



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS

**“ INYECCIÓN DE GASES EN PROCESOS DE
REFINACIÓN SECUNDARIA, USO DE
SUPERCONDUCTORES DE CALOR ”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
**MAESTRO EN METALURGIA Y CIENCIAS DE LOS
MATERIALES**

PRESENTA:
ROSAURA APARICIO FERNÁNDEZ

ASESOR:
Dr. GERARDO BARRERA CARDIEL

MORELIA MICHOACÁN, AGOSTO DEL 2006



INDICE

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABLAS	ix
OBJETIVOS	1
RESUMEN	2
 CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	 4
 CAPITULO II. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA.....	 8
2.1. PRODUCCIÓN DE ARRABIO.....	8
2.2. PROCESO DE ACERACIÓN.....	11
2.2.1. Proceso de Inyección con Lanza.....	13
2.2.2. Proceso de Inyección por el Fondo	15
2.3. REFINACIÓN SECUNDARIA	17
2.3.1. Antecedentes de la Refinación Secundaria	20
2.3.2. Principio de la Inyección de Gases.....	22
2.3.2.1. Inyección de Gases por Tapón	23
2.3.2.2. Inyección de Gases por Lanzas Sumergidas	25
2.4. CRITERIOS DE SIMILITUD	27
2.4.1. Grupos Adimensionales	28
2.5. ENERGÍA DE AGITACIÓN O DE MEZCLADO.....	30
2.6. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	31
2.6.1. Acelerómetro.....	32

2.6.2. Celda Fotovoltaica	34
2.7. UNIDAD SUPERCONDUCTORA DE CALOR O UNIDAD SCC.....	34
2.7.1. Termobomba.....	40
2.8. REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA).....	41
2.8.1. Entrenamiento de una RNA	42
CAPITULO III. DESARROLLO EXPERIMENTAL	46
3.1. MODELADO FÍSICO.....	46
3.2. ACELERÓMETRO Y CELDA FOTOVOLTAICA.....	47
3.3. DIGITALIZACIÓN DE SEÑALES	49
3.3.1. Medición de Vibraciones	50
3.3.2. Medición de Tiempos de Mezclado	52
3.4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	53
3.4.1. Condiciones Experimentales de la Primera Fase	57
3.4.2. Condiciones Experimentales de la Segunda Fase.....	60
3.5. SIMULACIÓN DE ESCORIAS	61
3.6. CONSTRUCCIÓN DE LA LANZA O UNIDAD SCC.....	62
CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	72
4.1. MODELADO FÍSICO.....	72
4.2. CÁLCULO DE LAS INTEGRALES PARA ENSAYOS CON LANZA	72
4.3. MODELOS MATEMÁTICOS DE ENERGÍA PARA ENSAYOS DE LANZA FIJA.....	76
4.3.1. Modelo Lineal.....	76
4.3.2. Modelo Lineal Robusto	77
4.3.3. Modelo con Redes Neuronales Artificiales (RNA)	79
4.4. MODELOS MATEMÁTICO DE ENERGÍA DE AGITACIÓN PARA ENSAYOS DE LANZA CON ÁNGULO DE INCLINACIÓN.....	83
4.4.1. Modelo Lineal	83

4.4.2. Modelo Lineal Robusto	84
4.5. ENSAYOS DE LANZA CON MOVIMIENTO DE OSCILACIÓN	84
4.6. ANÁLISIS PARA LOS TAPONES POROSOS	85
4.6.1. Modelo Lineal	85
4.6.2. Modelo Lineal Robusto	86
4.6.3. Modelo con Redes Neuronales Artificiales (RNA).	87
4.7. CÁLCULO DE TIEMPOS DE MEZCLADO	89
4.8. MODELOS MATEMÁTICOS PARA CALCULAR LOS TIEMPOS DE MEZCLADO PARA ENSAYOS CON LANZA CON MOVIMIENTO DE OSCILACIÓN	90
4.8.1. Modelo Lineal	90
4.8.2. Modelo Robusto	91
4.8.3. Modelo con Redes Neuronales Artificiales (RNA).	92
4.9. TIEMPO DE MEZCLADO PARA LOS TAPONES POROSOS	94
4.9.1. Modelo Lineal	94
4.9.2. Modelo No Lineal	94
4.10. DISCUSION DE LOS RESULTADOS DE ENERGIA DE AGITACIÓN Y LA RELACIÓN CON EL TIEMPO DE MEZCLADO	94
4.10.1 Experimentos con la Lanza	94
4.10.2 Experimentos con Tapón Poroso	101
4.11. SIMULACIÓN DE ESCORIAS	103
4.12. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN CON ESCORIAS	108
4.13. UNIDAD SUPERCONDUCTORA DE CALOR	114
4.13.1. Pruebas en Horno	114
4.13.2. Pruebas en Metal Líquido	120
4.14. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA LANZA	125
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	127
BIBLIOGRAFÍA	130

Quiero dedicar la presente a:

MIS DOS MÁS PRECIADOS TESOROS: MI MAMA Y HERMANO.

No solo por su gran ayuda económica, física y emocional sino por ser los dos pilares más importantes en mi vida. Por darme esa oportunidad de respirar, vivir, luchar y soñar a su lado. Por ser mi fuente de inspiración y motivación constante. Les doy gracias por entregarme cada parte de su ser y estar conmigo todo momento. LOS AMO DEMASIADO...

A MI PEQUEÑO Y GRAN MUNDO: MI FAMILIA FERNANDEZ.

A cada miembro de esta bonita familia, desde mis abuelos preciosos, Vicky y Roberto, a quienes siempre tendré muy dentro de mi corazón y siempre estaré agradecida. Mis tías, Laura, Vicky, Chayo, Elvi, Lui, Doris y Mary, de las que siempre estaré orgullosa. Mis tíos, Chepe, Lalo quienes me han brindado amistad y confianza, Roberto al cual admiro y añoro su presencia. Y los tíos y tías que se unieron a mi mundo y me dieron preciosos primos quienes han venido a dar luz y alegría a mi vida.

Doy gracias a la vida por darme a cada uno de ellos y a ellos por darme todo ese apoyo, cariño, energía y motivación. LOS QUIERO MUCHO...

A GERY:

Que ha entrado de una manera muy especial a mi vida. Gracias por tus sabios consejos y todo el apoyo que siempre me has brindado. Te admiro, respeto y quiero mucho Gery, GRACIAS...

A MI FLAQUIS:

No solo por el gran esfuerzo y apoyo que me brindaste durante la realización de la presente, “mi chacharitas”, sino por todo el amor, comprensión, paciencia, amistad y confianza que me has brindado. TE AMO Y GRACIAS...

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a las instituciones que hicieron posible la realización de este proyecto:

Al Instituto de Investigaciones Metalúrgicas la cual me permitió el poder desarrollarme en lo profesional y personal, en el transcurso de la maestría. A mi eterna Facultad de Ingeniería Química quien me permitió el uso de sus instalaciones. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado durante la realización de ésta.

Un profundo agradecimiento a todos los doctores que me impregnaron de sus conocimientos y apoyo para llevar a cabo mi proyecto en especial al Dr. Gerardo Barrera Cardiel quién además de haber sido un excepcional asesor y maestro fue para mi un gran amigo y compañero de trabajo al cual entrego mi profunda, sincera y eterna confianza. Gracias Gery por haberme permitido trabajar contigo esperando no te arrepientas de haber acogido a una alumna inexperta e inmadura en muchas ocasiones durante el transcurso de ésta y te agradezco tu infinita paciencia...*DE CORAZÓN MIL GRACIAS.*

Un sincero y gran agradecimiento al Lic. Moisés Mendoza por su apoyo económico en el proceso de titulación... *SIEMPRE TE ESTARÉ AGRADECIDA MOY.*

De igual manera quiero agradecer a toda mi querida familia Fernández quienes siempre me han brindado frases de aliento las cuales son mi motivación constante muy en especial a mis dos fuentes de poder, mi madre y mi Payos, los cuales siempre llevo en mi mente y corazón. Gracias por su paciencia, consejos, apoyo y amor que siempre me han brindado, y por hacer de mi vida y mundo algo maravilloso...*LOS AMO.*

Por último y sin menor importancia quiero agradecer a todas aquellas personas, amigos, que me apoyaron de infinitas maneras para la realización de este proyecto en especial a Quetza quien me brindo de esa fuerza física e interna tan inmensa del que esta hecho para apoyarme en todo momento, sin duda alguna.

A cada uno de ustedes, *¡¡MUCHAS GRACIAS!!*

Rosy A. Fernández.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Convertidor B-OBP	12
Figura 2.2	Variantes de la inyección de gases en el convertidor	12
Figura 2.3	Modelo ASEA-SKF	21
Figura 2.4	Modelo VAD.....	21
Figura 2.5	Formas sugeridas del ascenso de plumas de burbujas en una olla de refinación secundaria	23
Figura 2.6	Esquema de un tapón poroso tradicional	24
Figura 2.7	(a) Tapón poroso sólido cuadrado. (b) Tapón poroso compuesto de entreplanos tipo emparedado.....	25
Figura 2.8	Inyección con lanza en una olla de refinación secundaria.....	26
Figura 2.9	Principio de funcionamiento de una unidad SCC o Heat Pipe	36
Figura 2.10	(a) Unidad SCC sin mecha o Termobomba. (b) Unidad SCC con mecha capilar	40
Figura 2.11	Red Perceptron Multicapas.....	45
Figura 3.1	(a) Acelerómetro y unidad de suministro de energía. (b) Conexiones traseras del acelerómetro y unidad de suministro de energía	48
Figura 3.2	Celda Fotovoltaica	49
Figura 3.3	Tarjeta digitalizadora de alta velocidad tipo osciloscopio, NI PCI-5112	50
Figura 3.4	Interfase gráfica para la adquisición de la señal del acelerómetro	51
Figura 3.5	Tarjeta NI-4351 con elemento auxiliar TC-2190.....	52
Figura 3.6	Interfase gráfica de la celda fotovoltaica	53
Figura 3.7	Modelo a escala de la olla de refinación secundaria, (a) olla de acrílico, (b) nomenclatura de los tapones porosos	54

Figura 3.8	Lanza de inyección conectada al motor de pasos.....	55
Figura 3.9	Disposición del equipo experimental usado en la primera fase	55
Figura 3.10	Equipo experimental en la segunda fase de la simulación, celda fotovoltaica ..	56
Figura 3.11	Señal característica para la obtención de tiempos de mezclado.....	57
Figura 3.12	Objetos creados en el cuaderno de trabajo HiQ.....	59
Figura 3.13	Script o lenguaje de HiQ.....	60
Figura 3.14	Relación entre energía de agitación, tiempo de mezclado e intensidad de las vibraciones producidas por la inyección de un gas en un baño líquido.....	61
Figura 3.15	Lanza concéntrica	63
Figura 3.16	a) Transductor de presión OMEGA, b) Válvula SWAGELOK.....	64
Figura 3.17	Curva de calibración del sensor	65
Figura 3.18	Lanza o Unidad SCC	67
Figura 3.19	Posición de termopares para el monitoreo de la temperatura	68
Figura 3.20	(a) Tarjeta de adquisición de datos tipo NI USB-6008, b) Tarjeta de adquisición de datos tipo NI USB-9162 cRIO-9211.....	69
Figura 3.21	Panel frontal de la interfase gráfica de LabVIEW	70
Figura 3.22	Diagrama de bloques para el monitoreo de las tarjetas	70
Figura 3.23	Prueba de la lanza en horno.....	71
Figura 3.24	Prueba de la lanza en horno de inducción con aluminio líquido	71
Figura 4.1	Señal obtenida a un diámetro de 0.65 mm., volumen de 20 l., posición de 13.8 cm., profundidad de 17.5 cm., y flujo de 1 l/min.....	73
Figura 4.2	Señal obtenida a un diámetro de 0.65 mm., volumen de 20 l., posición de 13.8 cm., profundidad de 17.5 cm., y flujo de 5 l/min.....	73
Figura 4.3	Panel frontal del programa usado en el cálculo de las integrales de las señales del acelerómetro	74
Figura 4.4	Diagrama de bloques para el cálculo de las integrales de las señales.....	75
Figura 4.5	Panel frontal para el cálculo de las integrales absolutas de las señales.....	75

Figura 4.6	Diagrama de bloques para el cálculo de las integrales absolutas de las señales.	76
Figura 4.7	Modelo lineal del modelo de lanza no consumible vertical fija.....	77
Figura 4.8	Modelo robusto de la lanza en posición vertical fija	78
Figura 4.9	Secuencia para la introducción de datos en NeuroShell® 2.....	79
Figura 4.10	Definición de entradas y salidas de las variables experimentadas	80
Figura 4.11	Etapa de extracción de elementos para entrenar y de prueba de la RNA	80
Figura 4.12	Etapa de entrenamiento de la red neuronal artificial.....	81
Figura 4.13	Etapa de prueba de la red neuronal entrenada	82
Figura 4.14	Resultados por RNA para los ensayos con lanza a diámetro=0.65, posición=3.8 cm, volumen=20 litros a las diferentes profundidades y flujos	83
Figura 4.15	Modelo lineal de los tapones porosos	86
Figura 4.16	Modelo robusto de los tapones porosos.....	87
Figura 4.17	Coeficiente de correlación de la RNA para los ensayos con tapones porosos ...	88
Figura 4.18	Resultados por RNA para los ensayos con tapones porosos, volumen de 20 litros, diferentes posiciones y flujos.....	88
Figura 4.19	Señal obtenida por la celda fotovoltaica a: diámetro de 1 mm, volumen 20 l, movimiento de oscilación de 5 grados, profundidad 6.25 cm y flujo 5 l/min	89
Figura 4.20	Cálculo del tiempo de mezclado de la señal de la celda fotovoltaica.....	90
Figura 4.21	Modelo lineal para el cálculo del tiempo de mezclado para la lanza con movimiento de oscilación	91
Figura 4.22	Modelo robusto para el cálculo de tiempos de mezclado para la lanza con movimiento de oscilación	92
Figura 4.23	Coeficiente de correlación de los ensayos para los tiempos de mezclado por RNA	93

Figura 4.24	Resultados pronosticados por la RNA para los ensayos de tiempo de mezclado: diámetro de 1 mm., volumen de 20 litros, ángulos de 5, 10 y 15 grados a diferentes profundidades y flujos	93
Figura 4.25	Efecto de la profundidad de la lanza en la energía de agitación	96
Figura 4.26	Tiempo de mezclado y energía de agitación en función del flujo de aire inyectado para: diámetro 1mm, volumen 20l, movimiento de oscilación 5 grados y profundidad de la lanza 17.5 cm	96
Figura 4.27	Efecto del movimiento oscilatorio (grados) en el tiempo de mezclado y la energía de agitación a las mismas condiciones de experimentación.....	97
Figura 4.28	Influencia del movimiento de oscilación en el tiempo de mezclado; diámetro: 1 mm, volumen: 25 l y movimiento de oscilación: 5 grados a 27 ciclos/min	98
Figura 4.29	Influencia del movimiento de oscilación en el tiempo de mezclado; diámetro: 1 mm, volumen: 25 l y movimiento de oscilación: 15 grados a 16 ciclos/min	99
Figura 4.30	Relación entre la magnitud de las vibraciones y la energía de agitación en función de la profundidad y flujos de aire	100
Figura 4.31	Efecto de la profundidad de la lanza en la magnitud de las vibraciones	101
Figura 4.32	Tiempo de mezclado en una olla agitada con tapones porosos en función de: flujo de aire, volumen de 25 l y en las cuatro diferentes posiciones del tapón.....	102
Figura 4.33	Tiempos de mezclado en una olla agitada con lanza en función de: flujo de aire, diámetro: 1 mm, volumen: 25 l, profundidad lanza: 17.5cm y tapón en función de la posición	103
Figura 4.34	Tapón en la posición A (centro) (a) aceite negro, $\mu=5000$ cSt: flujo de 1l/min, (b) aceite rojo, $\mu=70$ cSt: flujo de 1l/min	104

Figura 4.35	Tapón en la posición C (a) aceite negro, $\mu=5000$ cSt: flujo de 1 l/min, (b) aceite rojo, $\mu=70$ cSt: flujo de 1 l/min	104
Figura 4.36	Lanza con movimiento oscilatorio de 10 grados a 27 ciclos/min.: (a) aceite negro, $\mu=5000$ cSt: flujo 1l/min., (b) aceite rojo, $\mu=70$ cSt: flujo 1l/min.....	105
Figura 4.37	Ejemplo de imagen capturada a los 15 segundos de iniciada la inyección, tapón en la posición A y con un flujo de aire de 1l/min.....	106
Figura 4.38	Ejemplo de cálculo del área, en píxeles, de la imagen obtenida a los 15 segundos de iniciada la inyección, tapón en la posición A y con un flujo de aire de 1l/min	106
Figura 4.39	Cálculo del diámetro de la superficie del agua de la imagen en píxeles	107
Figura 4.40	Porcentaje de áreas expuestas de los aceites al inyectarse aire a través del tapón poroso en la posición A.....	109
Figura 4.41	Porcentaje de áreas expuestas de los aceites con inyección con la lanza no-consumible con movimiento oscilatorio de 15 grados a 16 ciclos/min.....	109
Figura 4.42	Áreas expuestas considerando las diferentes posiciones de los tapones porosos cuando se simula la escoria menos viscosa, $\mu=70$ cSt	110
Figura 4.43	Comparación de áreas expuestas respecto la posición que guardan los tapones porosos en el fondo de la olla. (a) tapón en la posición A y (b) el tapón en la posición C cuando se inyecta aire con un flujo de 5 l/min	111
Figura 4.44	Áreas expuestas a los diferentes ángulos de inclinación de la lanza en aceite de $\mu=5000$ cSt	111
Figura 4.45	Diferencia en la magnitud de las áreas expuestas cuando la inyección de los gases se lleva a cabo por tapón poroso y con lanza no consumible	112
Figura 4.46	Diferencias en la magnitud del área expuesta cuando la inyección se hace con: (a) tapón poroso y (b) lanza no consumible a un flujo de 1 l/min con el aceite de $\mu=70$ cSt	112

Figura 4.47	Diferencias en la magnitud del área expuesta cuando la inyección se hace con: (a) tapón poroso y (b) lanza no consumible a un flujo de 5 l/min con el aceite $\mu=5000$ cSt	113
Figura 4.48	Presión captada a la temperatura de 350°C	115
Figura 4.49	Presión captada a la temperatura de 400°C	115
Figura 4.50	Presión captada a 600°C	116
Figura 4.51	Presión a diferentes temperaturas	117
Figura 4.52	Temperaturas de entrada y salida de agua a temperatura de 400°C.....	117
Figura 4.53	Temperatura a lo largo de la lanza a 400°C	118
Figura 4.54	Temperatura a lo largo de la lanza a 600°C	118
Figura 4.55	Temperatura a lo largo de la lanza a 700°C	119
Figura 4.56	Diagrama de fases Cu-Al	120
Figura 4.57	Presión a 5 segundos de transcurridos los experimentos.....	121
Figura 4.58	Temperaturas de la zona condensadora a los 5 segundos del experimento.....	121
Figura 4.59	Lanza a los 5 segundos del experimento.....	122
Figura 4.60	Presión obtenida a los 14 segundos del experimento	123
Figura 4.61	Temperaturas de entrada y salida a los 14 segundos del experimento	123
Figura 4.62	Presión de la lanza en experimento con aluminio líquido.....	124
Figura 4.63	Lanza con costra de aluminio solidificado	125

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.I	Propiedades físicas del agua a 20°C y del acero a 1600°C.....	30
Tabla 2.II	Fluidos de trabajo para las unidades SCC.....	37
Tabla 3.I	Especificaciones del acelerómetro de cuarzo modelo PCB-482A.....	47
Tabla 3.II	Variables experimentales de los tapones porosos con el acelerómetro	58
Tabla 3.III	Variables experimentales de la lanza con el acelerómetro	58
Tabla 3.IV	Variables experimentales de la lanza con la celda fotovoltaica	60
Tabla 3.V	Variables de la lanza en la simulación de escorias.....	62
Tabla 3.VI	Variables de los tapones porosos en la simulación de escorias	62
Tabla 3.VII	Dimensiones de la lanza.....	63
Tabla 3.VIII	Datos para la calibración del sensor	64

OBJETIVOS

Cualquiera que sea el proceso de refinación del acero, esta operación siempre trae consigo la presencia de impurezas: gases, incrustaciones y segregaciones que hacen necesario la implementación de procesos de refinación posterior, comúnmente conocidos como “Refinación Secundaria” en donde una de las operaciones básicas consiste en agitar el baño metálico por medio de la inyección de gases inertes, argón principalmente. Dos son las técnicas o métodos más usados para cumplir con dicho objetivo: lanza sumergida y tapones porosos. Haciendo un análisis de estos métodos se plantean los objetivos, particular y generales del presente trabajo, los cuales son:

Objetivo Particular:

La reintroducción de lanzas, no consumibles, para inyección de gases y polvos en operaciones de refinación secundaria del acero.

Objetivos Generales:

- I. Obtener un modelo matemático a partir del modelado físico de una lanza permanente en función de los siguientes parámetros: diámetro del orificio de la lanza, altura (de acuerdo al volumen a agitar), posición radial, inclinación y movimiento de oscilación de la lanza, así como el volumen a agitar y el flujo de aire a inyectar. Para el tapón poroso en función de las siguientes variables: volumen a agitar, posición radial del tapón y el flujo de aire a inyectar.
- II. Proponer el uso de modelos de control de inyección de gases basados en el empleo de Redes Neuronales Artificiales, mediante la medición de la energía de agitación y así determinar los tiempos de mezclado más cortos.
- III. Diseñar y construir una Unidad Superconductora de Calor (SCC) o tubo calórico, para ser usado como lanza no consumible en procesos de refinación secundaria.

RESUMEN

En las operaciones de refinación secundaria es necesaria la inyección de gases inertes al baño metálico para la generación de agitaciones tales que generen aceros más limpios, con bajos contenidos de azufre, ultra bajos contenidos de gases como nitrógeno e hidrógeno, además de mejorar tanto la homogeneización de la temperatura y composición del acero como el control de la forma de las inclusiones y flotación de éstas.

Para ello se llevan a cabo técnicas que tienen algo en común, todas de un modo u otro inyectan gases, ya sea por medio de toberas, tapones porosos o lanzas sumergidas, las cuales por sus grandes ventajas como la inyección de polvos, adición de agentes aleantes y mejor control de agitación puede ser usada no solo en esta etapa en la producción de acero, sino en otras etapas como en el horno eléctrico de inducción en donde se producen aceros inoxidables. A pesar de ello el 90% de la industria acerera usa los tapones porosos ya que una seria desventaja del uso de dichas lanzas es el consumo de éstas al entrar en contacto con las altas temperaturas del acero fundido. Por ello se presenta la propuesta de construir una lanza capaz de autoprotgerse o unidad superconductora de calor no solo para el proceso de refinación secundaria sino para los procesos en donde se lleve a cabo inyección de gases.

Para demostrar la viabilidad y competitividad de la lanza no-consumible versus tapones porosos se llevó a cabo una serie de experimentos en un modelo de olla de refinación secundaria. La simulación de la inyección de gases se llevó a cabo para probar los dos métodos: tapón poroso y lanza. Se propone como elemento de control de la inyección un acelerómetro del tipo piezoeléctrico y una celda fotovoltaica para determinar tanto las energías de agitación como los tiempos de mezclado óptimos.

Los resultados arrojados a través del modelado físico demostraron que las señales de las vibraciones captadas por el acelerómetro son proporcionales a la cantidad de energía de

agitación inducida por la inyección de los gases (energía cinética y potencial del gas) y éstas a su vez; al incrementarse de forma inversamente proporcional disminuyen los tiempos de mezclado. Se encontró que la inyección con tapón poroso conlleva menores tiempos (10 a 12 segundos) cuando el tapón se encuentra en una parte intermedia entre el centro y orilla de la olla y al incrementarse el flujo de aire inyectado, en comparación con la lanza. Sin embargo, uno de los problemas en planta es la oxidación del metal debido al área de metal líquido expuesta al aire como consecuencia de la excesiva agitación. Se simuló esta situación mediante la incorporación de aceites de diferente densidad, para simular el comportamiento de la escoria de diferentes viscosidades, concluyendo que la lanza presenta mejores resultados al disminuir de manera considerable el área expuesta de la superficie del agua al medio ambiente.

Una vez demostrada la viabilidad de la lanza se procedió a su construcción usando cobre como material del contenedor con dimensiones previamente usadas y sodio como fluido de trabajo. Una vez hecha la limpieza profunda del tubo, soldando otro tubo concéntrico a éste para poder llevar a cabo la inyección de gas (monóxido de carbono), se realizaron varias pruebas para demostrar el principio de la unidad superconductora de calor en donde, en una primera fase, se llevo a cabo la inmersión de la lanza dentro de un horno a diferentes temperaturas observando la inmediata extracción de calor por parte de la lanza y haciendo mediciones de presión dentro de la lanza y temperatura en diferentes alturas a lo largo de la misma, así como en el agua de entrada y salida de la sección condensadora se observaron las diferentes zonas de las cuales está comprendida la lanza. Posteriormente, en una segunda fase se hace una prueba con metal líquido (aluminio) en un horno de inducción donde se corrobora el buen funcionamiento de la lanza a la hora de hacer la inyección de gas.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha detectado en el mercado internacional una gran demanda de nuevos materiales que han venido a cubrir las necesidades de nuevas aplicaciones tecnológicas del hombre moderno actual. Este esfuerzo se ha manifestado en el campo de la metalurgia y en particular de la industria siderúrgica en donde los requerimientos exigidos a los aceros son cada día más estrictos que respecto a años anteriores. Esta tendencia ha llevado a explorar más allá de las capacidades de las unidades de producción del acero, ya sea por vía de la aceración neumática (BOF, OBM o CB) o por vía de los hornos eléctricos de arco y a desarrollar nuevas tecnologías en los procesos de refinación secundaria del acero.

La demanda por aceros más limpios, con bajos niveles en los contenidos de azufre y fósforo, ultra bajos contenidos de gases como nitrógeno e hidrógeno y la eliminación de inclusiones es difícil de cumplir en un convertidor de aceración neumático debido, principalmente, a la naturaleza misma del proceso e inclusive aún en el mismo horno eléctrico de arco, ya que por las nuevas tendencias de manejar escorias espumosas (escorias con altos contenidos de óxido de hierro y de óxido de calcio) es más difícil de alcanzar niveles bajos de azufre, cuando se parte de niveles altos de azufre. Para poder alcanzar estos contenidos bajos de azufre se hace necesario cambiar la naturaleza oxidante del baño y la escoria a condiciones reductoras, es decir, libres de oxígeno.

En el caso de la homogeneización del acero, tanto en la composición como en la temperatura, una de las técnicas más empleadas para este propósito, hace necesaria la inyección de gases inertes, principalmente argón, en el seno del baño metálico. Esto es difícil de hacer en los

hornos de aceración. Dos principios son fundamentales para esta aseveración, el primero de ellos es de índole económica, ya que implicaría disminuir el número de coladas por unidad de tiempo, al permanecer más tiempo el metal en el horno se abate la temperatura del mismo, hay mayor generación de impurezas por desgaste del refractario del convertidor, mayores volúmenes de escoria a manejar, etc. Para resolver estos problemas el productor de acero ha introducido una etapa más en la ruta de producción de aceros: la *refinación secundaria*.

Las operaciones de refinación secundaria se hacen, por lo general, en las ollas de transferencia del acero, fase a la que se conoce como *procesos de metalurgia de olla*. En estas operaciones se lleva a cabo la inyección de gases inertes al seno del baño metálico ya sea por medio de toberas, tapones porosos (que son usados hasta en un 90% a nivel industrial) o lanzas sumergidas las cuales tienen muchas ventajas entre ellas la adición de polvos. Sin embargo, el inconveniente de dicha lanzas es el alto consumo de éstas debido a que se consumen al entrar en contacto con las altas temperaturas del acero líquido.

El inconveniente de las lanzas sumergibles y consumibles puede ser resuelto usando una unidad superconductora de calor o Heat Pipe. El principio de operación de éstas es la extraordinaria capacidad de transporte de calor de un punto a otro con casi ninguna pérdida, aunque el gradiente de temperatura sea muy pequeño. Estas unidades constan de tres componentes principalmente: contenedor, fluido de trabajo y una mecha capilar o por medio de gravedad asistida. El uso de éste principio permitirá la construcción de una lanza capaz de autoprotegerse y mostrar la competitividad de este método de inyección y además introducir este nuevo dispositivo para su uso industrial.

Para demostrar la viabilidad y competitividad de la lanza no-consumible, en operaciones de inyección de gases contra la técnica de mayor uso actualmente en este campo, los tapones porosos, se debe hacer un análisis de las variables que más influyen en éste tipo de operaciones en la olla de refinación, por ejemplo, para así poder determinar y observar la factibilidad de ambos métodos de inyección. Sin embargo, la observación y visualización de los flujos que se llevan a cabo en la olla de refinación secundaria real o en planta piloto es

extremadamente difícil, principalmente, debido a las altas temperaturas involucradas. El modelado físico es un método comúnmente usado para la caracterización del comportamiento del flujo en ollas de refinación secundaria, convertidores, distribuidores de colada continua, etc. En el modelado físico el agua es usada para simular el comportamiento del acero líquido, ya que es relativamente barato y un camino conveniente para lograr conocer el comportamiento del flujo del acero líquido.

En el modelado físico de una olla de refinación secundaria es importante observar las condiciones necesarias en la agitación del baño (energías de agitación) para obtener tiempo de homogeneización o tiempos de mezclado menores. Esto, nos lleva a la búsqueda de una forma de medir capacidad de agitación y tiempos de mezclado, es decir, encontrar sensores capaces de medir en el proceso industrial, en tiempo real, la eficiencia de los gases a inyectar y optimizar su uso.

Una técnica que luce promisoría en este campo, es el uso del análisis de las vibraciones producidas en la olla, por efecto de la inyección de gases. Esta técnica, ha sido ya experimentada por algunos investigadores pero no ha sido completamente comprendida ni estudiada. En 1984 Frank Mucciardi y Gerardo Barrera^[16], demostraron que el acelerómetro puede ser usado en convertidores de aceración al oxígeno. Sus resultados sugieren fuertemente que el acelerómetro puede ser usado como un medio de medir en forma continua y en tiempo real, la energía de homogeneización o de mezclado inducida a un sistema donde haya evolución o inyección de gases, como de los convertidores de aceración y de las unidades de refinación secundaria.

Otra de las variables importantes a manejar en una olla de refinación secundaria es el tiempo de mezclado ya sea para homogenizar temperatura y/o composición. Para medir el efecto de esta variable en el modelo físico se utilizó una celda fotovoltaica. Éste tipo de transductores son capaces de generar una señal de voltaje proporcional a la luminosidad del medio o de una fuente lumínica.

Los transductores usados generan una señal analógica por lo que es muy difícil registrar y mucho menos guardar evidencia de los eventos medidos. Para ello se hace necesario digitalizar las señales. Para llevar a cabo esta operación se tiene que utilizar unidades de adquisición de datos (DAQ) o convertidores de señales de analógico a digital. Para el acelerómetro, dado que se trata de un sensor que capta vibraciones y que, por lo tanto, requiere de ser muestreada a altas velocidades se usó una tarjeta digitalizadora de alta velocidad tipo osciloscopio. Para esta fase experimental también se utilizó el paquete de desarrollo LabVIEW™, bajo ambiente de instrumentación virtual y programación gráfica. Por lo que toca a la celda fotovoltaica ésta es conectada a una tarjeta de adquisición tipo NI-4351 con un elemento auxiliar tipo TC-2190 usando una interfase grafica creada en VirtualBench-Logger.

CAPITULO II

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El proceso de "aceración" del hierro, se dice, surgió por la necesidad de contar con un material tan fuerte como el bronce. Antes de la revolución industrial, el acero era un material caro que se producía en escala reducida para fabricar armas, principalmente. Los componentes estructurales de máquinas, puentes y edificios eran de hierro forjado o fundiciones. Actualmente, existen dos métodos para la producción de acero. El método "convencional" el cual involucra el uso de Altos Hornos y Convertidores Básicos de Oxígeno. El método "no-convencional" que consta de reactores de reducción directa y hornos eléctricos de arco.

2.1. PRODUCCIÓN DE ARRABIO.

En la ruta convencional se obtiene hierro (Fe) en el Alto Horno, un reactor alto cilíndrico, cargado inicialmente con: mineral de hierro (Fe_2O_3), coque (carbón destilado), caliza y dolomita. Estos son introducidos por la parte superior del horno, además se inyecta aire por medio de toberas el cual reacciona con el coque para producir CO y calor. Los óxidos de hierro reaccionan con el CO reduciendo así el mineral de hierro a arrabio (Fe + impurezas). Debido a las altas temperaturas dentro del horno, el hierro fundido se encuentra saturado con carbón (4 – 4.5% de carbón). Además, se forma una escoria producto de las impurezas de la carga y que debido a su baja densidad flota sobre la superficie del arrabio líquido ^[1].

Los otros elementos principales constituyentes del arrabio son: el manganeso, silicio, fósforo y azufre. En su mayor parte, proceden de la ganga de los minerales, excepto el azufre que es aportado principalmente por el coque.

El *manganeso* se encuentra, aunque en proporciones pequeñas, en casi todos los minerales de hierro, en general, formando con el silicio un silicato de manganeso, difícil de reducir, que se queda en la escoria en sus dos terceras partes. La tercera parte restante se incorpora al arrabio. La presencia de manganeso no es en realidad perjudicial, e incluso se añade algunas veces a las cargas como óxido de manganeso para facilitar la desulfuración del arrabio.

El *silicio*, en forma de silicato, se encuentra en gran cantidad en el lecho de fusión. Como la sílice es muy fácil de reducir por debajo de 1500°C, pasa, en su mayor parte a la escoria, quedando una pequeña parte en el arrabio que puede llegar hasta un 1 % en marcha fría y de un 3 a un 4% en marcha caliente. El silicio favorece la formación de fundiciones grises, pues provoca la precipitación del carbono en forma de grafito.

El *fósforo* es aportado, principalmente, por las cenizas de coque y por la ganga, en forma de fosfato que reaccionando con la sílice deja libre el pentóxido de fósforo^[2]:



El pentóxido de fósforo es reducido por el carbono:



Y el fósforo pasa en su mayor parte al hierro en forma de fosfuro férrico, según la reacción:



El problema, por tanto, no está en la reducción de los fosfatos, ni del pentóxido de fósforo, sino de eliminar el fósforo que ha pasado al hierro como consecuencia de las anteriores reducciones. Para lograr esto hace falta un proceso oxidante, y una escoria básica de cal y dado que el alto horno funciona en una marcha esencialmente reductora, entonces prácticamente todo el fósforo pasa al arrabio.

El fósforo baja el punto de fusión del arrabio y aumenta su fluidez, pero las inclusiones del fósforo en el arrabio en forma de fosfuros de hierro aumentan mucho su fragilidad.

El azufre, es introducido en el alto horno en un gran porcentaje a través del coque, en forma de sulfuro o de sulfato, y debido a que éste es un elemento muy perjudicial, no es conveniente que pase de 0.15% su contenido final en el arrabio. Los minerales de hierro, por lo general, no contienen azufre, o lo contienen en muy pequeñas cantidades. Parte del azufre (del 5 al 10 %) se elimina a medida que desciende la carga por oxidación en forma de anhídrido sulfuroso (SO_2) con los gases de alto horno.

Pero la mayor parte del azufre reacciona con el hierro formando sulfuro ferroso (FeS) muy soluble en el arrabio, por lo que es preciso eliminarlo. Esto se puede hacer a través del uso de la cal y el manganeso.

Con la cal, a través de la reacción:



Como el sulfuro de calcio formado es insoluble en el arrabio, se queda en la escoria. Además, como el óxido ferroso (FeO) se reduce por el carbón, queda roto el equilibrio de la reacción, desplazándose a la derecha y favoreciendo, por tanto, el proceso de desulfuración.

El inconveniente de este procedimiento es que la reacción citada es muy lenta. Se acelera aumentando la cantidad de escoria, su fluidez y su basicidad, o sea que una buena desulfuración se obtendrá con escoria abundante, rica en CaO , y operando a temperaturas elevadas. A medida que aumenta la basicidad de la escoria aumenta el poder desulfurante de la escoria, por lo que la desulfuración por la cal exige un gran consumo de combustible.

Como se ha mencionado, todas las impurezas se eliminan por oxidación, excepto el azufre, que se elimina por reducción. Por eso el Alto Horno, que funciona en marcha esencialmente reductora, da un arrabio con muchas impurezas, excepto en contenido de azufre, que es relativamente pequeño.

2.2. PROCESO DE ACERACIÓN.

Fundamentalmente, el proceso para obtener acero, a partir del arrabio, se desarrolla en dos fases, una de oxidación, en la que se elimina el exceso de carbono, el silicio, el manganeso y el fósforo por la acción combinada de cal. Esta oxidación se realiza utilizando oxígeno puro que se inyecta, y en menor proporción el oxígeno del óxido del hierro de la chatarra y mineral de hierro en los llamados “convertidores”. La otra fase es la de reducción, en la que se elimina el azufre, y se reduce parte del óxido de hierro formado en la fase de oxidación.

El primer paso para lograr la transformación masiva del arrabio en acero lo dio el inglés Henry Bessemer en 1856. La idea de Bessemer era simple: eliminar las impurezas del arrabio líquido y reducir su contenido de carbono mediante la inyección de aire en un "convertidor" con revestimiento refractario ácido, generalmente constituido por sílice y el cual se utilizaba para la refinación de arrabios pobres en fósforo y en azufre y en donde el principal elemento termógeno es el silicio. Sin embargo quién dio origen al actual convertidor moderno fue Sir Sydney Gilchrist Thomas quien lo introdujo en el año de 1878, éste es un convertidor de revestimiento refractario básico, generalmente de dolomita (carbonato cálcico y magnesio), el cual se utiliza para arrabios fosforosos pobres en sílice y que tomaba como elemento termógeno el fósforo.

En la actualidad los convertidores de arrabio en acero ya no son como los de Bessemer o Thomas. Estos son recipientes de chapa de acero, de forma especial que recuerda a una pera, revestido interiormente por refractario y con su fondo perforado para permitir la entrada de aire, siendo en muchos modelos este fondo reemplazable, pues es la parte que más se desgasta, Figura 2.1. El convertidor puede girar alrededor de un eje situado, aproximadamente, en su centro de gravedad para cargar el arrabio y descargar el acero fundido, cerrándose automáticamente la entrada de aire en cuanto deja de estar vertical, que es la posición de trabajo. ^[2]

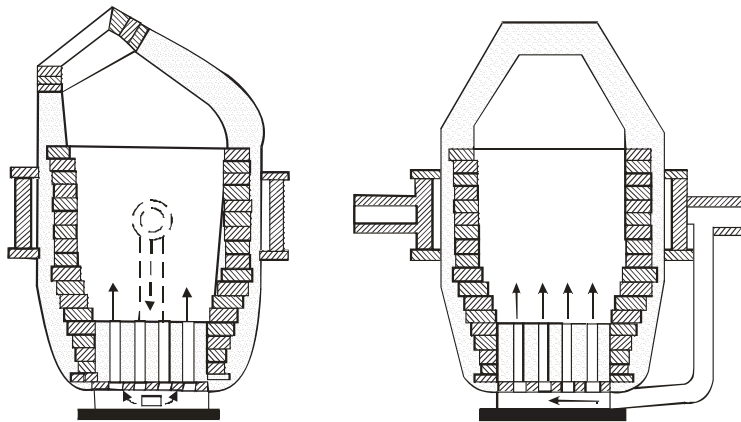


Figura 2.1. Convertidor B-OBP.

Hay principalmente tres variaciones de la inyección de gas oxígeno dentro del baño metálico, como se muestra en la Figura 2.2., inyección con lanza, inyección por el fondo e inyección combinada.

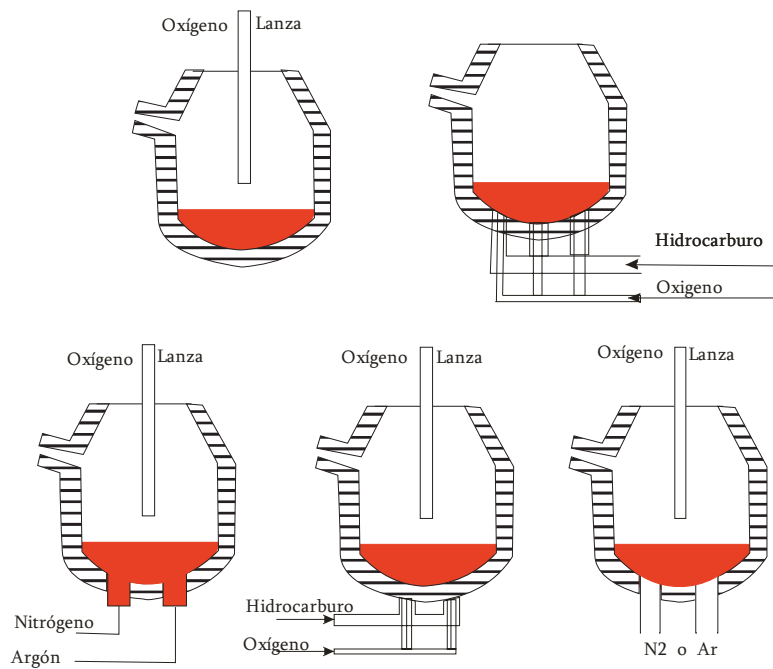


Figura 2.2. Variantes en la inyección de gases en el convertidor.

2.2.1. Proceso de Inyección con Lanza.

El proceso L.D. (Linz y Donawitz) o BOF (Basic Oxygen Furnace) transforma la carga de arrabio líquido, en su mayor parte, en acero, insuflando oxígeno sobre su masa por medio de una lanza refrigerada por agua.

Se utilizan para este proceso convertidores similares a los Thomas, pero con una piquera para la colada que facilita la separación de la escoria. Su revestimiento refractario básico permanente está formado por ladrillos tipo magnesítico, sobre los que se extiende el revestimiento de desgaste o trabajo, formado por bloques de dolomita aglomerada con alquitrán.

La lanza utilizada para la inyección del oxígeno está formada por tres tubos de acero concéntricos, con una cabeza de cobre electrolítico tipo Venturi. Está refrigerada con agua, que circula entre los tubos exteriores. El oxígeno utilizado tiene que ser de una pureza mínima de 99.5% y es inyectado a una presión de 8 a 12 atmósferas y un caudal de 60 a 150 m³/minuto, según el tamaño del convertidor.

Una vez que el oxígeno entra en contacto con el metal caliente tienen lugar oxidaciones y reducciones similares a las que se producen en cualquier otro convertidor de inyección al oxígeno, independientemente del lugar donde se encuentre la fuente de inyección: en la parte superior, en el fondo, lateral o una configuración combinada^[3].

El silicio se oxida totalmente a los tres o cuatro minutos de iniciarse el soplado, formándose una escoria de silicato de hierro y manganeso que flota en el baño. El manganeso también se oxida al principio muy rápidamente, pero su combustión se debilita a medida que se descarbura el hierro. Al final de la operación, como ocurría con los convertidores Thomas, se produce un retorno del que contienen las escorias al baño. El carbono se quema también desde el principio, aumentando la rapidez de su combustión en cuanto se han oxidado el silicio y el manganeso. El desprendimiento del CO formado produce una gran agitación del baño, que cesa bruscamente al final de la descarburación, a diferencia de lo que ocurre en los

convertidores clásicos, en los que la agitación persiste mientras dura el soplado 0.5%, y se elimina por oxidación a medida que se forma la escoria.

Esta desfosforización se realiza en las mejores condiciones con una escoria muy básica, el índice CaO/SiO_2 de 2.8 a 3, conteniendo alrededor de un 28% de cal libre. El azufre se reduce en forma de sulfuro de calcio, pero en pequeña proporción. Es por esto que es recomendable, para obtener contenidos de azufre en el acero inferiores a 0.02% que debe desulfurarse el arrabio a la salida del alto horno, por cualquiera de los métodos que existen.

El nitrógeno que queda en el acero es insignificante, de 0.002 a 0.003%. Esto se debe a la ausencia de nitrógeno en el gas insuflado y al arrastre del que contiene el metal, por el CO. La calidad de estos aceros es superior a los de Bessemer o Thomas, también el costo del afino es mucho más económico. Su capacidad ha ido en aumento, de dos toneladas que tenían los primeros, hasta las más de trescientas toneladas que tienen los mayores que se utilizan hoy. Cabe también destacar que en la actualidad, por medio de este proceso, se produce más del 70% del acero a nivel mundial ^[2]

La configuración más utilizada es en la que la inyección del oxígeno se hace por la boca del convertidor, de ahí el nombre que lleva: convertidor BOF, por sus siglas en Ingles (Basic Oxygen Furnace), siendo éste oxígeno introducido por medio de una lanza refrigerada con agua.

Una carga típica de un convertidor de este tipo sería la siguiente:

- ↳ Arrabio, (metal caliente).
- ↳ Chatarra, (normalmente fría).
- ↳ Fundentes, (cal, dolomita, fluoruro de calcio).
- ↳ Escorias de retorno, (acondicionadores de la escoria).

Las cantidades que se deban de adicionar de cada uno de estos materiales al convertidor, dependerán de la práctica en especial y tipo de acero que se elabore en cada planta, pero principalmente de acuerdo a la composición química del arrabio. Algunos otros factores que

afectan las cantidades de estos materiales son, por ejemplo, grado del acero que va a ser producido, capacidad del convertidor, composición, costo y disponibilidad de chatarra, etc.

Una vez que se han cargado las principales materias primas, arrabio y chatarra, la lanza es bajada dentro del convertidor hasta una altura preestablecida (p.e. de 2.5 a 2.3 metros sobre el nivel del baño metálico) y se inicia el soplo o inyección de oxígeno. Se hacen adiciones de cal (CaO) durante el desarrollo del soplo para contrarrestar la acidez de la escoria, la cual es producida por la oxidación del silicio (de $[\text{Si}]$ a $\{\text{SiO}_2\}$), durante los primeros 3 a 4 minutos de iniciado el soplo. Se continúa adicionando cal, durante casi todo el soplo para asegurar una escoria muy básica. Esta escoria básica facilita la transferencia, principalmente, del azufre y el fósforo del arrabio.

Para la simplicidad del proceso se puede dividir el ciclo de soplo en tres etapas. Esta división es independiente de la duración de cada una de éstas, ya que dependen de muchos factores, tales como: grado de acero a elaborar, composición del arrabio, carbón residual deseado, azufre residual, etc.

El propósito general de este proceso es el de reducir el carbón de 4% a, por lo general, menos de 0.2%, reducir o controlar el azufre y fósforo, y finalmente, el aumento de la temperatura del acero líquido a aproximadamente 1635°C , en promedio. Las altas temperaturas del hierro líquido y la intensidad con la que el jet de oxígeno agita contribuyen a la rápida oxidación de los elementos antes mencionados. El silicio, manganeso, fierro y fósforo forman óxidos, los cuales crean la escoria.^[4]

2.2.2. Proceso de Inyección por el Fondo.

En los convertidores Q-BOP (Q-Bottom Oxygen Process, donde Q = Quick, Quit and Quality) ú OBM (Oxygen Bottom Maximiliaschutte) la inyección de oxígeno se lleva a cabo por el fondo del convertidor por medio de toberas que están instaladas en el fondo del mismo. Cada tobera consiste de dos tubos concéntricos por donde pasa el oxígeno a través del centro del

tubo y un hidrocarburo como refrigerante pasando entre los mismos. El refrigerante es usualmente metano (gas natural) o propano.

En la inyección por el fondo, todo el oxígeno es introducido por el fondo, y pasa a través del baño y la escoria creando una agitación vigorosa y formando una emulsión de escoria. La misma técnica es usada en este tipo de convertidor como en la empleada en los convertidores de inyección por lanza, en donde la carga típica es: arrabio, fundentes, pelets, hierro esponja o mineral de hierro.

El carbón y el silicio son eliminados de una manera muy similar, tanto la inyección de oxígeno por lanza como en la inyección por toberas en el fondo del convertidor pero tienen algunas diferencias en la eliminación de los demás elementos. Debido a que en este proceso se utiliza como gas refrigerante de las toberas un hidrocarburo, su descomposición da lugar a que este elemento sea una fuente de suministro de hidrógeno al acero líquido. El contenido de hidrógeno en las burbujas de gas ascienden a través del baño metálico, durante todo el tiempo que los potenciales de hidrógeno son altos. Mientras haya evolución de CO, el hidrógeno podrá ser eliminado efectivamente del baño. También es posible controlar la concentración final de este elemento mediante la inyección de argón durante el basculado del convertidor al final de la operación de inyección de oxígeno.^[3]

La otra variante de la inyección de oxígeno es por medio de una inyección combinada que se caracteriza por la inyección de oxígeno tanto por la lanza como por el fondo del convertidor.^[4]

Las reacciones metalúrgicas y el comportamiento de éstas en la práctica, ocurre casi de la misma manera que en el proceso de inyección por lanza, teniendo además las siguientes ventajas:

- ↳ No existe sobre oxidación del baño metálico.
- ↳ Virtualmente desaparece toda tendencia de derrames.

- ⇒ Hay una mejor reacción metal-escoria, por lo tanto, hay una más eficiente eliminación de azufre y fósforo.

2.3. REFINACIÓN SECUNDARIA.

En la última década se ha incrementado la demanda por aceros más limpios, con bajos niveles en los contenidos de azufre, bajos contenidos de gases, etc. Esto ha hecho que la industria del acero se haya visto en la necesidad de introducir nuevos esquemas o filosofías de operación, ya que ahora se requiere tener un control más estricto no solo de la temperatura y de la composición del acero, sino que requiere además de eliminar, hasta los niveles mas bajos posibles el contenido de las inclusiones y, de las que se quedan en el baño y que no pueden ser flotadas o modificarles la forma. Además, requiere de cuidar el contenido de gases indeseables para que éste sea lo más bajo posible y evitar así la formación de compuestos perjudiciales para el acero o imperfecciones posteriores en el acero solidificado. Por ejemplo, si deseamos eliminar la mayor cantidad de azufre del acero es necesario cumplir con las siguientes condiciones: alta temperatura del metal líquido, alto índice de basicidad de la escoria y condiciones altamente reductoras en el horno.

Es obvio que en un convertidor de aceración neumático es difícil cumplir con éste último requisito, debido principalmente a la naturaleza misma del proceso e inclusive aún en el mismo horno eléctrico de arco ya que por las nuevas tendencias de manejar escorias espumosas (escorias con altos contenidos de óxido de hierro y de óxido de calcio) es más difícil alcanzar niveles de azufre bajos, cuando se parte de niveles de azufre altos. Para poder alcanzar estos bajos contenidos de azufre se hace necesario cambiar la naturaleza oxidante del baño y la escoria a condiciones reductoras, es decir, libres de oxígeno.

Ahora bien, respecto a la homogeneización del acero, tanto en la composición como en la temperatura, en una de las técnicas empleadas para este propósito, se hace necesario hacer inyección de gases inertes, argón principalmente, en el seno del baño metálico. Esto es difícil de hacer en los hornos de aceración. Dos principios son fundamentales para ésta aseveración,

el primero de ellos es de índole económica, ya que implicaría disminuir el número de coladas por unidad de tiempo, al permanecer más tiempo el metal en el horno. La segunda razón es de índole metalúrgica ya que al permanecer más tiempo el metal en el horno se abate la temperatura del mismo, hay menor generación de impurezas por desgaste del refractario del convertidor, mayores volúmenes de escoria a manejar, etc.

Por lo tanto, la compleja tarea de ajustar la composición, temperatura y limpieza del acero ha llevado a la industria del acero a salir con un nuevo proceso o etapa, a la cuál se le conoce en la actualidad como refinación secundaria del acero^[5].

Durante el tratamiento de metalurgia secundaria, toman lugar varias reacciones fisicoquímicas. Algunas de ellas incluyen la remoción de hidrógeno y nitrógeno, desulfuración, desoxidación, modificación de la morfología de óxidos y remoción de inclusiones no metálicas. Las inclusiones tienen un efecto desfavorable en la calidad del acero y para remover la mayor cantidad posible de inclusiones del acero líquido, que es uno de los objetivos principales de la producción del acero, se han desarrollado muchos métodos para removerlas^[6]. Otros factores que afectan la calidad del acero, son los procesos de reoxidación del acero.

Las ventajas económicas de la metalurgia secundaria son, entre otras:

- i. Ahorro de materias primas, tales como elementos aleantes debido a su más alto rendimiento.
- ii. Ahorro de energía.
- iii. Incremento de la producción, puesto que la unidad de fusión primaria es liberada de cualquier trabajo metalúrgico tal como la descarburación, desulfuración, ajuste de composición química, etc. Puesto que el tiempo requerido para el trabajo metalúrgico en la olla es mucho más corto que en el horno, la unidad de metalurgia secundaria puede competir con las altas velocidades de producción del horno de fusión. Por lo tanto, la capacidad anual del sistema completo puede ser mucho más alto.

Aparte de esas ventajas económicas directas, la unidad de metalurgia secundaria, con un diseño apropiado, puede funcionar como un amortiguador, es decir que se le puede emplear para mantener o recolectar las fusiones de diferentes hornos^[7].

También se puede considerar a la Refinación Secundaria como una oportunidad más para eliminar impurezas como el azufre ya que si se desea eliminar la mayor cantidad de azufre del acero es necesario cumplir con las siguientes condiciones: alta temperatura del metal líquido, alto índice de basicidad (relación de óxidos básicos a óxidos ácidos) de la escoria y condiciones altamente reductoras en el horno, objetivos que son difíciles de cumplir en un convertidor de aceración neumático debido, principalmente, a la naturaleza misma del proceso e inclusive aún en el mismo horno eléctrico de arco ya que las nuevas tendencias de manejar escorias espumosas (escorias con altos contenidos de óxido de hierro y óxido de calcio) es más difícil alcanzar niveles de azufre bajos, cuando se parte de niveles de azufre altos. Para poder alcanzar estos contenidos de azufre se hace necesario cambiar la naturaleza del baño y la escoria a condiciones reductoras, es decir, libres de oxígeno. Es por esto que la Refinación Secundaria sea tan exitosa ya que permite controlar la naturaleza de la escoria y el baño metálico a voluntad de una manera muy precisa.

Se ha introducido la Refinación Secundaria como una etapa mas en la ruta de producción de aceros, y para ello existen diferentes equipos y procesos, teniendo todos ellos como objetivos primordiales^[8]:

1. Una mejor homogeneización del acero, tanto en la composición como en la temperatura.
2. Flotación de inclusiones.
3. Desulfurización.
4. Mejorar la desoxidación.
5. Un mejor control de la forma de las inclusiones.
6. Mejorar, es decir, hacer más eficiente las técnicas de adición de los agentes aleantes.
7. Eliminación de nitrógeno e hidrógeno.

2.3.1. Antecedentes de la Refinación Secundaria.

Los primeros pasos y principios de la metalurgia secundaria se dieron en los años sesentas al aparecer la inyección de gases en la olla de transferencia de acero, siendo los pioneros de ésta técnica el *IRSID*, de Francia. Pero el medio de agitación más aceptado y generalizado fue la agitación electromagnética. En esa época el proceso comercial mas difundido fue el *ASEA-SKF* cuya primera unidad comercial se instaló en *Hellefors*, Suecia, en 1965. Desde el nacimiento del proceso *ASEA-SKF* el éxito fue total ya que éste proceso incluía entre sus singulares adelantos un sistema de vaciado del metal por medio de una válvula deslizante que obviamente representó un serio adversario a las ollas tradicionales que utilizaban el sistema *vástago – tapón*, Figura 2.3.

Ya en la década de los setentas se empezó a utilizar más la agitación del baño metálico mediante la inyección de gases. Se usó sistemáticamente el método *VAD* (Vaccum Argon Decarburization), Figura 2.4.

Algunas de las principales razones para ello fueron, entre otras:

1. La agitación con gases acelera las reacciones.
2. La inyección de gases incrementa la exposición del metal a la influencia del vacío, aspecto que es más difícil alcanzar con unidades agitadas por inducción electromagnética.
3. La agitación con gases acelera las reacciones de desulfurización, al incrementar el contacto metal/escoria.
4. La agitación con gases garantiza una mejor homogeneización, tanto de la temperatura como de la composición del metal.

Estudios llevados a cabo por J. Szekely y colaboradores^[9], demostraron que los patrones de agitación, tanto por inyección de gases como por inducción electromagnética son muy similares, sin embargo, la agitación por inducción, a pesar de ser más controlable, provee de menor agitación que por inyección de gases. Por otro lado, la agitación electromagnética

requiere de ollas de acero inoxidable (aceros austeníticos) que desde el punto de vista económico resulta una seria desventaja contra las ollas tradicionales que son más baratas.

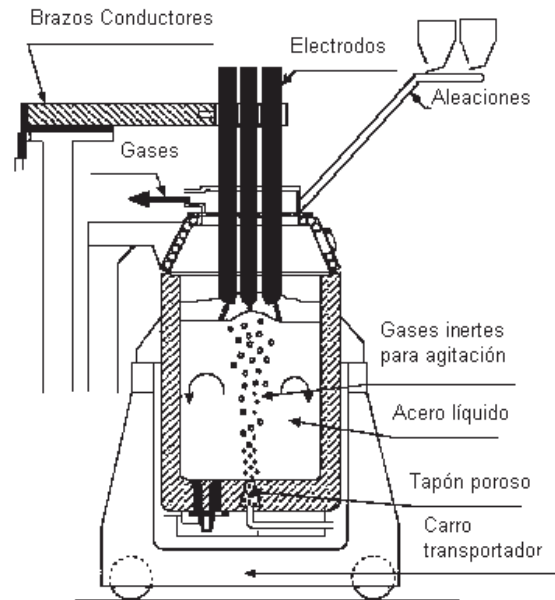


Figura 2.3. Modelo ASEA-SKF.

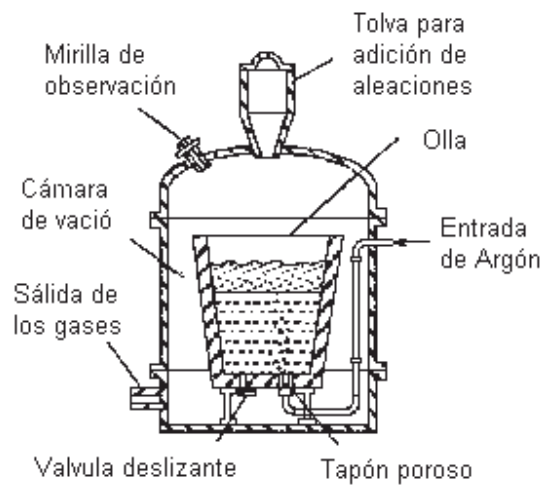


Figura 2.4. Modelo VAD.

No solo la agitación juega un papel preponderante en las operaciones de refinación secundaria, también el control de la temperatura es muy importante. La agitación, ya sea por gases o electromagnéticamente, necesariamente lleva a una disminución en la temperatura,

debido a varios factores. Un factor es el tiempo de residencia del acero en la olla; a mayor tiempo de agitación, mayores las pérdidas de calor. Otro factor es la introducción de elemento frío (el gas) a un medio más caliente (el acero), obviamente el gas toma calor del medio, disminuyendo la temperatura global del acero; a mayor cantidad de gas, mayores las pérdidas de calor. Si la agitación no se lleva a cabo en forma adecuada (mucha turbulencia) las pérdidas de calor serán mayores ya que esta práctica tiende a abrir la escoria exponiendo el metal al ambiente y en consecuencia mayores serán las pérdidas de calor por radiación, además de que el acero tenderá a reoxidarse y a incrementar la dilución de nitrógeno e hidrógeno, de acuerdo a la ley de Sieverst.

Este problema vino a ser resuelto con la introducción de sistemas de calentamiento externo: por medio de electrodos de grafito o por medio de la inducción electromagnética. El método más común y quizás el proceso más utilizado en la actualidad en la industria siderúrgica es el sistema que utiliza electrodos de grafito como medio de calentamiento, el Horno Olla o LF (Ladle Furnace).

2.3.2. Principio de la Inyección de Gases.

Existen dos métodos principales para la agitación del acero líquido: inyección de gases inertes y agitación electromagnética.^[10]

Haciendo un análisis de las técnicas de inyección de gases en refinación secundaria más utilizadas en la actualidad se llega a la conclusión de que todas tienen algo en común. Todas de un modo u otro inyectan gases, ya sea por medio de toberas, lanza sumergida o tapones porosos, entre otros, para agitar el baño metálico. Este procedimiento de agitación de gas inerte es usado en la industria metalúrgica para mezclar y homogeneizar el metal líquido dentro de el horno olla que son contenedores casi cilíndricos, que contienen acero líquido y en la superficie una capa de escoria (0.1 – 0.4 m) que evita la reoxidación del baño.^[11]

Este gas, al ir ascendiendo a través del acero líquido lo agita acelerando las reacciones químicas, minimizando la heterogeneidad en la temperatura y la composición, así mismo

mediante la generación de turbulencia, ayuda a la aglomeración y flotación de las inclusiones.

Existen tres ideas básicas de como éste fenómeno trabaja. La primera sugiere que burbujas pequeñísimas salen de la lanza o el tapón poroso, por ejemplo, y de ahí crecen en tamaño en varias magnitudes, antes de reventar en la superficie del baño metálico, Figura 2.5(a). Otros investigadores sugieren que una columna vertical densa de burbujas esféricas asciende a través del baño metálico, Figura 2.5(b). Una tercera teoría sugiere que un pequeño número de burbujas grandes asciende en forma de *hongo* a través del acero líquido^[3], Figura 2.5(c).

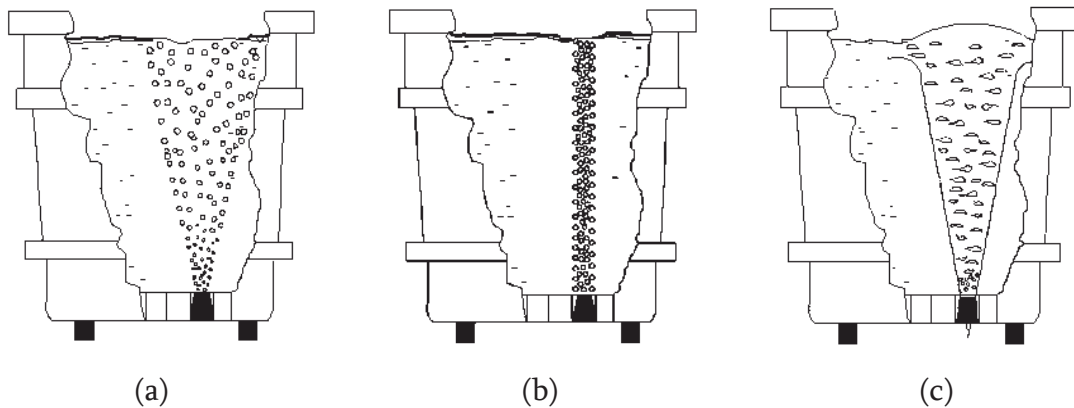


Figura 2.5. Formas sugeridas del ascenso de plumas de burbujas en una olla de refinación secundaria.

De estos tres mecanismos sugeridos, tal parece que éste último, figura 2.5(c), es el que más se aproxima a la realidad, mientras que los otros dos representarían más adecuadamente sistemas efervescentes. De esta figura podemos deducir que cuando el gas es inyectado a través de una tobera, por ejemplo, forma un jet o envoltorio de gas, próximo a la tobera. Este *envoltorio* de gas, hidrodinámicamente hablando, es inestable, por lo que se desbarata en forma de muchas burbujas esféricas, este fenómeno fue observado y medido por Sano y Mori^[12].

2.3.2.1. Inyección de Gases por Tapón.

La inyección de gases por este medio, tapones, generalmente se puede hacer con dos tipos: Tapón Poroso y Tapón Sólido, en donde el gas es inyectado dentro del acero líquido a través

de los tapones porosos formando burbujas. Las burbujas de salida en el líquido se rompen (desintegran) en burbujas más pequeñas y coalescen (integran) a burbujas más grandes.^[10]

El primer tipo de tapón está constituido de una lata o bote metálico el cuál contiene en su interior material refractario poroso, Figura 2.6. El refractario de estos tapones están hechos de alta alúmina ($\text{high-Al}_2\text{O}_3$) o materiales calcinados de MgO (óxido de magnesio) diseñados específicamente para esta aplicación y son instalados por la parte de afuera de la olla por mecanismos mecánicos o manuales como sistemas de bayonetas que permite cambiar rápidamente el tapón en una olla caliente. Los tapones son removidos del servicio después de un número determinado de tiempo o cuando se presentan indicadores visuales de desgaste dentro del tapón por el sobre uso.

La inyección del gas se hace por el tubo que se encuentra en la parte inferior del contenedor, el gas hace su ascenso por los poros interconectados hasta la superficie del tapón, generando una "nube" de burbujas que asciende a través del baño metálico.

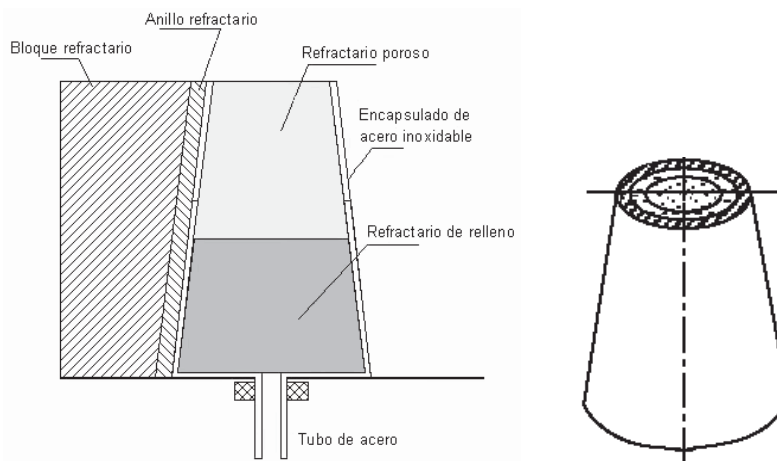


Figura 2.6. Esquema de un tapón poroso tradicional.

El tapón sólido consiste de un contenedor metálico que contiene en su interior material refractario sólido. El gas es inyectado por la base de dicho tapón refractario. El tapón de forma cilíndrica es el más fácil de cambiar, pero existen también los tapones cuadrados, Figura 2.7(a), que son geoméricamente más compatibles con los ladrillos circundantes del

refractario. También existe otro tipo de tapón sólido en el cual existen varias capas de refractario alternadas con claros, formando una especie de emparedado. Por estos claros sale el gas que agita el baño metálico, Figura 2.7(b).

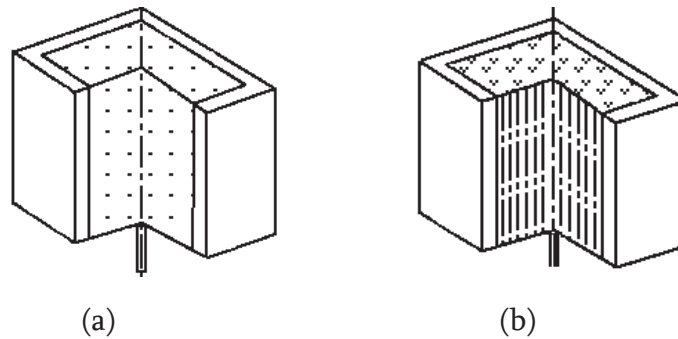


Figura 2.7. (a) Tapón poroso sólido cuadrado. (b) Tapón poroso compuesto de entreplanos tipo emparedado.

Uno de los problemas que se puede presentar, tanto en los tapones porosos como en las toberas, es la posibilidad de una fuga o derrame de acero en la unión entre el dispositivo instalado y la olla. Para evitar este problema en algunas ocasiones se instalan *cajas de arena* o tolvas por fuera de la olla junto al o los dispositivos instalados. Otra desventaja capilar de los tapones es que es muy propenso a la infiltración de acero líquido perdiendo presión del gas argón.^[4]

2.3.2.2. Inyección de Gases por Lanzas Sumergidas.

La inyección por lanza es una práctica que fue muy usada, sobre todo en las décadas de los 70's y mediados de los 80's. Con la introducción de tapones o medios porosos su uso se ha hecho menos frecuente a grado tal que casi ha desaparecido. Normalmente se utiliza más que como un medio de agitación, como un medio de adición de polvos al baño metálico. Los materiales mas comúnmente inyectados son mezclas de caliza-magnesita, calcio-silicio y caliza-espato flúor. Existen otros agentes como el aluminato de calcio, ferrosilicio, aluminio, boro, plomo y selenio que también son adicionados de esta manera.

La manera de operar este tipo de dispositivo es como sigue: la olla de tratamiento es cubierta y una lanza, protegida con material refractario, es sumergida en el baño metálico. Por lo general, la lanza es colocada en el centro de la olla, Figura 2.8, aún cuando esta no es la mejor posición para lograr las mejores condiciones de agitación y por ende de dispersión de los agentes inyectados. Se ha visto que cuando la lanza es posicionada fuera del centro de la olla, a un tercio, e inclusive a dos tercios del centro, los tiempos de mezclado son más cortos.



Figura 2.8. Inyección con lanza en una olla de refinación secundaria.

Los agentes inyectados son transportados por un gas, inerte, y debido a que los materiales pueden ser inyectados con un mínimo flujo, no se requiere de mucho espacio libre entre el acero y el reborde de la olla. Los bajos flujos de gas también hacen que se maximicen tanto las recuperaciones y la utilización de los materiales inyectados.

El uso de las lanzas sumergidas es en la actualidad una muy buena opción para la homogeneización del baño metálico, tanto en la composición como en la temperatura, así como para disminuir de manera considerable el contenido de azufre, fósforo, nitrógeno y oxígeno en el baño. Por lo que es de suma importancia su estudio, ya que el costo de su uso es alto debido al consumo de éstas al entrar en contacto con el acero a altas temperaturas.

Por lo que en el presente trabajo se hace un análisis de un recurso mucho más eficiente para su utilización en este ámbito, lanzas no-consumibles, lo que nos traería amplios beneficios así como una disminución de costos.

2.4. CRITERIOS DE SIMILITUD.

Dado la dificultad que presenta la observación del flujo de acero líquido directamente y el uso, la aplicación de modelos matemáticos, muy frecuente se complica por el hecho de la presencia de flujos turbulentos en algunas regiones del sistema. De esta manera, el modelado físico, usando modelos análogos con agua, es una herramienta muy atractiva que se utiliza para estudiar los fenómenos que ocurren en los diferentes procesos siderúrgicos como son la olla, el distribuidor, molde de la máquina de colada continua entre otros. El requisito clave para que el modelo físico represente el sistema real o el prototipo es lograr el criterio de similitud. Para obtener similitud entre dos sistemas de flujo, se deben satisfacer las siguientes cuatro condiciones:^[13]

- ✎ *Similitud Geométrica.*- Es la similitud de forma. Los sistemas son geoméricamente similares cuando la relación de cualquier longitud correspondiente del otro sistema es igual. Esta relación se le conoce comúnmente como factor escala. Todas las longitudes deben estar referidas a la misma escala. Es equivalente a tomar una fotografía del prototipo y reducirla o agrandarla hasta obtener el tamaño del modelo. En la semejanza geométrica todos los ángulos se conservan. Todas las direcciones del flujo se conservan. La orientación del modelo y del prototipo con respecto a los objetos de los alrededores debe ser idéntica.
- ✎ *Similitud Cinemática.*- Representa la similitud de movimiento. Las líneas de flujo en un sistema son geoméricamente similares a las líneas de flujo del otro sistema. La semejanza cinemática exige que todas las relaciones entre longitudes homólogas del modelo y prototipo tengan el mismo valor, que se denomina relación de escala de longitudes, y también que todas las relaciones entre tiempos homólogos tengan un valor común, que se denomina relación de escala de tiempos. Si los efectos de viscosidad, tensión superficial o de compresibilidad son importantes, la semejanza cinemática está condicionada a que haya semejanza dinámica.

⇒ *Similitud Dinámica.*- Representa la similitud de fuerzas. La magnitud de fuerzas de un punto correspondiente a cada sistema en una relación establecida. Existe semejanza dinámica cuando modelo y prototipo tienen la misma relación de escala de longitudes, la misma relación de escala de tiempos y la misma relación de escala de fuerzas (o de masa). De nuevo, la semejanza geométrica es el primer requisito; en caso contrario, no se debe proseguir. La semejanza dinámica existe simultáneamente con la semejanza cinemática, si todas las fuerzas en modelo y prototipo guardan la misma proporción.

⇒ *Similitud Térmica.*- Representa la similitud del efecto de fuerzas causadas por la diferencia de temperaturas. Los números adimensionales que involucran transferencias de calor deben ser iguales en ambos sistemas.

Cabe señalar que en el modelo que se ha llevado a cabo, el objetivo primordial es el observar como afectan las diferentes variables en la agitación del medio sin tomar en cuenta el criterio térmico, es decir se tomó como sistema o modelo isotérmico, ya que la temperatura del sistema permaneció constante a la del medio ambiente.

2.4.1. Grupos Adimensionales.

Las fuerzas principales a considerarse para lograr la similitud dinámica en la olla son: fuerzas inerciales, gravitacionales, viscosas y de tensión superficial. Los grupos adimensionales que involucran estas fuerzas son:

$$\text{Núm. de Reynolds} = R_e = \frac{v L}{\nu} = \frac{\text{Fuerzas Inerciales}}{\text{Fuerzas Viscosas}} \quad (2.5)$$

Donde:

v = velocidad del flujo, m/seg.

L = longitud, m.

ν = viscosidad cinemática, cs.

Su nombre se debe a Osborne Reynolds (1842-1912), un ingeniero británico que fue quien lo introdujo en 1883. El número de Reynolds es siempre importante, haya o no superficie libre,

y su efecto sólo puede despreciarse fuera de las regiones donde haya gradientes altos de velocidad; por ejemplo, lejos de las superficies fijas, chorros o estelas.

$$\text{Núm. de Froude} = Fr = \frac{v^2}{gL} = \frac{\text{Fuerzas Inerciales}}{\text{Fuerzas Gravitacionales}} \quad (2.6)$$

Donde:

g = aceleración de la gravedad, m/seg².

Su nombre se debe a William Froude (1810-1879), un arquitecto naval británico que, junto con su hijo Robert desarrolló la idea de utilizar modelos de barcos en canales y propuso leyes de semejanza para flujos con superficie libre (resistencia de barcos, ondas superficiales, canales abiertos). El número de Froude tiene un efecto dominante en flujos con superficie libre y su efecto solo puede despreciarse cuando no hay superficie libre.

$$\text{Núm. de Weber} = We = \frac{\rho v^2 L}{\sigma} = \frac{\text{Fuerzas Inerciales}}{\text{Fuerzas de Tensión Superficial}} \quad (2.7)$$

Donde:

ρ = densidad, g/cm³.

σ = Fuerza de tensión superficial, Dina/cm.

Debe su nombre a Moritz Weber (1871-1951), del Instituto Politécnico de Berlín, que desarrolló las leyes de semejanza en su forma actual. Fue Weber quién puso nombre a los números de Reynolds y Froude. El número de Weber juega un papel importante sólo si es de orden igual a la unidad o menor, lo que ocurre normalmente cuando la curvatura de la superficie es comparable en tamaño a la profundidad del líquido, por ejemplo, en gotas, flujos capilares, ondas de pequeña longitud de onda y en modelos hidráulicos de pequeñas dimensiones. Si el número de Weber es grande, sus efectos son despreciables.^[14]

En investigaciones de flujo de acero líquido, a menudo es usada agua como fluido de modelado por su facilidad de manejo, obtención y su viscosidad cinemática, que es similar a la

del acero líquido. Las propiedades físicas del agua a 20°C y del acero a 1600°C son comparadas en la Tabla 2.I.

Tabla 2.I. Propiedades físicas del agua a 20°C y del acero a 1600°C.

PROPIEDAD	AGUA (20°C)	ACERO (1600°C)
Viscosidad Absoluta (cp)	1	6.4
Densidad (gr./cm ³)	1	7.08
<i>Viscosidad Cinemática (cs)</i>	<i>1</i>	<i>0.9</i>
Tensión Superficial (DINA/cm.)	7.3	1600

La similitud dinámica absoluta requiere que los grupos adimensionales mencionados con anterioridad tengan el mismo valor tanto en el modelo como en el prototipo. Desafortunadamente, es imposible satisfacer cada uno de los criterios en un modelo a una escala particular.^[13]

2.5. ENERGIA DE AGITACIÓN O DE MEZCLADO.

Un factor que debe de ser tomado muy en cuenta en cualquier sistema de agitación con inyección de gases es el término conocido como “energía de agitación o de mezclado” la cual está íntimamente relacionada con el “tiempo de mezclado”. Esta energía de agitación o de mezclado se puede medir en términos de Watts/m³ o en Watts/ton de metal. La energía generada durante el vaciado es muy limitada así que la única manera de hacerlo eficientemente es mediante la inyección de un gas inerte.

Los patrones de agitación que se logran en una olla de refinación secundaria variarán de manera significativa de acorde con la técnica usada. Ya que las energías de agitación son función de múltiples factores, como los ya mencionados en el capítulo anterior, entonces el tiempo de mezclado será diferente para diferentes condiciones de la inyección de los gases. Se han sugerido ecuaciones^[15,16,17] para el cálculo de la energía de agitación en donde la energía es función de la fuerza ascensional de los gases y ésta a su vez íntimamente relacionada con el tiempo de mezclado:

$$E_p = \frac{2 * F * R * T_m}{22.4 * W_m} \ln \left(1 + \frac{\rho_m * g * Z}{P_a} \right) \quad (2.8)$$

$$E_c = 3.0346 \times 10^{-5} \left| \frac{F^3 * P_{mg} * T_g^2 * P_a^2}{W_m * r^4 (P_a + \rho_m * g * Z)^2} \right| \quad (2.9)$$

Donde:

E_p = Energía Potencial, Watts.

E_c = Energía Cinética, Watts.

F = Flujo de gas, l/seg.

Z = Profundidad de la lanza, m.

T_m = Temperatura del metal, K.

W_m = Peso del metal, Ton.

ρ_m = Densidad del metal, Kg/m³.

g = Constante gravitacional, 9.81 m/seg².

R = Constante de los gases, 8.314 J/mol-K.

T_g = Temperatura del gas a la salida de la tobera, K.

r = radio de la tobera, mm.

P_{mg} = Peso molecular del gas inyectado, 28.9 g/mol.

P_a = Presión atmosférica, Pa.

2.6. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.

Todas las técnicas de inyección de gases en una olla de refinación secundaria de un modo u otro inyectan gases por medio de toberas, lanza sumergida o tapones porosos, entre otros, para agitar el baño metálico. Este gas al ir ascendiendo a través del acero líquido lo agita acelerando las reacciones químicas, minimizando la heterogeneidad en la temperatura y la composición, así mismo mediante la generación de turbulencia, ayuda a la aglomeración y flotación de las inclusiones.

Un factor tomado en cuenta en cualquier sistema de agitación con inyección de gases es un término conocido como “*energía de agitación o de mezclado*” la cuál está íntimamente relacionada con el tiempo de mezclado. La energía de agitación no es otra cosa que la energía cinética y potencial que es inducida en el baño metálico ya sea por la inyección de un gas o por la simple acción del vaciado del acero líquido. La energía generada durante el vaciado es muy limitada así que la única manera de hacerlo eficientemente es mediante la inyección de un gas inerte.

Existen ciertos patrones de agitación que se logran en una olla de refinación secundaria, ya que las energías de agitación son función de factores tales como: Velocidad del flujo de gas, diámetro de la lanza, posición, profundidad de la inyección, ángulo de entrada y cantidad de metal a agitar (relación diámetro de olla a altura del metal).

Para poder determinar en planta la energía de agitación o tiempos de mezclado necesarios para que se lleve a cabo la inyección de gases se hace necesario del uso de instrumentos alternativos para poder controlar la cantidad necesaria de energía para que se cumpla con los requerimientos de una buena refinación en función de todos los parámetros ya mencionados, tal es el caso de instrumentos como son el acelerómetro y la celda fotovoltaica.

2.6.1. Acelerómetro.

Una técnica que ha sido explorada por un cierto número de investigadores, pero que ha ganado poca atención por la industria, es el de la medición y monitoreo continuo de las vibraciones de la lanza y/o el convertidor de aceración al oxígeno y en ollas de refinación secundaria, por ejemplo, para facilitar la desulfuración^[18], defosforización^[19] y desiliconización^[20].

En 1970 Bardenheuer^[21] y colaboradores publicaron los resultados de su estudio realizado a un convertidor en donde por medio de señales de vibraciones y las obtenidas por medio de un micrófono encontraron que eran similares y de alguna forma mostraban la evolución del soplo en el tiempo. La compañía japonesa Kawasaki Steel en 1979 presentó un artículo^[19] en

que describen como midieron las vibraciones en la lanza de inyección de oxígeno durante el soplo, lo que les ayudó a controlar los derrames logrando una desfosforización más estable. En 1983, Ohnishi^[15] y colaboradores también de la Kawasaki Steel, reportaron una estrecha relación entre la magnitud de las vibraciones de un convertidor K-BOP y el contenido de fósforo y hierro en la escoria. En 1984 Frank Mucciardi^[16] y Gerardo Barrera, demostraron que el acelerómetro puede ser usado en convertidores de aceración al oxígeno, tanto en la lanza como en el mismo convertidor para: a) seguir la velocidad de descarburización del baño, b) seguir la evolución de la escoria y c) prevenir los derrames. Sus resultados sugieren fuertemente que el acelerómetro puede ser usado como un medio de medir en forma continua y en tiempo real, la energía de homogeneización o de mezclado inducida a un sistema donde haya evolución o inyección de gases, como de los convertidores de aceración y de las unidades de refinación secundaria.

La intensidad de las vibraciones medidas por un acelerómetro muestra una disminución característica al final del soplo, la cual está correlacionada con una disminución similar en la intensidad del sonido. Un acelerómetro es un instrumento con alta sensibilidad diseñado para la medición de la amplitud de las vibraciones a través de un rango de frecuencia operativo. Un acelerómetro piezoeléctrico es un transductor capaz de llevar a cabo mediciones en un rango de 0.0005 g a miles de g's ($1g = 9.81 \text{ m/s}^2$).

Cuando el transductor es movido hacia arriba, la masa que esta suspendida en la unidad tiende a moverse hacia abajo, hacia el fondo del acelerómetro. Inversamente, un movimiento hacia abajo tiende a mover la masa hacia arriba. El corazón del transductor es un elemento a modo compresión de cuarzo rígido que genera una carga eléctrica como resultado del esfuerzo dinámico.

Esta carga eléctrica (Q) esta dada por la ecuación:

$$Q = d \delta A \quad (2.10)$$

Donde:

d = Constante piezoeléctrica del cristal.

A = Área de esfuerzo sobre el cristal.

δ = Esfuerzo en el cristal.

La señal de salida del acelerómetro es proporcional a la amplitud de las vibraciones por todo su rango de frecuencia de operación. Es utilizado un cable de bajo ruido para llevar a cabo los requerimientos de voltaje para el amplificador y la señal de salida. La salida es medida con instrumentos convencionales como voltímetros, osciloscopios y registradores. La unidad de poder consiste en una fuente bien regulada de 18-24 voltios de corriente directa, un diodo regulador de corriente, y un circuito para desacoplar la señal.

2.6.2. Celda Fotovoltaica.

Para conocer el grado de homogeneidad de o para medir la cinética de disolución de una aleación a altas temperaturas, se utiliza una técnica de muestreo, en función del tiempo o si se desea saber la temperatura en el mismo, y debido a la falta de homogeneidad en el baño, se deben de tomar varias mediciones con termopares. En un modelo físico esto se logra con mediciones en la variación de la temperatura, conductividad y/o la coloración del agua.

Una celda fotovoltaica puede convertir directamente un haz luminoso en electricidad, a nivel atómico. Algunos materiales presentan una propiedad conocida como efecto fotovoltaico que hace que absorban fotones de luz y emitan electrones. Cuando estos electrones libres se mueven, el resultado es un flujo de corriente eléctrica que puede ser utilizado de muy diversas formas. En este trabajo sirvió para medir tiempos de homogeneizado para diferentes condiciones de inyección de gases.

2.7. UNIDAD SUPERCONDUCTORA DE CALOR O UNIDAD SCC.

La idea de los Heat Pipes o unidades SCC fue primeramente sugerida por R. S. Gaugler en 1942. Sin embargo no fue hasta 1963 cuando en el Laboratorio Nacional de Investigaciones en Los Alamos, el ingeniero George Grover mostró el primer Heat Pipe o unidad SCC. Dentro de

los siguientes 30 años se han llevado a cabo numerosos estudios que conducen al entendimiento de la operación de estas unidades y esquemas de diseño para aplicaciones prácticas. Varios autores han investigado la infinidad de aplicaciones de este tipo de unidades^[22-27] como en intercambiadores de calor, generadores de vapor de alta temperatura, hornos de aire caliente así como un marcado progreso en campos como de la metalurgia, petroquímica, química y energética en países como China.

Una unidad SCC es un simple dispositivo que transfiere calor de un punto a otro y que posee una extraordinaria capacidad de transferir flujo de calor con una conductividad térmica extremadamente alta con casi ninguna pérdida aunque el gradiente de temperatura sea muy pequeño.^[28]

Los tres factores básicos que determinan el potencial conductor del fluido de trabajo y por ello la capacidad de transporte de calor son la tensión superficial, el ángulo de contacto y la geometría de la superficie sólida de la línea frontera de las tres fases (sólido-líquido-vapor). Una alta tensión superficial da un bajo ángulo de contacto entre sólido-líquido y un alto potencial conductor y capacidad de transporte de calor.^[24]

Una unidad SCC consiste en tres secciones: evaporador, sección adiabática y condensador. El principio de operación consiste en: el calor es adicionado en la sección evaporadora como se muestra en la Figura 2.9(a) y eso hace que un fluido de trabajo, el cual esta en equilibrio con su propio vapor, se evapore, Figura 2.9(b). Conducido, por la diferencia de presión entre el “calor” de la sección evaporadora y el “frío” de la sección condensadora en donde es condensado, Figura 2.9(c). Durante los cambios de fase el fluido toma o libera, respectivamente, el calor latente de vaporización. El líquido regresa, en algunos diseños, a través de una estructura capilar del condensador al evaporador conducido por fuerzas capilares, Figura 2.9(d).

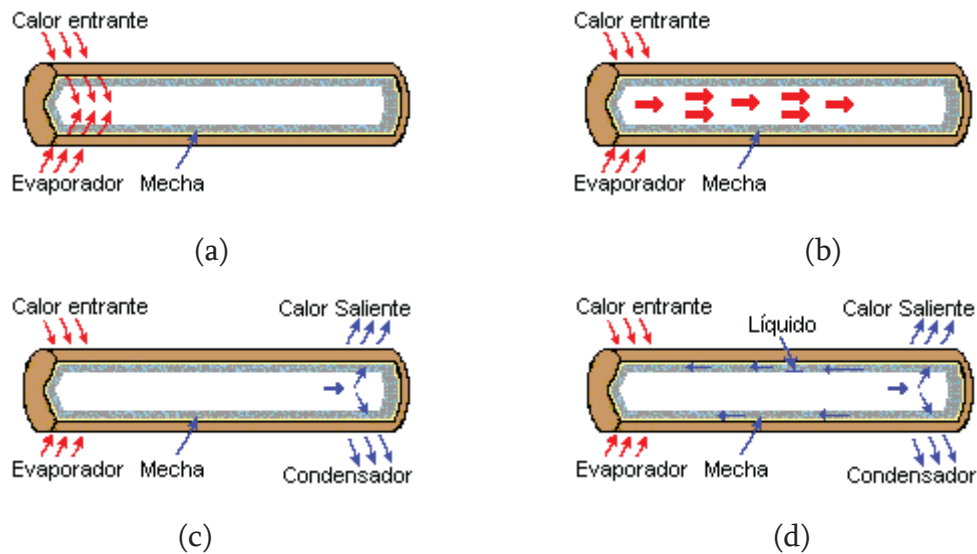


Figura 2.9. Principio de funcionamiento de una unidad SCC o Heat Pipe.

Los tres componentes básicos de una unidad SCC son:

1. El contenedor.
2. El fluido de trabajo.
3. La mecha o estructura capilar.

La función del **CONTENEDOR** es aislar el fluido de trabajo del ambiente externo. Este tiene que ser, por lo tanto, hermético, manteniendo un diferencial de presión en toda la unidad, y permitir la transferencia de calor que toma lugar en y con el fluido de trabajo. Para garantizar esta diferencia de presión se hace un vacío en el contenedor.

La selección del material del contenedor depende de muchos factores, como los siguientes:

- ↗ Compatibilidad (tanto con el fluido de trabajo como con el ambiente externo).
- ↗ Relación peso-resistencia.
- ↗ Conductividad térmica.
- ↗ Facilidad de fabricación, incluyendo soldadura, maquinabilidad y ductilidad.
- ↗ Porosidad.
- ↗ Mojabilidad.

Una alta relación peso-resistencia es más importante en aplicaciones aeroespaciales. El material puede ser no poroso para prevenir la difusión del vapor. Una alta conductividad térmica asegura una caída de temperatura mínima entre la fuente de calor y la mecha.

Entre los factores importantes de diseño para las unidades SCC es la selección del *FLUIDO DE TRABAJO*^[29]. Se han llevado a cabo investigaciones en donde se sugieren nuevos fluidos de trabajo para la construcción de estas unidades.^[30]

La primera consideración en la identificación del fluido de trabajo adecuado es el rango de temperatura de vapor. Dentro del rango aproximado de temperatura, pueden existir numerosos fluidos, y se tienen que examinar una variedad de características para determinar el más aceptable de estos fluidos para cada aplicación. Las unidades SCC pueden operar dentro de un determinado rango de temperatura dependiendo del fluido de trabajo mostrados en la siguiente Tabla 2.II

Tabla 2.II. Fluidos de trabajo para las unidades SCC.^[33]

Medio	Punto de Fusión (°C)	Punto de Ebullición a Presión Atmosférica (°C)	Rango de Operación (°C)
Helio	-272	-269	-271- -269
Nitrógeno	-210	-196	-203- -160
Amoniaco	-78	-33	-60- 100
Freón 11	-111	24	-40- 120
Acetona	-95	57	0-120
Metanol	-98	64	10-130
Etanol	-112	78	0-130
Agua	0	100	30-200
Tolueno	-95	110	50-200
Thermex	12	257	150-395
Mercurio	-39	361	250-650
Cesio	29	670	450-900
Potasio	62	774	500-1000
Sodio	98	892	600-1200
Litio	179	1340	1000-1800
Plata	960	2212	1800-2300

La selección del fluido de trabajo también debe ser basado sobre consideraciones termodinámicas, las cuales son concernientes con las varias limitaciones del flujo de calor que ocurren dentro de la unidad como, viscosidad y capilaridad. Los requisitos principales son:

- ↗ Compatibilidad con la mecha y materiales de la pared.
- ↗ Buena estabilidad térmica.
- ↗ Mojabilidad de la mecha y materiales de la pared.
- ↗ Presión de vapor no muy alto o bajo al rango de temperatura de operación.
- ↗ Alto calor latente.
- ↗ Alta conductividad térmica.
- ↗ Viscosidades de líquido y vapor bajas.
- ↗ Alta tensión superficial.
- ↗ Punto de congelamiento aceptable.

En el diseño de una unidad SCC, es deseable un alto valor de tensión superficial de tal manera que permita que éste trabaje en contra de la gravedad y para generar una alta fuerza motriz capilar. En adición a la alta tensión superficial, para que el fluido de trabajo moje la mecha y el contenedor, es necesario que el ángulo de contacto sea muy pequeño, casi cero.

La presión de vapor sobre el rango de temperatura de operación tiene que ser suficientemente grande para evitar altas velocidades de vapor, las cuales tienden a establecer largos gradientes de temperatura y causa inestabilidades en el flujo.

Es deseable un alto calor latente de vaporización de tal manera que se transfieran grandes cantidades de calor con un mínimo flujo de fluido, y por lo tanto mantener bajas las caídas de presión dentro de la unidad.

La conductividad térmica del fluido de trabajo debe ser preferentemente alta de tal manera que minimice el gradiente de temperatura radial y reducir la posibilidad de nucleación de ebullición de la mecha o e la superficie de las paredes.

La resistencia del fluido será minimizada escogiendo fluidos con valores de viscosidades de líquido y vapor bajos.

El último componente es la *MECHA CAPILAR* que es una estructura porosa hecha de materiales como acero, aluminio, níquel o cobre. El propósito primordial de la mecha es generar presión capilar para transportar el fluido de trabajo del condensador al evaporador. Puede también distribuir el líquido alrededor de la sección del evaporador a cualquier área donde el calor es probable a ser recibido por la unidad. A menudo estas dos funciones requieren de mechas de diferentes formas. La selección de la mecha para la unidad depende de muchos factores, muchos de ellos tienen que estar directamente parecidos a las propiedades del fluido de trabajo. Estos son fabricados usando espuma metálica^[31] y más particularmente fieltros, éste último es el más frecuentemente usado. Son también ampliamente usados materiales fibrosos como cerámicos, ellos generalmente tienen poros pequeños. La principal desventaja de las fibras cerámicas es que tienen poca rigidez y usualmente se requiere un soporte continuo por una malla de metal. Así que las fibras por sí solas pueden ser químicamente compatibles con el fluido de trabajo y los materiales de soporte pueden causar problemas.

Recientemente^[31] el interés se ha tornado a las fibras de carbón como materiales de mecha. Los filamentos de fibras de carbón tienen muchas ranuras finas en su superficie, tiene alta presión capilar y son químicamente estables. Un gran número de unidades SCC han sido construidas usando mechas de fibras de carbón que muestran una mayor habilidad para transportar calor. La fuente de capilaridad de la mecha incrementa al incrementar el tamaño del poro. Otra característica de la mecha, la cual se debe de optimizar, es su espesor. La habilidad para transportar calor de la unidad SCC es aumentado al incrementar el espesor de la mecha. La resistencia térmica en el evaporador también depende de la conductividad del fluido de trabajo en la mecha. Otra propiedad necesaria de la mecha es la compatibilidad con el fluido de trabajo y la mojabilidad.^[31,32]

2.7.1. Termobomba.

Un tipo especial de unidad SCC o Heat Pipe que no tiene ninguna estructura capilar es llamada usualmente termobomba, llamada algunas veces como Heat Pipe de gravedad asistida, es un dispositivo de un alto rendimiento en la transferencia de calor con pequeñas diferencias de temperatura asociadas con el calor latente de vaporización y condensación. De igual forma, la termobomba consta de tres partes: en el fondo del tubo (zona evaporadora) donde recibe calor el fluido de trabajo y éste vaporiza, una parte aislada donde se lleva a cabo un flujo a contracorriente de líquido y vapor (zona adiabática), y la parte superior del tubo donde el vapor asciende y es condensado (zona condensadora) y por medio de gravedad, el fluido de trabajo desciende nuevamente a la zona evaporadora llevándose a cabo un ciclo continuo.^[33]

La diferencia esencial entre un Heat Pipe y una termobomba es la estructura capilar ya que trabajando bajo gravedad con el condensador arriba del evaporador no necesita ninguna estructura capilar para que el fluido regrese al evaporador^[34], Figura 2.10.

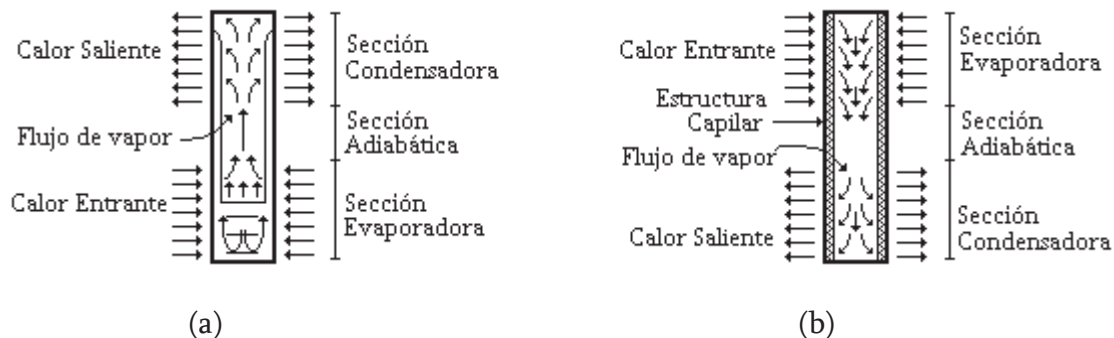


Figura 2.10. (a) Unidad SCC sin mecha o Termobomba. (b) Unidad SCC con mecha capilar.

Debido a que no hay mecha en una termobomba, es requerida, en la mayoría de los casos, fuerzas externas como la gravedad o fuerzas centrífugas para que el condensado regrese a la sección evaporadora mientras que en los Heat Pipes usa fuerzas capilares. De esta manera la zona evaporadora debe estar abajo de la condensadora que permita que el condensado regrese por gravedad. Ya que la termobomba no usa una mecha, éste tiene ventajas en cuanto a la simplicidad de construcción, una alta capacidad de transferencia de flujos de calor debido a

una resistencia térmica más pequeña, amplios límites de operación y bajos costos de manufactura.

El rendimiento y uso de las termobombas ha sido muy investigado en varias publicaciones^[35,36,37]. Se han realizado mediciones y experimentos a diferentes ángulos de inclinación de la termobomba donde se pudo observar que el rendimiento térmico de la ésta no es afectado por los ángulos de inclinación y el proceso o ciclo se lleva a cabo súbitamente sin ninguna inclinación o vertical. Se han hecho estudios de redes de termobombas para la propagación de calor donde se alcanza una alta capacidad de transferencia de calor.

En colectores solares se observaron los parámetros que afectan en su rendimiento como la intensidad de radiación global solar, temperatura interior del agua de enfriamiento, espesor y absorción del material, radio y longitud de la sección condensadora y largo total de la termobomba.^[37]

La capacidad de transporte de calor depende de muchas variables como las dimensiones geométricas (forma, longitud y diámetro interior del tubo, espesor, estructura superficial de las paredes de adentro), el tipo y cantidad del fluido de trabajo, velocidad de flujo de calor y temperatura de operación.

2.8. REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA).

El cerebro es un procesador de información, es capaz de procesar a gran velocidad grandes cantidades de información procedentes de los sentidos, combinarla o compararla con la información almacenada y de respuestas adecuadas incluso en situaciones nuevas. Lo más impresionante de todo es su capacidad de aprender a representar la información necesaria para desarrollar esas habilidades sin instrucciones explícitas para ello.

Desde finales de la década de los cuarentas se han venido desarrollando modelos que tratan de imitar tales habilidades; denominados redes neuronales artificiales (RNA) o modelos de computación coleccionista. Las redes neuronales artificiales son dispositivos o piezas de

software programados de manera tal que emulan el funcionamiento de las neuronas biológicas.

El aprendizaje de las redes neuronales se produce mediante la variación de la efectividad de las sinápsis, es decir, de la efectividad con la que una neurona se puede comunicar con una o varias neuronas a la vez. De esta manera es como cambia la influencia que unas neuronas ejercen sobre otras, de aquí se deduce que la arquitectura, el tipo y la efectividad de las conexiones en un momento dado, representan un cierto modo de memoria o estado de conocimiento de una red neuronal.

El aprendizaje requiere la presentación repetida de un número relativamente amplio de ejemplos de entrenamiento hasta lograr una respuesta satisfactoria del sistema (según la medida de error o función de energía utilizada)^[38].

2.8.1. Entrenamiento de una RNA.

Cuando un ser humano a través de sus ojos capta, por ejemplo, un objeto A , algunos de los sensores de la visión se activan y envían señales a las neuronas localizadas en una cierta región de su cerebro. Las neuronas que se disparan con la señal proveniente de sus ojos, señal de entrada, inmediatamente se incrementa el grado de conexión entre ellas. Si el mismo objeto A se presenta una y otra vez, la interconexión de neuronas se refuerza gracias a la sustancia *Creb* y, por lo tanto, el conocimiento del objeto se refuerza. Si se le presenta a la red anterior el objeto A modificado la unión de las neuronas para el conocimiento de tal objeto, es débil. Las neuronas deben entrenarse nuevamente para reconocer el objeto en cuestión en esta nueva o varias presentaciones. Luego de algunas sesiones de entrenamiento, el sistema neuronal es capaz de reconocer el objeto A en todas sus formas. Si el objeto cambia nuevamente la red de neuronas y el conocimiento se actualizan. Este entrenamiento, repetido para todos los valores de entrada y salida que se quiera, origina una representación interna del objeto en el cerebro a través de la red de neuronas entrenadas para tal propósito, que considerará todas las irregularidades y generalidades del mismo.

La mayor justificación del uso de las RNA es su habilidad para “ver” y “aprender” relaciones en conjuntos de datos complejos que no pueden ser fácilmente percibidos por humanos. Una red neuronal artificial realiza su función como un resultado del entrenamiento el cual es un proceso repetitivo, presentando un conjunto de datos (patrones) de entrenamiento a la red y ajustando los pesos hasta que cada conjunto de datos de entrada produce la salida deseada, de acuerdo a una regla de aprendizaje. Por lo tanto, al proceso de ajuste de los pesos hasta alcanzar un nivel de exactitud específica se le conoce como "entrenamiento". Se realiza después del entrenamiento una fase de prueba a la red, en la cual patrones de prueba desconocidos se presentan para establecer que tanto ha aprendido.

El principio de operación de las redes neuronales artificiales, está en definir el fenómeno bajo estudio, es decir, que el experto deberá saber qué variables o "características" definen a su proceso. Mientras mejores definiciones o características de su proceso se planteen mejores resultados que esperara del mismo. Esto quiere decir que para extraer el conjunto óptimo de características se debe determinar qué variables tienen las mayores posibilidades de brindar información relevante.

Es conveniente en este punto aclarar que el objetivo por el cual se llevaron a cabo un gran número de experimentos con todas la variables involucradas sin llevar a cabo un diseño experimental que nos llevará a realizar la menor cantidad de éstos fue debido a que uno de los modelos a proponer en este trabajo es por medio de redes neuronales artificiales y como se vio anteriormente este tipo de esquemas requieren de mucha información para su óptimo aprendizaje, es decir, a mayor cantidad de experimentos y buenas características obtenidas para el entrenamiento, mejor el modelo generado por esta técnica.

El tipo de red neuronal artificial usado y de acuerdo a las características o bondades que éstos nos brindan fue el tipo Perceptron Multicapas (MLP) o de Retro-Propagación. Este consiste en propagar el error hacia atrás, es decir, de la capa de salida hacia la capa de entrada, pasando por las capas ocultas o intermedias y ajustando los pesos de las conexiones con el fin de reducir dicho error entre las entradas y las salidas reales y las obtenidas por la red. El proceso

de entrenamiento puede llegar a requerir de altos niveles de capacidad computacional y puede llegar a consumir mucho tiempo de procesamiento en computadoras convencionales, además de que la convergencia del algoritmo no siempre se garantizará los mejores resultados. En el presente trabajo este no es el caso ya que la cantidad de datos involucrados en el entrenamiento y la complejidad del problema es relativamente bajo, es decir, para este tipo de técnicas de inteligencia artificial el problema se considera simple y, por lo tanto, el modelo obtenido puede llegar a ser muy robusto^[38].

El proceso de aprendizaje se lleva a cabo a través de los siguientes pasos:

1. Aleatorizar los pesos de todas las conexiones (preferiblemente con valores pequeños).
Seleccionar un par de entrenamiento, es decir, un patrón de entrada y el patrón de salida deseado correspondiente.
2. Se presentan los vectores de entrada a la red, es decir se dan los valores experimentales de las diferentes variables implicadas en el presente trabajo como vectores de entrada a las neuronas de la capa de entrada. Se calcula la salida de la red mediante las operaciones usuales: sumatoria de las entradas ponderadas, función de activación y transferencia a la siguiente capa, hasta llegar a la capa de salida.
3. Se compara esta salida con la salida deseada (vector correspondiente al tiempo de mezclado, por ejemplo) originando un error por cada neurona de salida, esto es, se hace el cálculo del error o discrepancia entre la salida obtenida y la deseada. El error (función objetivo) se suele definir como la suma de los cuadrados de las diferencias entre las salidas reales obtenidas y las deseadas, promediando para todas las unidades de salida y todos los patrones entrenamiento. Si el error es menor de cierto criterio fijado de antemano, incrementar el número de ejemplos correctos; si todos los ejemplos se han clasificado correctamente finalizar, si no continuar.
4. Aplicar la regla de aprendizaje, es decir, ajustar los pesos de las conexiones tratando de disminuir el error, generalmente mediante el cálculo de tasas de variación o gradiente

del error, por eso hablamos de reglas de aprendizaje por gradiente descendiente. Para reducir el error habrá que modificar los pesos de las conexiones, en proporción a la tasa relativa de variación del error con respecto a la variación del peso, o sea, la derivada del error respecto al peso, EP.

5. Volver al paso dos.

El objetivo de este procedimiento es minimizar el error global de la red.

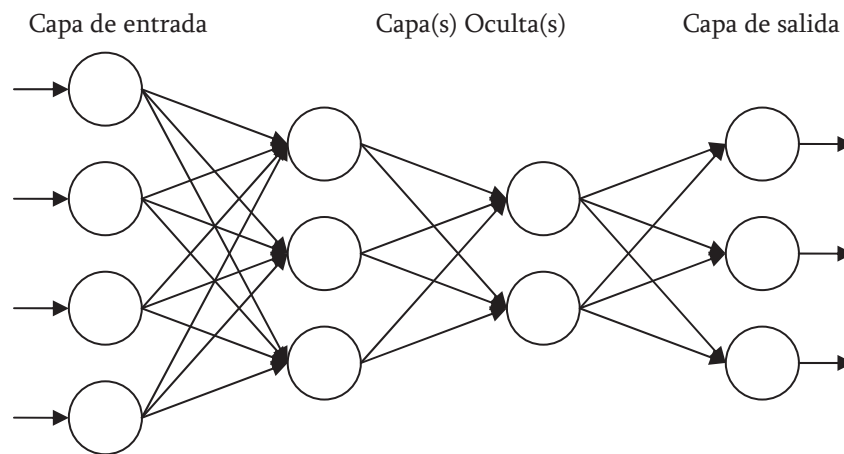


Figura 2.11. Red Perceptron Multicapas^[38].

CAPITULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. MODELADO FISICO.

Con el objeto de demostrar la factibilidad y viabilidad del uso de una lanza no-consumible o termobomba en comparativo con los tapones porosos en una olla de refinación secundaria y los factores que afectan su desempeño, fue construido un modelo análogo a escala, llevando a cabo ahí los cambios en las variables cuyo efecto se desea conocer.

En general, previo a la adopción extensa del proceso de colada continua, solo eran considerados dos parámetros para caracterizar la condición del acero durante la producción del acero y colada. Estos dos parámetros eran temperatura y composición. Sin embargo, recientes innovaciones en prácticas de producción de acero post-horno como tratamientos en la olla (desulfurización, adición de aleantes y agitación con gas) y particularmente procesos de colada continua, han requerido de la adición de un tercer parámetro para que sea completamente caracterizado a cualquier posición en la secuencia del proceso el cual es el flujo de fluido.

La temperatura y composición están ligadas a la fisicoquímica del proceso de la producción de acero. Por ejemplo, la solubilidad de las inclusiones no-metálicas y los niveles de oxígeno en el acero son influenciados por la temperatura. La condición del flujo de fluido afectará las pérdidas de calor y, por lo tanto, la temperatura por su efecto en la exposición del área en la superficie durante las operaciones de agitación con gas.

El flujo de fluido y la composición están fuertemente ligados. La condición del flujo de fluido ejerce una influencia significativa sobre:

- ↳ La habilidad de remover inclusiones no-metálicas del metal a la fase escoria.
- ↳ El grado de reoxidación el cual ocurre por el contacto atmosférico durante las operaciones del manejo del acero líquido.

El comportamiento del flujo de fluidos puede ser caracterizada de acuerdo a variables como: velocidad, patrón de flujo e intensidad de turbulencia. Ninguno de estos parámetros es realmente evidente por simple observación visual en ninguna operación de producción de acero o colada. Por esta razón, se emplean técnicas de modelado físico empleando agua como fluido del modelo, que ha demostrado ser útil en el reconocimiento del comportamiento del flujo de fluido durante la agitación en el acero.

3.2. ACELEROMETRO Y CELDA FOTOVOLTAICA.

El acelerómetro usado en la presente investigación, Figura 3.1, tiene las siguientes características:

Tabla 3.I. Especificaciones del acelerómetro de cuarzo modelo PCB-482A.

Sensibilidad	1014 mV/g
Resolución	0.0005 g
Rango de Frecuencia	2.5 a 3000 Hz
Frecuencia Resonante	31 Hz
Recuperación de sobrecarga	10 seg.
Tendencia de salida	10 Volts
Rango de Temperatura	-54 a 80°C
Vibración, máxima	100 ± g

El objetivo del uso de un instrumento de control como éste es debido a que, como ya se mencionó, un factor que tiene que ser tomado muy en cuenta en cualquier sistema de agitación con inyección de gases es la "*energía de agitación o de mezclado*". Esta energía hace posible la agitación del metal, necesaria para homogeneizar el baño metálico tanto en

temperatura como en composición, flotar inclusiones, promover la interacción metal-escoria, etc.



Figura 3.1 (a). Acelerómetro y unidad de suministro de energía.



Figura 3.1 (b). Conexiones traseras del acelerómetro y la unidad de suministro de energía.

La celda fotovoltaica utilizada, KELMAR, puede generar hasta un voltio de corriente directa, Figura 3.2.

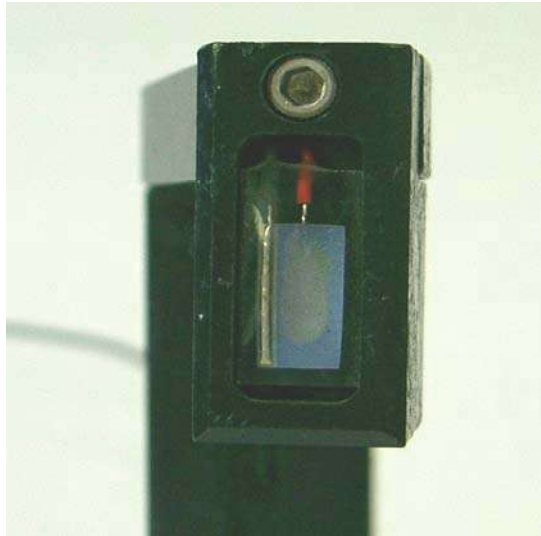


Figura 3.2. Celda Fotovoltaica.

El uso de la celda fotovoltaica es con la finalidad de hacer mediciones del grado de mezclado medido como voltaje en función del tiempo en la olla. Por medio de un indicador que se diluye paulatinamente en el baño hasta la homogeneización se calcularán los tiempos de mezclado para cada una de las condiciones a manejar.

3.3. DIGITALIZACIÓN DE SEÑALES.

Para esta fase se partió de la tesis de que al inyectarse un gas en un medio líquido la generación de burbujas provocara un incremento en la energía del sistema, que se manifiesta por medio de vibraciones. Esta energía es producto de la energía cinética y potencial del gas al ser inyectado en el agua. Esta energía puede ser entonces medida por medio de un acelerómetro y de esta manera relacionarlo con la energía de agitación. Para medir que tan bien se esta agitando el baño metálico se utilizó un colorante, éste tardará un tiempo mayor o menor en mezclarse en el agua, dependiendo de la energía inyectada al sistema. Para medir esta velocidad de mezclado se utilizó una celda fotovoltaica, partiendo del hecho de que a

medida que el tinte se mezcle, a una fuente de intensidad de luminosa constante, el voltaje generado por la celda tenderá a disminuir. El tiempo que tarda en homogeneizarse en color el agua, se considera como tiempo de mezclado y que esta relacionado directamente con la energía de mezclado inducida al inyectarse aire bajo diferentes condiciones.

Para obtener los datos del modelado físico se utilizaron dos tipos de unidades de adquisición o digitalización de las señales, una fue para medir la intensidad de las vibraciones del acelerómetro y una segunda para medir el de voltaje de salida de la celda fotovoltaica.

3.3.1. Medición de Vibraciones.

El acelerómetro fue conectado a una tarjeta digitalizadora de alta velocidad tipo osciloscopio NI PCI-5112, Figura 3.3, que cuenta con las siguientes características:

- ↳ 100 MHz de banda ancha.
- ↳ Capacidad de 2 canales, muestreados simultáneamente.
- ↳ 100 megamuestras/seg. en tiempo real y muestreo en forma aleatoria de 2.5 gigamuestras/seg.
- ↳ Rango de entrada de ± 25 mV a ± 25 V con un máximo de compensación de ± 37 V de corriente directa.



Figura 3.3. Tarjeta digitalizadora de alta velocidad tipo osciloscopio, NI PCI-5112.

Dicha tarjeta fue conectada a la PC a través de una de sus ranuras tipo PCI. En la PC se crearon las interfases gráficas para la fase de adquisición de los datos utilizando una plataforma de desarrollo bajo ambiente de instrumentación virtual, paquete comercial mejor conocido como LabVIEW™, Figura 3.4. Toda la programación se hizo bajo la plataforma o sistema operativo Windows XP.

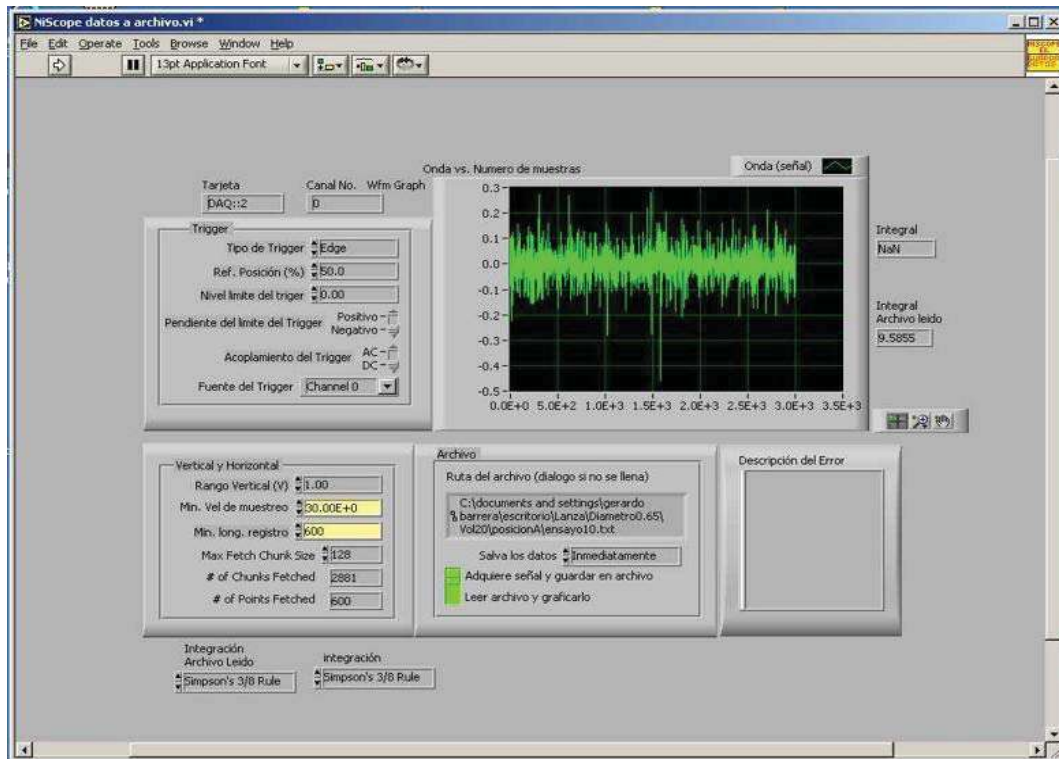


Figura 3.4. Interfase gráfica para la adquisición de la señal del acelerómetro.

Este instrumento virtual (VI) fue programado para hacer mediciones a una velocidad de 300 muestras/segundo con lo que para un periodo de 11 segundos (duración de cada ensayo) se obtuvieron 3,300 lecturas en cada experimento realizado. Los instrumentos virtuales se caracterizan, entre otras cosas, por tener una serie de botones, interruptores ON-OFF, palancas deslizables, pantallas, indicadores de aguja, etc que simulan los elementos de un instrumento real pero que a diferencia de éste el primero solo existe en la memoria de la computadora. Todos estos botones, palancas, etc. pueden ser manipulados por el teclado y el ratón de la computadora. La tarjeta Analógico/Digital (A/D) y Digital/Analógico (D/A) hace las veces de

una interfase entre el VI o software creado en la computadora y el sensor o transductor que observa o detecta el mundo real. Una de las grandes ventajas que tiene este tipo de sistemas, es que no es necesario tener una gran cantidad de instrumentos para poder hacer mediciones, sino que uno puede diseñar el o los instrumentos de acuerdo a sus necesidades aún y cuando solo existan en la memoria del computador. La forma de programar estos instrumentos se hace a base de códigos gráficos o iconos lo que facilita notablemente la implementación no solo de un sistema de adquisición de datos, sino también las interfases para el tratamiento o procesamiento de las señales y la creación de los modelos matemáticos y/o de control ^[39].

3.3.2. Medición de Tiempos de Mezclado.

La celda fotovoltaica fue conectada a una tarjeta de adquisición NI-4351 con un elemento auxiliar tipo TC-2190, Figura 3.5, la cual cuenta con las características siguientes:

- ↳ Blindada con adaptador para montar 14 termopares con mini conectores.
- ↳ Incorporación de referencia de punto de hielo y circuito de auto cero.



Figura 3.5. Tarjeta NI-4351 con elemento auxiliar TC-2190.

Esta tarjeta esta conectada en la misma unidad PC, el registro de los datos se lleva a cabo con una interfase creada en VirtualBench-Logger, Figura 3.6. La señal fue digitalizada a una velocidad de 10 muestras/segundo.

3.4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

La simulación del proceso inyección de gases en una olla de refinación secundaria se llevo a cabo en dos partes. En la primera fase se realizó el registro de las vibraciones producidas durante la inyección del aire en la olla, por medio de un acelerómetro, para posteriormente hacer el cálculo de las energías de agitación del baño. En la segunda parte se llevó a cabo otra serie de ensayos con la finalidad de registrar los tiempos de homogeneizado utilizando como indicador o elemento trazador Permanganato de Potasio en una concentración de 6 gr/l y la celda fotovoltaica. Los experimentos para el cálculo de los tiempos de mezclado se llevaron a cabo solamente para el caso de la lanza, ya que para los tapones porosos se tienen registros de modelos matemáticos realizados con anterioridad por medio de simulaciones^[40].

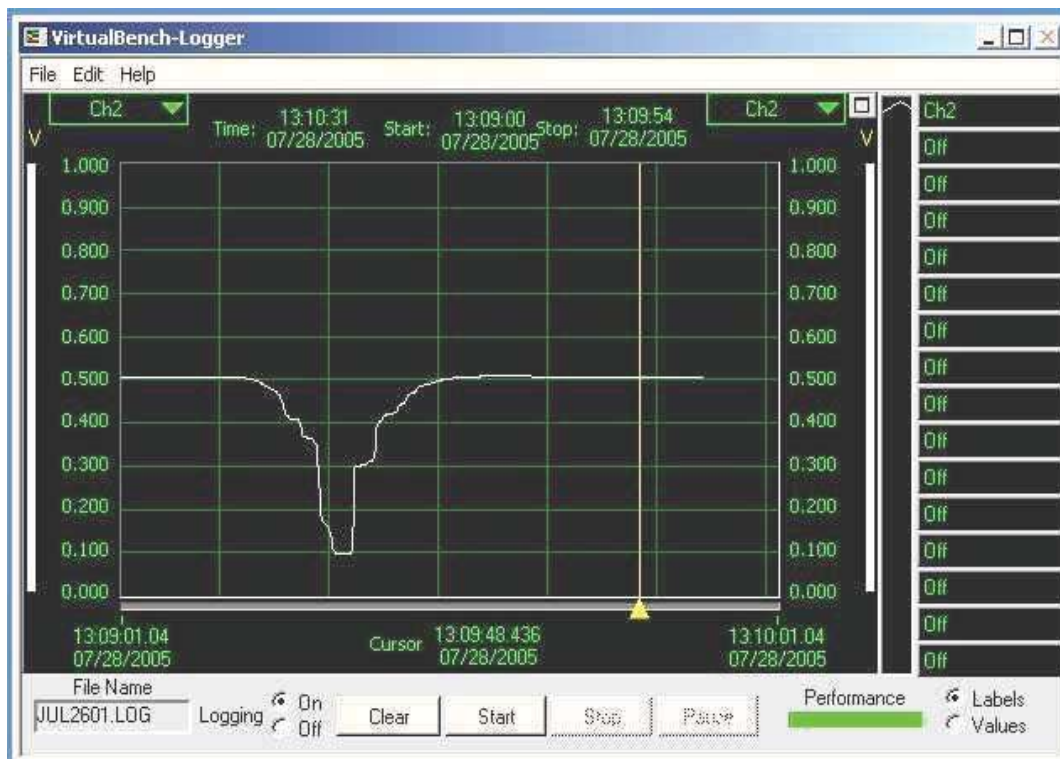


Figura 3.6. Interfase gráfica de la celda fotovoltaica.

La simulación se llevó a cabo en un modelo a escala de la olla de refinación secundaria, hecho de material acrílico, de una olla de refinación secundaria como la mostrada en la Figura 3.7 (a), con dimensiones de 37 cm de alto, diámetro inferior de 30 cm y diámetro superior de 37

cm, para una capacidad máxima de 35 litros. La olla cuenta con cuatro tapones porosos de níquel en el fondo para ensayar diferentes condiciones o configuraciones de agitación, Figura 3.7 (b), a los cuales se les dio una nomenclatura especial para su identificación.

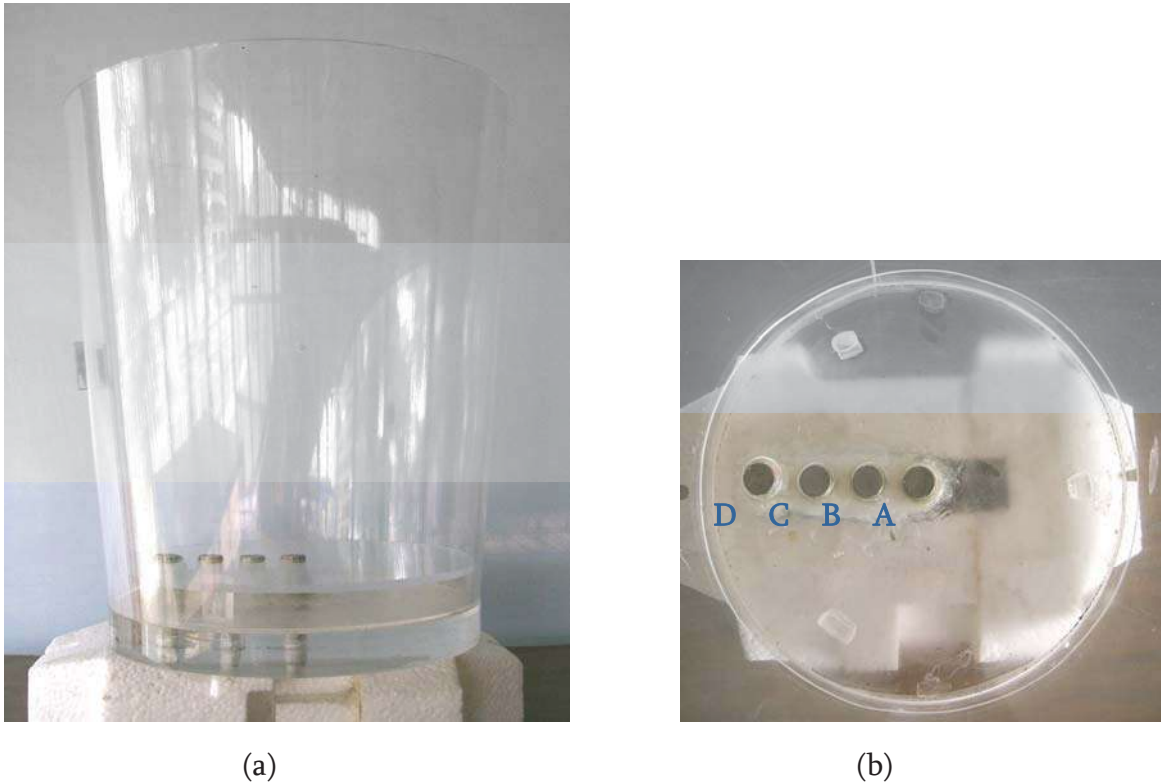


Figura 3.7. Modelo a escala de la olla de refinación secundaria, (a) olla de acrílico, (b) nomenclatura de los tapones porosos.

También se fabricó una lanza de acrílico de 60 cm de largo. Simulando una lanza de inyección no consumible y se colocó en el centro de la olla, en la dirección radial por medio de un dispositivo que le permite no solo posicionarse donde se encuentran los tapones porosos, sino además, fijarse a cualquier altura en la dirección vertical. Otra característica de este sistema posicionador de la lanza es que se le pueden dar diferentes ángulos de inclinación así como movimientos oscilatorios, por medio de un motor de pasos, mostrado en la Figura 3.8. Se escribió un programa para poder asignar el ángulo de inclinación deseado y el movimiento oscilatorio. El motor de pasos arriba mencionado requiere de una fuente de 9 voltios para su operación.

En la primera parte de la simulación, al modelo de la olla se le adosó externamente el acelerómetro en la pared de la misma en una posición tal que siempre guarda la horizontal con respecto a la base, es decir, 90° con respecto a la pared de la olla como se muestra en la Figura 3.9.



Figura 3.8. Lanza de inyección conectada al motor de pasos.

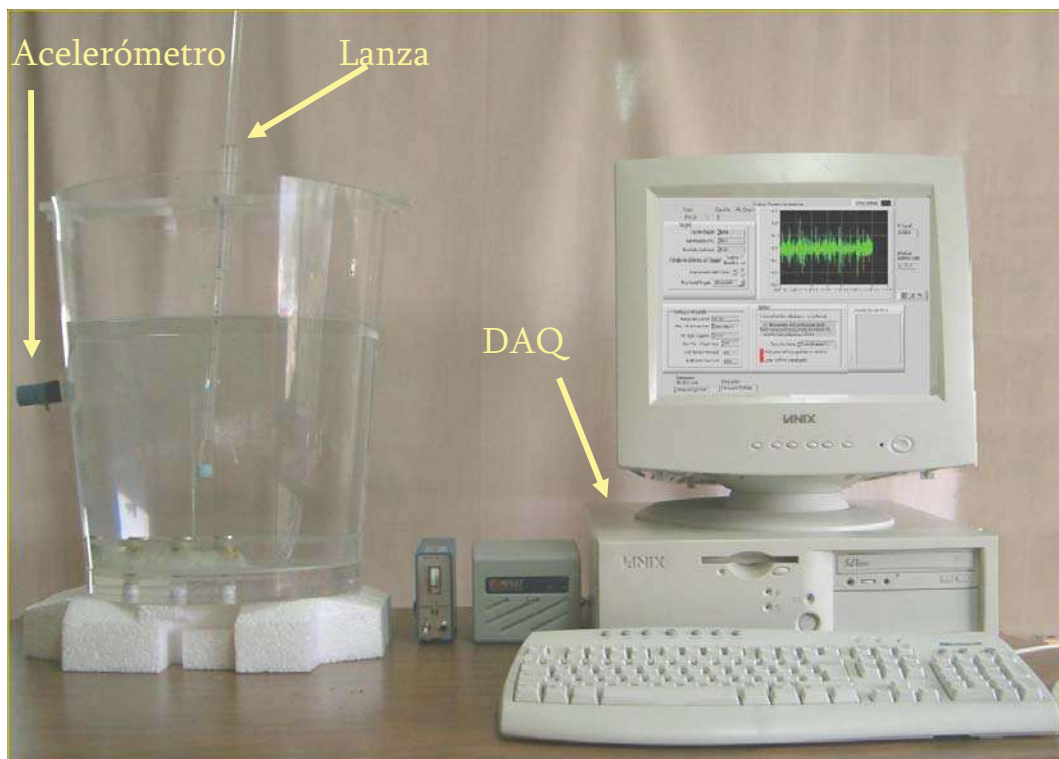


Figura 3.9. Disposición del equipo experimental usado en la primera fase.

Al momento de la inyección del aire en la olla a través de la lanza, el acelerómetro capta las vibraciones ocasionadas por dicha inyección, éstas señales son digitalizadas y mostradas, en tiempo real en la interfase gráfica diseñada donde puede observarse la magnitud de las vibraciones en función del tiempo.

En la segunda parte de la simulación, se calcularon los tiempos de mezclado u homogenizado. Haciendo uso de la celda fotovoltaica. En esta serie de experimentos la olla es cubierta con cartulina negra dejando solamente un orificio para la fuente emisora de luz (proyector de transparencias) y otro, en sentido opuesto a la fuente de luz, donde se colocó la celda fotovoltaica. La olla es cubierta además con una tapa negra y así evitar el paso de luz que pueda interferir con la luz que recibe el transductor y que pudiera alterar el resultado final como se muestra en la Figura 3.10.

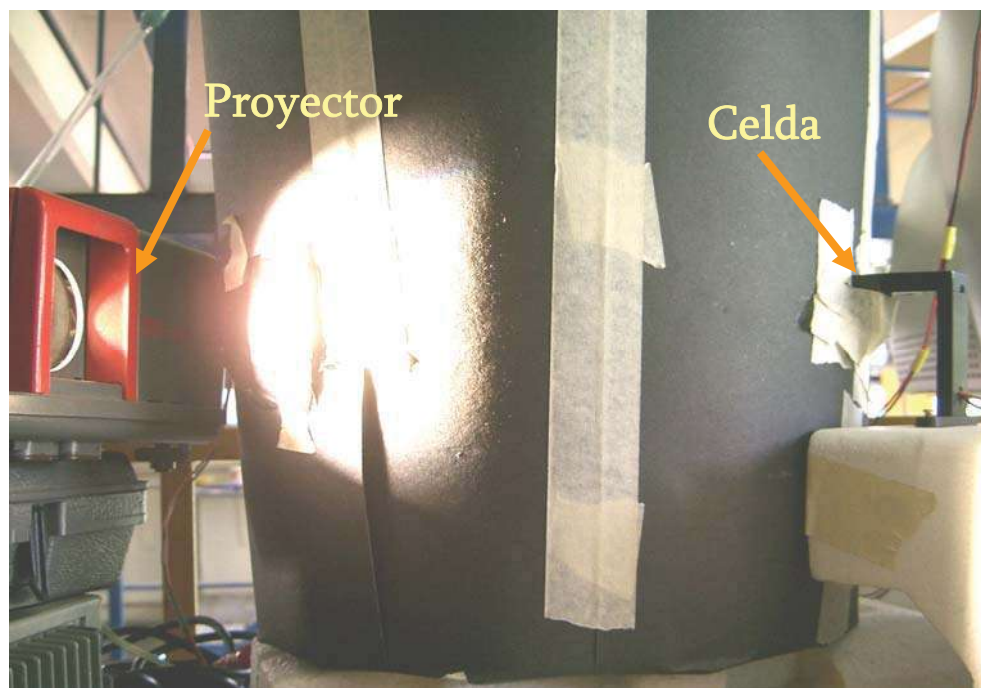


Figura 3.10. Equipo experimental en la segunda fase de la simulación, celda fotovoltaica.

La celda fotovoltaica varía su voltaje de una forma tal que la cantidad que genera ésta es directamente proporcional a la cantidad de luz que recibe.

La relación o principio en que se fundamenta el sistema para la determinación del grado de homogeneización y la emisión voltaica del sensor es el siguiente: cuando se adiciona el indicador coloreado o trazador a la olla, en este caso, permanganato de potasio $[K_2MnO_2]$ éste empieza gradualmente a diluirse en el agua, provocando que el haz de luz sea bloqueado por zonas de alta concentración del $[K_2MnO_2]$, lo que afecta la cantidad de luz que recibe el transductor y como consecuencia una disminución en el voltaje que éste genera. El tiempo que tarda en estabilizarse la señal recibida por la celda es el tiempo de homogeneización del baño líquido^[40], como se muestra en la figura 3.11.

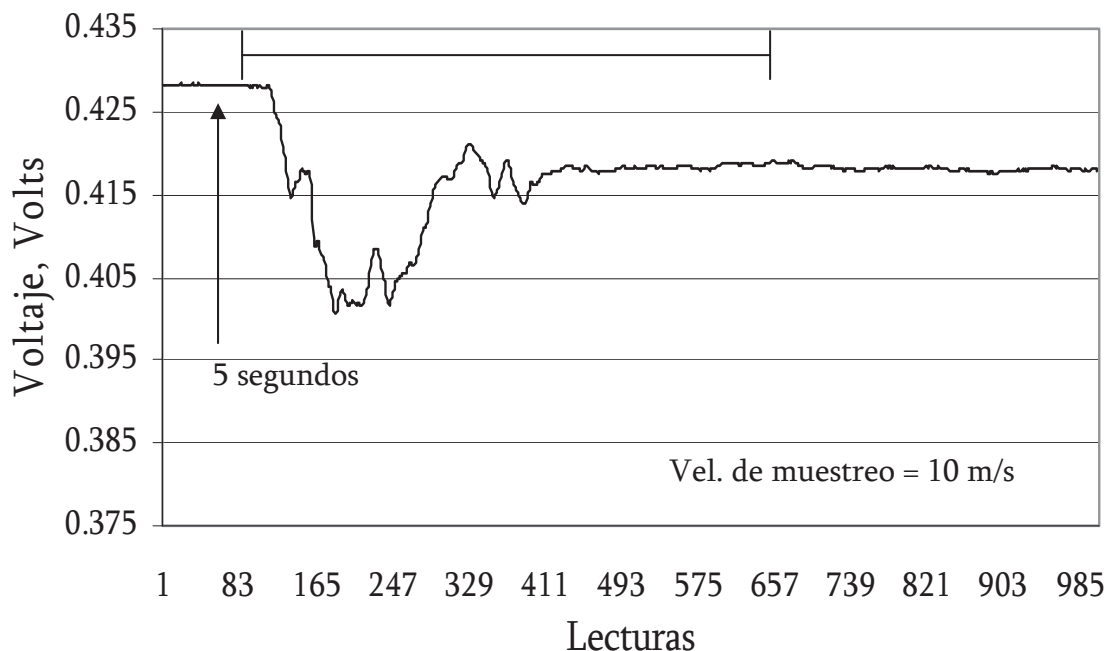


Figura 3.11. Señal característica para la obtención de tiempos de mezclado.

3.4.1. Condiciones Experimentales de la Primera Fase.

Los ensayos para la primer parte de los experimentos (cálculos de la energía de agitación, con acelerómetro) se exploraron los efectos de siete variables: diámetro de tobera, posición radial, volumen de agua a agitar, profundidad de la lanza, flujo de aire, inclinación y movimiento de oscilación de la lanza. Los experimentos fueron llevados a cabo bajo las siguientes condiciones, tanto para el tapón poroso como para la lanza, Tablas II y III:

Tabla 3.II. Variables experimentales de los tapones porosos con el acelerómetro.

Posición radial, cm.	4, 7.7, 10.3, 13.8		4, 7.7, 10.3, 13.8		4, 7.7, 10.3, 13.8		4, 7.7, 10.3, 13.8	
Flujo de aire, l/min.	1, 2, 3, 4, 5		1, 2, 3, 4, 5		1, 2, 3, 4, 5		1, 2, 3, 4, 5	
Volumen a agitar, l	20	25	20	25	20	25	20	25

Las posiciones radiales presentadas en la tabla en centímetros son correspondientes a la nomenclatura mostrada en la Figura 3.7(b). Para la posición radial a 13.8 cm le corresponde la nomenclatura “A”, para 10.3 cm corresponde a “B”, para 7.7 cm corresponde la letra “C” y finalmente a la posición de 4 cm le corresponde la letra “D”.

Tabla 3.III. Variables experimentales de la lanza con el acelerómetro.

Diámetro de tobera, mm.	0.65		0.88		1.0	
Posición radial, cm.	4, 7.7, 10.3, 13.8		4, 7.7, 10.3, 13.8		4, 7.7, 10.3, 13.8	
Volumen a agitar, L	20	25	20	25	20	25
Profundidad lanza, cm.	6.25, 10, 13.75,17.5	7.6, 12.16, 16.72,21.28	6.25, 10, 13.75,17.5	7.6, 12.16, 16.72,21.28	6.25, 10, 13.75,17.5	7.6, 12.16, 16.72,21.28
Flujo de aire, l/min.	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5
Inclinación, grados.	5, 10, 15	5, 10, 15	5, 10, 15	5, 10, 15	5, 10, 15	5, 10, 15
Movimiento de Oscilación.	-		+5y-5, +10y-10, +15y-15		+5y-5, +10y-10, +15y-15	

Cabe señalar que en esta primera fase de la simulación previa a cada ensayo, se tomó un estándar. es decir, por un periodo de 11 segundos se midió la intensidad de las vibraciones cuando no había inyección de aire. Esto se hizo con el propósito de tener un nivel de referencia de ruido (vibraciones de fondo o naturales) del medio y así, restar ésta cantidad a la vibración medida del ensayo y obtener el valor absoluto del nivel de vibraciones medido del experimento en turno. Cada ensayo fue hecho por duplicado, para de esa manera tener la opción de llevar a cabo pruebas estadísticas de máxima verosimilitud.

Para el caso en donde se tiene la lanza en forma vertical, sin movimiento e inclinación, y aplicando los parámetros mostrados en la Tabla 3.III, donde las principales variables a ensayar son: diámetro de la tobera, posición radial, volumen a agitar, profundidad de la lanza y flujo de aire a inyectar se calcularon las energías teóricas de agitación respectivas a cada una de las condiciones ensayadas por medio de un programa escrito en el lenguaje de programación orientado a objetos HiQ™, software de National Instruments Figura 3.12, en el cuál se introdujeron las ecuaciones (2.8) y (2.9).

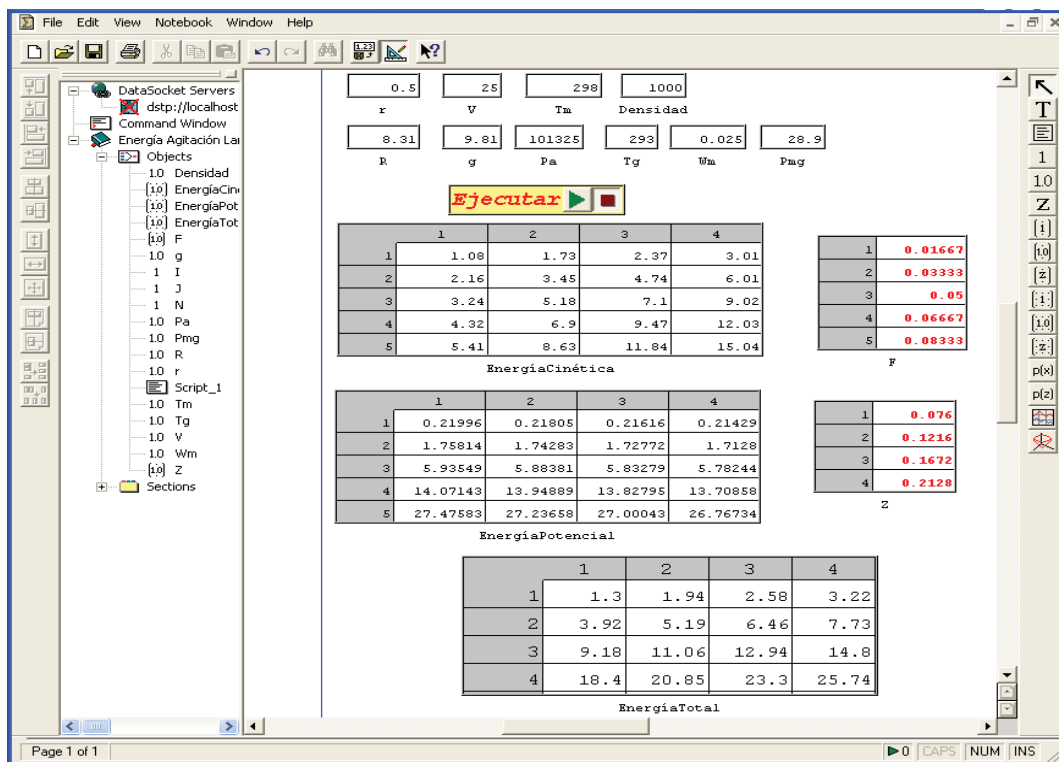


Figura 3.12. Objetos creados en el cuaderno de trabajo HiQ™.

Utilizando la sintaxis de HiQ™ se creo el Script, Figura 3.13. El Script es el equivalente a crear un programa en cualquier otro lenguaje de programación.

```

// CALCULO DE ENERGÍAS DE AGITACIÓN PARA INFECCIÓN POR LANZA DE GASES.
// CALCULA LA ENERGÍA CINÉTICA Y LA ENERGÍA POTENCIAL DEL GAS EN
// EL METAL (SIMULACIÓN: AGUA)
//
for J=1 to 4 do
  for I=1 to 5 do
    EC[I,J]= ((Z*F[I]*R*TG)/(22.4*WM))*ln(1+(DEN*g*Z[J])/P);
    EP[I,J]=3.0346E-05*((F[I]**3*PM*TN**2*P**2)/(WM*r**4*(P+DEN*g*Z[J])**2));
    ET[I,J]=EC[I,J]+EP[I,J];
  end for;
end for;

```

Figura 3.13. Script o lenguaje de HiQ™.

3.4.2. Condiciones Experimentales de la Segunda Fase.

Para la segunda fase de la simulación, correspondiente al cálculo de tiempos de mezclado con la celda fotovoltaica, se llevaron a cabo experimentos bajo las siguientes condiciones, Tabla 3.IV:

Tabla 3.IV. Variables experimentales de la lanza con la celda fotovoltaica.

Diámetro de la tobera, mm.	1.0	
Posición radial, cm.	4, 7.7, 10.3, 13.8	
Volumen a agitar, l	20	25
Profundidad lanza, cm.	6.25, 10, 13.75, 17.5	7.6, 12.16, 16.72, 21.28
Flujo de aire, l/min.	1, 2, 3, 4, 5	1, 2, 3, 4, 5
Movimiento, oscilación.	+5 y -5, +10 y -10, +15 y -15	

Igualmente que la serie de experimentos de la primera fase, se uso como trazador permanganato de potasio (K_2MnO_2) en una concentración de 6 gr/l y se adicionó a la olla en cantidades de 20 ml. en cada experimento. La ubicación de la alimentación del trazador a la olla fue fija y al lado opuesto al de la pluma de burbujas; es decir, se trato en lo posible de simular la adición de aleaciones en una olla industrial.

El fundamento para la propuesta de un transductor que pueda ser utilizado a nivel industrial con propósitos control se basa en el hecho de que existe una relación entre la energía de agitación, la intensidad de las vibraciones medida con el acelerómetro y el tiempo de mezclado tal como se observa en la Figura 3.14.

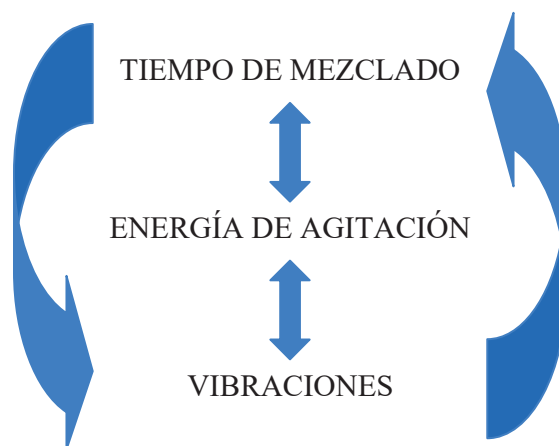


Figura 3.14. Relación entre energía de agitación, tiempo de mezclado e intensidad de las vibraciones producidas por la inyección de un gas en un baño líquido ^[39].

3.5. SIMULACIÓN DE ESCORIAS.

Se diseñó una serie de experimentos para ver el efecto de la inyección de gases sobre el comportamiento que tienen las escorias que cubren el baño metálico bajo ciertas condiciones de inyección de gases utilizando los dos métodos aquí analizados; inyección con tapón poroso y lanza no consumible. Para simular escorias con diferente refractariedad o viscosidad se utilizaron dos tipos de aceites automotrices: un aceite rojo para transmisión automática ATF tipo A el cual tiene una viscosidad entre 60 y 70 cSt (centistokes = $1 \text{ cm}^2/\text{seg.}$) a 20°C y un aceite negro para transmisión tipo SAE-250 GL-1 con una viscosidad de 5000 cSt a 20°C .

Con esta serie de experimentos no se trata de estudiar el comportamiento real de las escorias utilizadas en una olla de refinación secundaria, ya que éstas tienen características muy difíciles de imitar o simular, principalmente debido a que las escorias reales dependen de factores tales como: temperatura del metal, basicidad (relación de óxidos básicos a óxidos ácidos), acondicionadores de las escorias (fluorita), agentes aleantes, etc. Sin embargo, debido a que se está trabajando con un modelo isotérmico el comportamiento hidrodinámico del metal y la escoria son muy similares de los del agua y el aceite y, por lo tanto, pueden

proporcionar información valiosa que en un momento dado puedan ayudar a decidir sobre que método de inyección sería más adecuado para la olla de refinación secundaria.

Esta simulación se llevo a cabo para observar el agujero presente en el baño o superficie del agua poniendo a prueba los dos métodos de inyección, por lanza y por tapones porosos bajo las siguientes condiciones:

Tabla 3.V. Variables de la lanza en la simulación de escorias.

Diámetro de tobera, mm.	1 mm.
Posición radial, cm.	13.8 cm
Volumen a agitar, l	20 litros.
Profundidad lanza, cm.	17.5 cm
Flujo de aire, l/min.	1, 2, 3, 4 y 5
Movimiento de oscilación, grados	+5 y -5, +10 y -10, -15 y +15

Tabla 3.VI. Variables de los tapones porosos en la simulación de escorias.

Posición radial, cm.	4, 10.3, 13.8 cm
Flujo de aire, l/min.	1, 2, 3, 4 y 5 l/min.
Volumen a agitar, l	20 litros.

3.6. CONSTRUCCIÓN DE LA LANZA O UNIDAD SCC.

El diseño y construcción de la lanza se llevo a cabo tomando en consideración algunas sugerencias surgidas de trabajos previos y de acuerdo a los resultados encontrados en la literatura^[33]. Para ello se decidió construirla de cobre. Se tomó esta decisión por la disponibilidad de dicho material y, además, por razones de índole económica ya que lo ideal hubiera sido construirla de acero inoxidable pero no se encontraron los materiales en las dimensiones requeridas. Las dimensiones usadas se muestran en la Tabla 3.VII.

Se hizo el ensamble de los tubos de tal manera que se obtuvo una lanza del tipo concéntrica, es decir, una lanza con un orificio central y una sección hueca entre la superficie y el interior de la lanza como se muestra en la Figura 3.15. Se diseñó de esta manera para poder inyectar gases y poder aplicar el principio de operación de una unidad superconductora de calor.

Tabla 3.VII. Dimensiones de la lanza.^[33]

	TUBO EXTERNO	TUBO INTERNO
Material del tubo	Cobre	Cobre
Fluido de trabajo	Sodio	–
Diámetro exterior	2.4 cm.	0.6 cm.
Diámetro interior	2 cm.	0.4 cm.
Espesor de la pared	0.2 cm.	0.2 cm.
Longitud	60 cm.	90 cm.

Al tubo de cobre exterior se le colocó una válvula SWAGELOK para conectar por una de las salidas de la válvula un transductor de presión tipo OMEGA PX 176-025A5V con un rango de 0 a 1.7 atmósferas (0 – 25 psi), mostrado en la Figura 3.16, con la finalidad de monitorear la presión interna del tubo al momento de entrar en operación la lanza. Por el otro extremo de la válvula se tiene la salida para la conexión de la bomba de vacío. La salida analógica del transductor se da en voltios, y para poder sacar una correlación entre estas unidades y la presión real se llevo a cabo una calibración de éste por medio de un manómetro analógico (tipo Pitot).

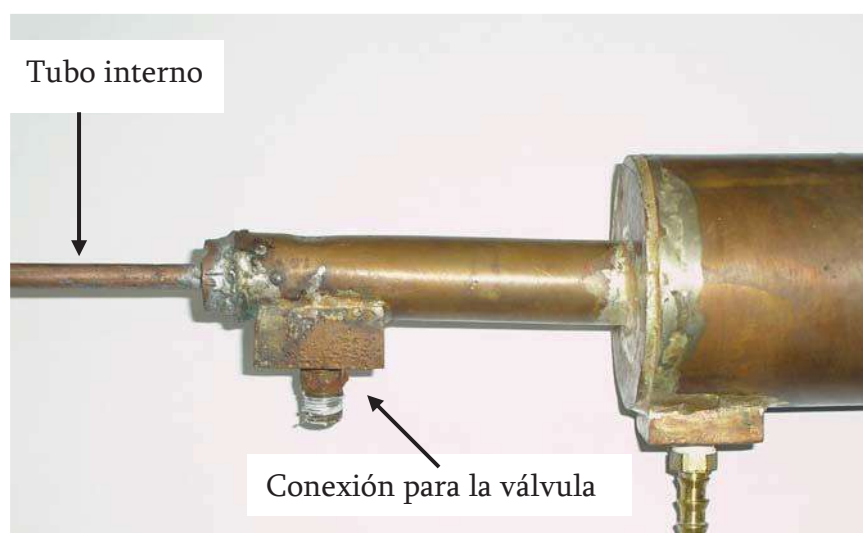


Figura 3.15. Lanza concéntrica.



Figura 3.16. a) Transductor de presión OMEGA, b) Válvula SWAGELOK.

Se utilizó una válvula “T” para conectar los dos transductores. En uno de los extremos de la válvula fue conectado el manómetro y por el otro el sensor digital, cuya señal podía ser captada tanto por un multímetro como por una unidad tipo DAQ. El proceso de calibración se llevó a cabo de la siguiente manera: por una de las entradas de la válvula “T” se hizo pasar aire, a una cierta presión y flujo. Se midió al mismo tiempo el valor del manómetro analógico en libras por pulgada cuadrada y en el transductor digital su equivalente en volts. De este proceso se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 3.VIII. Datos para la calibración del sensor.

Manómetro, psi	Manómetro, atm.	Sensor, Volts.
0	0	3.19
2.5	0.170115	3.71
5	0.34023	4.20
7.5	0.510345	4.61
10	0.68046	5.25
12.5	0.850575	5.72
15	1.020689	6.25

17.5	1.190804	6.72
20	1.360919	7.22
23	1.565057	7.84
25	1.701149	8.23
27.5	1.871264	8.63
30	2.041379	9.19

En la Figura 3.17 se muestran la grafica de los datos de la tabla anterior donde se obtuvo la siguiente ecuación de regresión lineal:

$$Y = 0.3399 X - 1.088 \quad (3.1)$$

Con un índice de correlación de 0.9995.

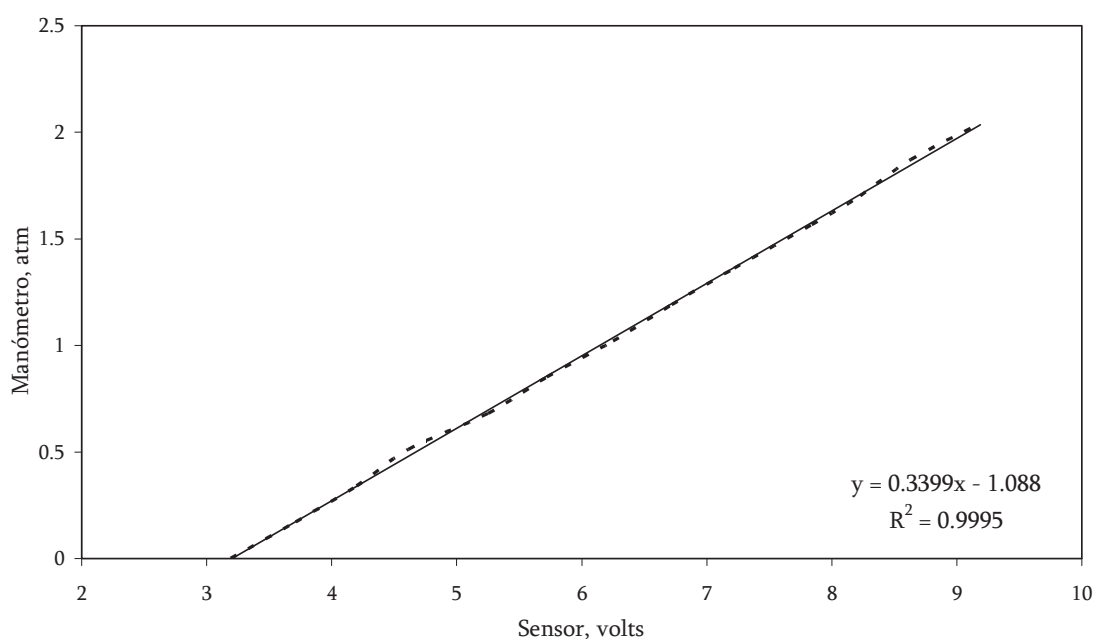


Figura 3.17. Curva de calibración del sensor de presión absoluta.

En la parte superior de la lanza se colocó un sistema de enfriamiento, enchaquetado de cobre, que hizo la función de la sección condensadora de la lanza. Una vez soldada ésta sección condensadora al área donde se va a extraer el calor al fluido de trabajo de la lanza, se llevó a

cabo la limpieza de la parte o sección interna del tubo ya que la presencia de contaminantes en cualquier estado, sólido, líquido o gaseoso pueden ser perjudiciales para el rendimiento y vida de la lanza. Es muy importante llevar a cabo una limpieza minuciosa para remover los posibles contaminantes que hayan quedado dentro del tubo previo al ensamble de sus partes. La limpieza se llevo a cabo siguiendo el siguiente procedimiento^[33]:

1. Limpieza con 1,1,1-tricloroetano y periódicamente agitar y cepillar.
2. Enjuagar con 1,1,1-tricloroetano frío y secar con aire.
3. Introducir el tubo en una solución de pasivación con dicromato de sodio (7.5 – 30 kg/m³) y ácido nítrico (15 – 30% en volumen) a temperatura ambiente por 30 minutos a 2 horas seguido de un enjuague con agua destilada.
4. Secar con aire comprimido.
5. Enjuagar con alcohol isopropílico.
6. Secar con aire.

Una vez limpia la parte interna del tubo se lleva a cabo el llenado del mismo con el sodio. Uno de los extremos de la lanza no fue soldada para poder llevar a cabo la introducción del sodio, que hay que recordar que es un elemento muy reactivo. El procedimiento que se utilizó implica el uso de una unidad que sea capaz de desplazar el aire y así evitar que el sodio reaccione con éste. El llenado se llevo a cabo dentro de una cámara a la cuál se le creo una atmósfera inerte mediante un flujo constante de argón. Dentro de la misma cámara se procedió a cortar el sodio en pequeños trozos, los cuáles se introdujeron dentro del tubo concéntrico formado por los dos tubos de cobre.

La cantidad de sodio introducida fue determinada en base a estudios realizados con anterioridad^[33] en donde por diferencia de volúmenes se obtuvo que para nuestro volumen de la lanza la cantidad de sodio era de 35.7 gramos.

Una vez introducido el sodio se procedió inmediatamente a soldar la parte superior de la unidad superconductora. Se procedió a llevar a cabo el vacío en la sección donde fue

introducido el sodio. El vacío se llevó a cabo con una bomba de vacío VARIAN que tiene una capacidad de vacío de hasta 5 militorr (7×10^{-6} atm). Una vez terminada la evacuación del aire, la válvula que fue conectada a la bomba de vacío fue cerrada inmediatamente con un tapón SWAGELOK para evitar que se tuviera una pérdida de vacío de manera accidental. De esta manera se concluyó la construcción de la unidad superconductora de calor que sería utilizada como lanza de inyección, Figura 3.18.

Para probar la efectividad de la lanza, para trabajar como una unidad que se autoprotégiera durante su inmersión en el baño metálico, se procedió a llevar a cabo dos fases experimentales. En la primera se introdujo la lanza en un horno eléctrico, a base de resistencias, sin la presencia de metal y calentarla en diferentes etapas. En la segunda fase se introduciría la lanza en un baño caliente de aluminio.



Figura 3.18. Lanza o Unidad SCC.

La lanza fue probada primeramente en un horno a temperaturas de 350, 400, 500, 600 y 700°C como el mostrado en la Figura 3.23 y posteriormente, en aluminio líquido fundido en un horno de inducción, Figura 3.24.

En la primera etapa, para llevar a cabo mediciones de temperatura en la lanza y en el sistema de enfriamiento de la misma se usaron tres termopares tipo “K” para el registro de la temperatura; a la entrada y salida del agua del condensador y uno más para el registro de la temperatura a 5, 20 y 35 cm del fondo de la lanza (zona adiabática) como se muestra en la Figura 3.19.

Cabe mencionar que uno de los termopares se fijó, en el transcurso de los experimentos, a 35 cm del fondo (muy cercano a la zona condensadora) ya que el cableado no permitió la introducción de éste a los 20 y 5 cm, por estar la lanza dentro del horno, sin embargo también se realizaron mediciones a éstas dos posiciones al ir retirando la lanza del horno.

En la zona condensadora se hizo fluir agua a una velocidad de 1.5 l/min, la cual se midió con un medidor de flujo manual de esfera. En el transcurso de los experimentos se monitoreó la evolución de las temperaturas de entrada y salida del condensador.

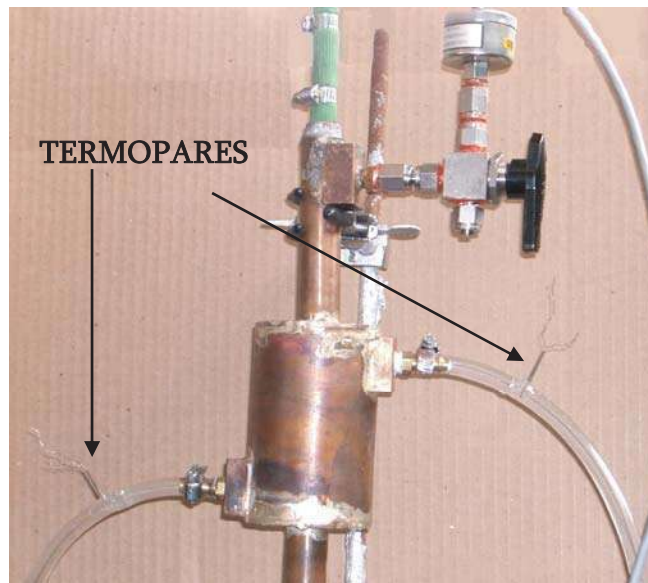


Figura 3.19. Posición de termopares para el monitoreo de la temperatura.

Las señales de los termopares fueron monitoreadas por medio de una tarjeta de conversión de señales de analógico a digital, NI USB-9162 cRIO-9211 de National Instruments dedicada especialmente para medición de termopares, Figura 3.20(a). El transductor de presión fue

monitoreado a través de una tarjeta de conversión de señales de analógico a digital NI USB-6008 de la misma marca, Figura 3.20(b). Ambas tarjetas tienen la característica de que son conectadas a cualquiera de los puertos USB; USB 1.0 o USB 2.0, ya sea de una computadora de escritorio o a una portátil o LapTop. Se escribió un programa, bajo ambiente de instrumentación virtual usando el programa de desarrollo LabVIEW™, en el que se monitorearon todos los transductores al mismo tiempo, haciendo un registro de ellos con una velocidad de conversión de 4 muestras por segundo, Figuras 3.21 y 3.22.



(a)



(b)

Figura 3.20. a) Tarjeta de adquisición de datos tipo NI USB-6008, b) Tarjeta de adquisición de datos tipo NI USB-9162 cRIO-9211.

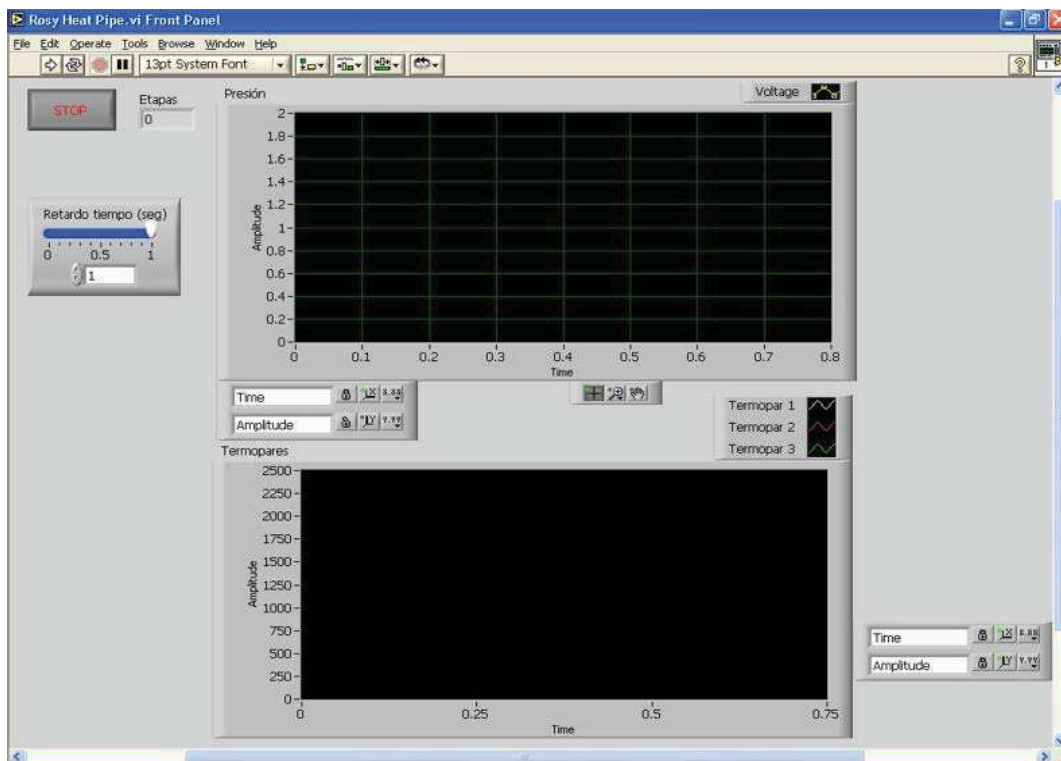


Figura 3.21. Panel frontal de la interfase gráfica de LabVIEW™

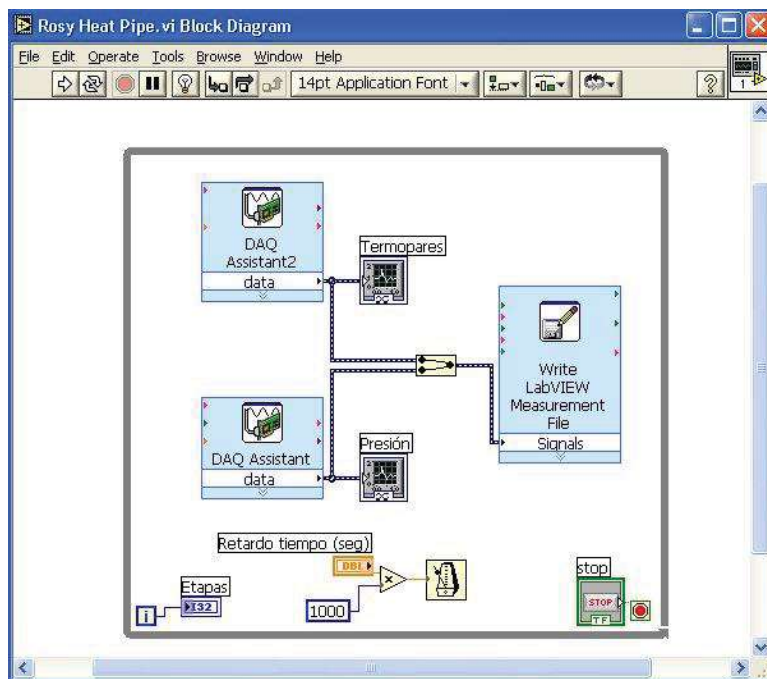


Figura 3.22. Diagrama de bloques para el monitoreo de las tarjetas.

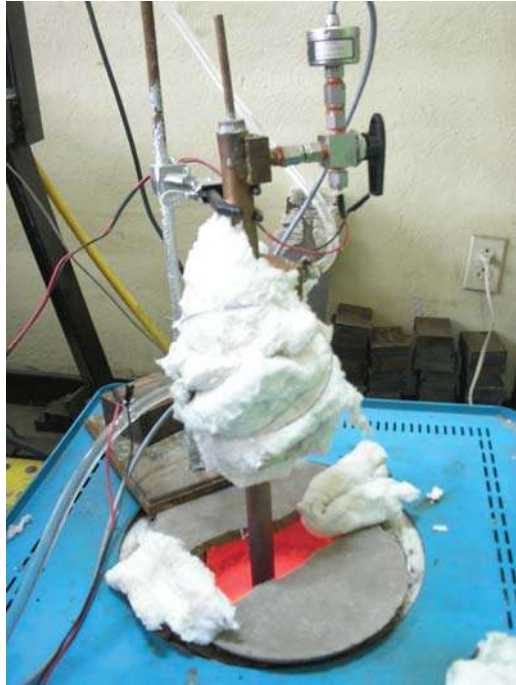


Figura 3.23. Prueba de la lanza en horno.



Figura 3.24. Prueba de la lanza en horno de inducción con aluminio líquido.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. MODELADO FISICO.

El principal objetivo del modelado físico en el presente trabajo es observar y probar la factibilidad y viabilidad del uso de una lanza no consumible, capaz de autoprotgerse en el acero líquido, y comparar su desempeño con el método tradicional de agitación de ollas de refinación secundaria, tapones porosos. Para ello se propone como herramienta de evaluación el uso de sensores capaces de obtener señales del estado del baño metálico para que posteriormente con los cálculos adecuados puedan proporcionar información relevante respecto a las energías de agitación y los tiempos óptimos de mezclado para ambos métodos de inyección.

4.2. CÁLCULO DE LAS INTEGRALES PARA ENSAYOS CON LANZA.

Los patrones de las señales obtenidas por el acelerómetro son muy similares, solo variando en magnitud de acuerdo a las condiciones de agitación experimentadas como se puede observar en las Figuras 4.1 y 4.2:

A cada una de las señales digitalizadas del acelerómetro se les calculó el valor de la integral, con el propósito de tener la magnitud absoluta del área bajo la curva de la señal del ensayo en turno. Debido a que la magnitud de las vibraciones es diferente para cada condición experimentada se hace necesario tener como referencia de dicho cambio, el área bajo la curva de la magnitud de dichas vibraciones. De esta manera, la comparación es más objetiva ya que se comparan valores absolutos y no una serie de gráficas difíciles de interpretar.

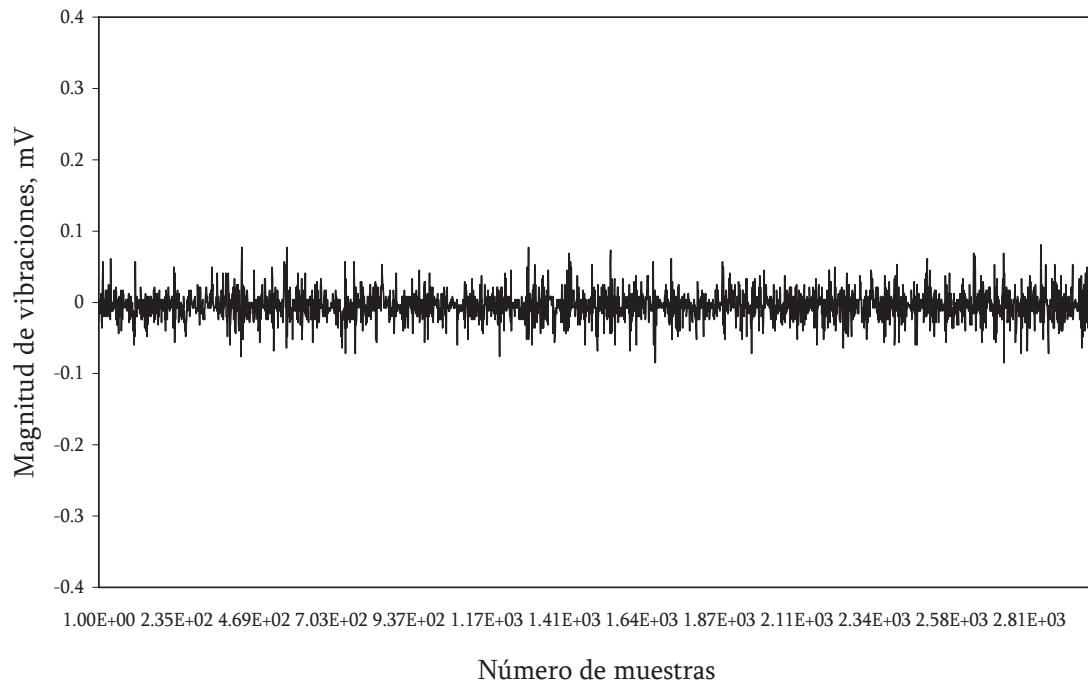


Figura 4.1. Señal obtenida a un diámetro de 0.65 mm., volumen de 20 l., posición de 13.8 cm., profundidad de 17.5 cm., y flujo de 1 l/min.

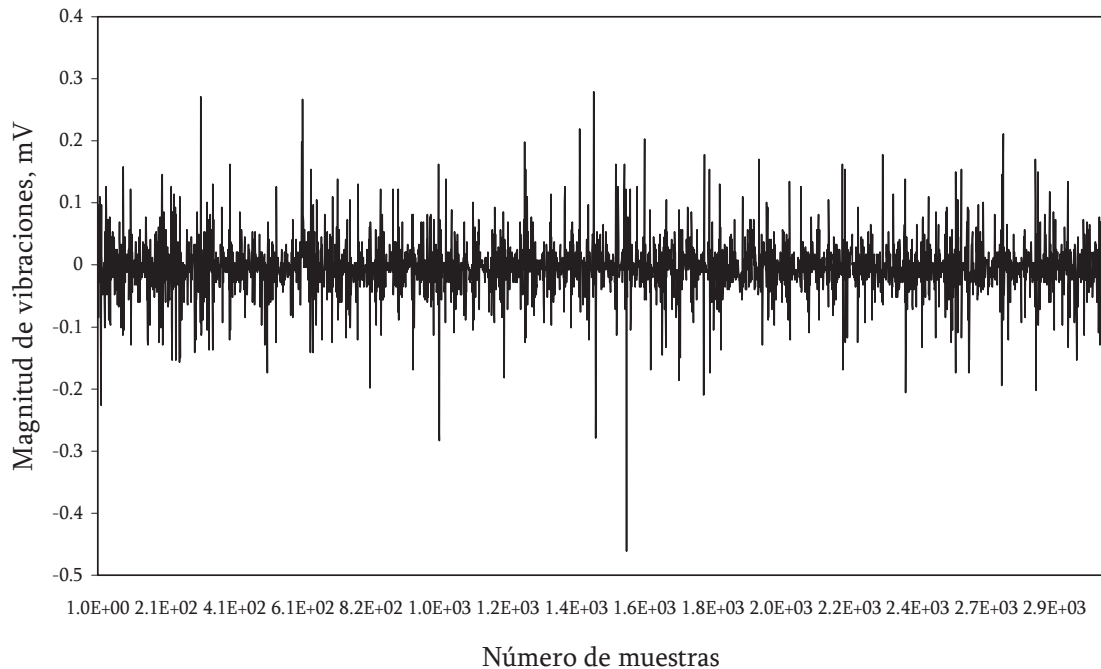


Figura 4.2. Señal obtenida a un diámetro de 0.65 mm., volumen de 20 l., posición de 13.8 cm., profundidad de 17.5 cm., y flujo de 5 l/min.

El proceso de cálculo de las diferentes áreas se llevo a cabo a través de un programa realizado con el lenguaje de programación G mostrado en la Figura 4.3, donde el programa o algoritmo es representado gráficamente en forma de diagrama de bloques, Figura 4.4, el cual calcula las integrales de todos los ensayos que se llevaron a cabo, para cada diámetro, volumen, posición, profundidad, flujo, ángulos de inclinación y movimiento de oscilación. El resultado es guardado en un archivo en formato ASCII con extensión txt.

De igual forma se llevo a cabo el cálculo de las integrales de los 4 estándares (1 por cada profundidad), dando también por resultado un archivo con extensión txt, producto del promedio de cuatro valores o mediciones de este estándar de ruido.

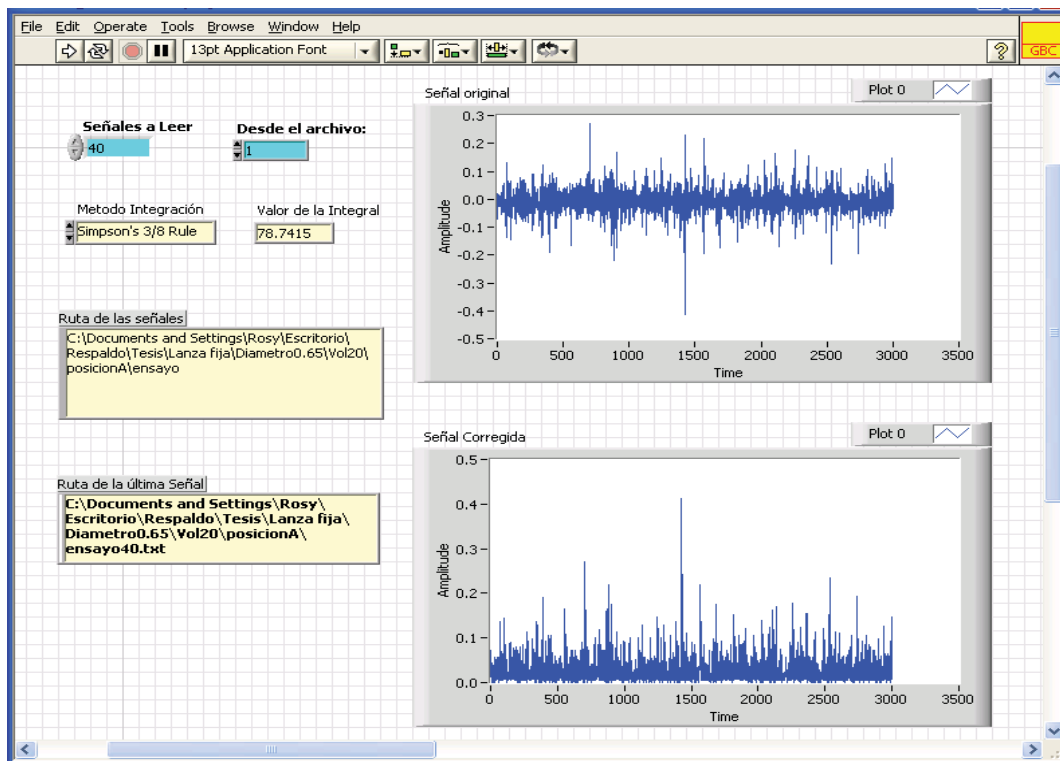


Figura 4.3. Panel frontal del programa usado en el cálculo de las integrales de las señales del acelerómetro.

Una vez obtenidas las integrales correspondientes a cada ensayo y el promedio de los estándares que representa el nivel de referencia de ruido (vibraciones) del medio, se prosiguió

a restarle éste a cada valor de la integral para obtener el valor absoluto del nivel de vibraciones del medio del experimento en turno.

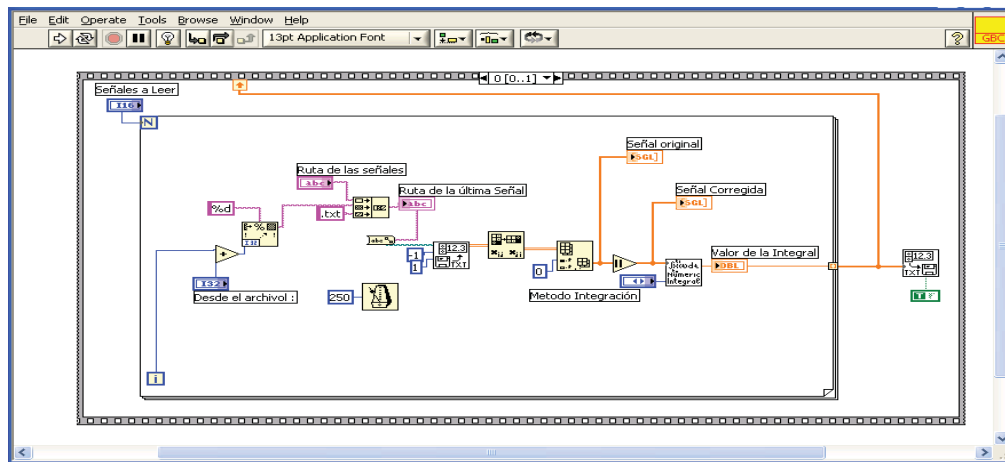


Figura 4.4. Diagrama de bloques para el cálculo de las integrales de las señales.

Lo anterior se realizó por medio de un programa realizado en LabVIEW™, Figura 4.5, donde por medio de un programa, Figura 4.6, se obtuvieron archivos con extensión txt como los anteriores donde se muestran los valores absolutos de cada ensayo.

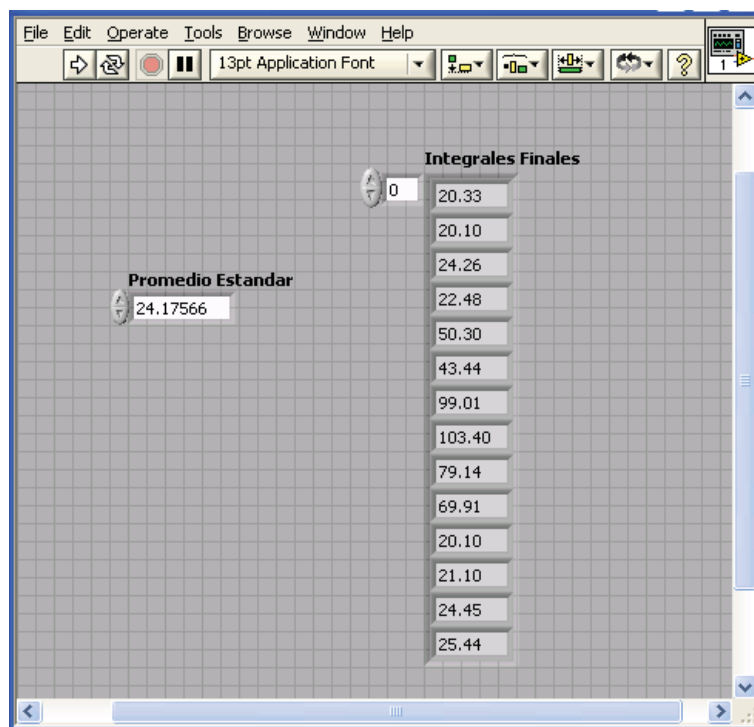


Figura 4.5. Panel frontal para el cálculo de las integrales absolutas de las señales.

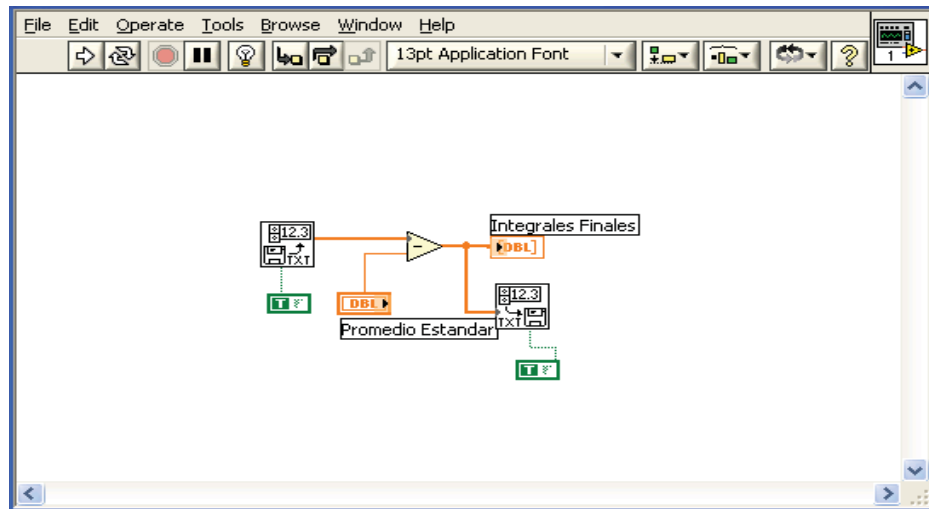


Figura 4.6. Diagrama de bloques para el cálculo de las integrales absolutas de las señales.

4.3. MODELOS MATEMÁTICOS DE ENERGIA PARA ENSAYOS DE LANZA FIJA.

Una vez obtenidos tanto los valores de las energías de agitación, como los valores de las integrales absolutas se pasó a la fase de obtención de los modelos por regresión múltiple.

4.3.1. Modelo Lineal.

Lo anterior se llevo a cabo por medio de un paquete comercial para procesamiento de información mayormente orientado a la minería de datos, MINITAB® 14, Figura 4.7, Se tomaron todos los valores obtenidos de todos los ensayos, es decir, la base de datos generados en la fase experimental y de los cálculos teóricos de energía de agitación.

El modelo lineal obtenido, para el caso en donde la lanza permanece fija sin ángulo de inclinación o movimiento de oscilación, es el siguiente:

$$E_T = 172 - 205 D - 2.35 V - 1.54 P + 0.85 Z + 35.4 F - 0.239 \text{ Int.} \quad (4.1)$$

$$R = 0.77$$

Donde:

E_T = Energía de agitación, Watts.

D = Diámetro de la tobera, mm.

V = Volumen de agua a agitar, L.

P = Posición radial de la lanza, cm.

Z = Profundidad de la lanza, cm.

F = Flujo de aire a inyectar, l/min.

Int = Valor absoluto de la integral de la señal.

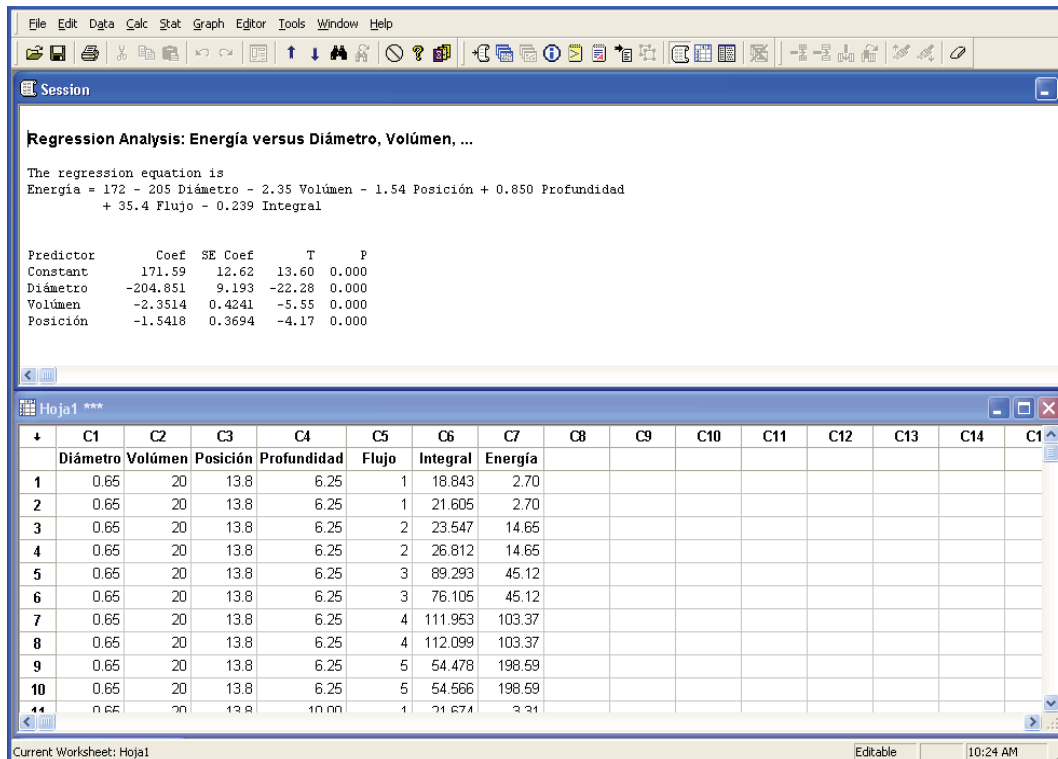


Figura 4.7. Modelo lineal del modelo de lanza no consumible vertical fija.

4.3.2. Modelo Lineal Robusto.

La magnitud de los errores entre lo medido y lo pronosticado se puede lograr si el modelo utilizado puede discriminar las variables que mayor influencia o impactan al proceso. Al ponderar estas variables, es decir, al separar las variables de mayor influencia entonces el nuevo modelo obtenido será mejor, más preciso. Hay que agregar que también funciona si las variables menos significativas son eliminadas del análisis. A esta metodología se le conoce como “Análisis Discriminatorio Robusto” o RDA, por sus siglas en Ingles. La forma de obtener los coeficientes respectivos se hace aplicando el método de los mínimos cuadrados en donde

las variables pueden ser seleccionadas hacia delante (propagación hacia adelante) o hacia atrás (retro propagación). Este método es más preciso puesto que da más peso a las variables que más influyen en el proceso.

Esta operación se llevó a cabo en otro paquete de procesamiento de información conocido como SYSTAT[®] 11, Figura 4.8, ya que MINITAB[®] no cuenta con dicha utilería. El modelo obtenido fue el siguiente:

$$E_T = 20.879 - 29.892 D - 0.403 V - 0.002 P + 0.282 Z + 10.063 F - 0.003 \text{Int.} \quad (4.2)$$

$$R = 0.97$$

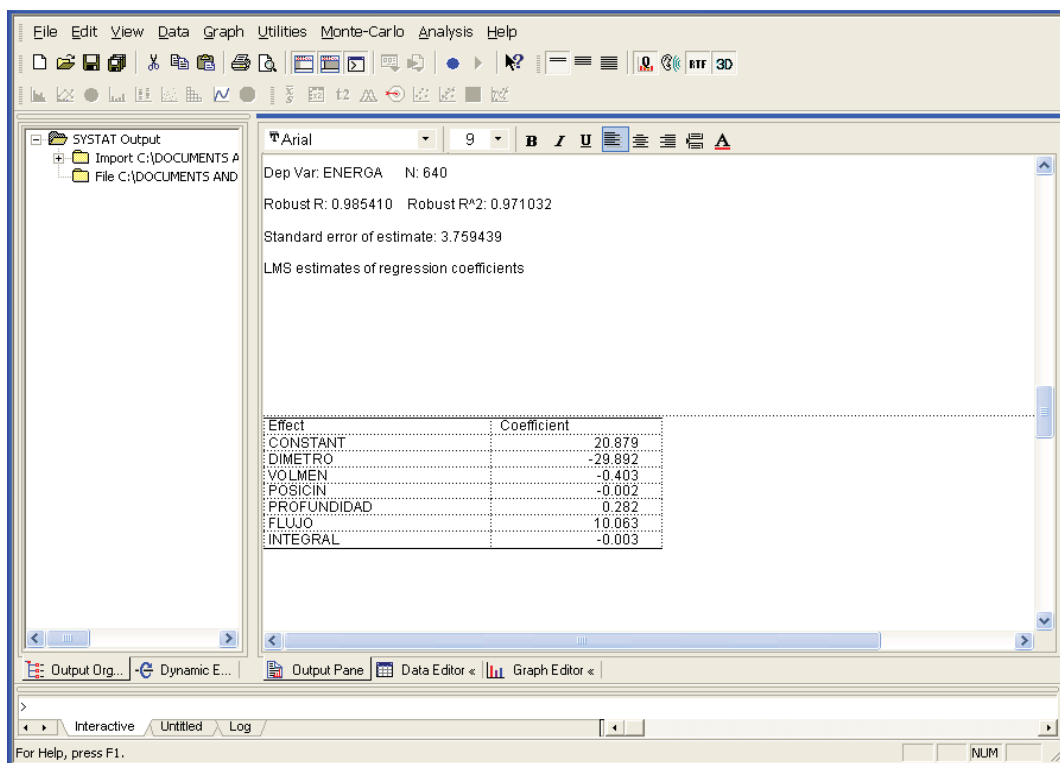


Figura 4.8. Modelo robusto de la lanza en posición vertical fija.

En las ecuaciones lineales 4.1 y 4.2 obtenidas por medio de los dos métodos usados se ve reflejado el efecto que tienen las variables flujo de aire inyectado y diámetro de la tobera en la energía de agitación. El efecto del diámetro de la tobera es negativo, tanto en coeficiente como en los valores de energía de agitación. En ambos modelos se observa que al incrementar

el diámetro, el valor de la energía de agitación decrece lo cual es perjudicial ya que traería un menor homogeneizado del sistema. Por otro lado se observa la influencia positiva (en coeficiente y efecto) del flujo de aire inyectado en la energía de agitación siendo diferente al mostrado con el diámetro, es decir, el aumento en el flujo hace que la energía de agitación aumente.

4.3.3. Modelo con Redes Neuronales Artificiales (RNA).

Los modelos con RNA se obtuvieron utilizando un paquete de aplicación comercial conocido como NeuroShell[®] 2. Este paquete de aplicación es extremadamente amigable, no requiere de programación y maneja prácticamente cualquier formato en la etapa de entrada de datos. Esto le da mucho potencial, ya que información obtenida directamente de una fase de digitalización de señales puede ser procesada sin dificultad en este paquete. La forma de operar este programa, en la opción de principiantes, consiste básicamente en 6 etapas. En la primera se hace la entrada de datos, esta puede ser a partir de una base de datos existente o ser introducida interactivamente, Figura 4.9.

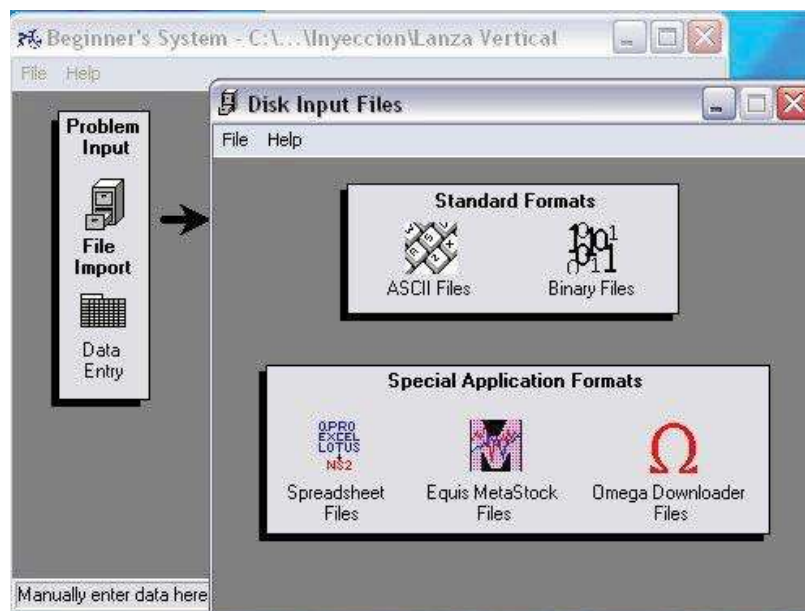
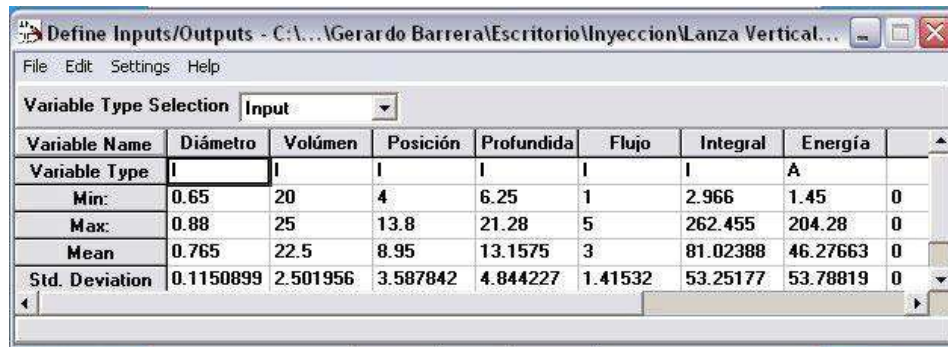


Figura 4.9. Secuencia para la introducción de datos en NeuroShell[®] 2

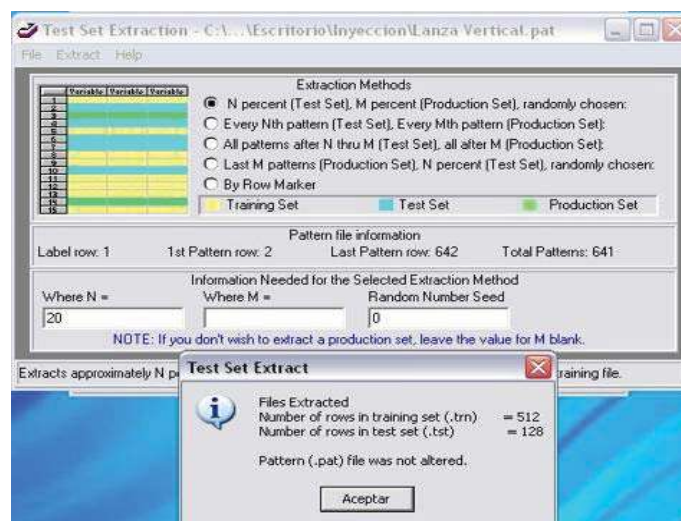
En la segunda fase se definen las entradas y salidas, es decir, se define que variables van a constituir los vectores de entrada y cuál o cuales serán los vectores de salida. Al mismo tiempo se hace la normalización de los datos, paso necesario cuando de modelos de RNA se trata, Figura 4.10.



Variable Name	Diámetro	Volúmen	Posición	Profundida	Flujo	Integral	Energía	
Variable Type							A	
Min:	0.65	20	4	6.25	1	2.966	1.45	0
Max:	0.88	25	13.8	21.28	5	262.455	204.28	0
Mean	0.765	22.5	8.95	13.1575	3	81.02388	46.27663	0
Std. Deviation	0.1150899	2.501956	3.587842	4.844227	1.41532	53.25177	53.78819	0

Figura 4.10. Definición de entradas y salidas de las variables experimentadas

En la tercera etapa se puede hacer una extracción, si así se desea y de una manera totalmente aleatoria, de una muestra de la base de datos con el principal objetivo de tener una serie de datos para probar la efectividad de la red entrenada. A gusto del usuario se puede fijar el tamaño de esta muestra (en porcentaje), el programa también da la opción de hacerlo de manera automática, dependiendo del tamaño de la base de datos y no dejar pocos elementos para la fase de entrenamiento, Figura. 4.11.



Extraction Methods

- ☒ N percent (Test Set), M percent (Production Set), randomly chosen:
- ☐ Every Nth pattern (Test Set), Every Mth pattern (Production Set):
- ☐ All patterns after N thru M (Test Set), all after M (Production Set):
- ☐ Last M patterns (Production Set), N percent (Test Set), randomly chosen:
- ☐ By Row Marker

Training Set Test Set Production Set

Pattern file information

Label row: 1 1st Pattern row: 2 Last Pattern row: 642 Total Patterns: 641

Information Needed for the Selected Extraction Method

Where N = 20 Where M = Random Number Seed 0

NOTE: If you don't wish to extract a production set, leave the value for M blank.

Extracts approximately N p

Test Set Extract

Files Extracted

Number of rows in training set (.trn) = 512

Number of rows in test set (.tst) = 128

Pattern (.pat) file was not altered.

Aceptar

Figura 4.11. Etapa de extracción de elementos para entrenar y de prueba de la RNA.

En la cuarta etapa se lleva a cabo el entrenamiento de la red, fase donde se tienen que definir una serie de parámetros tales como velocidad de aprendizaje, momento, número de neuronas en las capas escondidas, tipo de prueba de error, etc. Figura 4.12.

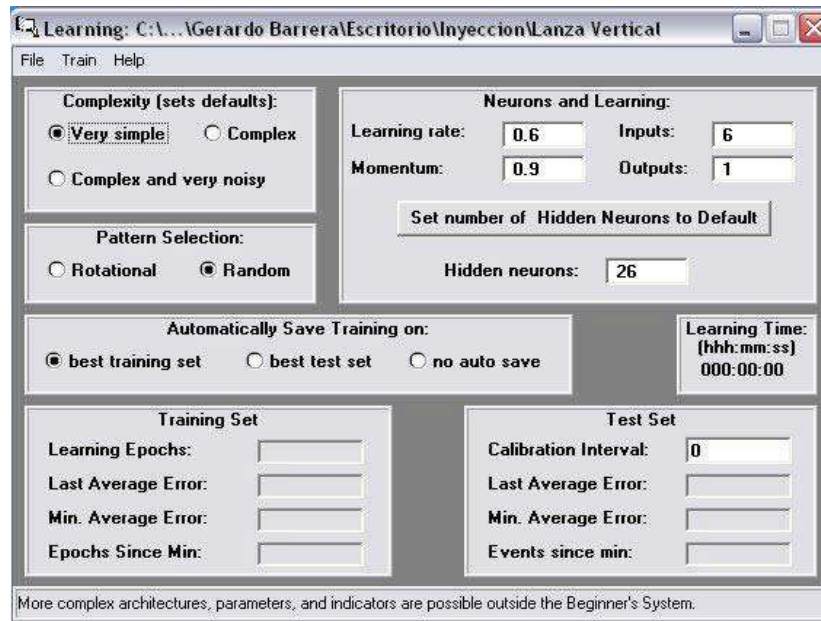


Figura 4.12. Etapa de entrenamiento de la red neuronal artificial.

En la quinta etapa se hace la prueba de la red entrenada, es decir, se mide la eficiencia de la red a través de parámetros estadísticos como R^2 , los errores máximo y mínimos, media cuadrada del error, etc. Figura 4.13. Al finalizar la prueba de la red encontramos que el error al que alcanza en tan solo 30 segundos de entrenamiento fue de 9×10^{-6} , habiendo ejecutado 2463 iteraciones. También se obtiene una base de datos que contienen los valores reales (vector de salida original) y los pronosticados por la red (vector de salida pronosticado por la RNA), ésta base de datos puede ser visualizada automáticamente en el programa de procesamiento de datos que tengamos por definición en nuestra computadora; por ejemplo Excel, Lotus 123, MINITAB®, etc. Esto nos brinda la posibilidad de aprovechar a otro programa, con el que estemos mejor familiarizados y poder hacer así no solo la representación grafica de los resultados, sino llevar a cabo otra serie de pruebas estadísticas.

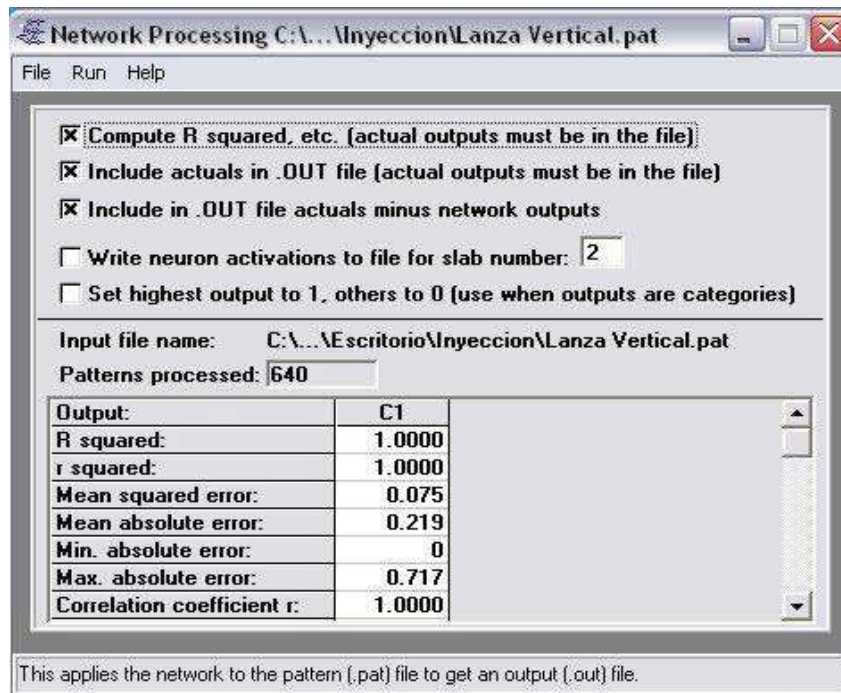


Figura 4.13. Etapa de prueba de la red neuronal entrenada

Finalmente, en la etapa seis se pueden obtener los pesos del modelo RNA utilizado; estos pesos pueden ser exportados a los códigos de lenguajes más populares como C++, Visual Basic, Pascal, Access, FORTRAN, etc. Además puede ser exportado a una rutina tipo DLL (Windows Dynamic Link Library) que obviamente para los familiarizados con el manejo de este tipo de rutinas podrán sacarle mejor provecho y llevar a cabo la aplicación utilizando mejor los recursos del sistema operativo Windows.

El entrenamiento dado a esta red nos ha arrojado un coeficiente de correlación de 1.00, Figura 4.13, lo que indica que los resultados obtenidos por medio del entrenamiento-aprendizaje de la red es tal que los resultados obtenidos por el modelo físico son muy parecidos a los resultados de la red neuronal. En la Figura 4.14 se puede observar con claridad que los valores obtenidos por la red neuronal son los mismos que los obtenidos por los ensayos.

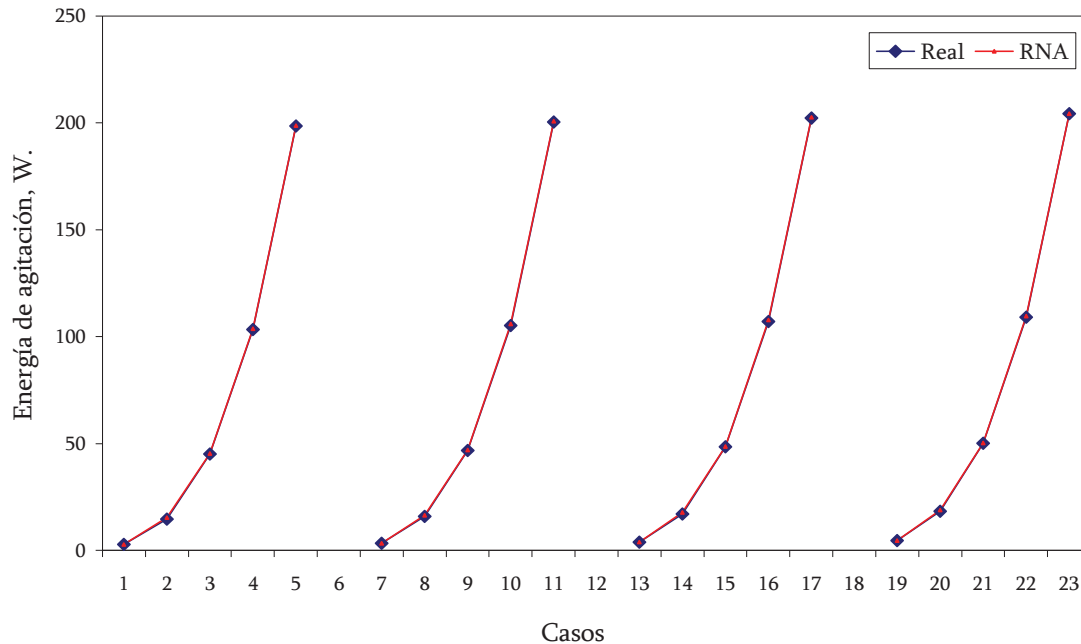


Figura 4.14. Resultados por RNA para los ensayos con lanza a diámetro = 0.65, Posición = 13.8 cm., volumen = 20 litros a las diferentes profundidades y flujos.

4.4. MODELOS MATEMÁTICO DE ENERGÍA DE AGITACIÓN PARA ENSAYOS DE LANZA CON ANGULO DE INCLINACIÓN.

El objetivo del modelado físico es el analizar las condiciones que influyen en la inyección de gases por medio de una lanza que no va a consumirse. Esto brinda la posibilidad de poder manejar ésta de manera tal que podamos aprovechar todas las ventajas que da la inyección con una lanza más fácil de manejar. Una posibilidad es probar diferentes ángulos de inyección, es decir, introducir la lanza al baño metálico con diferentes ángulos de entrada y a diferentes profundidades, de esta manera se podrá además controlar las zonas posibles zonas muertas que se pueden generar con una lanza en la posición vertical y estática.

Utilizando la misma metodología que para la inyección con la lanza en la posición vertical se obtuvieron los siguientes resultados:

4.4.1. Modelo Lineal.

$$E_T = 148 - 195 D - 2.71 V + 0.481 G + 1.19 Z + 35.2 F - 0.281 \text{ Int.} \quad (4.3)$$

$$R = 0.77$$

Donde:

E_T = Energía de agitación, Watts.

D = Diámetro de la tobera, mm.

V = Volumen de agua a agitar, l.

G = Ángulos de inclinación, grados.

Z = Profundidad de la lanza, cm.

F = Flujo de aire a inyectar, l/min.

Int = Valor de la integral de la señal.

4.4.2. Modelo Lineal Robusto.

Usando la misma metodología aquí se obtuvo el siguiente modelo:

$$E_T = 4.759 - 17.051 D - 0.332 V + 0.001 G + 0.539 Z + 10.723 F - 0.032 Int. \quad (4.4)$$

$$R = 0.97$$

En las ecuaciones lineales 4.3 y 4.4 las variables que más influencia tienen en la energía de agitación son el diámetro de la tobera y el flujo de aire inyectado como se observó en las ecuaciones 4.1 y 4.2. De igual manera se repite el patrón de comportamiento de las variables antes mencionadas al aumentar el diámetro de la tobera, la energía de agitación disminuye y de manera inversa sucede con el aumento del flujo de aire inyectado. La discusión de los resultados se da a detalle en la sección 4.11.

4.5. ENSAYOS DE LANZA CON MOVIMIENTO DE OSCILACIÓN.

Una vez realizado el modelado físico de la lanza con ángulos de inclinación surgió la interrogante de cómo sería la energía de agitación o tiempos de homogeneizado si la lanza no permaneciera estática sino se le aplicara a ésta un movimiento oscilatorio, es decir, de un lado a otro dentro de un cierto ángulo. El sentido común nos dice que podemos agitar de una

manera más eficiente. Ya que los patrones de agitación generados son más vigorosos y al mover más el metal forman menos zonas muertas y la energía aplicada al sistema es mayor.

Sin embargo, las ecuaciones que se tienen para el cálculo de energías de agitación no son aplicables para éste tipo de experimentos ya que se introduce una variable más dentro de la ecuación tomando en cuenta la energía aportada por el motor, la lanza en movimiento y cómo afectan éstos en las otras variables como es el caso de la altura.

Se realiza el análisis de energía de agitación del sistema con la lanza en movimiento de forma indirecta por medio de los tiempos de mezclado ya que están íntimamente ligados. Dicho análisis se discutirá posteriormente, una vez obtenidos los resultados de los tiempos de mezclado (Sección 4.8 y 4.11).

4.6. ANÁLISIS PARA LOS TAPONES POROSOS.

Para el caso de los tapones porosos se llevó a cabo el modelado físico involucrando las variables mencionadas en el capítulo 3, Tabla 3.III. Haciendo el cálculo de las integrales tanto de los ensayos como de los estándares se obtuvieron los valores de las integrales absolutas para cada ensayo.

Como se puede observar en el caso de los tapones las únicas variables a considerar fueron posición radial, flujo de aire y volumen a agitar, por lo que el análisis de las integrales se llevó a cabo en función de éstas.

Los modelos matemáticos calculados para los tapones porosos, al igual que para el caso de las lanzas, se tomó el valor de la señal del acelerómetro, intensidad de las vibraciones medidas en mV, en función de las variables experimentales.

4.6.1. Modelo Lineal.

Por medio del paquete para minería de datos MINITAB[®] mostrado en la Figura 4.15, y con los datos obtenidos del modelado físico para los tapones porosos se obtuvo el siguiente modelo:

$$\text{Integral} = 0.6 + 0.648 V - 3.6 P + 13.8 F \quad (4.5)$$

$$R = 0.71$$

Donde:

Integral = Integral de las vibraciones, mV.

V = Volumen de agua a agitar, l.

P = Posición radial de los tapones, cm.

F = Flujo de aire a inyectar, l/min.

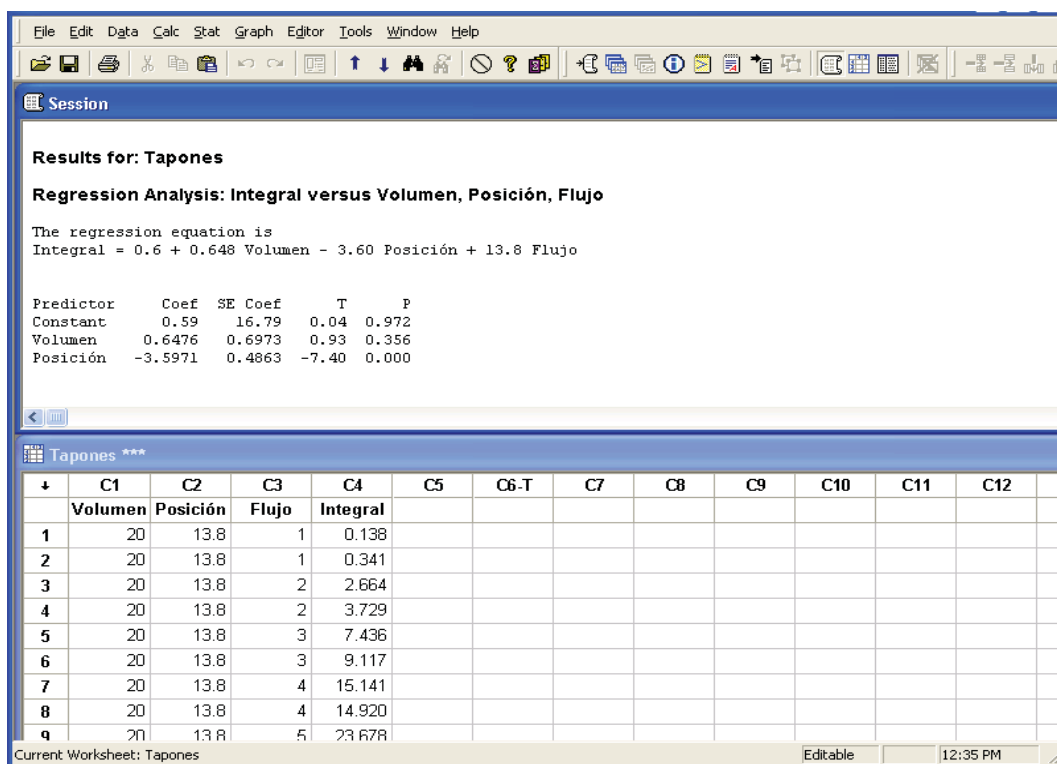


Figura 4.15. Modelo lineal de los tapones porosos.

4.6.2. Modelo Lineal Robusto.

De igual forma que para el caso de la lanza se realizó un modelo robusto para los tapones porosos por medio del paquete estadístico SYSTAT[®] 11, mostrado en la Figura 4.16. Dando el modelo siguiente:

$$\text{Integral} = -16.306 + 0.684 V - 0.324 P + 5.641 F \quad (4.6)$$

$R = 0.98$

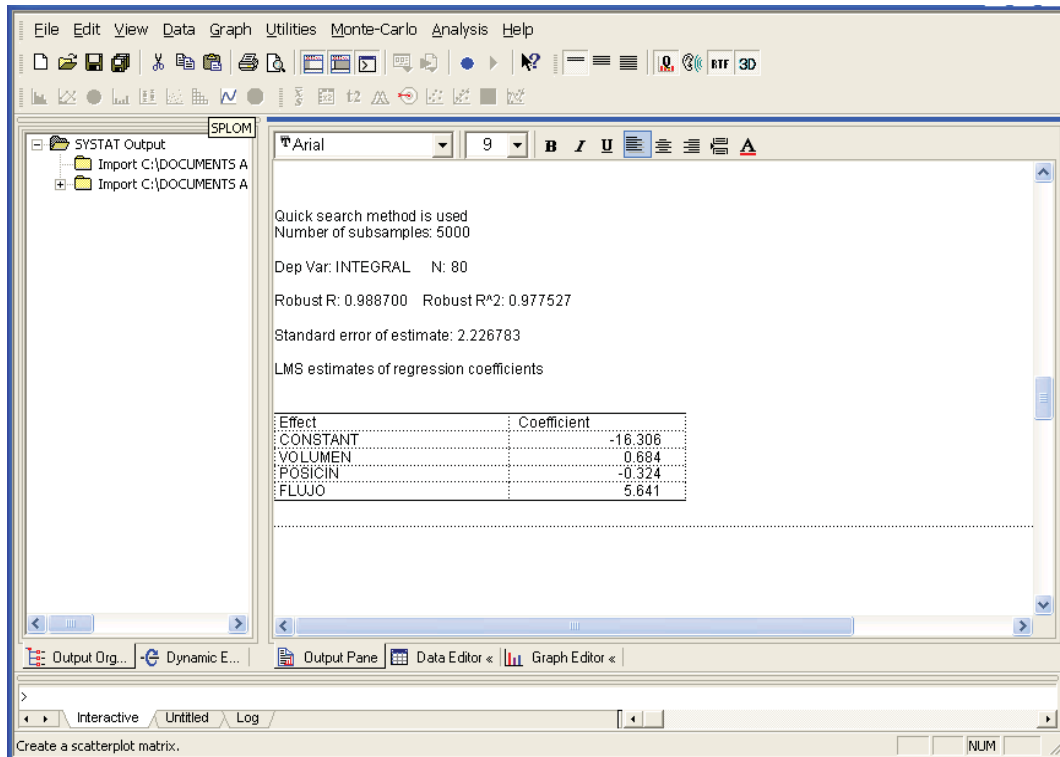


Figura 4.16. Modelo robusto de los tapones porosos.

Las ecuaciones lineales 4.5 y 4.6 muestran que la variable con el mayor efecto en el modelo es el flujo de aire a inyectar ya que al aumentar éste la magnitud de las vibraciones incrementa. Por otro lado se observa que al irse alejando la posición de los tapones del borde de la olla, la magnitud de las vibraciones decrece.

4.6.3. Modelo con Redes Neuronales Artificiales (RNA).

Para el caso del modelo con RNA aplicado a los datos obtenidos de los ensayo con los tapones porosos, de la misma forma que para los datos obtenidos con la lanza se obtuvo el modelo RNA con un coeficiente de correlación de 0.99, Figura 4.17.

En la Figura 4.18 se puede observar la grafica con los datos obtenidos tanto en los ensayos como por la red en donde se puede apreciar que son muy similares tomando en cuenta que el sistema es diferente con respecto al de la lanza debido que éste es en función del valor de la

integral (magnitud de la intensidad las vibraciones) y los de la lanza están en función de la energía.

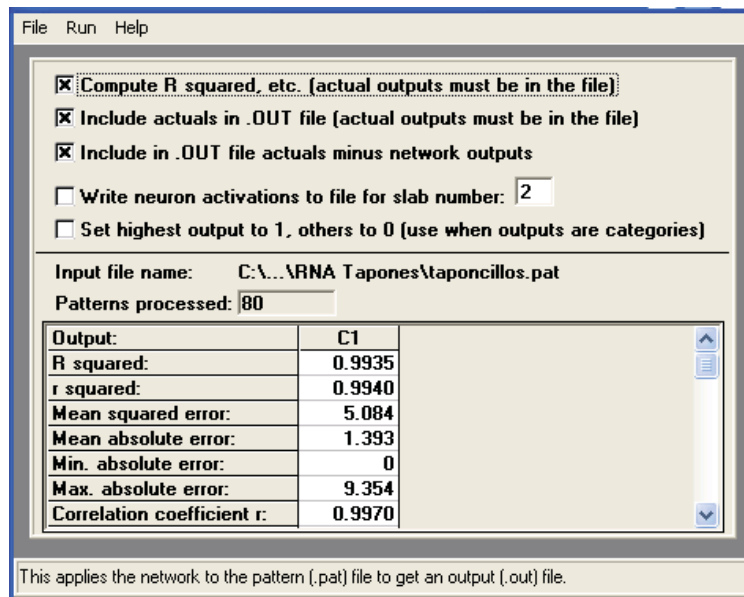


Figura 4.17 Coeficiente de correlación de la RNA para los ensayos con tapones porosos.

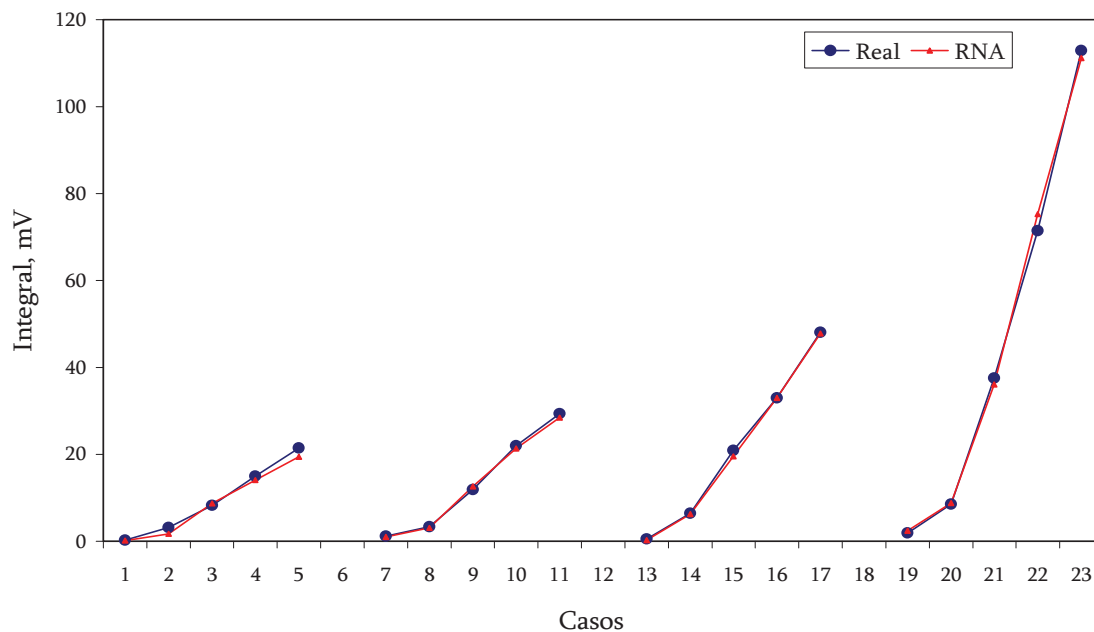


Figura 4.18. Resultados por RNA para los ensayos con tapones porosos, volumen de 20 litros, diferentes posiciones y flujos.

4.7. CALCULO DE TIEMPOS DE MEZCLADO.

Como se mencionó en el capítulo anterior para medir los tiempos de mezclado o tiempos de homogeneizado se utilizaría una celda fotovoltaica y mediante el cambio de coloración del agua se inferiría en el tiempo que tarda en mezclarse completamente el agua al ser adicionado un agente trazador al medio. En la Figura 4.19 se muestra la señal característica de la celda fotovoltaica, para las condiciones fijadas en dicho experimento en particular. Como puede observarse durante aproximadamente los primeros 3 segundos la señal es constante, 0.39 V. Al ser adicionado el trazador la señal cae hasta valores de 0.37 V y tarda un cierto tiempo en volverse a estabilizar la señal, Esto quiere decir que el agua tardo aproximadamente 24 segundos en adquirir el mismo color, es decir, en homogeneizarse completamente como se muestra en la Figura 4.20. Este nuevo valor de voltaje fue, para ese experimento en particular de 0.387 V. De esta manera se calcularon los tiempos de mezclado para cada uno de los ensayos realizados.

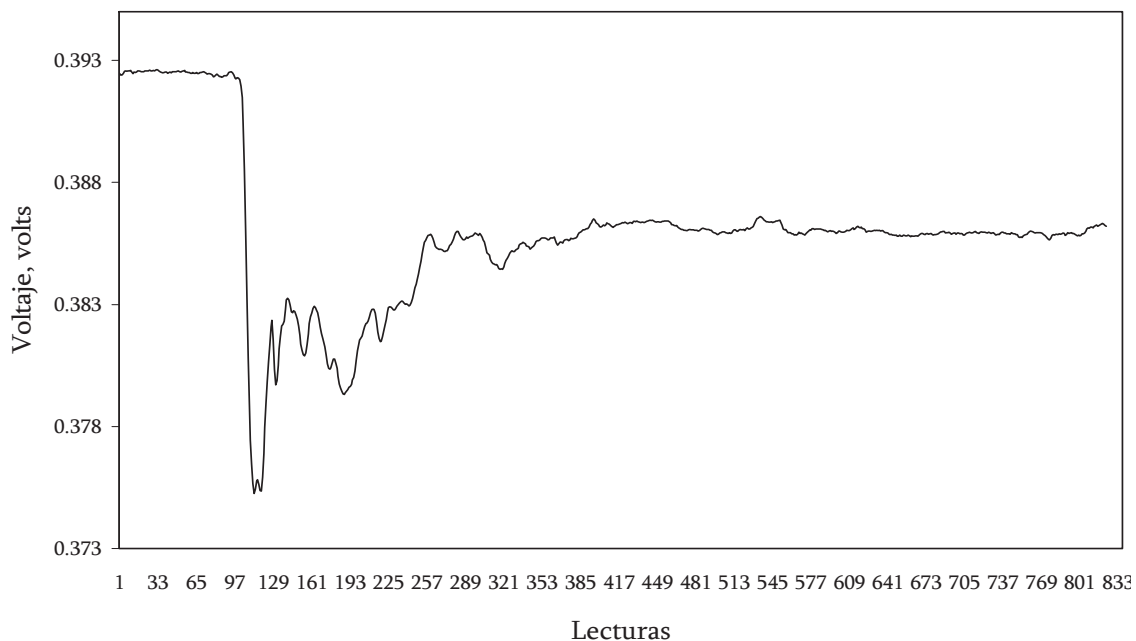


Figura 4.19. Señal obtenida por la celda fotovoltaica a un diámetro de 1 mm, volumen 20 l, movimiento de oscilación de 5 grados, profundidad 6.25 cm. y flujo 5 l/min.

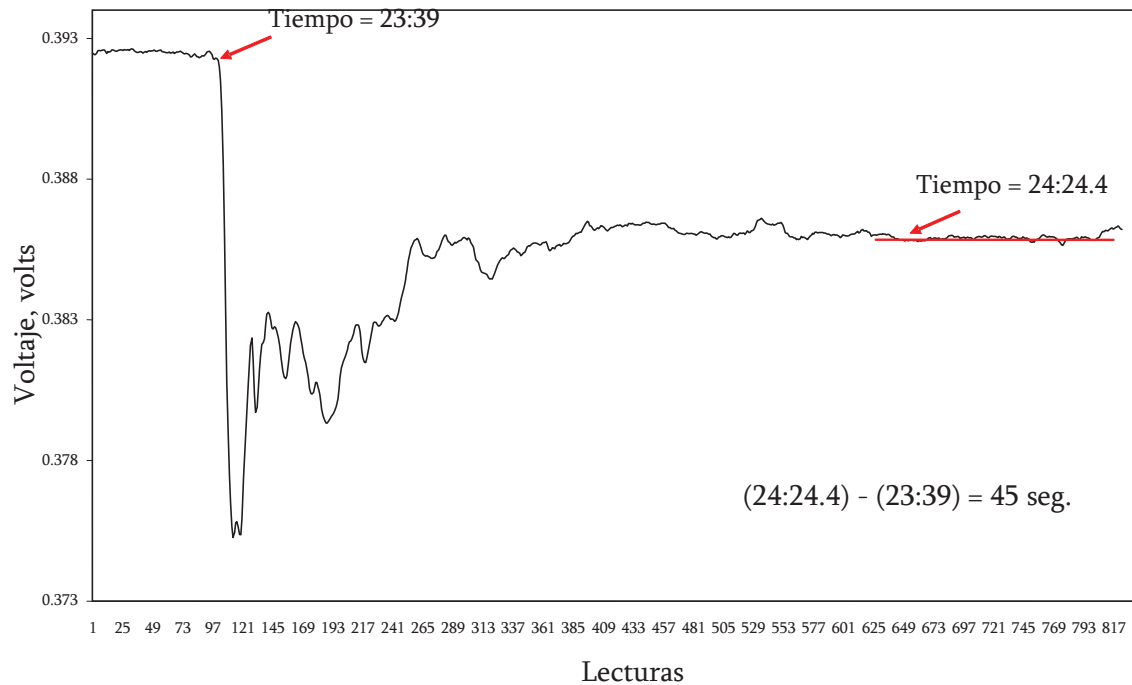


Figura 4.20. Cálculo del tiempo de mezclado de la señal de la celda fotovoltaica.

4.8. MODELOS MATEMÁTICOS PARA CALCULAR LOS TIEMPOS DE MEZCLADO PARA ENSAYOS CON LANZA CON MOVIMIENTO DE OSCILACIÓN.

Una vez obtenidos todos los tiempos de mezclado se calcularon los modelos matemáticos para el tiempo de mezclado.

4.8.1. Modelo Lineal.

Utilizando el paquete comercial para minería de datos MINITAB[®] 14, se llevo a cabo el cálculo del modelo lineal múltiple Figura 4.21, se obtuvo el siguiente modelo:

$$T_m = 36.3 + 3.51 V - 0.141 G - 2.69 Z - 8.9 F + 0.154 \text{ Int.} \quad (4.7)$$

$$R = 0.77$$

Donde:

T_m = Tiempo de mezclado, seg.

V = Volumen a agitar, l.

G = Movimiento de oscilación, grados.

Z = Profundidad de la lanza, cm.

F = Flujo de aire a inyectar, l/min.

Int = Valor de la integral de la señal.

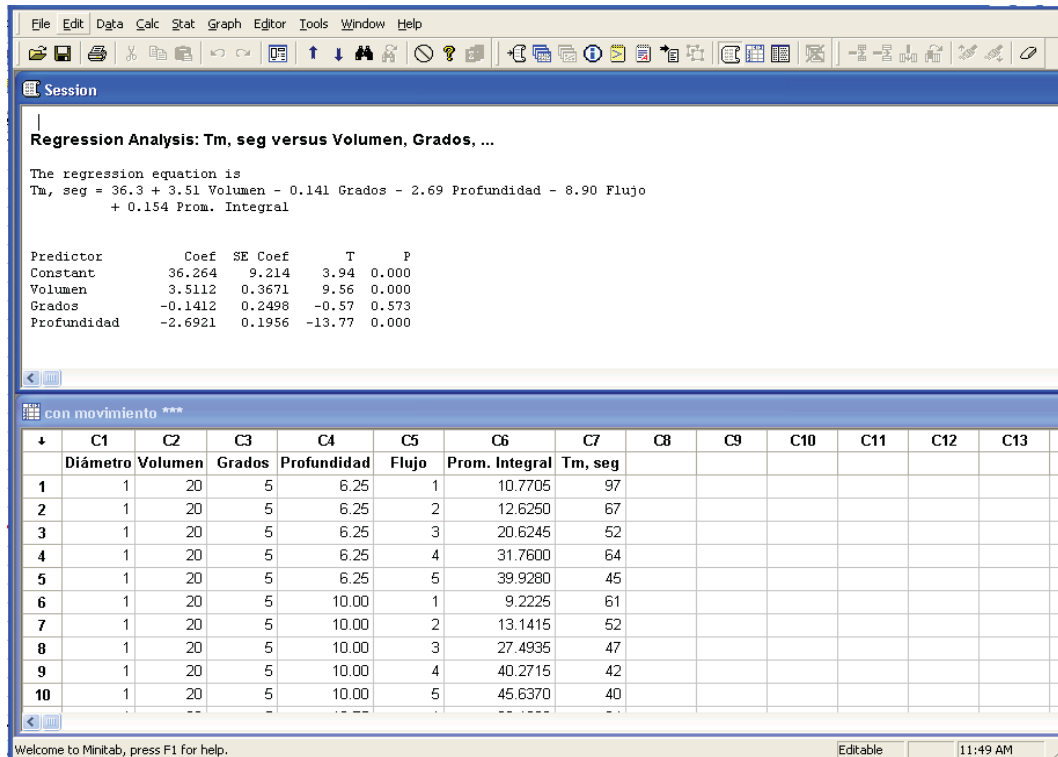


Figura 4.21. Modelo lineal para el cálculo del tiempo de mezclado para la lanza con movimiento de oscilación.

4.8.2. Modelo Lineal Robusto.

Utilizando el paquete comercial para minería de datos y estadística SYSTAT[®] 11, Figura 4.22, se obtuvo el modelo robusto para encontrar los tiempos de mezclado para cuando se inyectan gases a través de una lanza que tiene un movimiento oscilatorio:

$$T_m = 0.753 + 4.343 V + 0.436 G - 1.96 Z - 9.472 F + 0.32 \text{ Int.} \quad (4.8)$$

$$R = 0.90$$

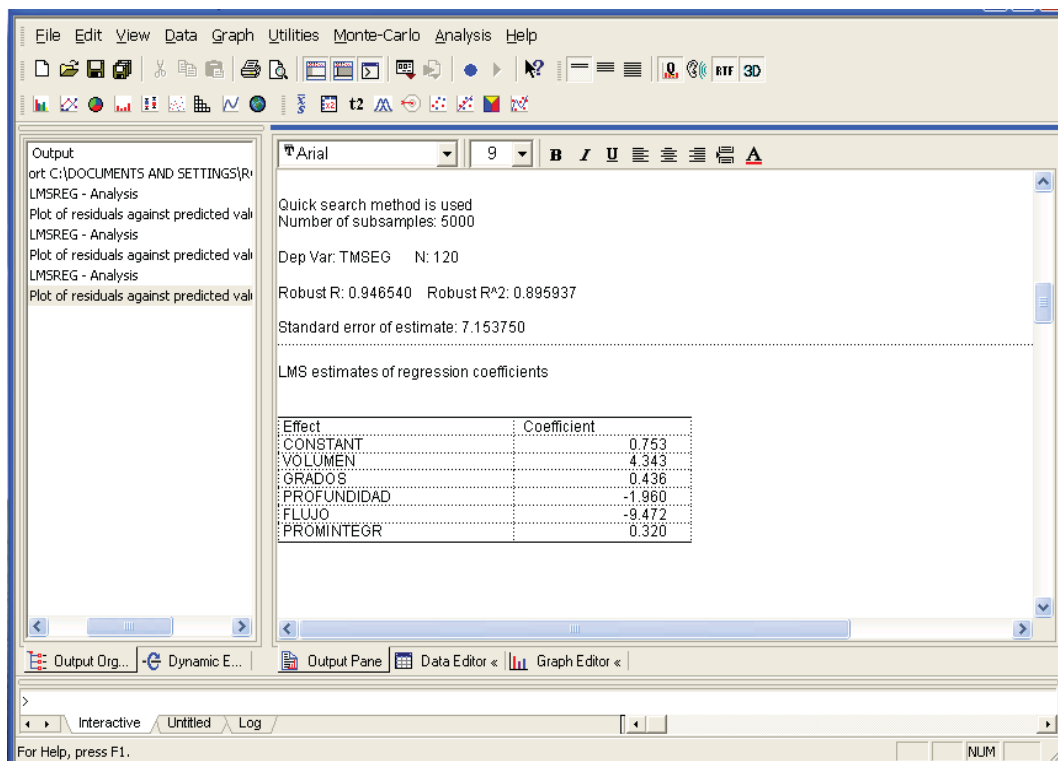


Figura 4.22. Modelo robusto para el cálculo de tiempos de mezclado para la lanza con movimiento de oscilación.

En las ecuaciones 4.7 y 4.8 se observa el efecto del volumen a agitar y el flujo de aire inyectado. Al incrementar el volumen a agitar da como consecuencia un tiempo de mezclado más alto siendo perjudicial para el sistema ya que lo que se quiere alcanzar son los tiempos de mezclado más cortos. Para el caso del efecto del flujo de aire en los tiempos de mezclado se puede observar que al incrementar éstos, los tiempos de mezclado disminuyen.

4.8.3. Modelo con Redes Neuronales Artificiales (RNA).

Se procesó la base de datos obtenida en el paquete comercial NeuroShell[®] 2, para entrenamiento de redes neuronales artificiales. El modelo obtenido mostró muy buenas características estadísticas; con un coeficiente de correlación de 0.94 mostrado en la Figura 4.23. En la gráfica 4.24 se puede observar la relación existente entre los datos obtenidos por los ensayos y los pronosticados por la red neuronal.

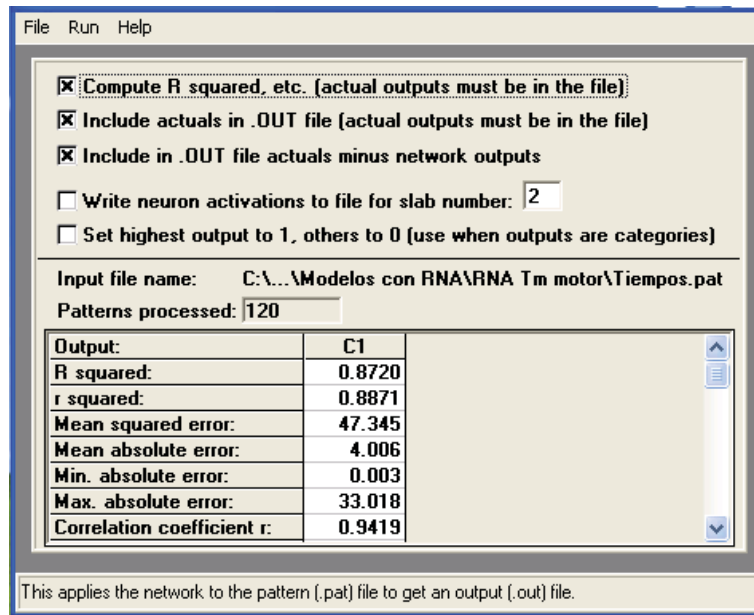


Figura 4.23. Coeficiente de correlación de los ensayos para los tiempos de mezclado por RNA.

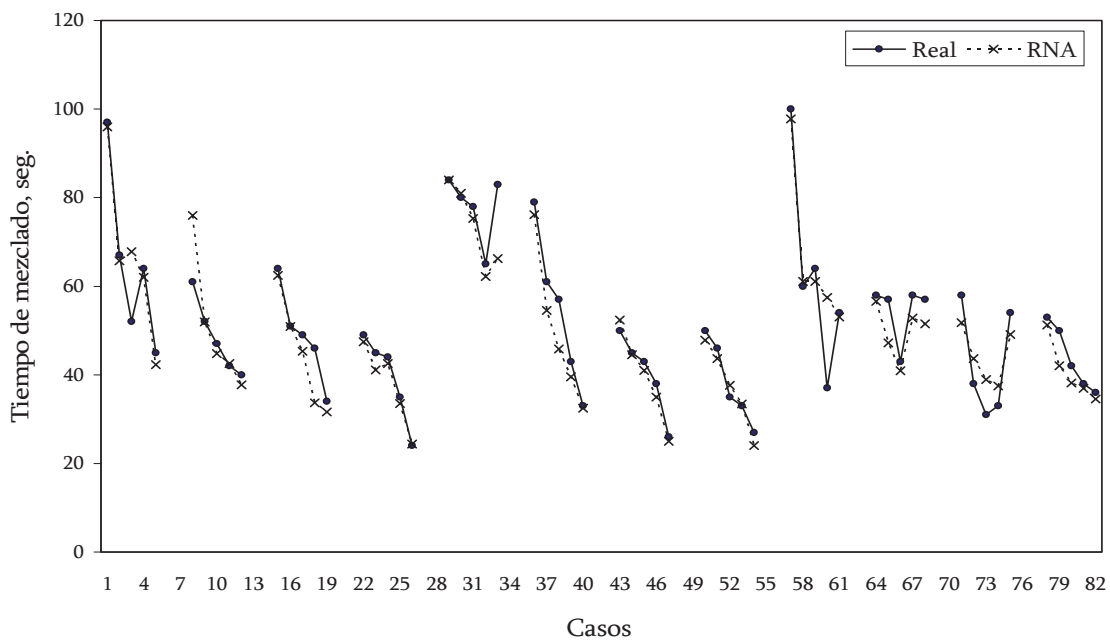


Figura 4.24. Resultados pronosticados por la RNA para los ensayos de tiempo de mezclado: diámetro de 1 mm., volumen de 20 litros, ángulos de 5, 10 y 15° a diferentes profundidades y flujos.

4.9. TIEMPO DE MEZCLADO PARA LOS TAPONES POROSOS.

Los modelo matemáticos usados como comparación con respecto a la lanza fueron los obtenidos por medio de un modelado físico realizado con anterioridad^[40] utilizando como elementos sensores la celda fotovoltaica y termopares, usando las mismas variables y condiciones del presente trabajo experimental. Los modelos obtenidos fueron los siguientes:

4.9.1. Modelo Lineal.

$$T_m = 0.1967 V - 1.0303 F - 0.0396 P \quad (4.9)$$

$$R = 0.89$$

4.9.2. Modelo No Lineal.

$$T_m = 0.3482 V + 0.3444 P - 0.0033 V^2 - 0.0041 P^2 + 0.0743 F^2 \quad (4.10)$$

$$R = 0.96$$

En las ecuaciones 4.9 y 4.10 se observa que a mayor volumen a agitar el tiempo de mezclado aumenta. Cuando aumenta el flujo de aire el tiempo de mezclado disminuye y aumenta cuando los tapones porosos se van acercando a la orilla de la olla.

4.10. DISCUSION DE LOS RESULTADOS DE ENERGIA DE AGITACIÓN Y LA RELACIÓN CON EL TIEMPO DE MEZCLADO.

De la Figura 3.14, es de esperar que a un valor grande, en magnitud, de la energía de agitación necesariamente conduzca a obtener tiempos de mezclado más cortos en la olla de refinación secundaria. Es decir un valor alto en la intensidad de las vibraciones representa un menor tiempo en la velocidad de mezclado, es decir, un tiempo de homogeneizado más pequeño.

4.10.1 Experimentos con la Lanza

De lo observado en los modelos matemáticos de los experimentos de inyección de aire con la lanza, ecuaciones 4.1 y 4.2, se deduce que las variable que más afectan a la energía de agitación del sistema son el flujo de aire a inyectar y el diámetro aunque su efecto sea de

manera distinta para el beneficio del sistema, ya que al incrementarse la cantidad de aire al sistema la energía de agitación se incrementa de manera significativa debido a que se induce una mayor cantidad de energía cinética y potencial al modelo de la olla de refinación secundaria por efecto del gas y esto lo podemos observar en la señal del acelerómetro ya que éste registra una mayor intensidad en las vibraciones de acuerdo a la Figura 4.2 en comparación con la Figura 4.1 donde se puede apreciar el aumento en la intensidad de las vibraciones en función del flujo de aire inyectado.

Un comportamiento contrario se presenta al incrementar el diámetro de la tobera.

Considerando que el flujo superficial del aire inyectado (Q_g , cm/s) se obtiene de la siguiente expresión:

$$Q_g = \frac{V}{A} = \frac{\text{Flujo Volumétrico de aire, cm}^3/\text{s}}{\text{Area Transversal de la lanza, cm}^2} \quad (4.11)$$

De la anterior expresión se deduce que para un flujo constante de aire inyectado Q_g aumenta al disminuir el diámetro de la lanza y disminuye al aumentar el diámetro de la misma.

De acuerdo a lo anterior, al aumentar el diámetro de la tobera (p.e. de 0.65 a 1 mm), la suma de las energías cinética y potencial disminuye y la energía de agitación por consecuencia también decrece.

Por otra parte al aumentar el volumen de agua a agitar, se observa una disminución en la energía de agitación ya que para mover mayor volumen de líquido se requiere de mayor cantidad de energía cinética y potencial del gas. Observándose en los modelos matemáticos obtenidos.

Es posible observar en cualquiera de los modelos matemáticos obtenidos que la profundidad de la lanza también tiene un efecto en la energía de agitación y, por lo tanto, en el tiempo de mezclado. Al posicionar la lanza a una mayor profundidad la energía inducida en el sistema también se ve incrementada como se muestra en la Figura 4.25. Esto se debe a que la nube de burbujas (fracción de gas) que asciende hacia la superficie está más tiempo en contacto con el metal, además de que este fenómeno se ve potenciado en el proceso real ya que las burbujas

tenderán a incrementar su tamaño, por efecto de la presión ferrostática y el efecto de la temperatura del metal. Resumiendo; esto quiere decir que la masa de burbujas estará más tiempo en contacto con el líquido cuando la lanza se encuentra a mayor profundidad en la olla que estando la lanza muy cerca de la superficie del mismo.

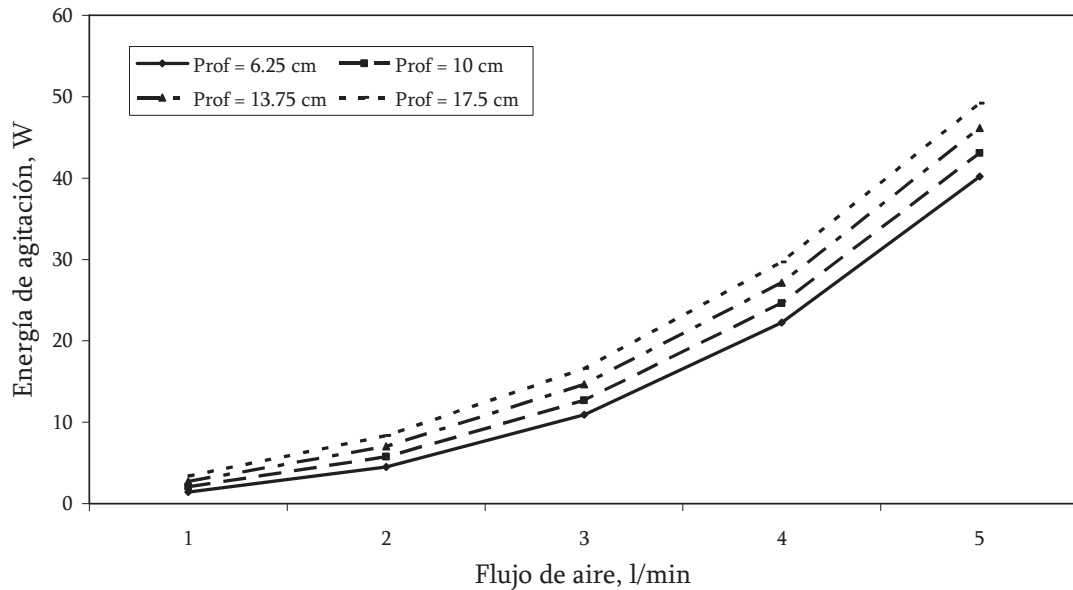


Figura 4.25. Efecto de la profundidad de la lanza en la energía de agitación.

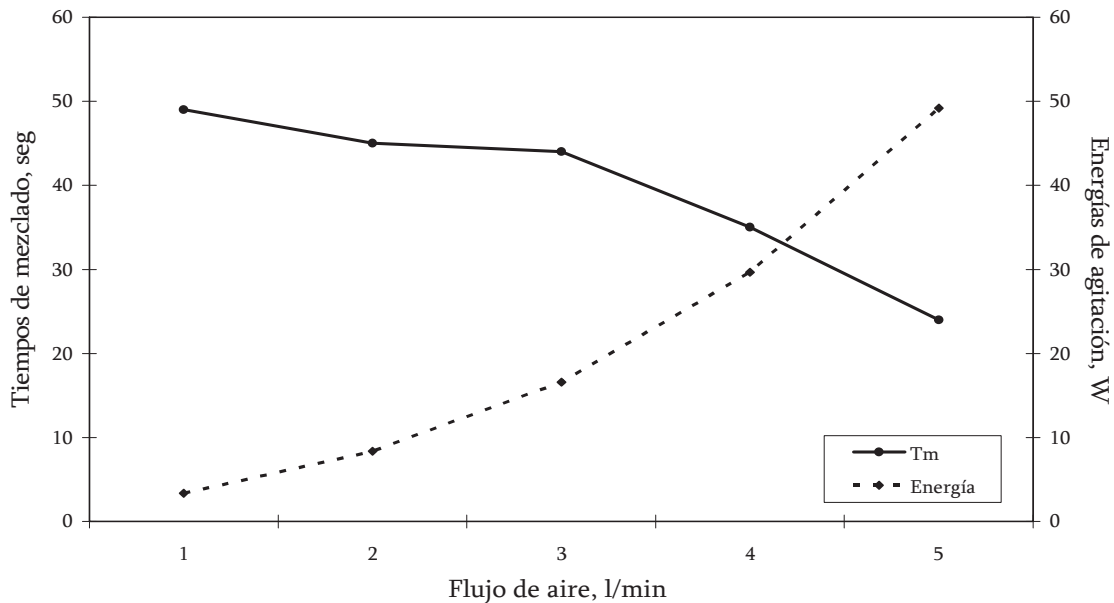


Figura 4.26. Tiempo de mezclado y energía de agitación en función del flujo de aire inyectado para: diámetro 1 mm, volumen 20 l, movimiento de oscilación ± 5 grados y profundidad de la lanza 17.5 cm.

En la Figura 4.26 se observa que a energías de agitación más grandes se tienen tiempos de mezclado más cortos. Así mismo se puede observar que al incrementar el flujo de aire, una de las variables que más influye en el sistema, se incrementa la energía de agitación y los tiempos de mezclado se hacen más cortos.

En la Figura 4.27 Se observa el efecto que tiene la inyección de aire en el modelo de olla de refinación secundaria cuando la lanza es introducida y mantenida con ciertos ángulos de inclinación sobre la energía de agitación y los tiempos de mezclado. Se pudo ver que éstos tienen muy poca influencia en la energía de agitación, sin embargo, en los tiempos de mezclado se observa una gran influencia. Esto es debido a que al tener un movimiento oscilatorio se homogeneiza más rápidamente el sistema al tener patrones de agitación más favorables. Hay que hacer notar que esto no contradice lo que ya anteriormente se había encontrado sino que para este caso en particular no se consideró la energía de agitación aportada por la lanza debido a este movimiento oscilatorio, es decir, la energía aportada por el motor, a través del movimiento de la lanza no fue considerada en el cálculo final de ésta.

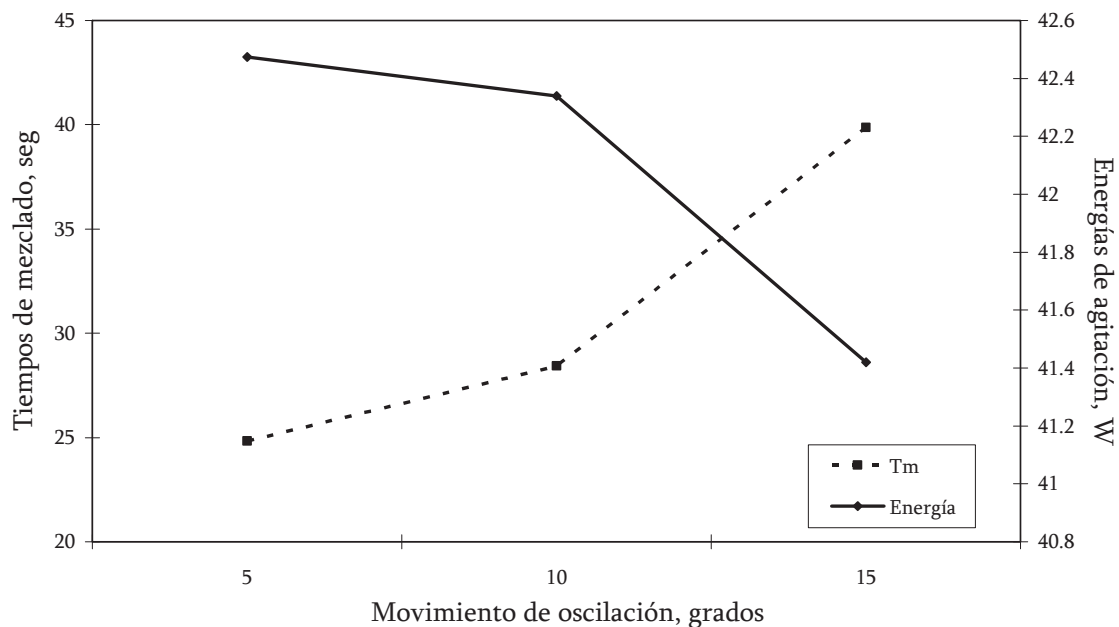


Figura 4.27. Efecto del movimiento oscilatorio (grados) en el tiempo de mezclado y la energía de agitación a las mismas condiciones de experimentación.

Tomando en cuenta el efecto que tienen los ángulos a los que es introducida la lanza en el modelo de la olla y para todos estos experimentos, sobre el tiempo de mezclado, se observa que al incrementar el ángulo de inclinación se tienen mejores tiempos de homogeneizado, es decir, más cortos, Figuras 4.28 y 4.29. Esto puede ser debido a que al tener un mayor ángulo la lanza, con respecto a la vertical, se crea un patrón de circulación más vigoroso, tipo remolino, y, por lo tanto, tenderá a desplazar un mayor volumen de agua. Al incrementarse los ángulos de inclinación los tiempos de mezclado son menores en el sistema a agitar bajo las mismas condiciones experimentales.

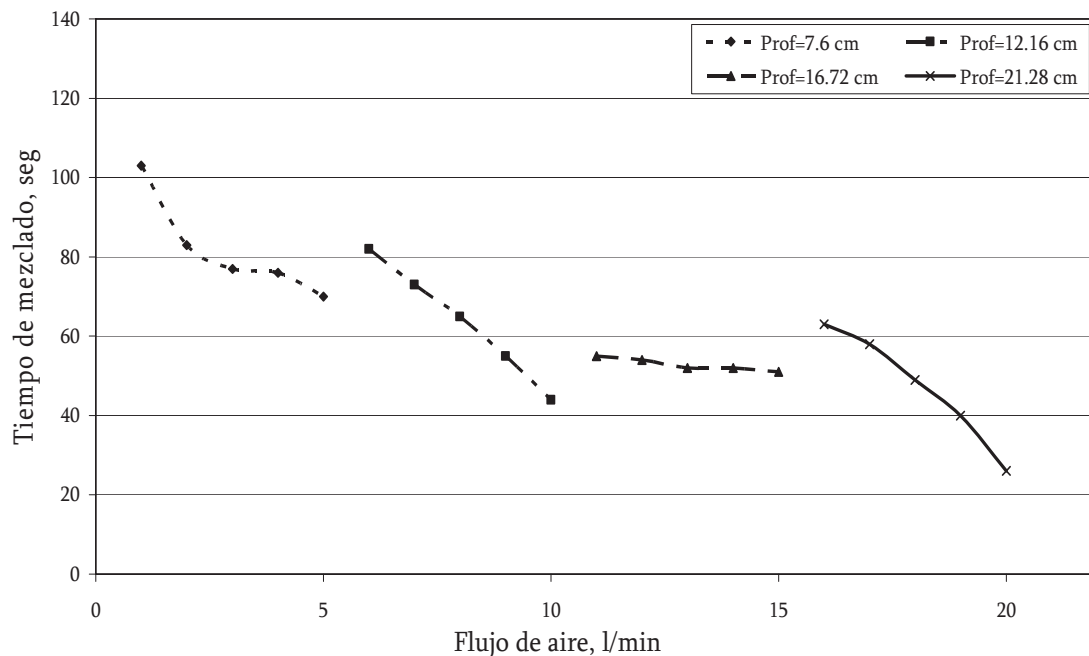


Figura 4.28. Influencia del movimiento de oscilación en el tiempo de mezclado; diámetro: 1 mm, volumen: 25 l y movimiento de oscilación: ± 5 grados a 27 ciclos/min.

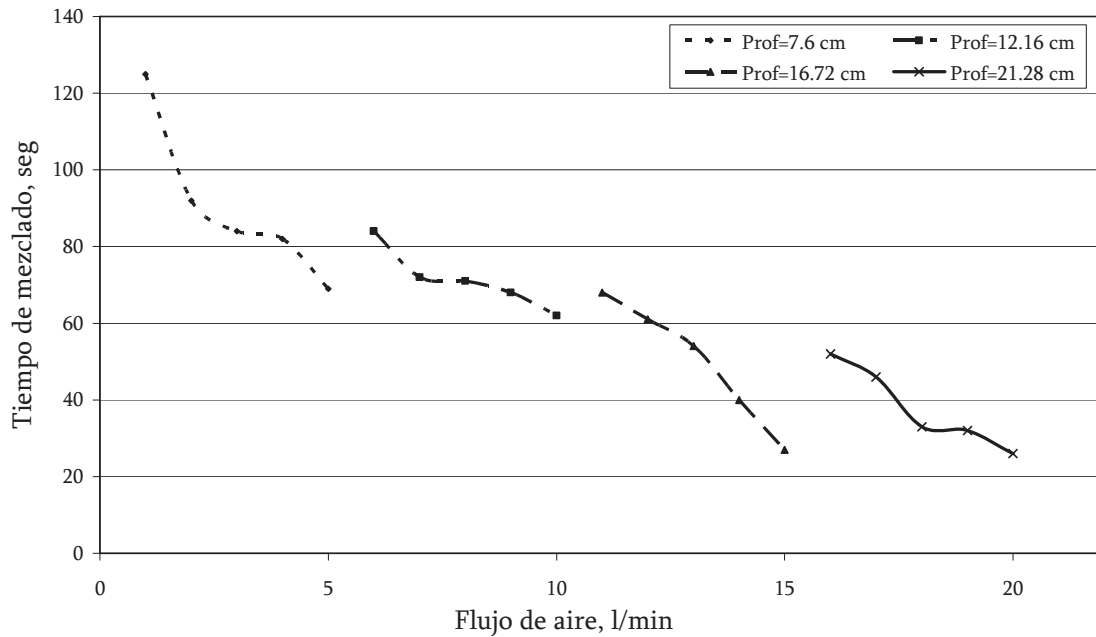


Figura 4.29. Influencia del movimiento de oscilación en el tiempo de mezclado; diámetro: 1 mm, volumen: 25 l y movimiento de oscilación: ± 15 grados a 16 ciclos/min.

Aquí es oportuno hacer la siguiente observación y consideración respecto a la energía de agitación y la magnitud de las vibraciones que fueron calculadas y obtenidas en la fase experimental, que a final de cuentas es la relación que estamos buscando como medio para controlar la fase de inyección de gases en el proceso de refinación secundaria.

Como se notó en los modelos lineales, ya fuera el tradicional y el robusto, muestran que la magnitud de las vibraciones tiene un efecto pequeño y negativo, coeficiente numérico pequeño, sobre la energía de agitación, es decir, que a medida que la magnitud de las vibraciones se incrementa la energía de agitación disminuye. Esto contradice lo que encontramos en los experimentos, es decir, que a medida que la magnitud de las vibraciones captadas por el acelerómetro crece, la energía de agitación también se incrementa como lo muestra la Figura 4.30.

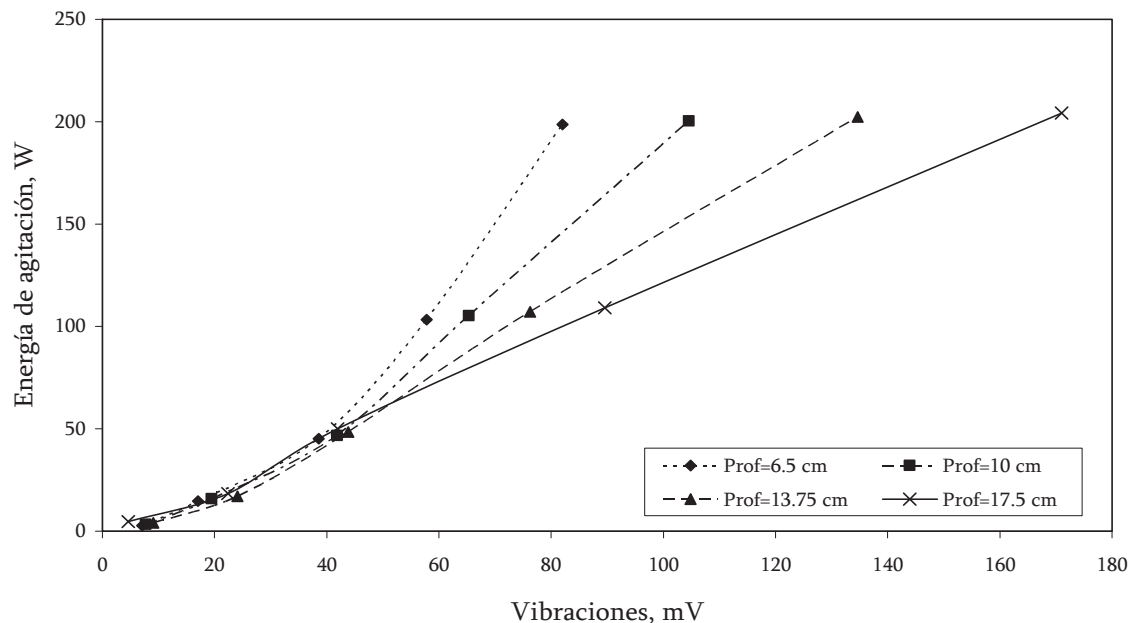


Figura 4.30. Relación entre la magnitud de las vibraciones y la energía de agitación en función de la profundidad y flujos de aire.

Esta aparente discrepancia se debe de atribuir, primero, a que la energía de agitación se basa en un cálculo teórico ya que es prácticamente imposible calcularla a través de dispositivos de medición y por otro lado las vibraciones son mediciones hechas con un dispositivo de medición, es decir, son experimentales. Por ejemplo cuando se lleva a cabo la agitación del baño con la lanza en movimiento es muy difícil calcular cuál es la cantidad de energía suministrada al baño, es decir, se debe de considerar que el motor con que mueve la lanza está transmitiendo de alguna manera, mediante el torque ejercido por la lanza dicha energía. Esto equivale a tratar de calcular cuál sería la energía que se suministra, por ejemplo, a una taza de café, cuando agitamos a éste con una cuchara. Es obvio que la agitación aplicada por el movimiento de la cuchara es mucho más eficiente, energía de agitación, que si se agitara con aire a través de una pajilla, por ejemplo. Ahora bien la energía de agitación es medida, indirectamente, con el acelerómetro ya que, como se puede observar en las Figuras 4.25 y 4.31, a medida que variables como flujo y profundidad de la lanza, que tienen una gran influencia en el fenómeno de agitación, se incrementan, tanto la energía de agitación como la magnitud de las vibraciones se comportan de manera similar.

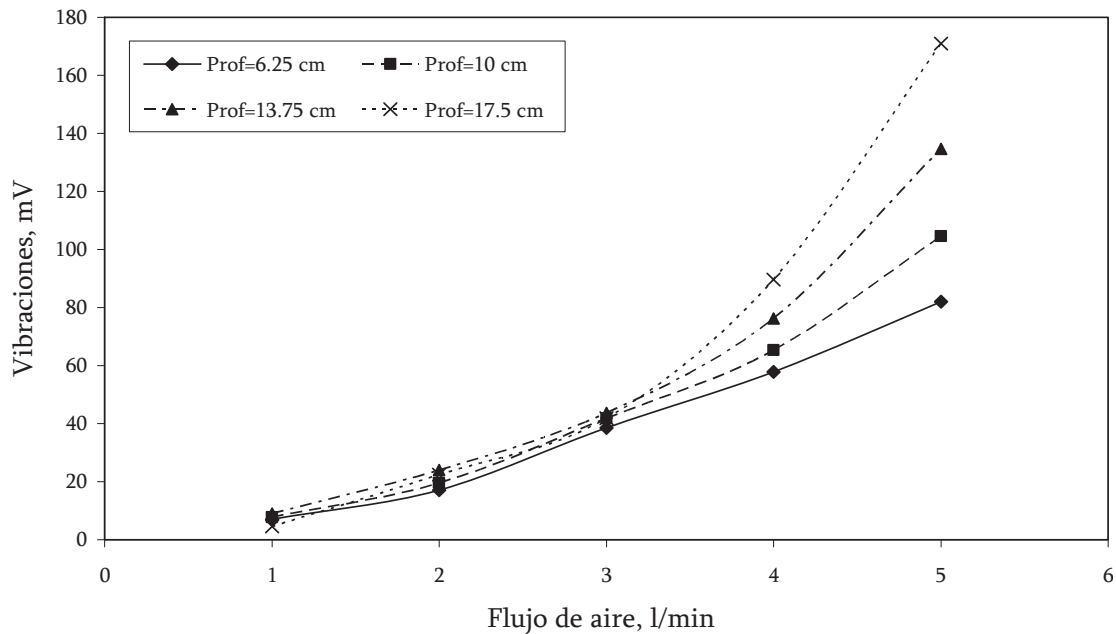


Figura 4.31. Efecto de la profundidad de la lanza en la magnitud de las vibraciones.

Es por esto que el acelerómetro debe de considerarse como un buen candidato para poder medir y controlar, en tiempo real y en la planta la fase de inyección de gases y polvos en el proceso de refinación secundaria del acero.

4.10.2 Experimentos con Tapón Poroso.

En el caso de los tapones porosos se observa que las variables que mayor influencia tienen sobre las operaciones de agitación al inyectar un gas a través de tapones porosos son: el flujo de aire a inyectar, volumen de agua a agitar y la posición de los tapones en la dirección radial en el fondo de la olla. La influencia que el gas tiene sobre los patrones de agitación ya fue bien discutida y, sabemos que a mayor flujo de gas, mayor la energía de agitación. La posición del tapón poroso tiene un efecto significativo sobre los patrones de agitación y, por lo tanto, en el tiempo de mezclado. Un tapón en el centro, por ejemplo, tenderá a formar patrones de circulación tipo espejo, es decir, patrones de circulación idénticos a ambos lados de la pluma de gas ascendente. Este tipo de patrón tiene la desventaja de formar grandes zonas muertas y, por lo tanto, una disminución considerable en la masa a agitar ya que estas zonas permanecen estáticas y, por lo tanto, un proceso de homogenizado deficiente.

A medida que el tapón es desplazado del centro hacia las paredes de la olla los patrones de agitación mejoran notablemente y, por lo tanto, el homogenizado. Sin embargo, cuando la pluma de burbujas se encuentra ya muy cerca de las paredes de la olla éstas tienden a erosionar el refractario de la olla y por lo tanto a incrementar las inclusiones del baño y obviamente no deseamos esto. En la Figura 4.32 se puede observar que a medida que el tapón poroso se acerca al borde de la olla se tienen tiempos de mezclado más cortos, hecho que corrobora lo anteriormente expuesto.

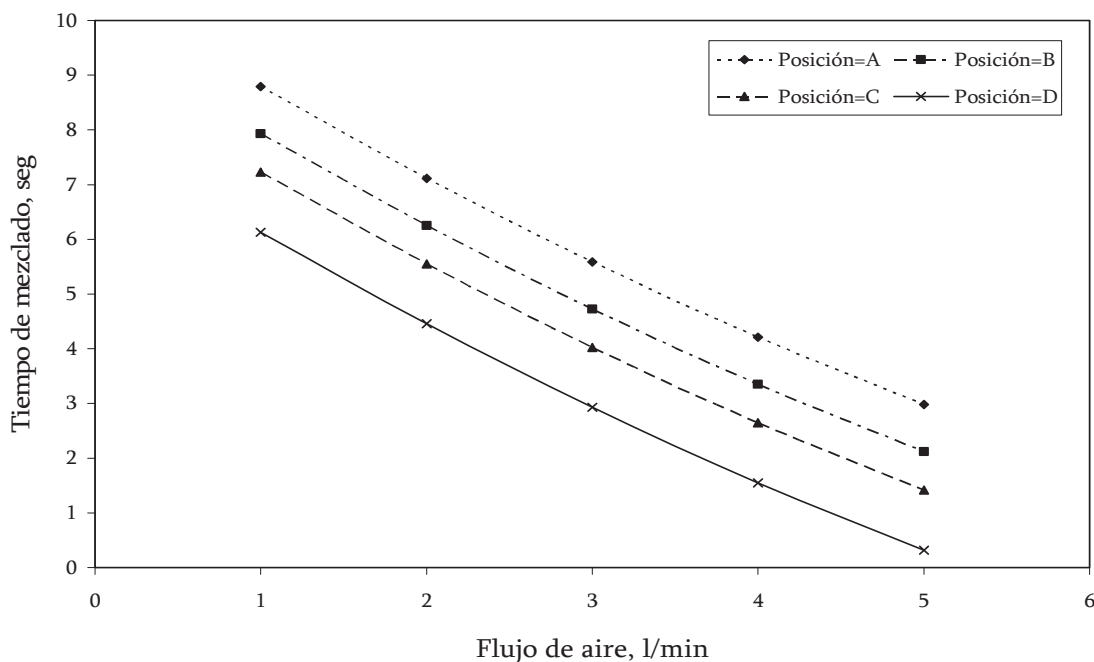


Figura 4.32. Tiempo de mezclado en una olla agitada con tapones porosos en función de: flujo de aire, volumen de 25 l y en las cuatro diferentes posiciones del tapón.

Al tratar de hacer un comparativo entre los dos sistemas de inyección de gases más utilizados en la industria siderúrgica: tapón poroso y lanza, debemos de tomar no solo en cuenta los tiempos de mezclado, Figura 4.33, sino otra serie de aspectos de tipo operativo que pueden en un momento dado inclinar la balanza a favor de uno de los métodos de inyección aquí analizados.

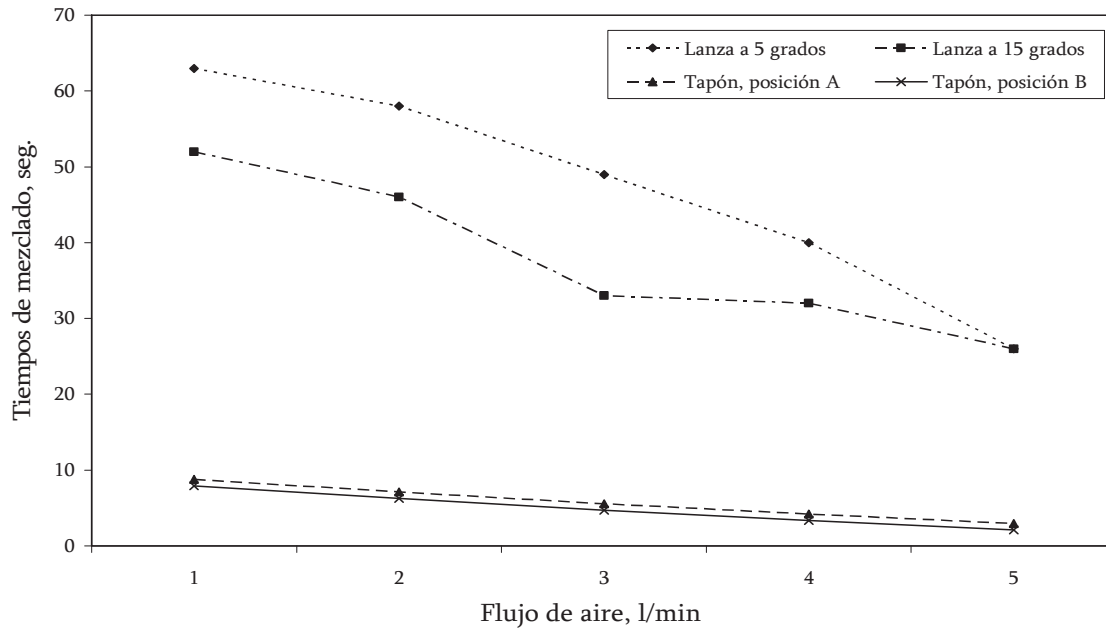


Figura 4.33. Tiempos de mezclado en una olla agitada con lanza y tapón en función de: flujo de aire, diámetro: 1 mm, volumen: 25 l, profundidad lanza: 17.5cm.

A nivel operativo en una planta de aceración, dos de los factores que tienen un impacto muy fuerte en la operación de una olla de refinación secundaria es la reoxidación y el control de la temperatura del metal. La reoxidación del baño, exposición de una cierta área del metal caliente al medio ambiente, siempre es provocada por una mala práctica de inyección de gases. Esta mala práctica tiene que ver con un exceso en la cantidad y forma de agitar el baño con los gases de inyección por lo que no es siempre recomendable aplicar los resultados que nos pueda brindar el modelado físico. Por ejemplo, el modelado nos dice que a mayores flujos de gas inyectado tendremos tiempos de mezclado más cortos, tanto para la inyección con lanza, como con el tapón poroso. Pero en la práctica esto podría significar una sobre exposición del metal y, por lo tanto, reoxidarlo ya que el mayor flujo de gases necesariamente abrirá la escoria que protege al baño metálico.

4.11. SIMULACIÓN DE ESCORIAS

Como se mencionó en el capítulo anterior, se llevaron a cabo experimentos con dos tipos de aceite de diferentes viscosidades (aceite rojo de viscosidad (μ) de 60-70 cSt y un aceite negro

de viscosidad (μ) de 5000 cSt) para los tapones porosos a sus diferentes posiciones y flujos y con la lanza a los diferentes movimientos de oscilación y flujos. En las Figuras 4.34 y 4.35 se pueden observar imágenes del comportamiento de las “escorias” para diferentes posiciones de los tapones e iguales condiciones de flujos de aire inyectado.

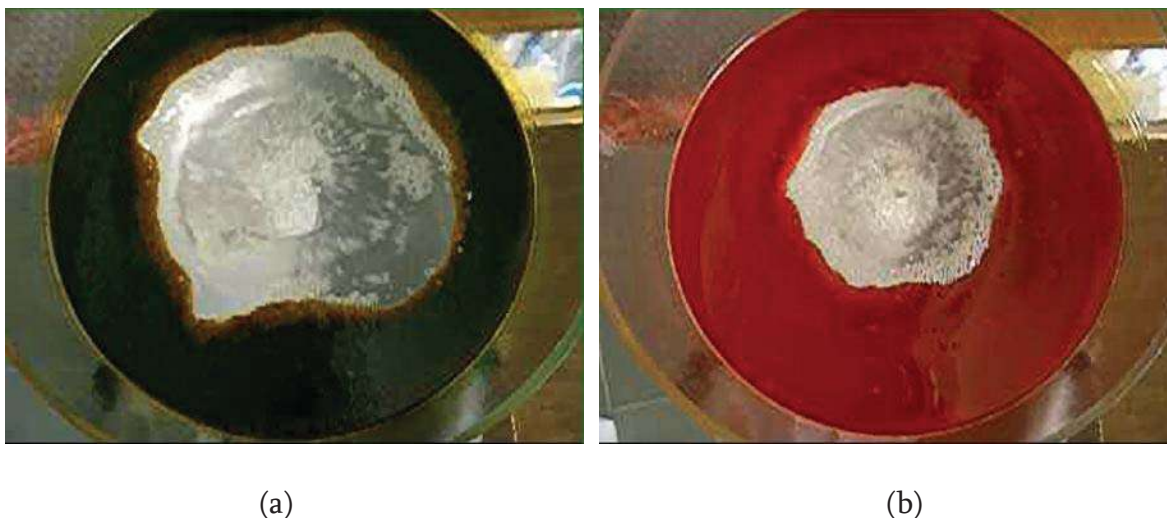
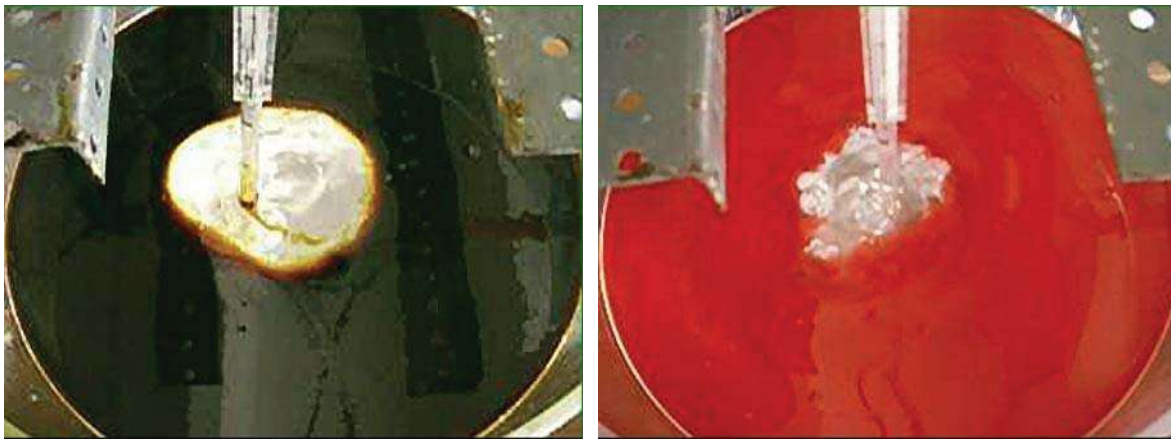


Figura 4.34. Tapón en la posición A (centro). (a) aceite negro, $\mu=5000$ cSt: flujo de 1l/min, (b) aceite rojo, $\mu=70$ cSt: flujo de 1l/min.



Figura 4.35. Tapón en la posición C. (a) aceite negro, $\mu=5000$ cSt: flujo de 1l/min, (b) aceite rojo, $\mu=70$ cSt: flujo de 1l/min.

Para el caso de la inyección con lanza con movimiento oscilatorio se obtuvo lo siguiente, Figura 4.36:



(a)

(b)

Figura 4.36. Lanza con movimiento oscilatorio de 10 grados a 27 ciclos/min.:

(a) aceite negro, $\mu=5000$ cSt: flujo 1l/min.,

(b) aceite rojo, $\mu=70$ cSt: flujo 1l/min.

Se levantaron registros, grabación con cámara digital, de aproximadamente 30 segundos para cada uno de los ensayos para medir la severidad, bajo las condiciones de inyección mostradas en las Tablas 3.V y 3.VI, sobre la integridad de la escoria, es decir, poder cuantificar el área libre de aceite en el agua. Esta área expuesta se cuantifico mediante análisis de imágenes. Las imágenes analizadas contemplaron las obtenidas tanto para los tapones porosos como de la lanza bajo las condiciones experimentales ya mencionadas.

Las áreas fueron calculadas utilizando dos paquetes de software comercial. Con el paquete conocido como Topaz Moment™, versión de evaluación, de cada uno de los videos grabados se capturaron imágenes, en formato jpg a intervalos de 5, 10, 15, 20 y 25 seg. Figura 4.37. Con un segundo paquete, NI Vision Assistant 7.0 de Nacional Instruments®, se calcularon las áreas de cada una de las cinco imágenes capturadas de cada experimento filmado, Figura 4.38. Las áreas calculadas están en unidades de píxel.

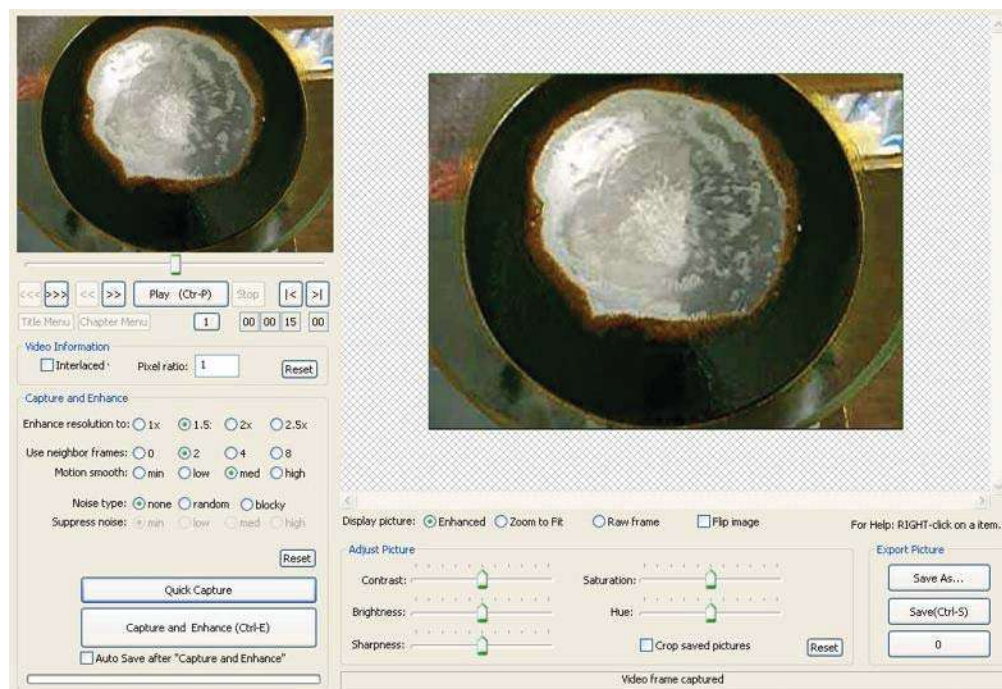


Figura 4.37. Ejemplo de imagen capturada a los 15 segundos de iniciada la inyección, tapón en la posición A y con un flujo de aire de 1l/min.

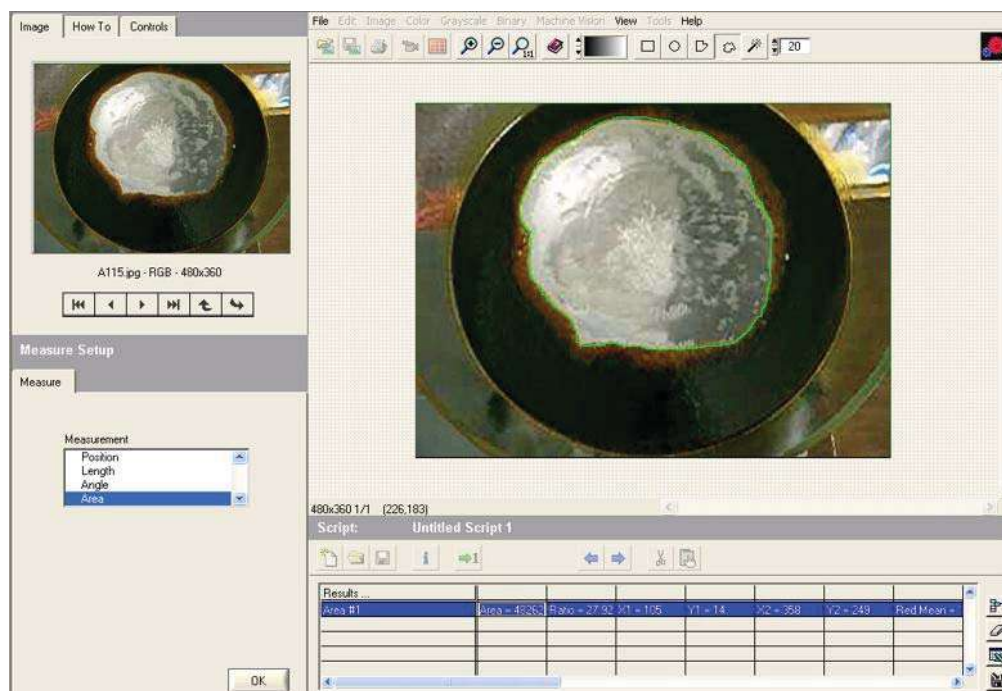


Figura 4.38. Ejemplo de cálculo del área, en píxeles, de la imagen obtenida a los 15 segundos de iniciada la inyección, tapón en la posición A y con un flujo de aire de 1l/min.

Para calcular un área promedio para cada ensayo y puesto que fueron 5 imágenes con sus respectivos valores de área, se decidió calcular el promedio de éstas y tomar este valor en cálculos posteriores. Ahora bien, dado que las áreas fueron obtenidas en unidades de píxel, se decidió expresar estas en unidades de área, es decir, cm². Para llevar a cabo esta tarea se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. Se calculó el diámetro de la superficie del agua, para todos los casos fue de 33.5 cm.
2. Por medio del software Vision Assistant 7.0[®] se calculó el diámetro en píxeles de cada una de las imágenes, Figura 4.39. Este cálculo se llevó a cabo varias veces para la misma área y se sacó el promedio de ellas. Esto se hizo con la finalidad de reducir los errores en el procedimiento ya que éste se hace de manera manual.

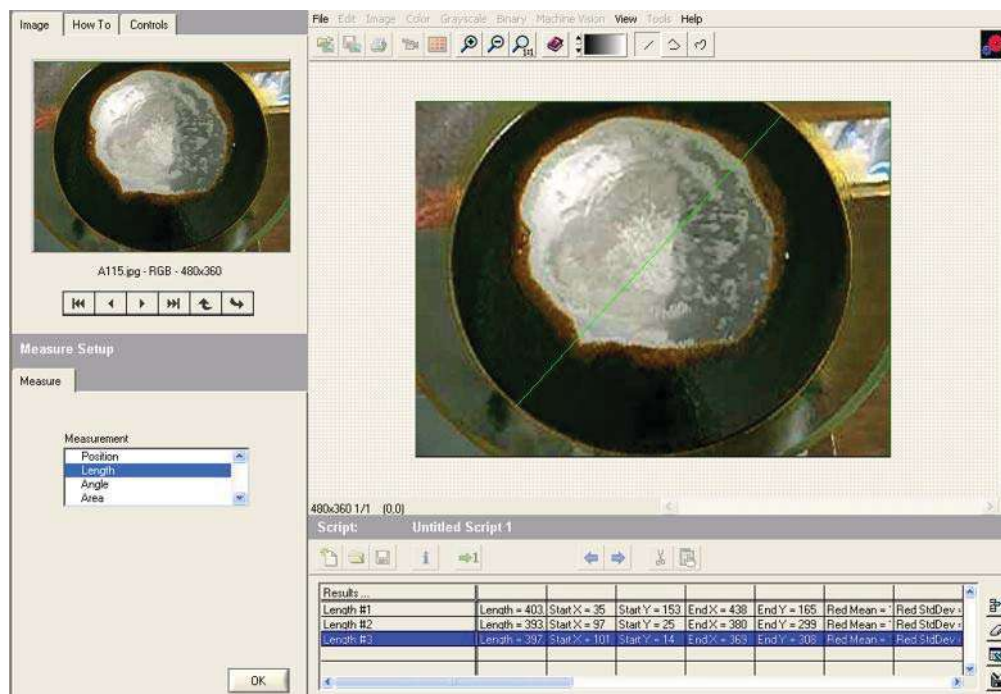


Figura 4.39. Cálculo del diámetro de la superficie del agua de la imagen en píxeles.

3. Por medio de la fórmula del área se calcularon para cada valor de diámetro o radio.

$$A = \pi r^2 \quad (4.12)$$

Por ejemplo, se tiene:

Diámetro real = 33.5cm → radio = 16.75cm.

Diámetro de la imagen = 393.1841 píxeles → radio = 196.5921 píxeles

Sustituyendo en la fórmula se tiene:

$$A_{\text{imagen}} = 3.1416 (196.5921 \text{ píxeles})^2 = 121417.637 \text{ píxeles}^2$$

$$A_{\text{real}} = 3.1416 (16.75 \text{ cm.})^2 = 881.4131 \text{ cm}^2$$

Por medio de regla de tres y usando los valores de las áreas en píxeles calculadas para cada ensayo se tiene que:

$$\frac{121417.637 \text{ píxeles}^2}{13330.8 \text{ píxeles}^2} = \frac{881.4131 \text{ cm}^2}{x} \Rightarrow x = 96.7729 \text{ cm}^2$$

4. Por último se calcula el porcentaje del área como sigue:

$$\frac{881.4131 \text{ cm}^2}{96.7729 \text{ cm}^2} = \frac{100\% \text{ de la superficie del volumen}}{x} \Rightarrow x = 10.98\%$$

4.12. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN CON ESCORIAS.

Los resultados muestran que el aceite rojo o menos viscoso tiene más resistencia a abrirse debido a la fluidez del mismo. Caso contrario sucede con el aceite más viscoso (negro) el cual representa el comportamiento de una escoria refractaria, respecto a su viscosidad cinemática. Al ser más viscoso pierde la fluidez que provoca que el agujero no cierre con la misma rapidez que el aceite rojo y tienda a mantenerse en ese estado, exponiendo el baño por más tiempo.

Como se aprecia en la Figura 4.40, el aceite rojo presenta características menos viscosas que da a lugar un agujero más pequeño en la superficie a todas las condiciones experimentadas. De igual forma se puede observar que en el caso de la inyección de aire por medio de la lanza no consumible a los diferentes movimientos de oscilación ensayados los resultados son muy similares, Figura 4.41.

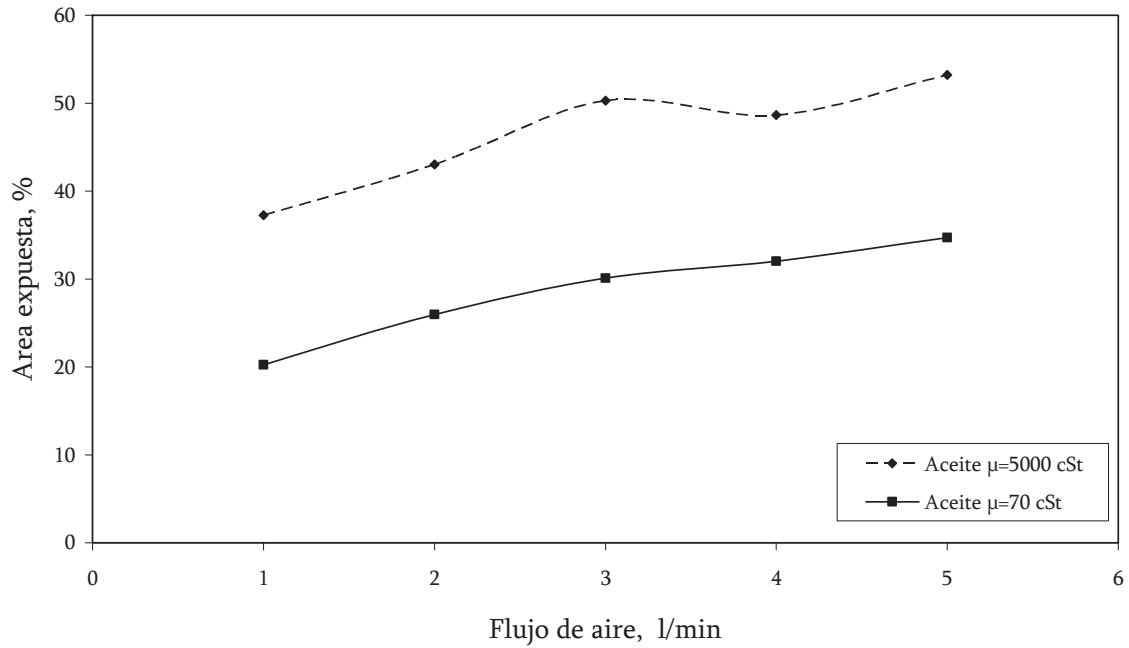


Figura 4.40. Porcentaje de áreas expuestas de los aceites al inyectarse aire a través del tapón poroso en la posición A.

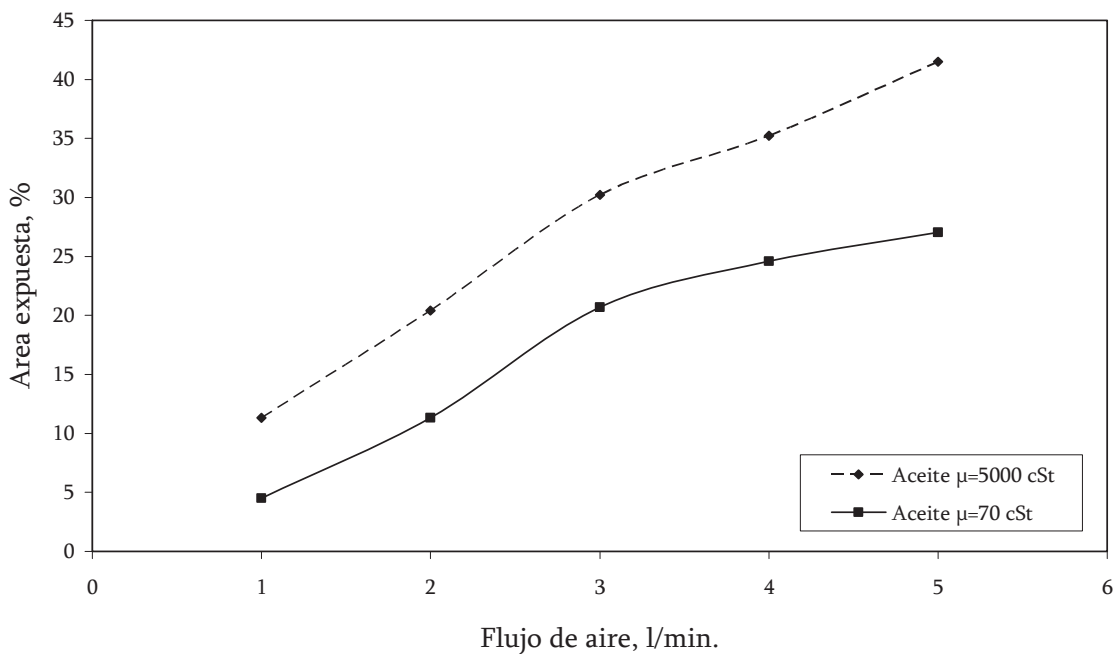


Figura 4.41. Porcentaje de áreas expuestas de los aceites con inyección con la lanza no consumible a profundidad = 17.5 cm y con un movimiento oscilatorio de ± 15 grados a 16 ciclos/min.

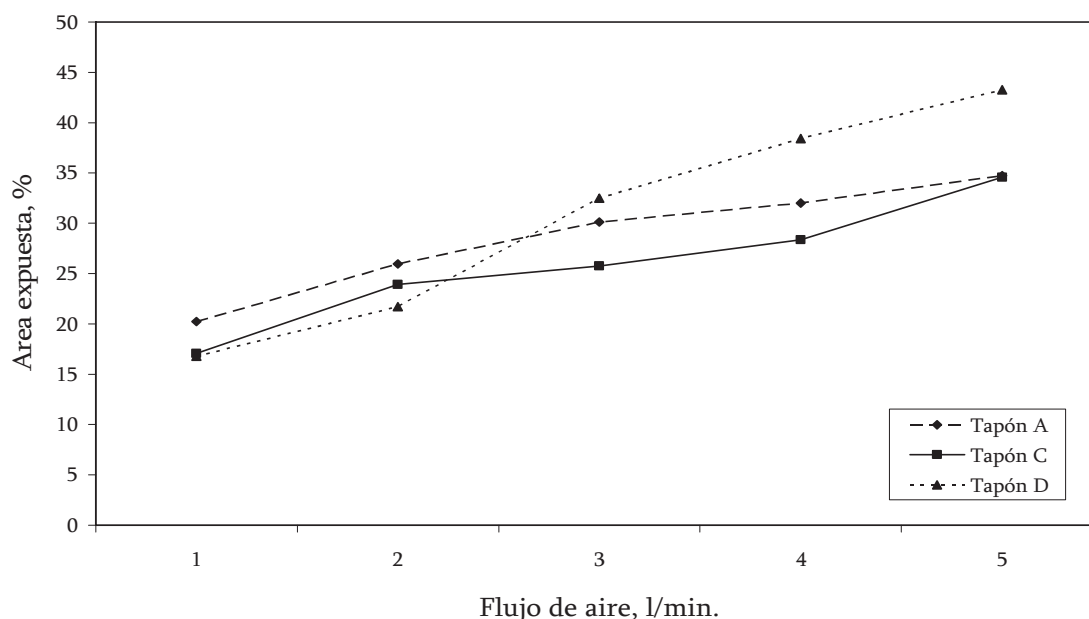


Figura 4.42. Áreas expuestas considerando las diferentes posiciones de los tapones porosos cuando se simula la escoria menos viscosa, $\mu=70$ cSt.

Como se puede observar en la Figura 4.42, a medida que la inyección se lleva a cabo en algunos de los tapones que se encuentran más cerca de las paredes de la olla (C, D) se da una disminución en la magnitud de las áreas expuestas para flujos menores a 2 l/min. Sin embargo, cuando la inyección se lleva a cabo con el tapón en la posición más cercana a la pared de la olla se observa un incremento en el tamaño de las áreas expuestas, debido principalmente a que el patrón de agitación se hace más vigoroso entre otras cosas debido a que las burbujas chocan con la pared de la olla y éste es entonces empujando hacia el centro de la misma y hacia arriba con mayor velocidad, por lo que el área expuesta es mucho mayor bajo estas condiciones de agitación, Figura 4.43.

Para los experimentos en el que la inyección se llevó a cabo con lanza no consumible y con diferentes ángulos de inclinación, se puede observar que ésta última variable no tiene efecto alguno sobre la magnitud del área expuesta, Figura 4.44. Esto se observó para cada una de las escorias simuladas (aceites). Sin embargo, se observaron cambios en la posición de las áreas

conforme cambia la posición de las lanzas, es decir, son de aproximadamente la misma magnitud pero en diferentes posiciones respecto a la superficie de la olla.

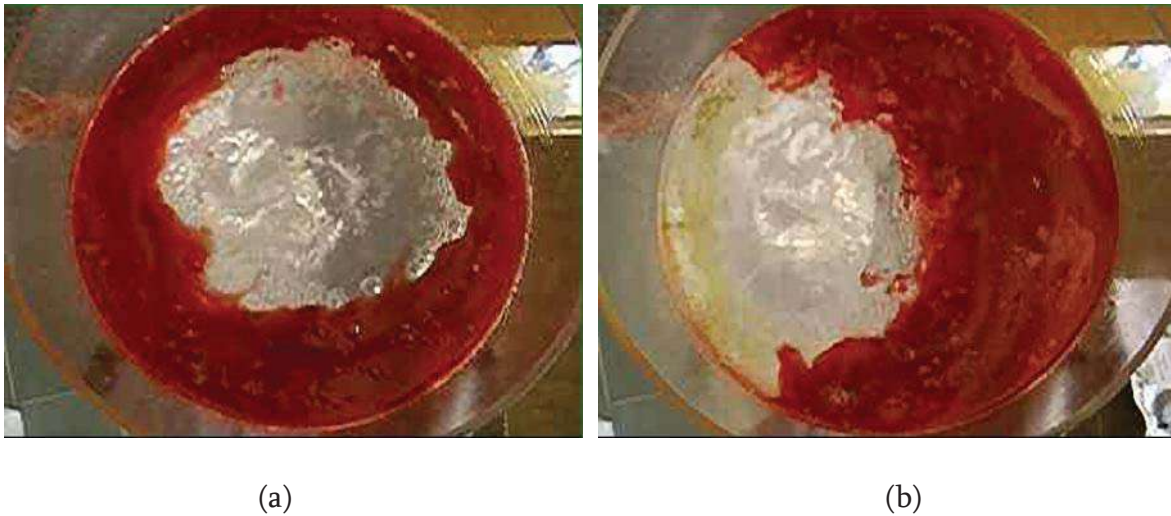


Figura 4.43. Comparación de áreas expuestas respecto la posición que guardan los tapones porosos en el fondo de la olla. (a) tapón en la posición A y (b) el tapón en la posición C cuando se inyecta aire con un flujo de 5 l/min.

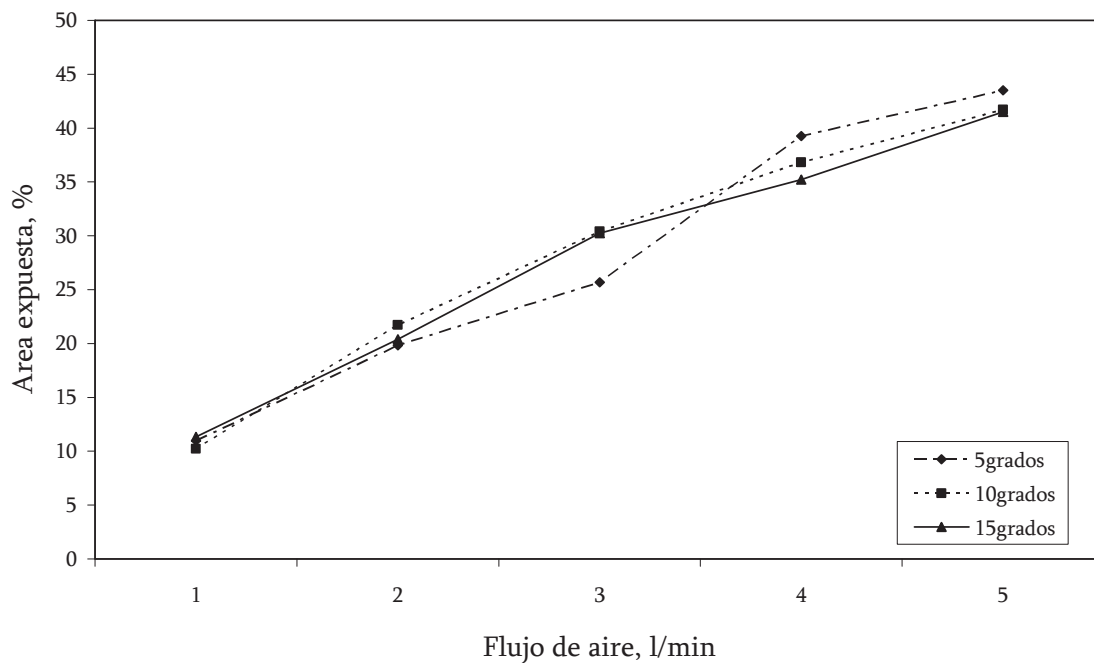


Figura 4.44. Áreas expuestas a los diferentes ángulos de inclinación de la lanza en aceite de $\mu=5000$ cSt.

Ahora bien, en todos los casos se pudo observar que la magnitud de las áreas expuestas, siempre es más grande cuando la inyección de los gases se lleva a cabo a través de los tapones porosos, que cuando la inyección se lleva a cabo por medio de las lanzas no consumibles, Figura 4.45.

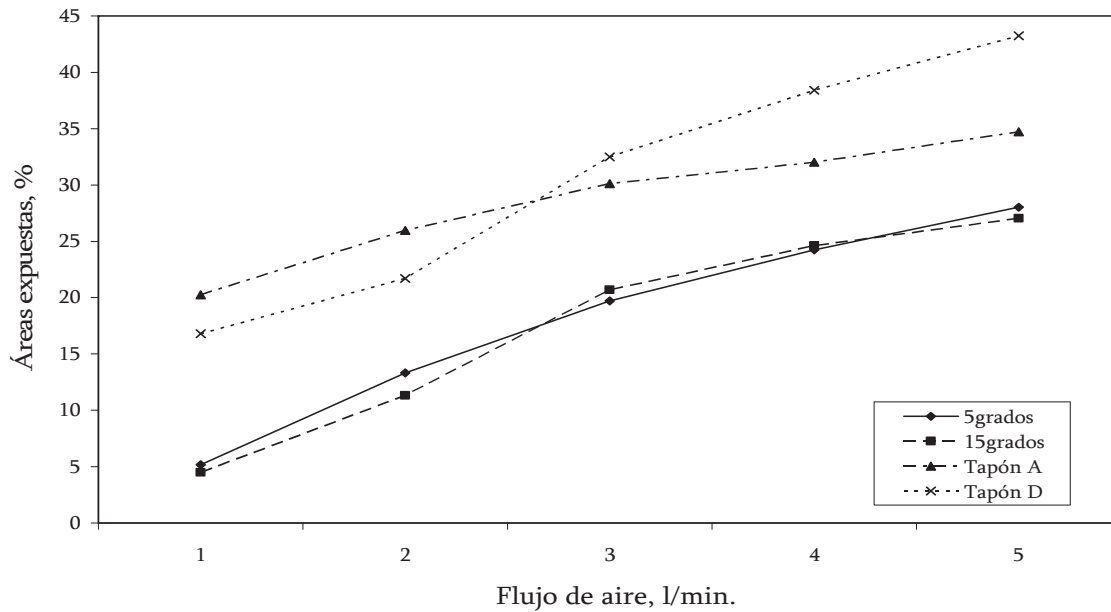


Figura 4.45. Diferencia en la magnitud de las áreas expuestas cuando la inyección de los gases se lleva a cabo por tapón poros o con lanza no consumible.

El concepto anterior puede ser observado de una manera mucho más explícita en las siguientes imágenes, Figuras 4.46 y 4.47:

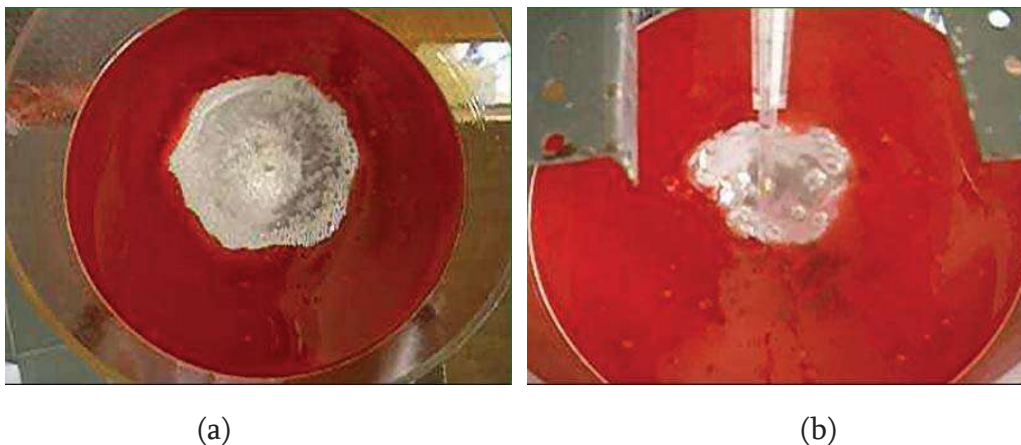


Figura 4.46. Diferencias en la magnitud del área expuesta cuando la inyección se hace con: (a) tapón poroso y (b) lanza no consumible. En ambos casos las condiciones de inyección de aire fueron las mismas, flujo de 1 l/min con el aceite de $\mu=70$ cSt.



(a)

(b)

Figura 4.47. Diferencias en la magnitud del área expuesta cuando la inyección se hace con:
(a) tapón poroso y (b) lanza no consumible a flujo de 5 l/min con el aceite $\mu=5000$ cSt.

De la simulación física de la inyección de aire en el modelo de olla de refinación secundaria acrílico y de la simulación de escorias con diferentes viscosidades se pudo observar que, por lo que a los tiempos de mezclado y las energías de agitación se refiere; efectivamente, éstas dos variables están íntimamente relacionadas, es decir, si se conoce la energía de agitación entonces será posible calcular de una manera confiable los tiempos de mezclado en la olla. También se obtuvo una relación entre la energía de agitación y la magnitud de las vibraciones medidas con un acelerómetro. Por lo que se establece que a través de las mediciones de las vibraciones en la olla de refinación secundaria es posible calcular o pronosticar los tiempos de mezclado en la misma.

También se encontró que al hacer la inyección de los gases a través de la lanza no consumible cuando, tanto el movimiento como el ángulo de oscilación de ésta se incrementó, los tiempos de mezclado disminuyeron considerablemente, sin afectar de manera notable la exposición del metal al ambiente, ya que este tipo de movimiento mejora los patrones de agitación, permaneciendo el área expuesta relativamente constante en magnitud, aún cuando ésta se va desplazando conforme el ángulo de inclinación se desplaza.

Por otro lado, se encontró que la inyección de gases a través de los tapones porosos presenta tiempos de homogeneización más cortos, que los logrados cuando la inyección se lleva a cabo con la lanza no consumible. Sin embargo, la inyección con tapón poroso tiende a dar como resultado áreas expuestas más grandes en la superficie del agua como resultado de la agitación excesiva.

A pesar de que los tiempos de mezclado alcanzados, cuando la inyección de los gases se lleva a cabo con los tapones porosos, son más cortos que los obtenidos cuando la inyección se hace con la lanza no consumible, se tiene que las áreas expuestas, cuando se sopla con lanza con respecto a la inyección con los tapones, son más pequeñas en magnitud, Figura 4.45. Esta particularidad puede darle una ventaja o característica que debe ser muy tomada en cuenta a la hora de decidir si la fase de inyección de gases se lleva a cabo a través de tapón poroso o por lanza, siempre y cuando ésta tenga la capacidad de autoprotgerse. Además, en caso de optar por esta última opción, se deberá de incorporar movimientos de oscilación a la lanza para poder competir con la inyección con tapón poroso. Otra de las ventajas de una lanza auto protegida, que al no fundirse, permitiría tener un mejor control de las condiciones de agitación del baño al disminuir las zonas muertas, acortar los tiempos de homogenización y además permitiría la inyección de polvos, ventaja notable ya que esta practica es imposible de llevar a cabo cuando se usa tapón poroso.

4.13. UNIDAD SUPERCONDUCTORA DE CALOR.

4.13.1. Pruebas en Horno.

Al hacer la introducción de la lanza dentro del horno a diferentes temperaturas se observó que en instante en el que la lanza era introducida la temperatura del horno inmediatamente bajaba debido, primero a la introducción de un objeto frío y, segundo debido a la extracción inmediata de calor que la lanza empieza a llevar a cabo desde que el sodio pasa a la fase gas y, que por efecto del vacío inducido en la sección concéntrica de la lanza la fase vapor se inicia a temperaturas muy por debajo a la que el sodio se hace vapor a la presión atmosférica, 1156 K

(883°C). Cabe hacer notar que dependiendo de la presión de vacío a la que se haya logrado llegar el punto de ebullición del sodio será diferente.

Los resultados de las presiones a diferentes temperaturas se muestran en las figuras siguientes:

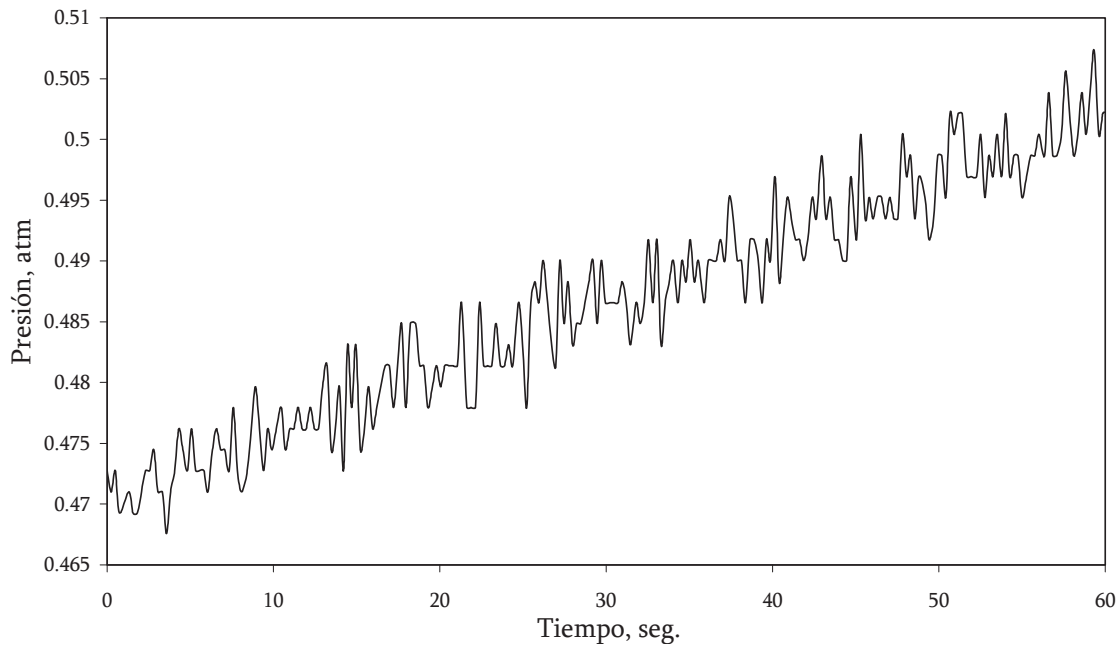


Figura 4.48. Presión captada a la temperatura de 350°C.

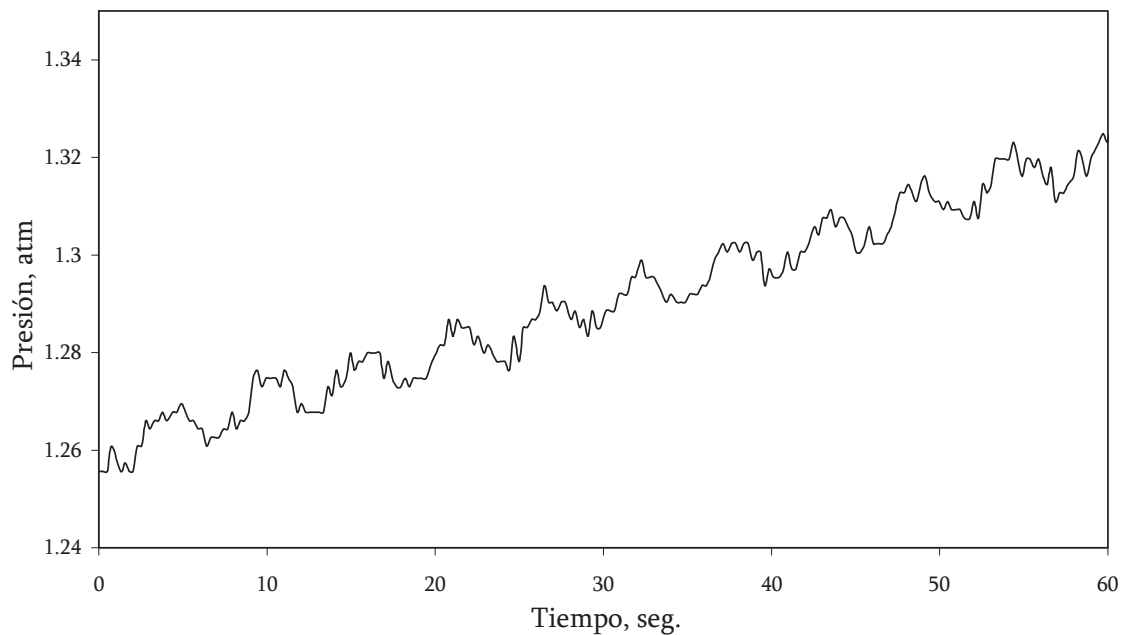


Figura 4.49. Presión captada a la temperatura de 400°C.

En la Figura 4.48 se representan los datos obtenidos para la temperatura de 350°C donde se observa un aumento de la presión, de igual forma a una temperatura de 400°C, figura 4.49, esto es debido a la vaporización del sodio.

A las temperaturas posteriores (500, 600 y 700 °C) se observa el mismo patrón de aumento de la presión como se observa en la Figura 4.50.

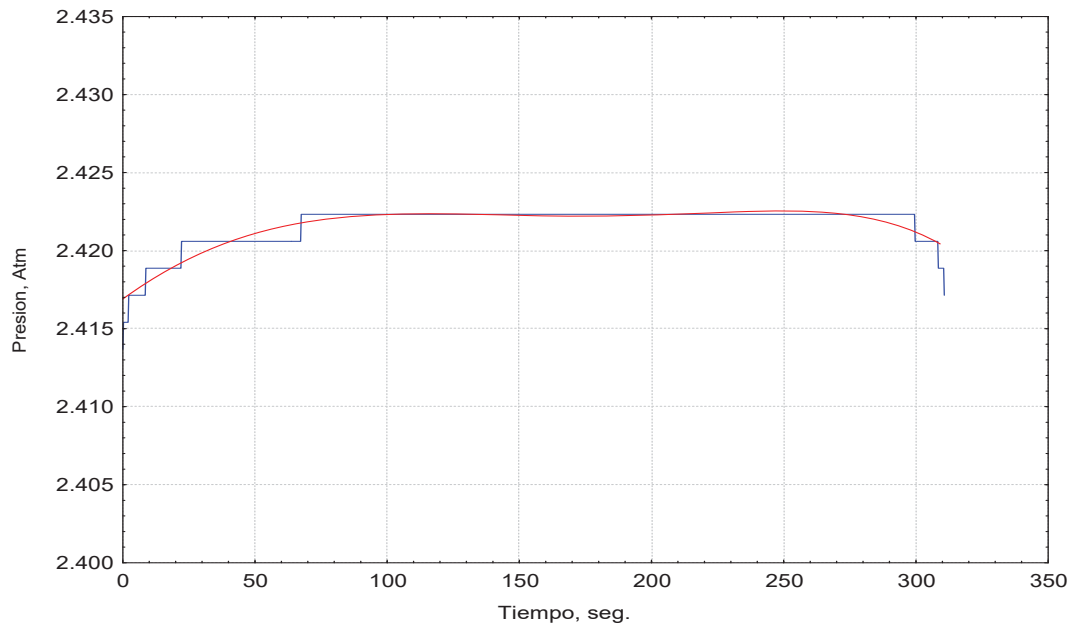


Figura 4.50. Presión captada a 600°C.

En la figura anterior se puede observar a una temperatura mayor a 400°C que el patrón de aumento de presión continua, sin embargo, se obtiene una señal muy ruidosa y una tendencia de aumento muy pequeña. Por lo que observando los datos de la calibración del sensor en el capítulo anterior, se concluye que es debido a que el rango de medición del sensor fue rebasado por el aumento de presión, ya que según los registros se obtuvo que el sensor no puede captar presiones mayores a 2.5 atm, por lo que a temperaturas después de los 400°C la señal es constante, tendiente al aumento pero sobrepasa la capacidad del sensor, figura 4.51.

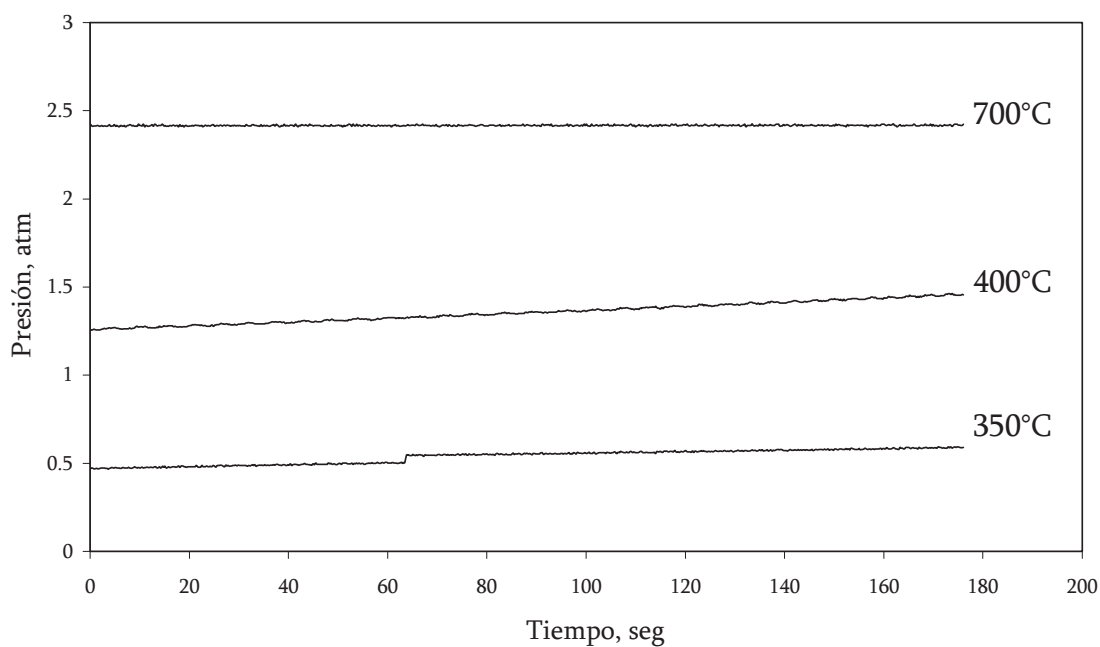


Figura 4.51. Presión a diferentes temperaturas.

Simultáneamente al análisis de los resultados de la presión, se llevaron a cabo análisis de las temperaturas monitoreadas a lo largo de la lanza, además del registro de las temperaturas de entrada y salida del agua, mostradas en la Figura 4.52:

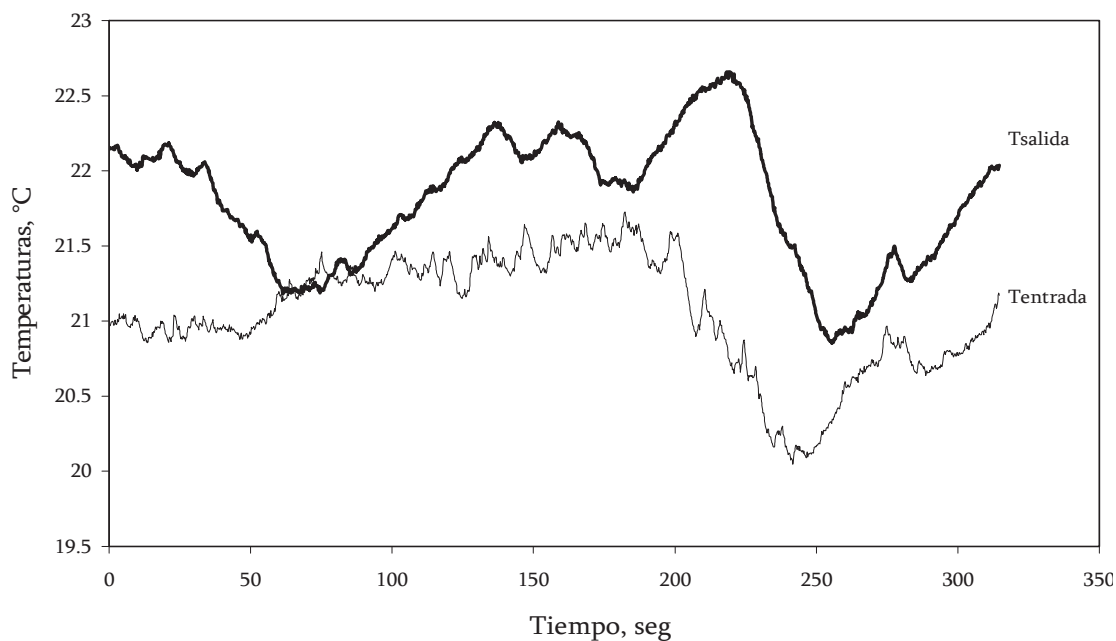


Figura 4.52. Temperaturas de entrada y salida de agua a temperatura de 400°C.

Se puede observar que la temperatura de salida del agua es un poco mayor a la temperatura de entrada, esto es debido a la cantidad de calor que extrae la sección condensadora del vapor de sodio. La temperatura registrada a lo largo del tubo por medio del termopar tres, que es el que esta registrando la evolución de la temperatura en la zona adiabática de la lanza, se muestra en la Figura 4.53.

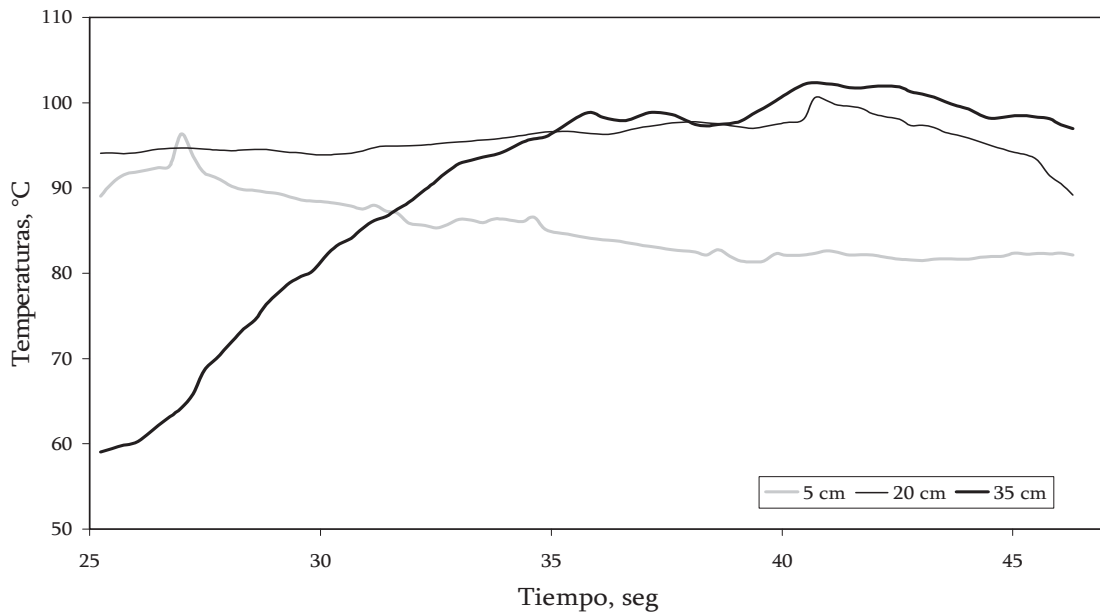


Figura 4.53. Temperatura a lo largo de la lanza a 400°C.

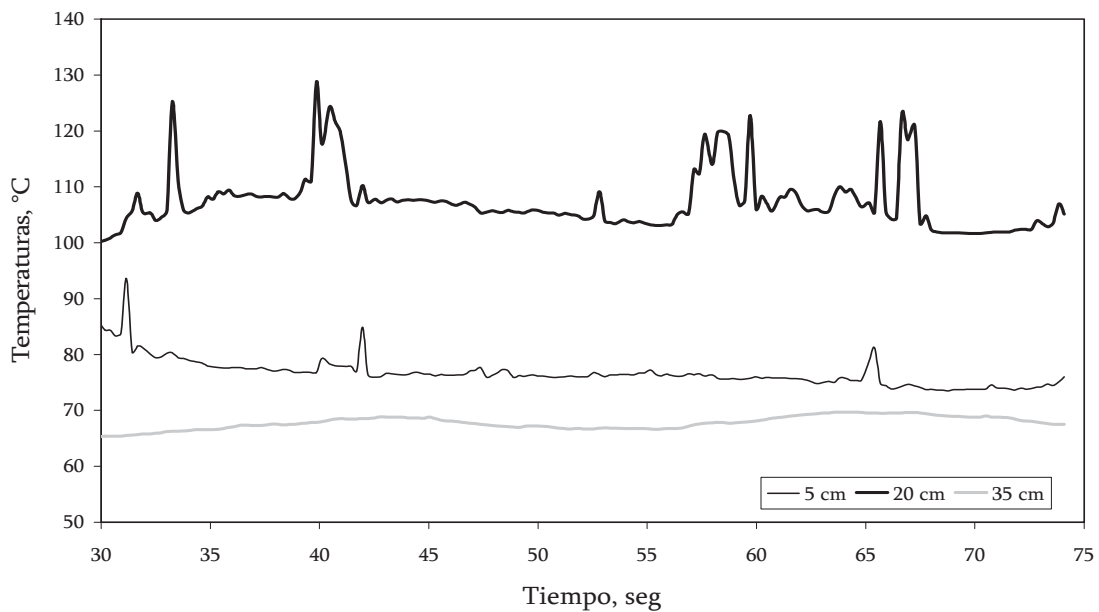


Figura 4.54. Temperatura a lo largo de la lanza a 600°C.

En la Figura 4.53 se puede observar como las temperaturas registradas a los 20 y 35 cm están arriba de la registrada en el fondo de la lanza, y esto es debido a que en el momento de poner en contacto la lanza con la fuente de calor (horno) comienza la evaporación del sodio, el cual al transportarse a lo largo de la lanza, la temperatura del vapor es mayor a la del sodio que se encuentra en el fondo de la lanza, donde se deposita el condensado. La temperatura registrada en la posición a 20 cm del fondo de la lanza se considera como la zona en la cual se lleva a cabo el transporte del vapor, y a los 35 cm la condensación del vapor se esta llevando a cabo debido a la proximidad con la zona condensadora como se aprecia en la Figura 4.54, en donde se observa como la temperatura registrada a 20 cm del fondo es superior que la otras dos zonas (5 cm y 35 cm). Además de la temperatura más baja en la zona cercana a la sección condensadora. El fenómeno anterior o funcionamiento de la lanza se puede apreciar aún mejor en los datos obtenidos para una temperatura de 700°C, Figura 4.55.

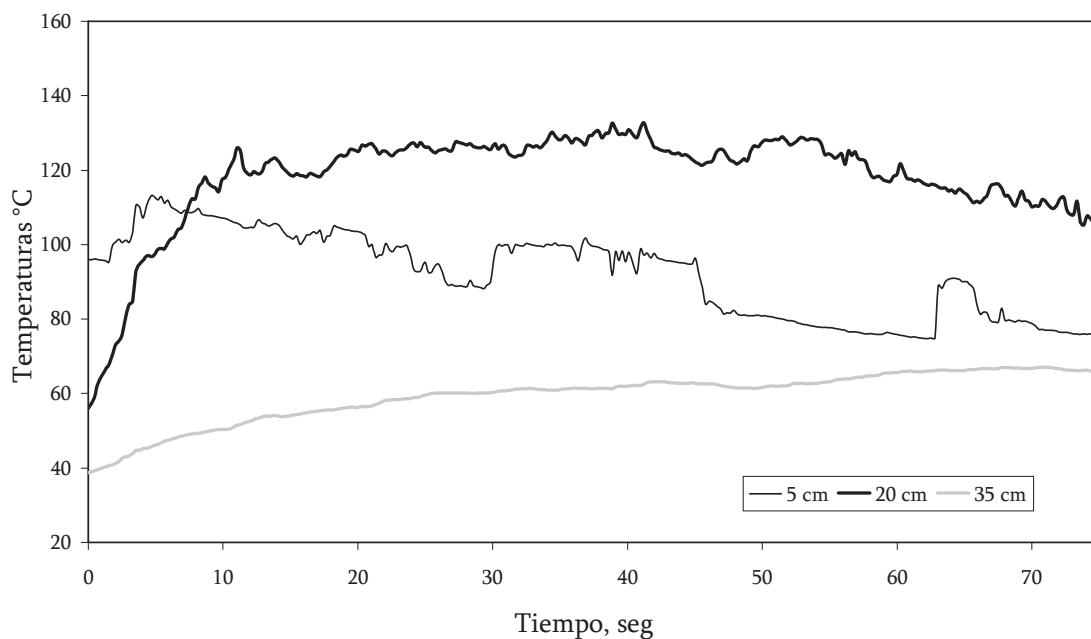


Figura 4.55. Temperatura a lo largo de la lanza a 700°C.

Aquí es donde se puede apreciar aún más la diferencia de temperaturas en las tres secciones o zonas de la lanza. La zona evaporadora o donde el sodio cambia de fase (5 cm), la zona de transporte del vapor (20 cm) registrando la temperatura mayor, y la zona condensadora (35

cm) en donde se presenta la extracción de calor del sodio y hace que éste cambie nuevamente de fase, registrándose una temperatura inferior.

4.13.2. Pruebas en Metal Líquido.

Las pruebas con metal se diseñaron para llevarse a cabo en aluminio líquido, por lo que se tomó en cuenta el diagrama de fases Cu-Al para hacer un análisis de la temperatura a la cual existía reacción entre estos dos elementos. Como se puede observar en la Figura 4.56, se tiene un punto eutéctico a una temperatura de 548°C y tomando en cuenta la temperatura de fusión del aluminio puro que es de 660°C se consideró que, por lo menos, se podría llevar a cabo una prueba o ensayo de inyección de gas (CO_2) con la lanza en el seno del baño metálico caliente, antes de que se dé la reacción entre ambos elementos, cobre - aluminio.

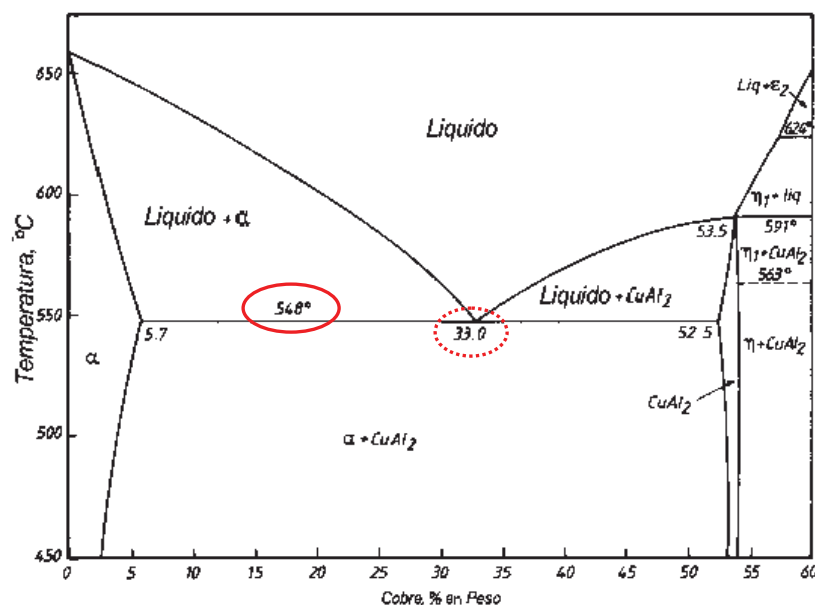


Figura 4.56. Diagrama de fases Cu-Al.^[41]

Se procedió a fundir aproximadamente 9 Kg. de aluminio, en un crisol de grafito que se introdujo en el horno de inducción. Una vez que el técnico avisó que la temperatura del baño era de 750°C, se introdujo la lanza al baño líquido y cuando transcurrieron los primeros 5 segundos del experimento, se observó que el principio de operación de la lanza procedía

conforme lo planeado y esperado, es decir, estaba extrayendo el calor de la zona de evaporación.

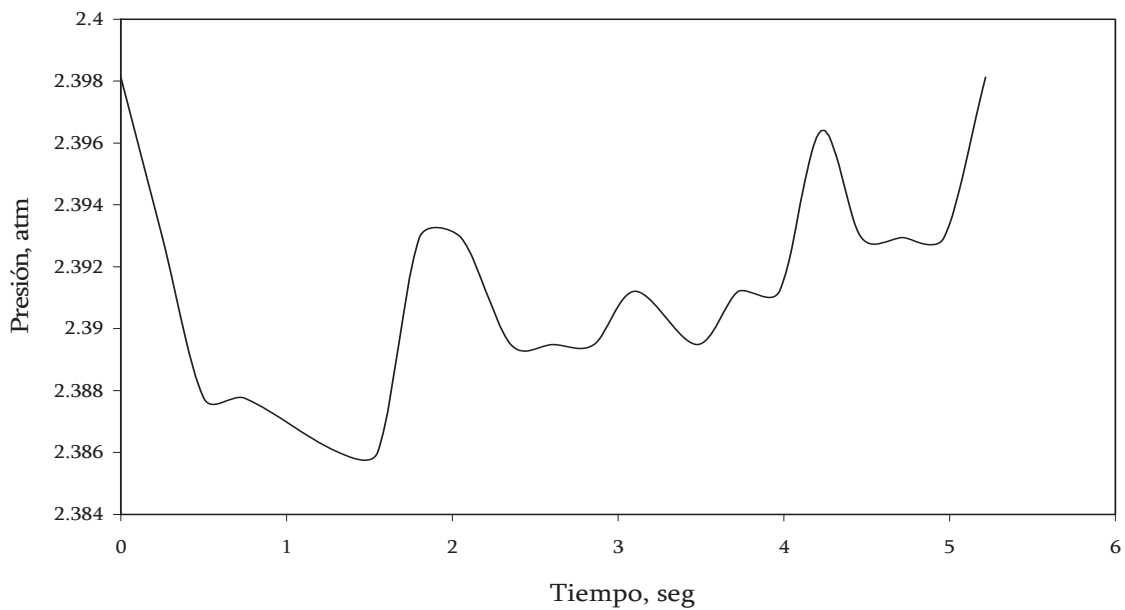


Figura 4.57. Presión a 5 segundos de transcurridos los experimentos.

Como se puede observar en la Figura 4.57, el patrón de la señal de presión va en aumento como es de esperarse, por la evaporación del sodio.

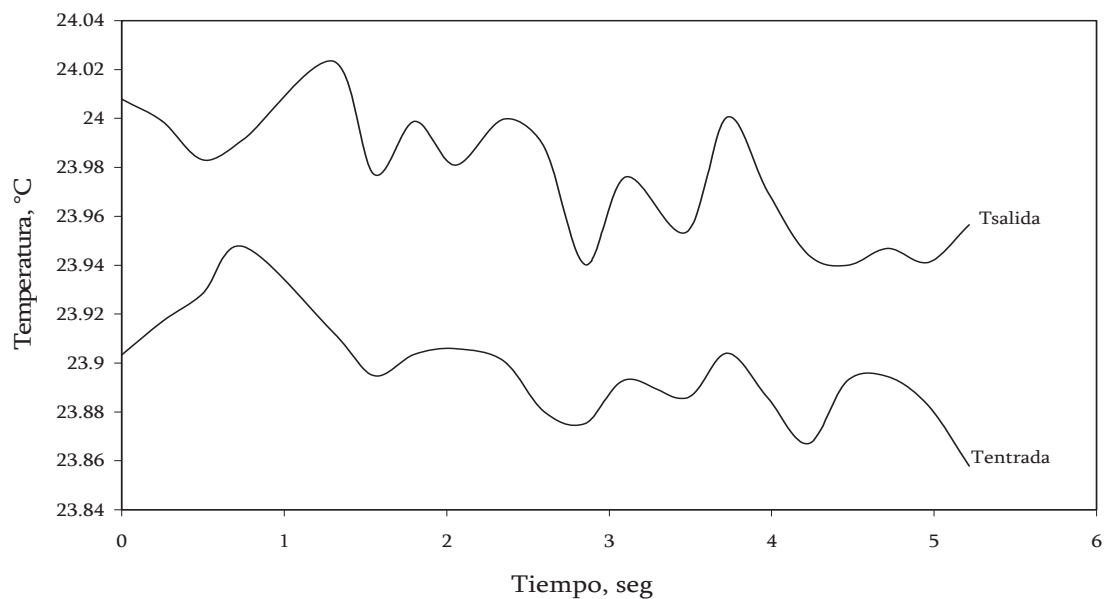


Figura 4.58. Temperaturas de la zona condensadora a los 5 segundos del experimento.

De igual forma con las temperaturas con respecto a los experimentos previos, la temperatura de entrada es ligeramente más pequeña que la temperatura de salida debido a la extracción de calor de la zona condensadora como se observa en la Figura 4.58.



Figura 4.59. Lanza a los 5 segundos del experimento.

Como se muestra en la Figura 4.59, se saco la lanza del metal líquido debido al eutéctico que se formaba con el aluminio, sin embargo se observa que la lanza se encuentra en buenas condiciones para proseguir con dicho experimento. En dicha figura puede observarse una pequeña costra de aluminio sólido alrededor de la lanza.

Se dejo transcurrir el experimento y se introdujo nuevamente la lanza en el baño metálico, observándose un aumento aún mayor en la señal del sensor de presión:

En la Figura 4.60 se observa el aumento de presión continua hasta los 14 segundos.

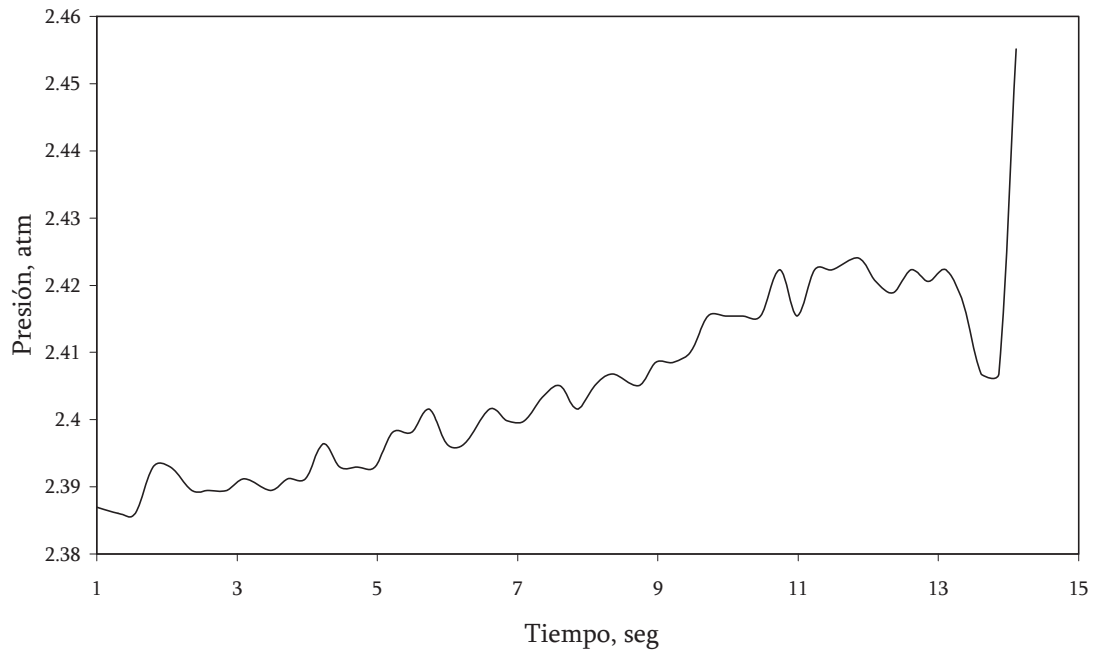


Figura 4.60. Presión obtenida a los 14 segundos del experimento.

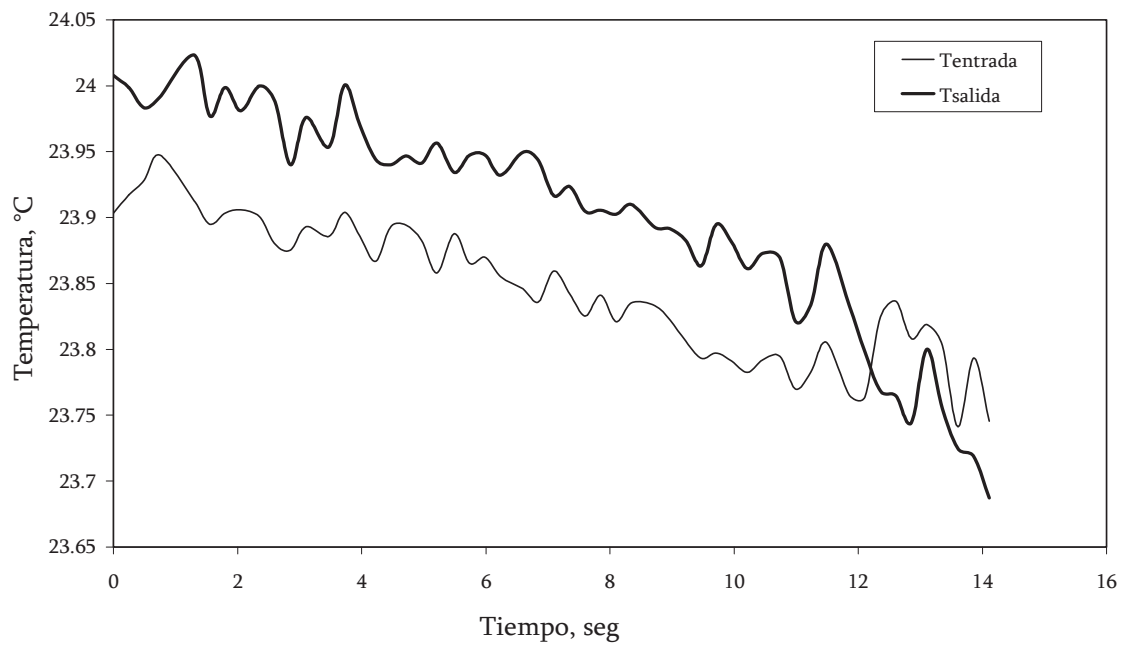


Figura 4.61. Temperaturas de entrada y salida a los 14 segundos del experimento.

En la Figura 4.61 se puede observar el comportamiento de las temperaturas de entrada y de salida de la zona condensadora, siguiendo el mismo patrón que en los experimentos anteriores.

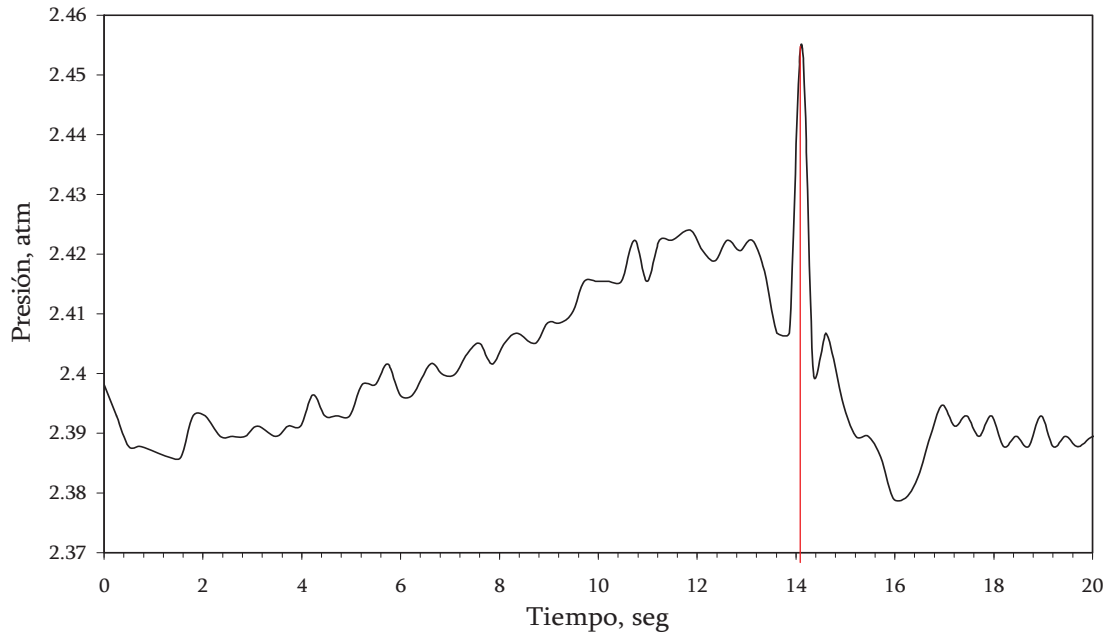


Figura 4.62. Presión de la lanza en experimento con aluminio líquido.

A partir de los 14 segundos del experimento se encuentra que existe una inestabilidad en el sistema, Figura 4.62, esto es debido a que la lanza empezó a reaccionar y a fundirse por efecto de las altas temperaturas del baño metálico. Esto trajo como consecuencia que el sodio fuera expuesto al baño metálico e inmediatamente reacciono con éste y con el oxígeno del aire de una manera muy violenta (pico en el gráfico de la Figura 4.62). Debido a este incidente se procedió a medir la temperatura del baño, con un termopar del tipo K, y se encontró que el técnico que opera el horno había cometido un error y la temperatura real del baño de aluminio no era de 750°C, como había dicho que era, sino que en realidad estaba por arriba de los 1,300°C. Como bien se sabe la temperatura de fusión de cobre es de 1,083°C, lo que obviamente había rebasado el punto al que la integridad de la lanza se mantuviera, por lo que la destrucción de la lanza fue inminente. Sin embargo, a pesar del incidente se pudo constatar que debido al principio de operación de la lanza (superconductor de calor) se había logrado proteger a ésta por 14 segundos, evitando su destrucción desde el instante mismo en que ésta fue introducida al baño metálico, tal y como se muestra en la Figura 4.63, donde se observa la costra formada o la autoprotección que la lanza había logrado formar con el metal.

El que se haya destruido por la parte inferior la lanza se debió principalmente a que se había soldado una pieza hecha de níquel, que entre otras cosas tenía la función de lograr un buen ensamble entre los dos tubos de cobre e impedir la formación de costras en el orificio de inyección que impidieran la inyección del gas, en nuestro caso de CO_2 . Se supone que la aleación que se formó, por las altas temperaturas del metal, entre el cobre, aluminio y el níquel se formó un eutéctico de más baja temperatura y eso propició la falla en dicha zona, es decir, en el área de la soldadura. Cabe hacer notar que no fue posible recuperar la punta de níquel, que hubiera demostrado esta hipótesis.



Figura 4.63. Lanza con costra de aluminio solidificado.

4.14. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA LANZA.

Como se pudo observar en el conjunto de experimentos que se llevaron a cabo con la lanza utilizando como fluido de trabajo el sodio, los resultados de temperatura y de presión muestran el buen funcionamiento del principio de una unidad superconductora de calor ya que como se puede observar los cambios de presión indican la evaporación del sodio el cual fue transportado por la zona adiabática dándose a la vez un incremento de la temperatura debido al paso del vapor y finalmente extrayendo el calor del sodio en la zona condensadora

lo cual hacía que el vapor de sodio cambiara nuevamente de fase, como lo corroboran las mediciones de temperatura en las tres diferentes zonas de la lanza.

Durante el monitoreo de las temperaturas de entrada y salida del agua de la zona condensadora se observa que la cantidad de agua necesaria para la extracción de calor es muy pequeña ya que no hubo necesidad de cambiar éste parámetro (flujo de agua) y se mantuvo constante (1.5 l/min) sin tener cambios notables entre ambas temperaturas lo que indica que la cantidad de enfriamiento requerida para la extracción de calor es muy pequeño dando como opciones el enfriamiento por medio de aire que resultaría ser mucho más económico a nivel industrial.

Por otro lado en la prueba de la lanza en el metal líquido se pudo observar el buen funcionamiento de ésta en los primeros segundos del experimento al observar la manera tan efectiva de protegerse a pesar de las altas temperaturas. Cabe mencionar que se tenía previo conocimiento de la reacción entre el cobre (material del contenedor de la lanza) y el aluminio sin embargo la falla técnica en la medición de la temperatura, como se mencionó anteriormente propició que se llegara a la destrucción de la lanza. Aún así se puede observar que la lanza cumplió con el principio de operación de las unidades superconductoras de calor que pueden ser ampliamente utilizadas no solo en operaciones de refinación secundaria sino en procesos de pirometalurgia, súper enfriadores, convertidores o en cualquier zona dentro de la producción del acero y otros metales en donde se requiere el uso de lanzas.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo de investigación se plantearon objetivos que nos condujeran a mostrar y demostrar las ventajas y desventajas de la inyección con lanza en procesos de refinación secundaria y, en general, en procesos pirometalúrgicos en los que se tenga que hacer inyección de gases, y hacer un comparativo con la inyección tradicional a base de tapones porosos. Uno de los argumentos al que se le dio un mayor peso específico tenía que ver con las unidades superconductoras de calor que podrían dar la ventaja de autoproteger la lanza y, por lo tanto, una ventaja significativa sobre los tapones porosos.

Al llevar a cabo el modelado físico y matemático de la inyección de gases en los procesos de refinación secundaria, así como la construcción y prueba de una unidad superconductora de calor se pudo llegar a las siguientes conclusiones:

CONCLUSIONES:

1. Se encontró que los tiempos de mezclado cuando se inyectan gases en un baño metálico con tapones porosos son ligeramente más cortos que cuando se lleva a cabo esta operación la lanza.
2. Estos tiempos de mezclado son función, primordialmente, de la alta energía de agitación que produce el gas por la acción combinada de la energía cinética y potencial del gas inyectado. Esta energía fue posible medirla con un acelerómetro del tipo piezoeléctrico.
3. Los tapones porosos, por otro lado, tienen como desventaja que al inyectarse el gas, éste produce en un área libre de la escoria que protege el baño, más grande que la que se

produce cuando la inyección se hace con lanza, resultados arrojados cuando se simuló el efecto de la inyección de gases sobre el comportamiento de la escoria. Esto en la practica repercutiría en la sobre oxidación del baño metálico.

4. Las redes neuronales artificiales ofrecen la posibilidad de obtener modelos más precisos para pronosticar las mejores condiciones de agitación del baño y mejorarlos con la práctica. En caso de existir modificaciones en el sistema experimental se puede volver a entrenar la red sin hacer prácticamente ningún cambio.
5. Los instrumentos de medición empleados el modelado físico, acelerómetro y la celda fotovoltaica, resultaron ser muy útiles y efectivos. Estos demostraron ser una herramienta muy adecuada para medir, de manera indirecta, la energía del sistema de inyección y los tiempos de mezclado óptimos. El acelerómetro tiene la posibilidad de ser usando como instrumento de control en el proceso real cuando se lleva a cabo esta operación.
6. Las pruebas que se llevaron a cabo con la lanza no-consumible o unidad superconductora de calor resultó ser favorable. Para ello se estuvieron monitoreando tanto la presión como las temperaturas en diferentes zonas de la lanza.
7. La lanza no-consumible construida siguió con el principio de autoprotección de las unidades superconductoras de calor al probarla en aluminio líquido, protegiéndose aún a temperaturas de más de 1300°C por un tiempo de 14 segundos.
8. La inyección con lanza no-consumible es una buena alternativa, a la inyección con tapón poroso, ya que al no fundirse ésta permite tener un mejor control de las condiciones de agitación del baño al disminuir las zonas muertas, acortar los tiempos de homogenización, no exponer el baño metálico a la atmósfera.
9. Usar la unidad SCC como *transductor permanente de temperatura* en operaciones pirometalúrgicas como convertidores, ollas de refinación secundaria, colada continua, metalurgia del cobre, súper enfriamiento, etc. ofrece buenas perspectivas ya que es

posible seguir la evolución de ésta a través de las variaciones de presión y los flujos de calor.

RECOMENDACIONES:

1. Mejorar el sistema de movimiento de la lanza, en el modelo físico para así tener un mejor control no solo del movimiento de oscilación de la lanza sino de la posición y la profundidad a la que se coloca, y poder así determinar los tiempos de mezclado y energías de agitación con mayor precisión y reproducibilidad.
2. Hacer simulaciones de escorias para todas las condiciones de simulación que se llevaron a cabo, tanto de la lanza como de los tapones porosos.
3. Realizar simulaciones matemáticas con la finalidad de obtener una forma de dimensionar la lanza en función a la cantidad de calor a extraer y las condiciones del medio.
4. El uso y manejo de sustancias tan reactivas como el sodio hacen que se tengan que aumentar las medidas de seguridad y, por lo tanto, existe la necesidad de diseñar un manual para las operaciones del ensamble de la lanza y la carga de estas sustancias en la misma.
5. Llevar a cabo la construcción de una lanza no-consumible o unidad superconductora de calor de acero inoxidable para poder así ampliar el rango de temperaturas y baños metálicos, como el acero líquido, por ejemplo.
6. En las primeras fases de prueba de la lanza se recomienda usar metales que tengan punto de fusión más bajos tales como el estaño y el zinc para así poder detectar posibles defectos en el ensamblado y condiciones operativas de las lanzas.
7. Realizar pruebas para la *inyección de polvos* en acero líquido, con una lanza no-consumible, lo que le daría a procesos como la desulfurización, la defosforización, etc. mejores perspectivas y por lo tanto aceros mejores y más limpios.

BIBLIOGRAFIA

- [1] BARRERA C. G. “*Hot Model Simulation of the Bottom Blown Steelmaking Process*”, Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, McGill University, Montreal Canada, 1985.
- [2] LASHERAS E. J. M. “*Tecnología del Acero*”, 2ª Edición, Edit. LJE, Zaragoza España, 1967, pp. 46.
- [3] BARRERA C. G. “*Procesos de Aceración Neumática*”, Notas del Curso, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia Michoacán, 2003.
- [4] FRUEHAN R. J. “*The Making, Shaping and Treating of Steel, Steelmaking and Refining Volume*”, 11ª edition. The AISE Steel Foundation, 2002, pp. 661
- [5] MILLMAN M. S. “*Secondary Steelmaking Developments in British Steel*”, Ironmaking and Steelmaking. Vol. 26, No.3, 1999, pp. 169.
- [6] ZHANG L., TANIGUCHI S., MATSUMOTO K. “*Water Model Study on Inclusion Removal from Liquid Steel by Bubble Flotation under Turbulent Conditions*”, Ironmaking and Steelmaking, Vol 29, No.5, 2002, pp. 326.
- [7] AYALA L. S. “*Introducción a la Refinación Secundaria*”, Notas del Curso, Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia Michoacán, 2000.
- [8] ANDERSSON M., HALLBERG M., JONSSON L., JÖNSSON P. “*Slag-Metal Reaction during Ladle Treatment with Focus on Desulphurization*”, Ironmaking and Steelmaking. Vol 29, No.3, 2002, pp. 224.
- [9] SZEKELY J., CHANG C. W. “*Turbulent Electromagnetically Driven Flow in Metals Processing*”, Part I: Formulation and Part II: Practical Applications. Ironmaking and Steelmaking. Nº 3, 1977, pp. 190-204.

- [10] SZEKELY J. “*Fenómenos de Flujo de Fluidos en Procesamiento de Metales*”, Edit. Limusa, México, 1988.
- [11] GOLDSCHMIT M. B., COPPOLA O. A. H., “*Numerical Modeling of Gas Stirred Ladles*”, Ironmaking and Steelmaking. Vol 28, No.4, 2001, pp. 337.
- [12] SANO M., MORI K., Trans. Jpn. Inst. Met., Vol. 17, 1976, pp. 101-110.
- [13] HEASLIP L. J., McLEAN A., SUMMERVILLE I. D., “*Fluid Flow*”, Continuous Casting, Vol1, Chapter two, ISS-AIME, 1983, pp. 67-84.
- [14] WHITE F. M., “*Mecánica de Fluidos*”, 5ª Edición, Edit. McGraw-Hill, pp. 300.
- [15] OHNISHI M., NAGAI J., YAMOTO T., NAKAI K., TACHIBANA R., “*Metallurgical Characteristics and Operation of Oxygen Top and Bottom Blowing at Mizushima Works*”, Iron and Steelmaker, 1983, pp. 28-34.
- [16] MUCCIARDI F., BARRERA G., “*The Use of Vibrations for Dynamic Control in Primary Steelmaking Operations*”, Process Tech. Proc. of AIME, Vol. 4.4, 1984.
- [17] TAKATSUKA Y. IGUCHI M., “*Effect of Swirl on Mixing Time in Water Bath Agitated by Upward Gas Injection*”, ISIJ Int., 41, 2001, pp. 124-127.
- [18] N. A. Voronova, “*Desulphurization of Hot Metal by Magnesium*”, Chapter I, Published by Iron and Steel Society of AIME, 1983, pp. 1-25.
- [19] KAWASAMI M. “*Desulphurization and Dephosphorization by Bottom Injection of Alkali Bearing Slag Powder*”, Scandinavian Journal of Metallurgy, 1976.
- [20] SANO N., “*New Technologies in Japan*”, Department of Metallurgy and Materials Science, Faculty of Engineering. The University of Tokyo.
- [21] BARDERNHEUER V, OBERHAUSER P, “*Comparison of the Vibration and Sound Measurement to Control the Formation of Slag in the Basic Oxygen Converter*”, Stahlund Eisen, Vol. 90, 1970, pp. 789-795.
- [22] ZHANG H., ZHUANG J., “*Research, development and industrial application of heat pipe technology in China*”, Applied Thermal Engineering 23. 2003, pp. 1067–1083.

- [23] NOIE-BAGHBAN S.H., MAJIDEIAN G.R., “*Waste heat recovery using heat pipe heat exchanger (HPHE) for surgery rooms in hospitals*”, Applied Thermal Engineering 20, 2000, pp. 1271-1282.
- [24] GROLL M., “*Thermal Control of Electronic Equipment by Heat Pipes*”, Rev. Gen. Therm 37. Paris. 1998, pp. 323-352.
- [25] KIM K., WON M., “*Heat pipe cooling technology for desktop PC CPU*”, Applied Thermal Engineering 23, 2003, pp. 1137-1144.
- [26] YU Z., HALLINAN K. P., KAZAN R. A., “*Temperature control of electro hydrodynamic micro heat pipes*”, Experimental Thermal and Fluid Science 27, 2003, pp. 867-875.
- [27] CHUN W., HEACK K. Y., “*An experimental study of the utilization of heat pipes for solar water heaters*”, Applied Thermal Engineering 19, 1999, pp. 807-817.
- [28] TU S.T., ZHANG H., ZHOU W.W., “*Corrosion failures of high temperature heat pipes*”, Engineering Failure Analysis 6, 1999, pp. 363-370.
- [29] AKYURT M., AL-RABGHI O.M., “*Curtailling noncondensables in steel heat pipes using a NaCr solution*”, Energy Conversion & Management 40, 1999, pp. 281-286.
- [30] ZHANG N., “*Innovative Heat Pipe Systems Using a New Working Fluid*”, Int. Comm. Heat Mass Transfer. Vol. 28, No. 8, 2001, pp. 1025-1033,
- [31] SHANKARA N. K. R., “www.cheresources.com/htpipes.shtml”.
- [32] http://www.benchtest.com/heat_pipe2_2.html.
- [33] CHOI H., “*Techniques for the Continuous Measurement of Melt Temperature*”, Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, McGill University, Montreal Canada, 1991.
- [34] JOUDI K. A., WITWIT A.M., “*Improvements of gravity assisted wickless heat pipes*”, Energy Conversion & Management 41, 2000, pp. 2041-2061.
- [35] ANIRUDDHA P., YOGENDRA J., “*Design and Performance Evaluation of a Compact Thermosyphon*”, Woodruff School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology. Atlanta Georgia.

- [36] CAO Y., GAO M., “*Wickless network heat pipes for high heat flux spreading applications*”, International Journal of Heat and Mass Transfer 45, 2002, pp. 2539–2547.
- [37] HUSSEIN H.M.S., MOHAMAD M.A., EL-ASFOURI A.S., “*Optimization of a wickless heat pipe flat plate solar collector*”, Energy Conversion & Management 40, 1999, pp. 1949-1961.
- [38] BARRERA C. G. “*Análisis Numérico*”, Notas del Curso, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia Michoacán, 2004.
- [39] BARRERA C. G., BARRERA C. E., AGUILAR R. E., MARTINEZ G. E., COREÑO A. O., LEON P. C., NUÑEZ L. M., “*Determinación de las Condiciones Optimas de Mezclado en el Proceso de Aceración por Inyección Combinada (CB), Modelado en Agua*”, Revista Ciencia Nicolaita No. 9, UMSNH, Morelia Michoacán, 1995, pp. 119.
- [40] BARRERA C. G., CALDERÓN L. J., ESCUDERO G. R., LEMUS R. J., MENDOZA S. G., “*Determinación de Tiempos de Homogeneizado en Ollas de Refinación Secundaria, Modelado en Agua*”, Revista Ciencia Nicolaita No. 1, UMSNH, Morelia Michoacán, 1992, pp. 77.
- [41] <http://www.edicionsupc.es/ftppublic/pdfmostra/EM04903M.pdf>