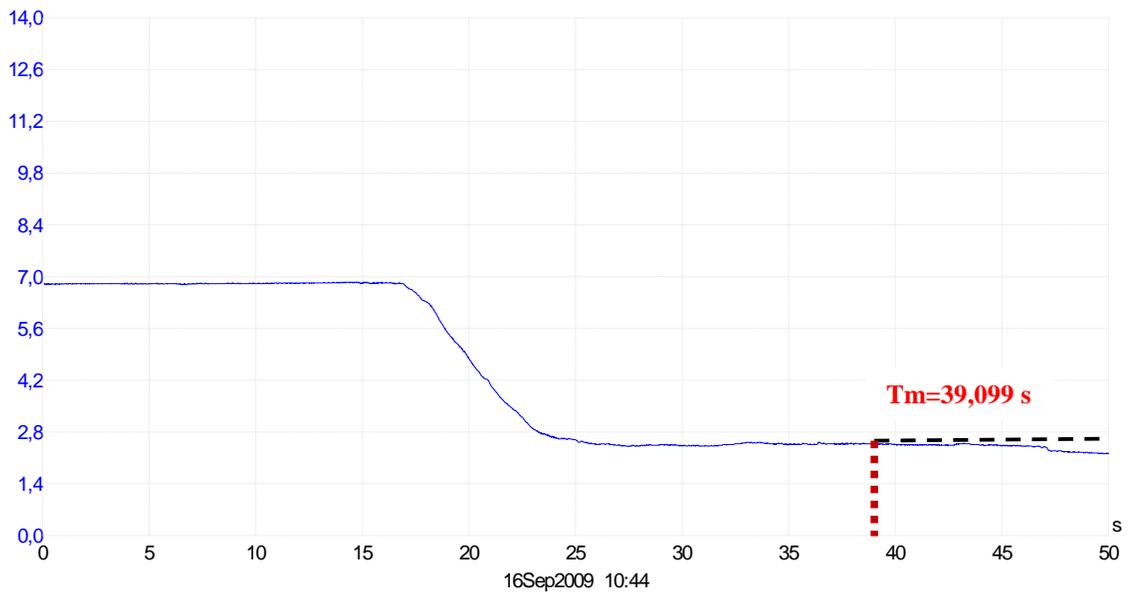


Fig. C.57. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

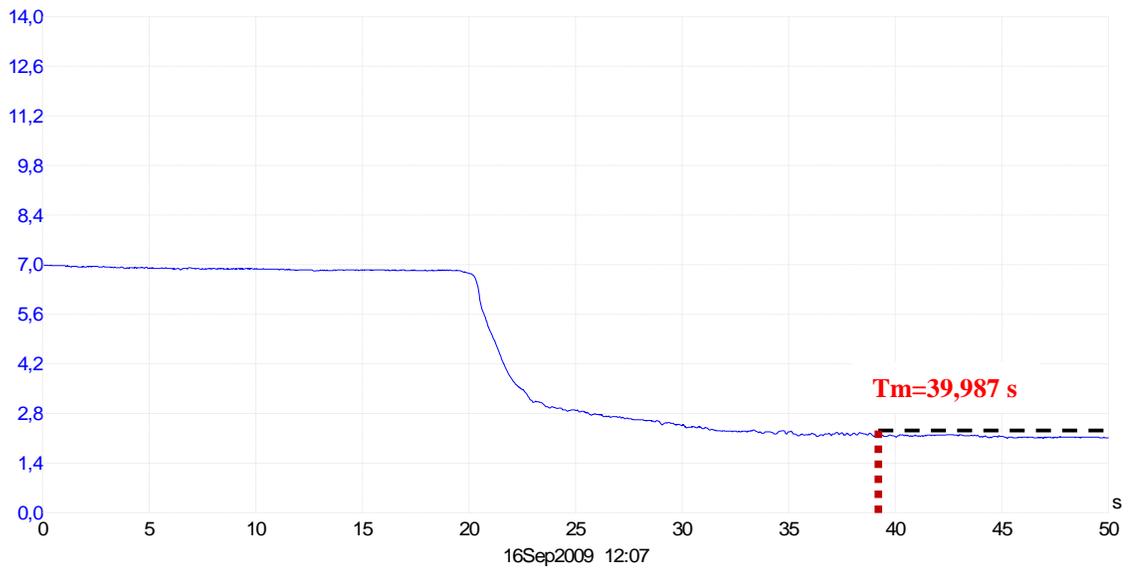


Fig. C.58. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

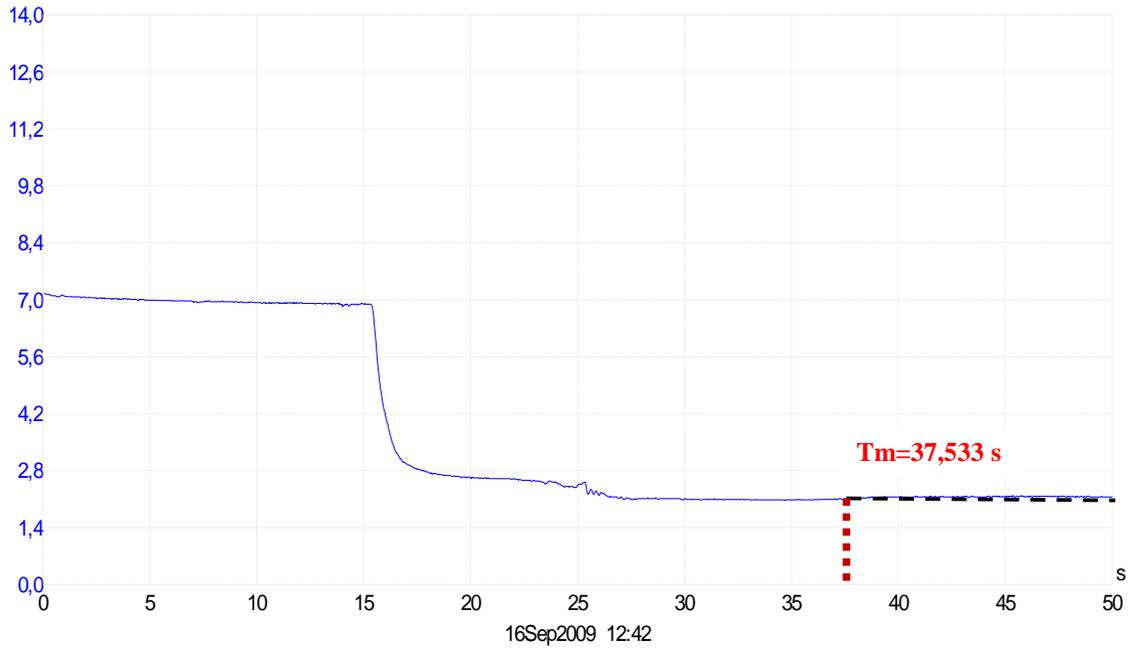


Fig. C.59. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-2, con escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

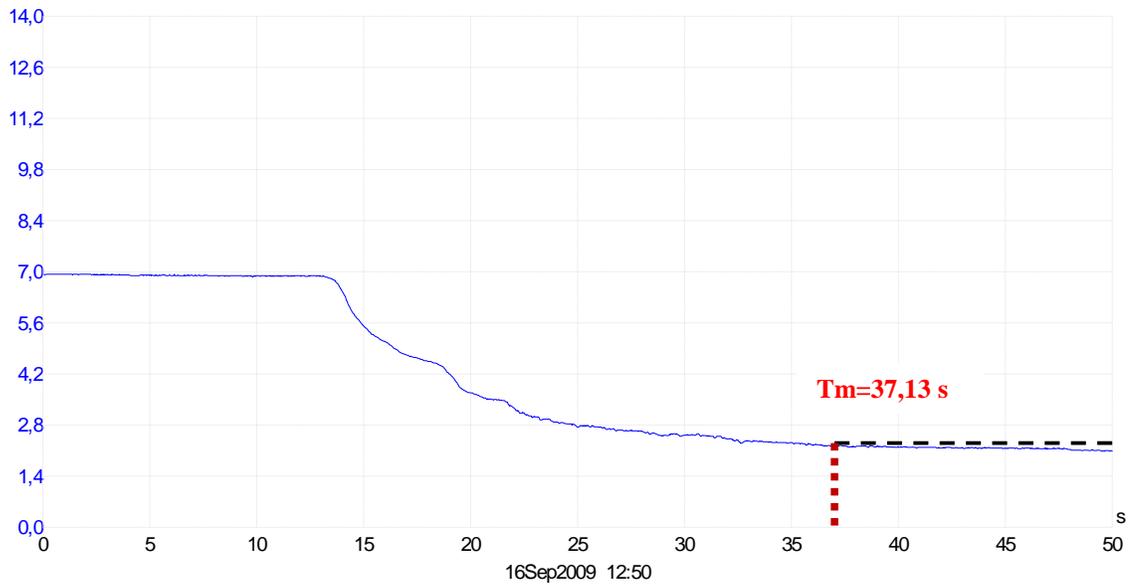


Fig. C.60. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,16m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

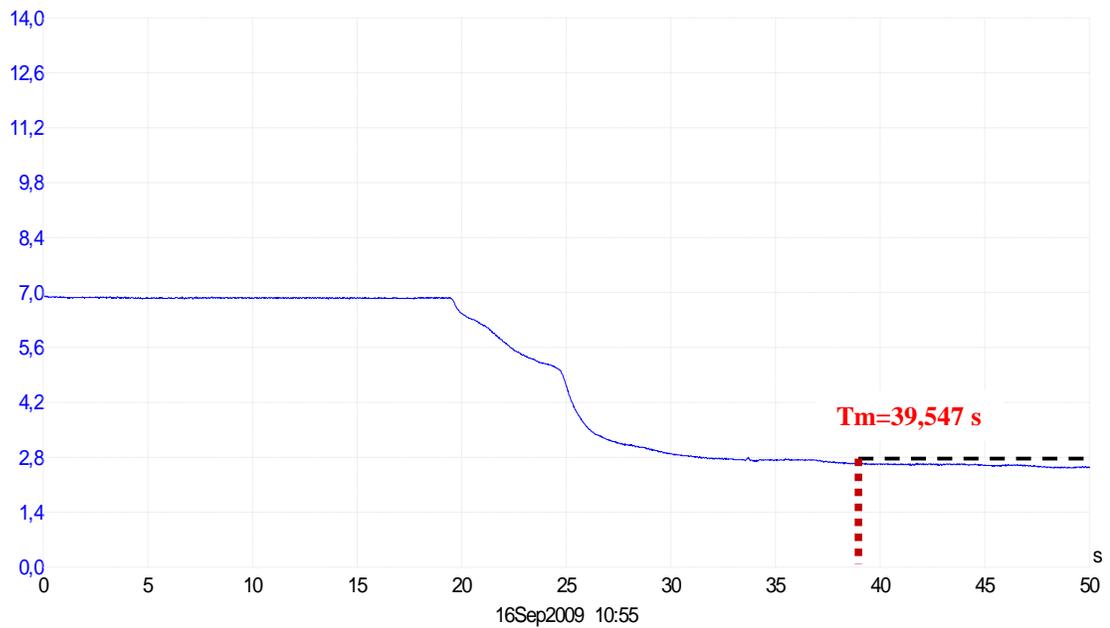


Fig. C.61. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

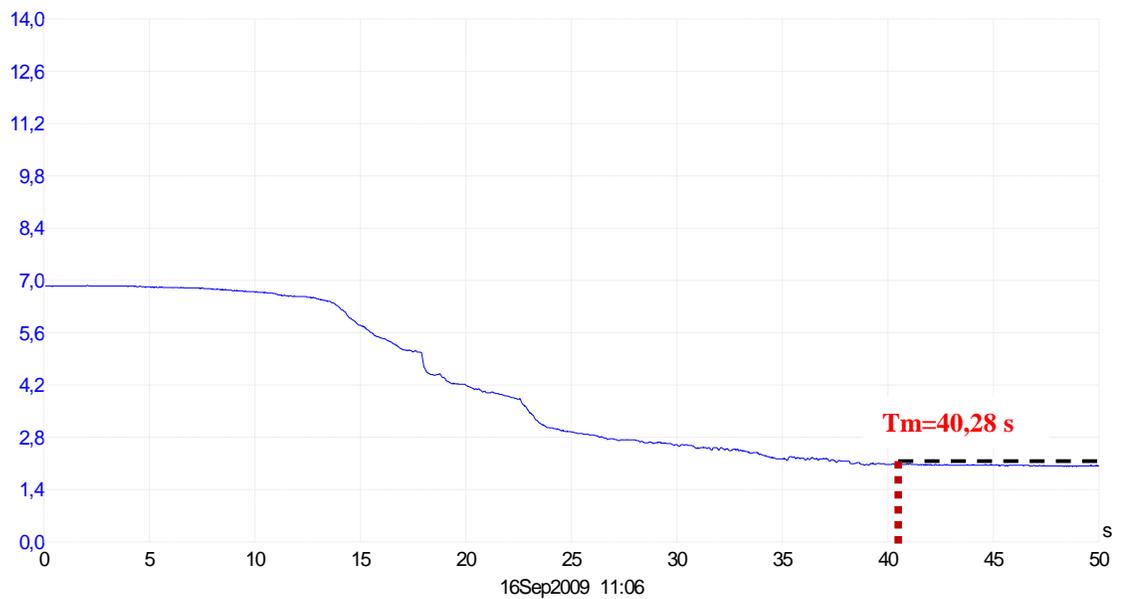


Fig. C.62. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-2, con escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

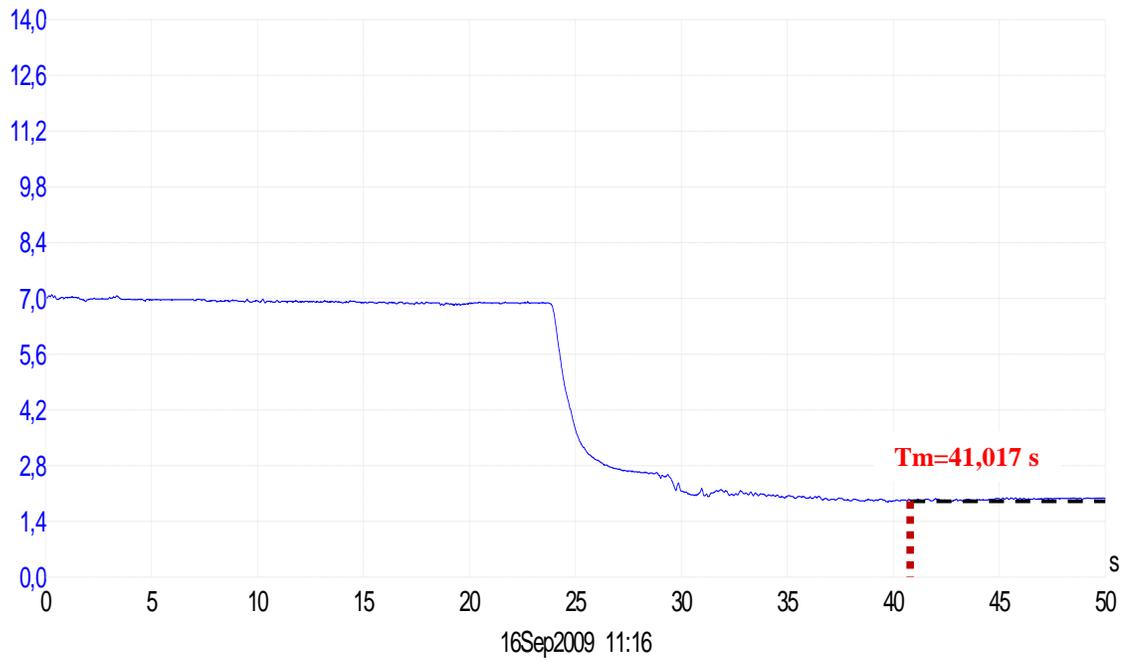


Fig. C.63. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

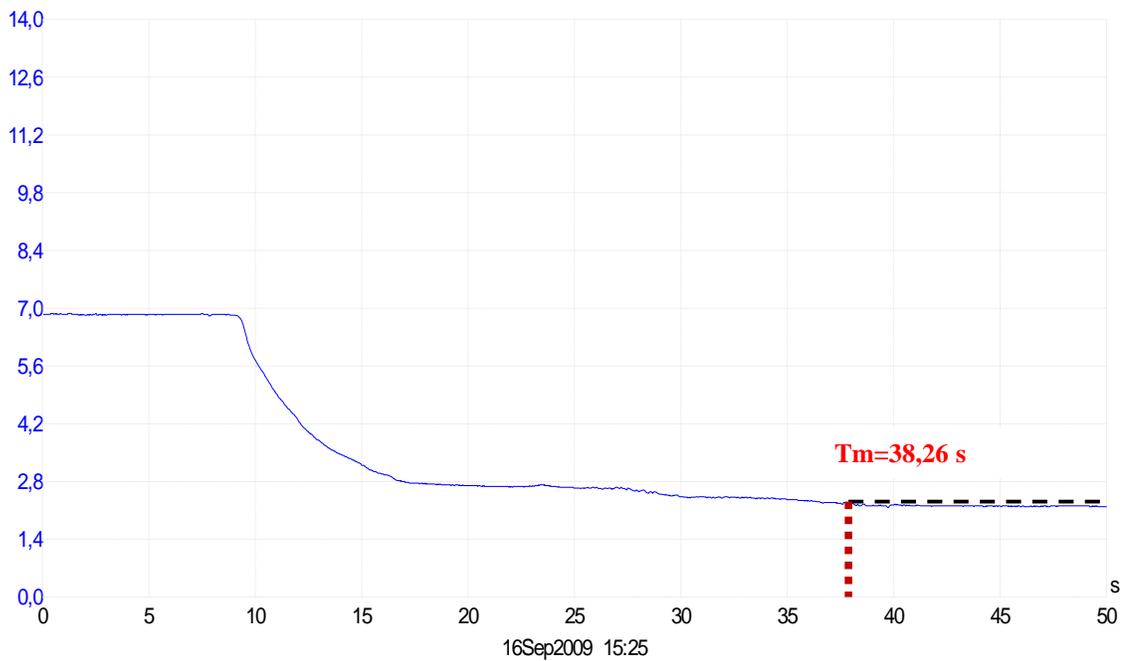


Fig. C.64. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

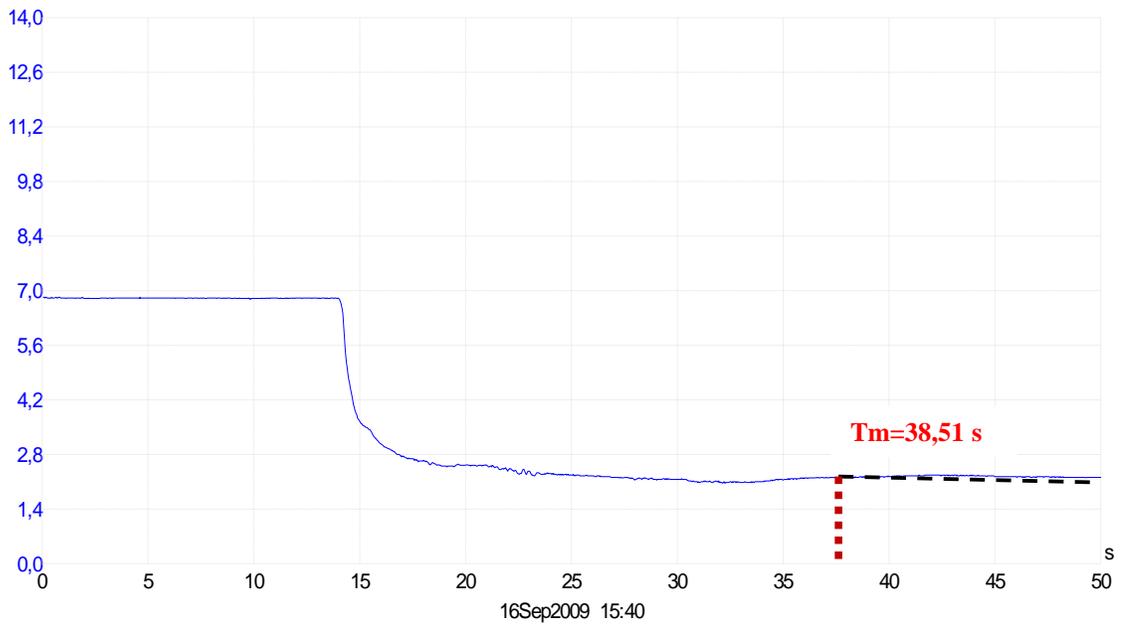


Fig. C.65. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-2, con escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

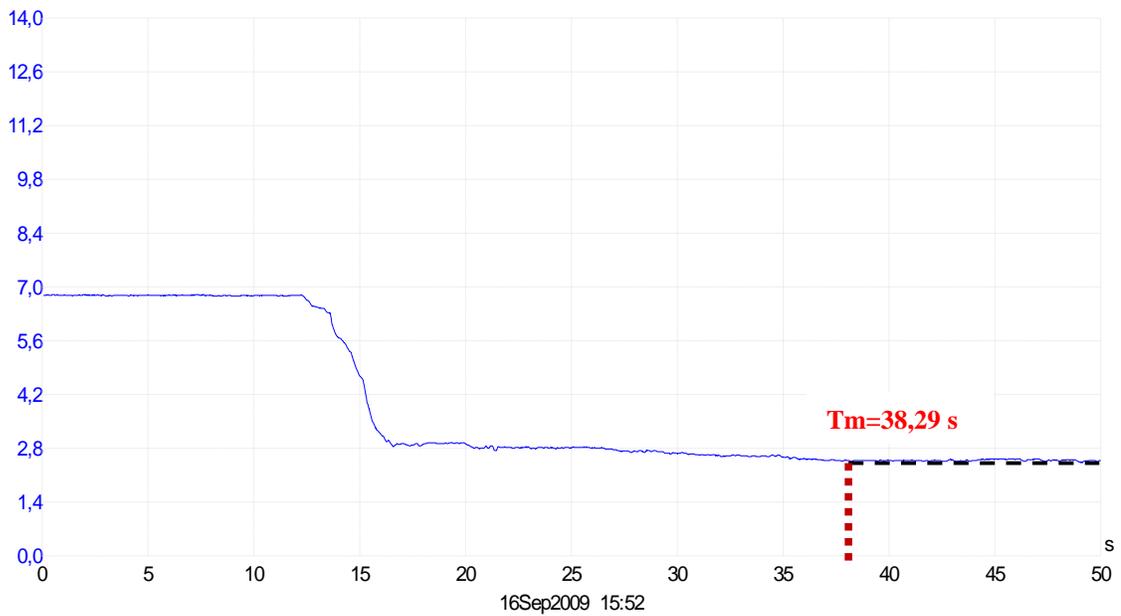


Fig. C.66. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,20m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

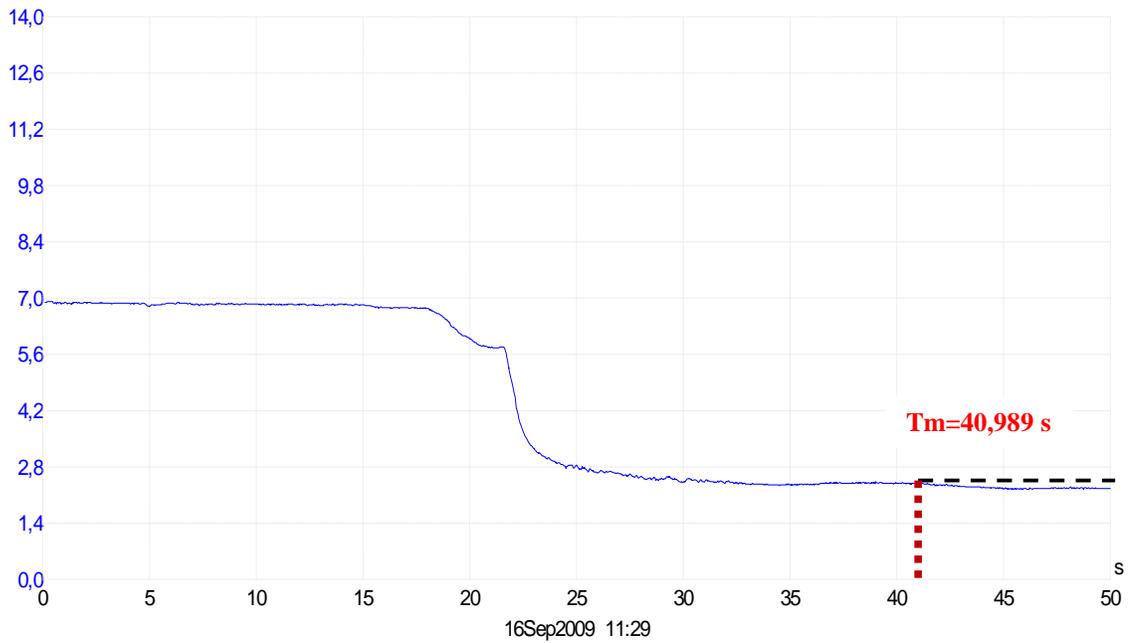


Fig. C.67. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

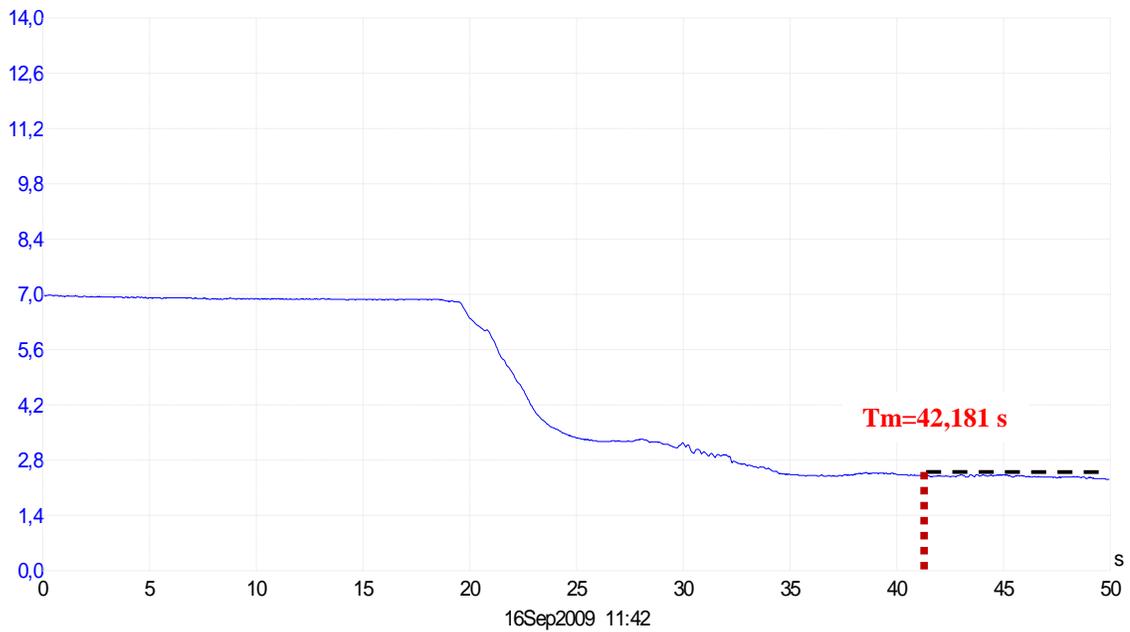


Fig. C.68. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-2, con escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

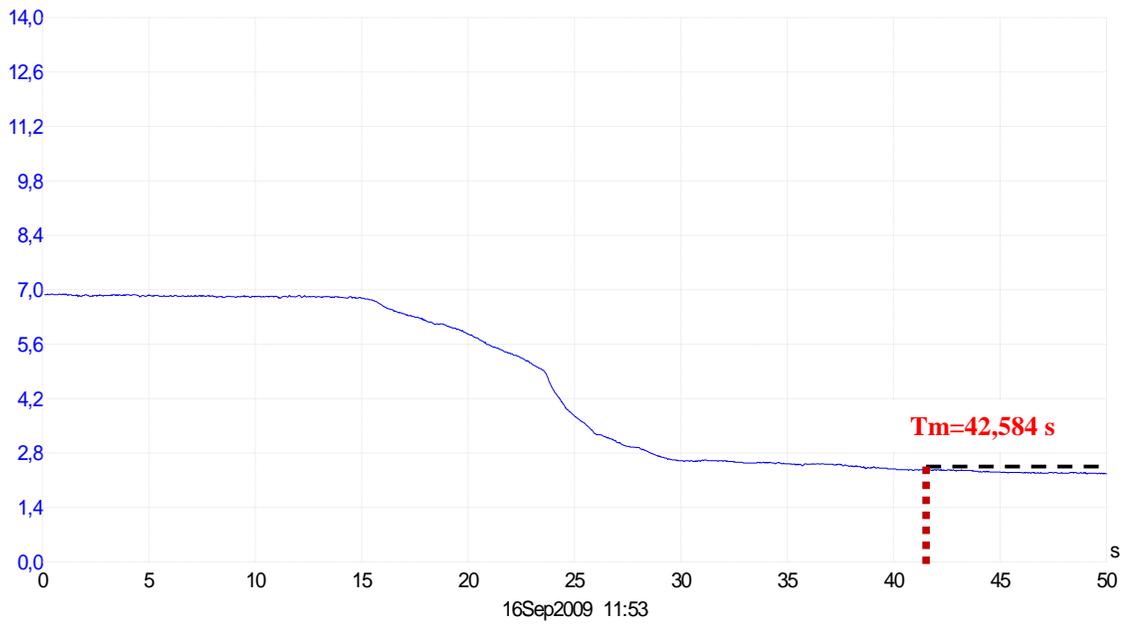


Fig. C.69. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $9,006 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a 2/3 del radio del cucharón.

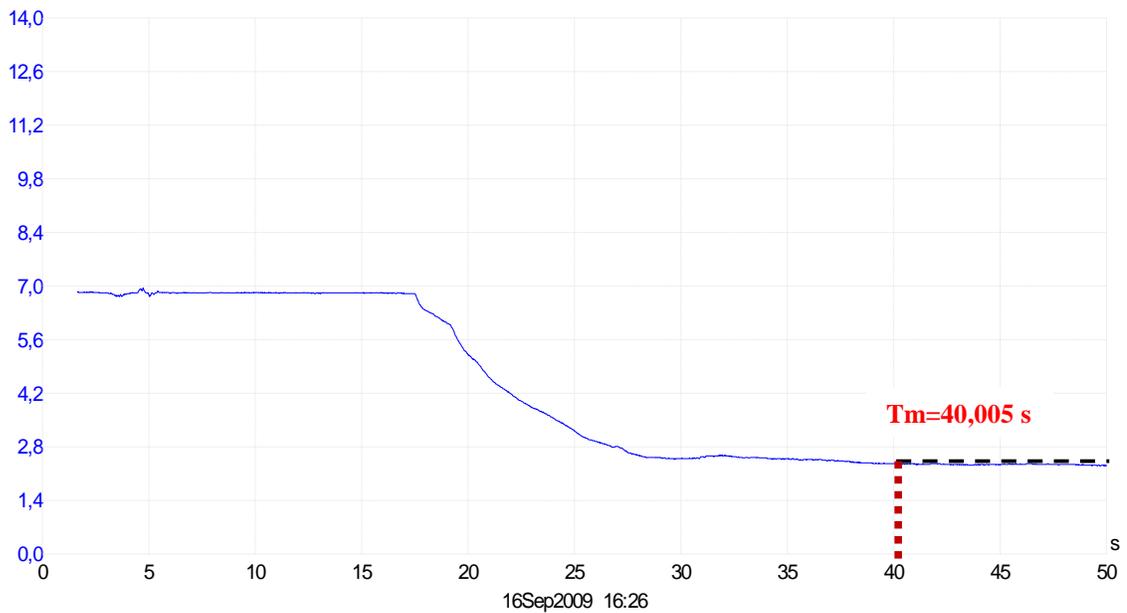


Fig. C.70. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-1, con escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a 2/3 del radio del cucharón.

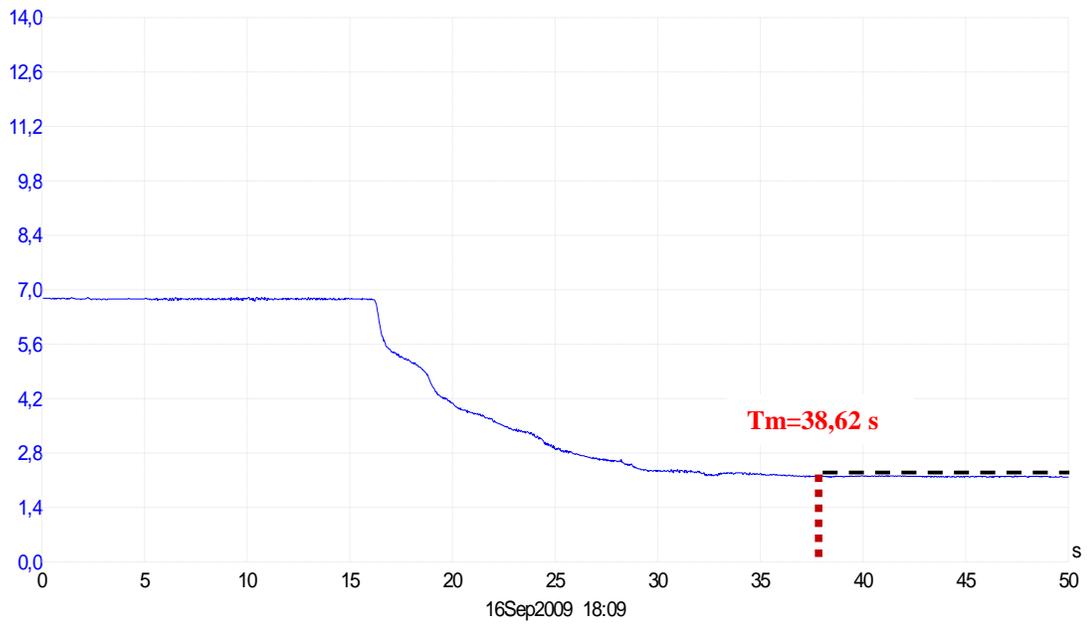


Fig. C.71. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-2, con escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

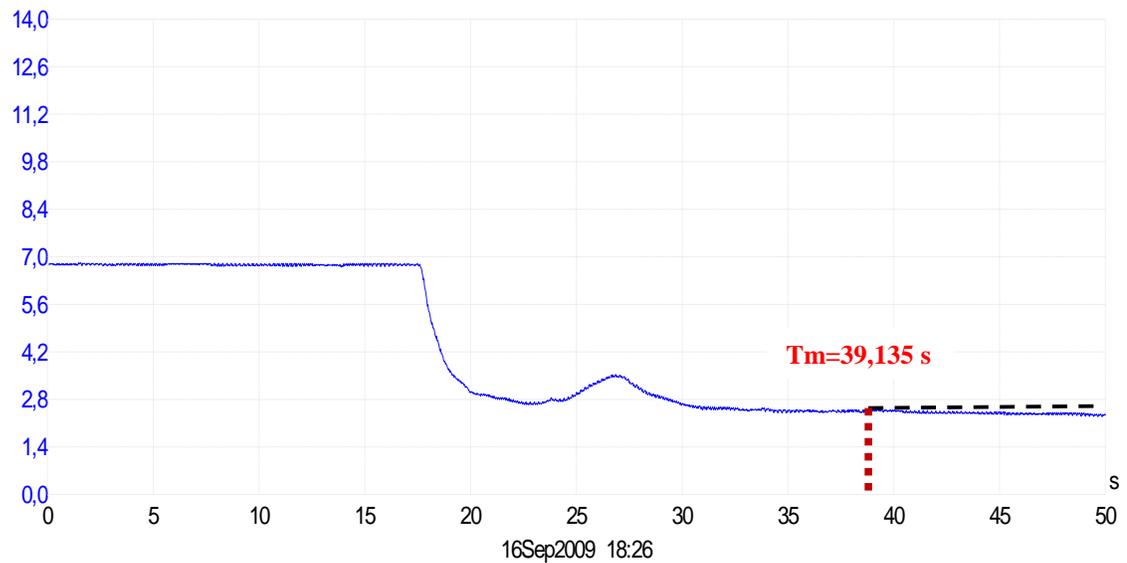


Fig. C.72. Grafico del tiempo de mezcla arrojado por el *Software PicoScope* para una altura de 0,25m-3, con escoria, con una inyección de gas de  $1,028 \cdot 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$  localizada a  $2/3$  del radio del cucharón.

## APENDICE D

### IMÁGENES DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

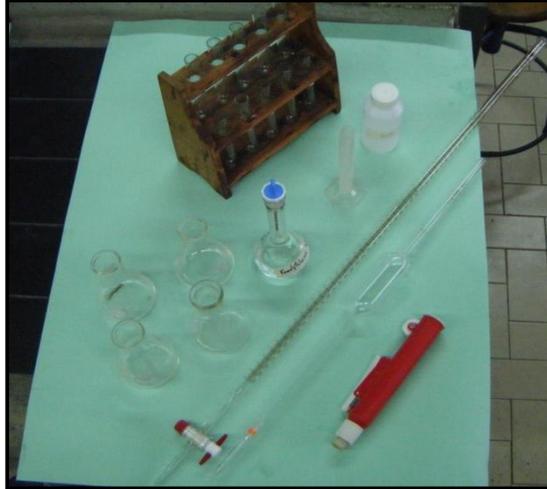


Fig. D.1. Equipos empleados para la determinación de transferencia de masa.



Fig. D.2. Montaje para la determinación de transferencia de masa.



Fig. D.3. Montaje para la determinación del Tiempo de Mezcla.

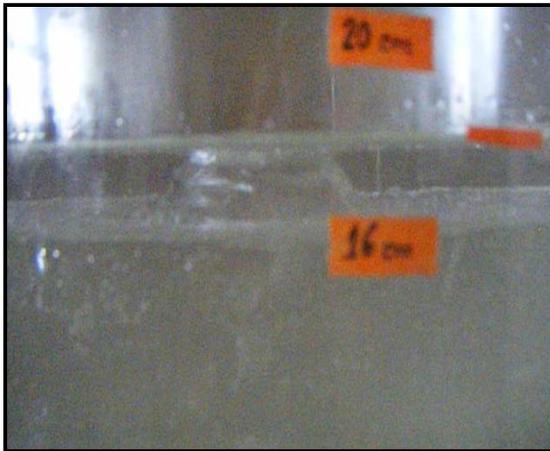


Fig. D.4. Apertura de ojo a una altura constante de 16 cm en el centro con escoria.

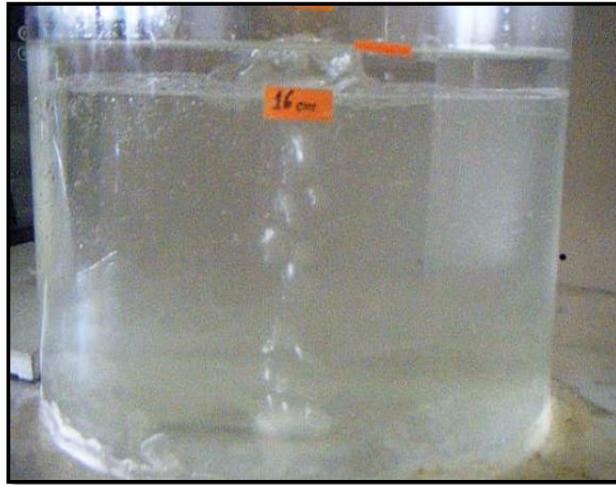


Fig. D.5. Burbujeo y Apertura de ojo a una altura constante de 16 cm en el centro con escoria.



Fig. D.6. Apertura de ojo a una altura constante de 20 cm en el centro con escoria.



Fig. D.7. Apertura de ojo a una altura constante de 20 cm en el centro con escoria.



Fig. D.8. Apertura de ojo a una altura constante de 25 cm en el centro con escoria.

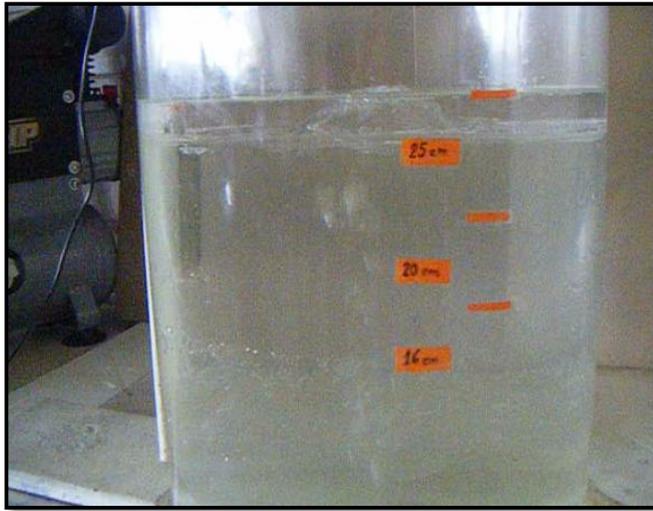


Fig. D.9. Burbujeo y Apertura de ojo a una altura constante de 25 cm en el centro con escoria.

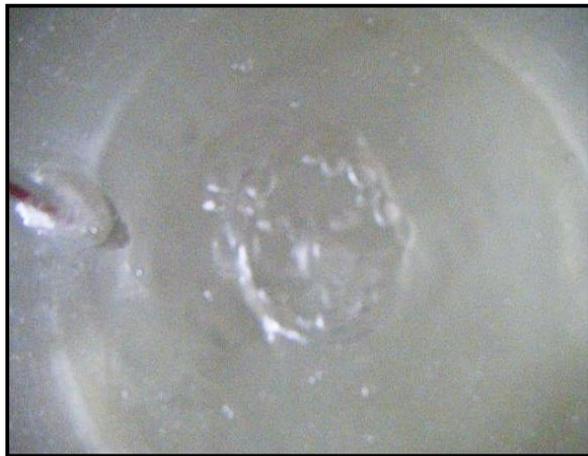


Fig. D.10. Vista superior del burbujeo en el centro con escoria.



Fig. D.11. Vista superior del burbujeo a  $2/3$  del radio con escoria.



Fig. D.12. Apertura de Ojo vista a  $2/3$  del radio con escoria.

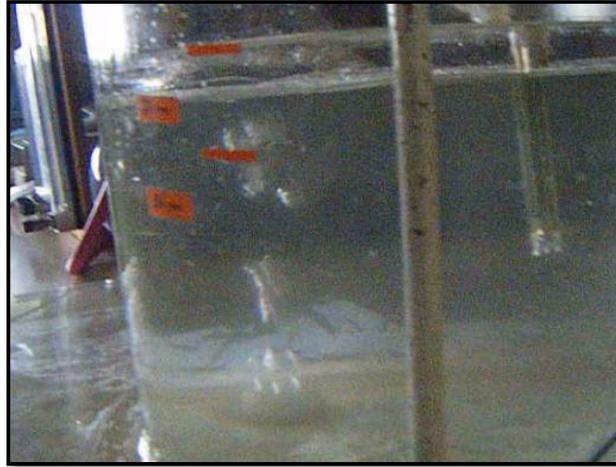


Fig. D.13. Burbujeo visto a  $2/3$  del radio con escoria.