

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE QUÍMICA

“Efecto del tamaño de partícula y diseño de rotor en el aleado de Si en Al usando la técnica del rotor - inyector”

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA**

PRESENTA

YAMILETT GARCÍA VIGUERAS



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX

2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: Dr. Carlos González Rivera
VOCAL: Profesor: M. en I. Agustín Ruiz Tamayo
SECRETARIO: Profesor: Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez
1er. SUPLENTE: Profesor: IQM Diego Alberto Abreu López
2° SUPLENTE: Profesor: M. en M. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: Laboratorio 009, edificio D, Facultad de Química, UNAM, CDMX.

ASESOR DEL TEMA: Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez

SUPERVISOR TÉCNICO: M. en M. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco

SUSTENTANTE: Yamilett García Viguera

Agradecimientos.

Se agradece el apoyo económico por el concepto de beca al proyecto **PAPIIT IN115617** con el título *“Determinación de las características magneto hidrodinámicas de plasmas de soldadura mediante simulación numérica y teorías de escalamiento”*, también se agradece el apoyo financiero por concepto de tesis al proyecto **PAPIIT IN114115** con el título *“Diseño de un rotor y optimización en una olla de desgasificado de aluminio mediante modelado físico y matemático”*, ambos a cargo del Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez.

Contenido.

Lista de símbolos.....	I
Lista de figuras.....	IV
Lista de tablas.....	VII
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. El aluminio.....	2
1.2.1. Clasificación de las aleaciones base aluminio.....	4
1.2.2. Aleación aluminio-silicio.....	5
1.3. Desgasificado: técnica del rotor-inyector.....	7
1.3.1. Agitación.....	9
1.3.2. Mezclado.....	10
1.3.3. Tiempo de mezclado.....	10
1.3.4. Tipos de impulsores o mezcladores.....	11
1.3.5. Rotor-estator.....	12
1.3.6. Bombeo.....	13
1.4. Revisión bibliográfica.....	13
Hipótesis.....	24
Objetivos.....	24
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	25
2.1. Balance de carga.....	28
2.2. Preparación de las cargas de aluminio puro (comercial).....	29
2.3. Preparación de las cargas de silicio.....	30
2.4. Experimentación.....	32

2.5. Procesamiento de datos.	36
2.5.1. Balance de materia.	36
2.5.2. Rendimiento de silicio.	36
2.5.3. Curvas de tiempo contra concentración adimensional.	37
2.5.4. Tiempo de mezclado.	37
2.5.5. Curvas de área interfacial vs tiempo.	39
2.5.6. Cinéticas de disolución.	41
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	43
3.1. Composición química.	43
3.2. Balance de materia.	43
3.3. Rendimiento del silicio.	44
3.4. Curvas de concentración.	48
3.5. Tiempo de mezclado.	55
3.6. Cinéticas de disolución.	58
3.7. Correlaciones de tiempo mezclado y rendimiento de Si en función del tamaño de partícula y tipo de rotor.	62
3.8. Optimización del proceso de disolución.	64
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES.	67
Referencias.	69
ANEXO I. Impresión de las determinaciones de composición química promedio obtenidas por espectrometría de emisión durante la experimentación al final de cada experimento.	71
Experimento A con las variables: tamaño de partícula de 0.131 in y rotor 5 aspas.	71
Experimento C para las variables: tamaño de partícula de ½ in y rotor 5 aspas. ...	72
Experimento D para las variables: tamaño de partícula de ¾ in y rotor 5 aspas. ...	72

Experimento E para las variables: tamaño de partícula de 0.103 in y rotor estándar	73
Experimento F para las variables: tamaño de partícula de $\frac{1}{4}$ in y rotor estándar. .	73
Experimento G para las variables: tamaño de partícula de $\frac{1}{2}$ in y rotor estándar. 74	74
Experimento H para las variables: tamaño de partícula de $\frac{3}{4}$ in y rotor estándar.. 74	74
Experimento I para las variables: tamaño de partícula de 0.0661 in y rotor 5 aspas.	75

Lista de símbolos.

Símbolo	Significado.
a_C^*	Actividad del carbón en la interfase.
a_{solid}	Actividad del carbón sólido.
A	Área de contacto en la interfase sólido-líquido.
A_{part}^t	Área por partícula a diferentes tiempos.
A_{ave}	Área superficial de interfaz sólido líquido.
A_T^t	Área total de superficie de las partículas de silicio.
Q_{Ti}	Calor liberado por mol de titanio que reacciona con el hierro.
$D_{Si/Al}$	Coefficiente de difusión binaria en Al-Si
K_m	Coefficiente de transferencia de masa.
k_{Nb}^{off}	Coefficiente experimental de transferencia de masa en condiciones estáticas.
k_{Nb}	Coefficiente experimental de transferencia de masa.
C_{adm}^t	Concentración adimensional al tiempo t.
$C_{eq.}$	Concentración al equilibrio.
C_t	Concentración al tiempo t.
$[C]^*$	Concentración de carbono en la interfase.
$[C]$	Concentración de carbón en el baño.
C_{Nb}^{*L}	Concentración de niobio en acero.
C_{sat}	Concentración de saturación.
C_{Si}^F	Concentración de Si en la aleación final.
C_{Si}^t	Concentración de Si en la moneda al tiempo t.
C_{Si}^o	Concentración de Si inicial en el aluminio puro comercial.
$C_{Fe/Ti}$	Concentración de titanio en la zona de reacción.
C_{Ti}	Concentración de titanio inicial.
C_{solid}	Concentración del carbón sólido.
C_b	Concentración del seno del líquido.
C_{Nb}^{Bulk}	Concentración inicial de niobio en acero.
$C_{real Si}^F$	Concentración real de la última moneda.
$C_{real si}^t$	Concentración real de Si al tiempo t.
k_{Fe}	Conductividad térmica del hierro.
k_{Ti}	Conductividad térmica del titanio.
K_r	Constante de equilibrio de reacción.
k_r	Constante de velocidad de reacción.
ρ_{Si}	Densidad de silicio a temperatura ambiente.
$\rho_{Al}(T)$	Densidad del Al a temperatura T.
ρ_m	Densidad del baño (g/cm ³)

ρ_{Nb*s}	Densidad del niobio.
ρ	Densidad.
$\frac{\Delta C}{\Delta t}$	Derivada numérica de la concentración con respecto al tiempo.
D	Diámetro del agitador.
d	Diámetro de la probeta.
α_{Fe}	Difusividad térmica del hierro.
α_{Ti}	Difusividad térmica del titanio.
δ_m	Espesor de la capa límite.
j_d	Factor de transferencia de masa.
Q	Flujo de gas.
\overline{m}_{ave}	Flujo de masa promedio.
N_{Ti}	Flux molar de titanio.
L	Longitud del cilindro sumergido.
m_{ale}^t	Masa de la aleación al tiempo t.
m_{ale}	Masa de la aleación final.
m_M^t	Masa de la moneda al tiempo t.
m_{part}^t	Masa de la partícula al tiempo t.
m_{part}^{t-1}	Masa de la partícula al tiempo t-1.
$m_{Si\ dis}^t$	Masa de si disuelto al tiempo t.
m_{Si}^T	Masa de Si en la aleación.
m_{Si}^t	Masa de silicio en la aleación al tiempo t.
m_{papel}	Masa del papel aluminio.
$m_{si\ ale}^{t-1}$	Masa del silicio disuelto al tiempo t-1.
m_d	Masa disuelta de Si
m_{Al}^o	Masa inicial de aluminio.
m_{Si}^o	Masa inicial de silicio.
m_{part}	Masa inicial de una partícula de silicio.
Gr_m	Número de Grashof.
N^o_p	Número de partículas.
Re	Número de Reynolds.
Ω	Número de rotaciones por minuto
Sc	Número de Schmidt.
Sh	Número de Sherwood.
m	Pendiente.
Pe_{ale}	Perdida de material.
M_{NB}	Peso molecular del niobio.
r	Posición radial.
r^t	Radio de la partícula al tiempo t.

r_0	Radio inicial de las partículas de Si.
r_1	Radio inicial de titanio.
r_2	Radio la carcasa de acero líquido de interfase al tiempo t.
r_r	Rapidez de la reacción de disociación.
r_m	Rapidez de transferencia de masa.
Ren_{Si}	Rendimiento de silicio.
N	Revoluciones por minuto.
Rot	Rotor.
Tp	Tamaño de partícula.
t_{total}	Tiempo de fusión de la coraza.
θ	Temperatura.
t_R	Tiempo de inicio de la reacción exotérmica.
t_{mix}	Tiempo de mezclado.
t	Tiempo.
v	Velocidad de disolución.
u	Velocidad superficial.
μ	Viscosidad dinámica del fluido.
V_{ale}	Volumen de la aleación al tiempo t.
V_{part}^0	Volumen de la partícula de silicio.
V_{part}^t	Volumen de partícula al tiempo t.
V_{Si}^t	Volumen de silicio total al tiempo t.

Lista de figuras.

FIGURA 1. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE PRODUCCIÓN DE METALES VÍA FUNDICIÓN.....	2
FIGURA 2. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE PRODUCCIÓN MUNDIAL DE ALUMINIO [5].	3
FIGURA 3. DIAGRAMA DE FASES DE ALUMINIO-SILICIO [6].	6
FIGURA 4. CINÉTICA DE REMOCIÓN DE HIDROGENO CON DIFERENTES TÉCNICAS DE DESGASIFICACIÓN CON PURGA DE GASES; LANZA, TAPÓN POROSO Y ROTOR EN 200 KG DE ALEACIÓN AL-7%SI-0.5%MG PARA UN FLUJO DE GAS DE 6L/MIN [7].	8
FIGURA 5. ESQUEMA DE DESGASIFICACIÓN POR ROTOR-INYECTOR 1) MOTOR, 2) EJE IMPULSOR, 3) ROTOR-INYECTOR, 4) CRISOL [8].	8
FIGURA 6. IMÁGENES DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ROTOR A) IMPULSORES DE FLUJO AXIAL, B) IMPULSORES DE FLUJO RADIAL, C) IMPULSORES DE ALTO CORTE [9].	12
FIGURA 7. GRÁFICOS DEL EFECTO DEL SOBRECALENTAMIENTO SOBRE LA VELOCIDAD DE DISOLUCIÓN DE UNA ADICIÓN CILÍNDRICA DE SI EN AL A) EN CONDICIONES DE CONVECCIÓN NATURAL, B) EN CONVECCIÓN FORZADA A 10 RPM, C) EN CONVECCIÓN FORZADA A 20 RPM [11].	14
FIGURA 8. GRÁFICO DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA DE FUSIÓN SOBRE LA DISOLUCIÓN DE LAS PROBETAS EN CONDICIÓN DE CONVECCIÓN NATURAL [13].	17
FIGURA 9. GRÁFICO DE LA DISMINUCIÓN DEL DIÁMETRO DE LAS PROBETAS A) PARA UN ORIFICIO DE 2 MM A VELOCIDADES BAJAS DE AGITACIÓN CON GAS B) PARA UN ORIFICIO DE 160 MM A VELOCIDADES ALTAS DE AGITACIÓN CON GAS.	18
FIGURA 10. GRÁFICOS DE LA DISOLUCIÓN CON CONVECCIÓN NATURAL DE A) FERROVAC E EN BAÑO DE HIERRO SATURADO DE CARBONO, B) ACERO 1045 EN BAÑO DE HIERRO SATURADO DE CARBONO.	19
FIGURA 11. PROBETAS DE FERROVAC E DESPUÉS DE LA DISOLUCIÓN EN UN BAÑO DE HIERRO SATURADO DE CARBONO A) CON CONVECCIÓN NATURAL A 2467 °F, B) CONVECCIÓN FORZADA CON 100 RPM A 2278 °F C) CONVECCIÓN FORZADA CON 900 RPM A 2278 °F. LOS NÚMEROS EN LA PARTE SUPERIOR INDICAN EL TIEMPO DE INMERSIÓN EN SEGUNDOS.	20
FIGURA 12. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL CILINDRO D TITANIO EN FORMACIÓN DE CORAZA DE ACERO Y LA ZONA DE REACCIÓN.	21
FIGURA 13. IMAGEN DEL ESQUIPO MONTADO QUE SE EMPLEÓ PARA LA EXPERIMENTACIÓN, 1) TANQUE DE GAS ARGÓN, 2) FLUJOMETRO, 3) ROTOR, 4) FLECHA DEL ROTOR, 5) COMPUTADORA CON EL SOFTWARE, 6) ADQUISIDOR DE DATOS, 7) CONTROLADOR DE TEMPERATURA, 8) MOTOR DEL ROTOR-INYECTOR, 9) MOLDE PARA LA MUESTRA, 10) HORNO DE PISO DE RESISTENCIA, 11) TERMOPAR TIPO K, 12) CUCHARA PARA TOMA DE MUESTRA, 13) MESA ELEVADORA MANUAL, 14) MUFLA.	26
FIGURA 14. DIAGRAMA DE FASES ALUMINIO-SILICIO MOSTRANDO LA TEMPERATURA DE TRABAJO Y EL % Si OBJETIVO EN EL PROCESO DE ALEACIÓN PROPUESTO [6].	26
FIGURA 15. FOTOGRAFÍAS DE LOS ROTORES EMPLEADOS EN LA EXPERIMENTACIÓN A) ESTÁNDAR VISTA FRONTAL E INFERIOR, B) 5 ASPAS VISTA FRONTAL E INFERIOR.	27
FIGURA 16. IMAGEN DE LOS LINGOTES A) ANTES DEL CORTE, B) DESPUÉS DEL CORTE.	29
FIGURA 17. IMAGEN DE LAS CARGAS DE ALUMINIO UTILIZADAS PARA LA EXPERIMENTACIÓN, LINGOTES E 250 G + 50 G.	29
FIGURA 18. IMAGEN DE LA TRITURADORA DE QUIJADA UTILIZADA PARA LA TRITURACIÓN PRIMARIA. A) VISTA FRONTAL, B) VISTA SUPERIOR.	30

FIGURA 19. IMAGEN DE A) CONJUNTO DE MALLAS UTILIZADAS PARA EL CRIBADO DE SILICIO, B) EQUIPO UTILIZADO PARA CRIBAR (RO-TAP).	31
FIGURA 20. IMAGEN DE LAS MALLAS COMENZANDO POR EL TAMAÑO DE APERTURA MÁS GRANDE (1 IN) DE LADO IZQUIERDO Y TERMINANDO CON EL TAMAÑO MÁS PEQUEÑO (0.131 IN) LADO DERECHO. EN LA PARTE INFERIOR DEL LADO IZQUIERDO SE OBSERVA EL TAMAÑO DE PARTÍCULA DE Si DEL QUE SE PARTIÓ PARA LA OBTENCIÓN DE LOS TAMAÑOS DESEADOS, SEGUIDO DE LOS TAMAÑOS $\frac{3}{4}$ IN, $\frac{1}{2}$ IN, $\frac{1}{4}$ IN Y 0.131 IN.	31
FIGURA 21. IMAGEN DE LOS PAQUETES DE SILICIO FORMADOS CON PAPEL ALUMINIO.	31
FIGURA 22. IMAGEN DE A) MUFLA UTILIZADA PARA EL PRECALENTAMIENTO DE LOS LINGOTES, B) MUFLA ABIERTA MOSTRANDO EL ARREGLO DE LA CARGA.	32
FIGURA 23. IMAGEN DE A) EQUIPO MONTADO DEL ROTOR INYECTOR, B) HORNO DE PISO Y DE RESISTENCIA UTILIZADO PARA LA EXPERIMENTACIÓN.	33
FIGURA 24. IMAGEN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS DE CUATRO EXPERIMENTOS, TOMADAS A LOS DIFERENTES TIEMPOS SEGÚN EL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.	33
FIGURA 25. IMAGEN DE A) ADQUISIDOR DE DATOS DAQVIEW, B) DETALLE DEL PROGRAMA PARA ADQUIRIR DATOS “PERSONAL DAQVIEW”, C) TERMOPAR TIPO K CUBIERTO POR UN TUBO DE VIDRIO SELLADO.	34
FIGURA 26. CURVA DE LA VARIACIÓN EN LA TEMPERATURA DEL BAÑO DURANTE UNA EXPERIMENTACIÓN DE DISOLUCIÓN.	35
FIGURA 27. IMAGEN DEL A) EQUIPO DE ANÁLISIS DE CHISPA SPECTRO ANALYTICAL INSTRUMENTS, B) PROGRAMA MEASURE WINDOW- ELEMENTS-CONCENTRATION UTILIZADO PARA EL ESPECTRO, C) TOMA TÍPICA DEL ANÁLISIS DE CHISPA PARA UNA MONEDA.	35
FIGURA 28. CURVA DE EVOLUCIÓN DE TIEMPO CONTRA LA CONCENTRACIÓN ADIMENSIONAL PARA EL ROTOR DE 5 ASPAS CON TAMAÑO DE PARTÍCULA DE $\frac{1}{2}$ IN, ILUSTRANDO EL PROCEDIMIENTO GRÁFICO PARA OBTENER EL TIEMPO DE MEZCLADO.	38
FIGURA 29. CURVA DE RENDIMIENTO DE Si CONTRA EL TAMAÑO DE PARTÍCULA PARA LOS ROTORES DE 5 ASPAS Y ESTÁNDAR.	46
FIGURA 30. CURVA DE RENDIMIENTO DE Si CONTRA TIEMPO PARA AMBOS ROTORES, DONDE SE ANEXA, DE COLOR ROJO, EL RENDIMIENTO DEL Si PARA UN TAMAÑO DE PARTÍCULA DE 0.0661 IN.	47
FIGURA 31. IMAGEN DE Si A) A LOS PRIMEROS MINUTOS DEL EXPERIMENTO, B) A MITAD DEL EXPERIMENTO, C) AL FINALIZAR EL EXPERIMENTO, C) SILICIO SIN DISOLVER AL TERMINO DEL EXPERIMENTO CON ESCORIA Y ALUMINIO.	48
FIGURA 32. CURVA DE EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ADIMENSIONAL DE SILICIO CON EL TIEMPO PARA EL ROTOR ESTÁNDAR A DIFERENTES TAMAÑOS DE PARTÍCULA.	49
FIGURA 33. CURVA DE EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ADIMENSIONAL DE SILICIO CON EL TIEMPO PARA EL ROTOR DE 5 ASPAS A DIFERENTES TAMAÑOS DE PARTÍCULA.	49
FIGURA 34. CURVA DE EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ADIMENSIONAL DE SILICIO CON EL TIEMPO, COMPARANDO LOS ROTORES DE 5 ASPAS Y ESTÁNDAR PARA UN TAMAÑO DE PARTÍCULA DE 0.131 IN.	51
FIGURA 35. CURVA DE EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ADIMENSIONAL DE SILICIO CON EL TIEMPO, COMPARANDO LOS ROTORES DE 5 ASPAS Y ESTÁNDAR PARA UN TAMAÑO DE PARTÍCULA DE $\frac{1}{4}$ IN.	51
FIGURA 36. CURVA DE EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ADIMENSIONAL DE SILICIO CON EL TIEMPO, COMPARANDO LOS ROTORES DE 5 ASPAS Y ESTÁNDAR PARA UN TAMAÑO DE PARTÍCULA DE $\frac{1}{2}$ IN.	52

FIGURA 37. CURVA DE EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ADIMENSIONAL DE SILICIO CON EL TIEMPO, COMPARANDO LOS ROTORES DE 5 ASPAS Y ESTÁNDAR PARA UN TAMAÑO DE PARTÍCULA DE $\frac{3}{4}$ IN.	52
FIGURA 38 CURVA DE EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ADIMENSIONAL DE SI VS EL TIEMPO PARA TAMAÑO DE PARTÍCULA DE 0.0661 IN.	54
FIGURA 39. TIEMPOS DE MEZCLADO OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA PARA CADA TIPO DE ROTOR.	56
FIGURA 40. CURVA DE EVOLUCIÓN DE TIEMPO CONTRA EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA (k_A) PARA EL ROTOR DE 5 ASPAS PARA DIFERENTES TAMAÑOS DE PARTÍCULA.	59
FIGURA 41. CURVA DE EVOLUCIÓN DE TIEMPO CONTRA EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA (k_A) PARA EL ROTOR ESTÁNDAR PARA DIFERENTES TAMAÑOS DE PARTÍCULA.	59
FIGURA 42. CURVA DE EVOLUCIÓN DEL ÁREA INTERFACIAL CON EL TIEMPO PARA EL ROTOR 5 ASPAS A DIFERENTES TAMAÑOS DE PARTÍCULA.	61
FIGURA 43. CURVA DE EVOLUCIÓN DEL ÁREA INTERFACIAL CON EL TIEMPO PARA EL ROTOR ESTÁNDAR A DIFERENTES TAMAÑOS DE PARTÍCULA.	61
FIGURA 44. CURVAS DE EVOLUCIÓN DEL TIEMPO DE MEZCLADO CON RESPECTO A TAMAÑO DE PARTÍCULA, OBTENIDAS CON EL PROGRAMA TABLE CURVE2D V5.01 PARA EL ROTOR DE A) 5 ASPAS Y B) ESTÁNDAR.	62
FIGURA 45. CURVAS DE EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO CON RESPECTO A TAMAÑO DE PARTÍCULA, OBTENIDAS CON EL PROGRAMA TABLE CURVE2D V5.01 PARA EL ROTOR DE A) 5 ASPAS Y B) ESTÁNDAR.	64
FIGURA 46. OPTIMIZACIONES HECHAS EN MATLAB USANDO EL ALGORITMO GENÉTICO PARA A) ROTOR ESTÁNDAR, B) ROTOR DE 5 ASPAS.	65
FIGURA 47. FRENTE DE PARETO MOSTRANDO LOS TIEMPOS DE MEZCLADO Y RENDIMIENTOS ÓPTIMOS PARA EL ROTOR ESTÁNDAR.	66

Lista de tablas.

TABLA 1. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE METALES POR TIPO DE FUNDICIÓN 2015 [1].....	1
TABLA 2. CLASIFICACIÓN DE ALUMINIO PARA CONFORMADO [2].	4
TABLA 3. CLASIFICACIÓN DE ALUMINIO PARA FUNDICIÓN [2], [3], [4].....	5
TABLA 4. CLASIFICACIÓN DE LOS DISTINTOS TIPOS DE IMPULSORES [9].	11
TABLA 5. VARIABLES EMPLEADAS EN LA EXPERIMENTACIÓN	28
TABLA 6. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MONEDA AL TIEMPO 0 DEL PRIMER EXPERIMENTO.	43
TABLA 7. BALANCE DE MATERIA.	44
TABLA 8. RENDIMIENTO DE SI SEGÚN EL ROTOR Y EL TAMAÑO DE PARTÍCULA	45
TABLA 9. TIEMPOS DE MEZCLADO EN SEGUNDOS PARA LOS ROTORES DE 5 ASPAS Y ESTÁNDAR A DIFERENTES TAMAÑOS DE PARTÍCULA.	56
TABLA 10. COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA (k_A) CALCULADO PARA CADA EXPERIMENTO A DIFERENTES TIEMPOS.	58
TABLA 11. COEFICIENTES OBTENIDOS POR TABLE CURVE2D V5.01 PARA EL TIEMPO DE MEZCLADO.....	63
TABLA 12. COEFICIENTES OBTENIDOS POR TABLE CURVE2D V5.01 PARA EL RENDIMIENTO DE SILICIO.	63
TABLA 13. PUNTOS ÓPTIMOS PARA EL ROTOR DE 5 ASPAS Y ESTÁNDAR SEGÚN LA OPTIMIZACIÓN POR EL PROGRAMA MATLAB.....	65

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO.

1.1. Introducción.

El hombre tratando de conseguir mejores condiciones de vida ha usado su ingenio durante toda su existencia. Para lograr este objetivo, se ha valido del uso de metales que hasta la actualidad siguen presentes en la vida cotidiana. Sin darnos cuenta, hemos creado una dependencia con la metalurgia tal que, a estas alturas, nos sería difícil vivir sin metales y sus aleaciones.

Esta dependencia se ve reflejada en la producción mundial de metales. Prueba de esto es lo publicado en diciembre de 2016 en la revista *Modern casting* donde se asegura que, en 2015, la producción mundial de piezas metálicas obtenidas vía fundición alcanzó los 104.1 millones de toneladas métricas, lo cual representa un ligero aumento en producción en comparación a los 103.7 millones de toneladas métricas producidas en 2014, de acuerdo con el censo de ese año de la producción mundial de fundición. El crecimiento en producción de 2013 a 2014 fue del 2.37% y de 2014 a 2015 fue de 0.4%. El 2015 fue el sexto año consecutivo que el mercado de piezas procesadas vía fundición se ha expandido después de la recesión mundial del 2008-2009. México reportó un aumento de 55% en su producción en este periodo, lo que indica que la producción de fundición pudo haber sido subestimada en los últimos años [1].

Tabla 1. Producción mundial de metales por tipo de fundición 2015 [1].

Producción mundial de 2015 (toneladas métricas).									
Hierro Gris	Hierro dúctil	Hierro maleable	Acero	Aleaciones base cobre	Aluminio	Magnesio	Zinc	Otros no Ferrosos	Total
46738654	25575894	884581	10887948	1761182	16053014	198121	675022	1354841	104129257

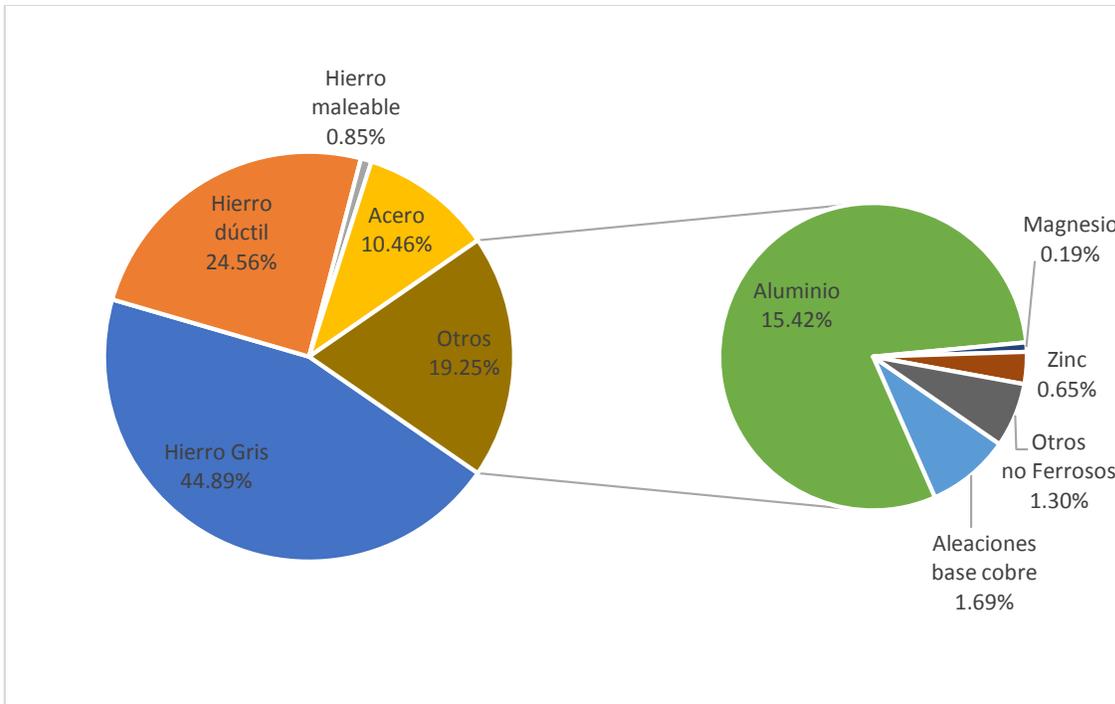


Figura 1. Representación gráfica de producción de metales vía fundición.

Como se observa en la **Figura 1** y en la **Tabla 1**, la producción por fundición se puede dividir en dos grandes grupos: fundición ferrosa y no ferrosa. Dentro de los productos no ferrosos, que representan el 19.25% del total de la producción por fundición, encontramos al aluminio con un 15.42%, representando éste metal más del 80% del total de todos los metales no ferrosos producidos. Este trabajo se enfoca a ese 80% de la producción vía fundición de los metales no ferrosos, es decir, al aluminio.

1.2. El aluminio.

Según la ASM (American Society for Metals) el aluminio es el segundo elemento metálico más abundante en la tierra. Se hizo accesible después de la invención de la refinación de aluminio por el proceso de Hall-Heroult, nombre dado por sus creadores Charles Hall y Paul Heroult, que de forma independiente hicieron posible la reducción electrolítica de alúmina (Al_2O_3) disuelta en criolita fundida [2]. Posteriormente con la aparición de los primeros vehículos con motor de combustión interna el aluminio tomó gran relevancia como material de automoción. Algunas otras aplicaciones del aluminio fueron la electrificación, la cual requeriría cantidades inmensas de metal conductor ligero

para la transmisión a larga distancia y para la construcción de las torres necesarias para soportar la red aérea de cables que suministran energía eléctrica desde sitios de generación de energía [3].

En la primera parte del siglo XX, la aplicación de piezas fundidas de aluminio se limitó a piezas decorativas y utensilios de cocina. Después de la Segunda Guerra Mundial, se produjo una dramática expansión de la industria de fundición de aluminio. Se desarrollaron nuevas aleaciones y se implementaron procesos de colada para cumplir con especificaciones de ingeniería y para ampliar el rango de aplicaciones comerciales y técnicas. La reciente "crisis energética" de los años setenta condujo a un mayor uso del aluminio fundido en muchos vehículos, debido a su excelente relación resistencia-peso [3], [4].

Como ya se describió en la **Figura 1**, el aluminio es el metal no ferroso más utilizado. Debido a su resistencia y ligereza se ha convertido en un insumo estratégico en la fabricación de equipos de transporte, en el sector de construcción, elaboración de envases y empaques [5]. Esto ha generado una alta demanda, por lo que la producción de aluminio se ha incrementado como se muestra en la **Figura 2**.



Figura 2. Representación gráfica de producción mundial de aluminio [5].

1.2.1. Clasificación de las aleaciones base aluminio.

Las aleaciones de aluminio se dividen en dos categorías: por colada y para conformado. Su sistema de identificación de aleaciones emplea diferentes nomenclaturas para cada caso.

En el caso de aleaciones para conformado se utiliza un sistema de cuatro dígitos como se muestra en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Clasificación de Aluminio para conformado [2].

Clasificación	Descripción.
1xxx	Composiciones controladas sin alear (puras).
2xxx	Aleaciones en las que el cobre es el principal elemento de aleación, aunque otros elementos como el magnesio, puede especificarse.
3xxx	Aleaciones en las que el manganeso es el principal elemento de aleación.
4xxx	Aleaciones en las que el silicio es el principal elemento de aleación.
5xxx	Aleaciones en las que el magnesio es el principal elemento de aleación.
6xxx	Aleaciones en las que el magnesio y el silicio son elementos principales de aleación.
7xxx	Aleaciones en las que el zinc es el principal elemento de aleación, pero otros elementos como el cobre, magnesio, cromo y zirconio pueden especificarse.
8xxx	Aleaciones incluyendo estaño y algunas composiciones de litio que caracterizan composiciones diversas.
9xxx	Reservado para uso futuro.

Para el caso de las aleaciones por fundición se describen mediante un sistema de tres dígitos seguido de un valor decimal. El primer dígito indica el elemento principal de aleación en el grupo. La **Tabla 3** presenta esta notación.

Tabla 3. Clasificación de Aluminio para fundición [2], [3], [4]

Clasificación	Descripción.
<i>1xx.x</i>	Composiciones puras 99.0%.
<i>2xx.x</i>	Aleaciones en las que el cobre es el principal elemento de aleación.
<i>3xx.x</i>	Aleaciones de silicio con magnesio y/o cobre.
<i>4xx.x</i>	Aleaciones en las que el silicio es el principal elemento de aleación.
<i>5xx.x</i>	Aleaciones en las que el magnesio es el principal elemento de aleación.
<i>6xx.x</i>	No utilizado.
<i>7xx.x</i>	Aleaciones en las que el zinc es el principal elemento de aleación.
<i>8xx.x</i>	Aleaciones de titanio.
<i>9xxx</i>	No utilizado.

En el grupo 1xx.x, los dos dígitos a la izquierda del punto decimal indican el mínimo de contenido de aluminio. Por ejemplo, una designación 190.x corresponde a un aluminio con una pureza del 99,90%. El decimal .0 en todos los casos se refiere a aleación de colada. Los decimales .1 y .2 se refieren a composiciones de lingotes que, después de la fusión y el procesamiento, deben dar lugar a procedimientos químicos que se ajusten a los requisitos de especificación de colada. En los grupos de aleaciones de 2xx.x a 9xx.x, el segundo y tercer dígito no tienen significado específico y sirven únicamente para identificar las diferentes aleaciones del grupo. El último dígito a la derecha del punto decimal identifica la forma del producto [3].

En la actualidad se estima que más del 50% de las piezas fundidas de aluminio están hechas de metal reciclado.

1.2.2. Aleación aluminio-silicio.

El diagrama de fases es una herramienta termodinámica útil para comprender los efectos que se producen en la microestructura de una aleación variando la concentración del elemento aleante, también ayuda a: 1) determinar las fases de equilibrio que se forman y el rango de temperaturas en que son estables éstas o se disuelven, 2)

determinar la temperatura en la que inicia la fusión y la solidificación o el rango de solidificación/fusión de una aleación, 3) establecer las temperaturas de trabajo en procesos de fundición y/o tratamientos térmicos y 4) identificar la cantidad de un elemento aleante para obtener una microestructura deseada en condiciones de equilibrio.

Entre las regiones que componen el diagrama de fases Al-Si se encuentran: 1) las fases que comprenden soluciones sólidas primarias α -aluminio y silicio, 2) el dominio de fases mixtas (L+ α , L+Si) ubicadas entre la fase líquida y las soluciones sólidas, 3) líneas de líquidus (líneas superiores) que indican la temperatura a la cual la aleación se funde completamente o empieza a solidificar, 4) línea de sólidus (línea inferior solo del lado rico en aluminio) que indica la temperatura a la cual la aleación solidifica totalmente o empieza a fundir, 5) máxima solubilidad de fase α (1.65 % Si) a 577°C, 6) punto eutéctico con 12.2 %Si a 577°C, 7) temperatura de fusión del aluminio puro a 660°C y 8) temperatura de fusión del silicio puro a 1414°C (ver **Figura 3**).

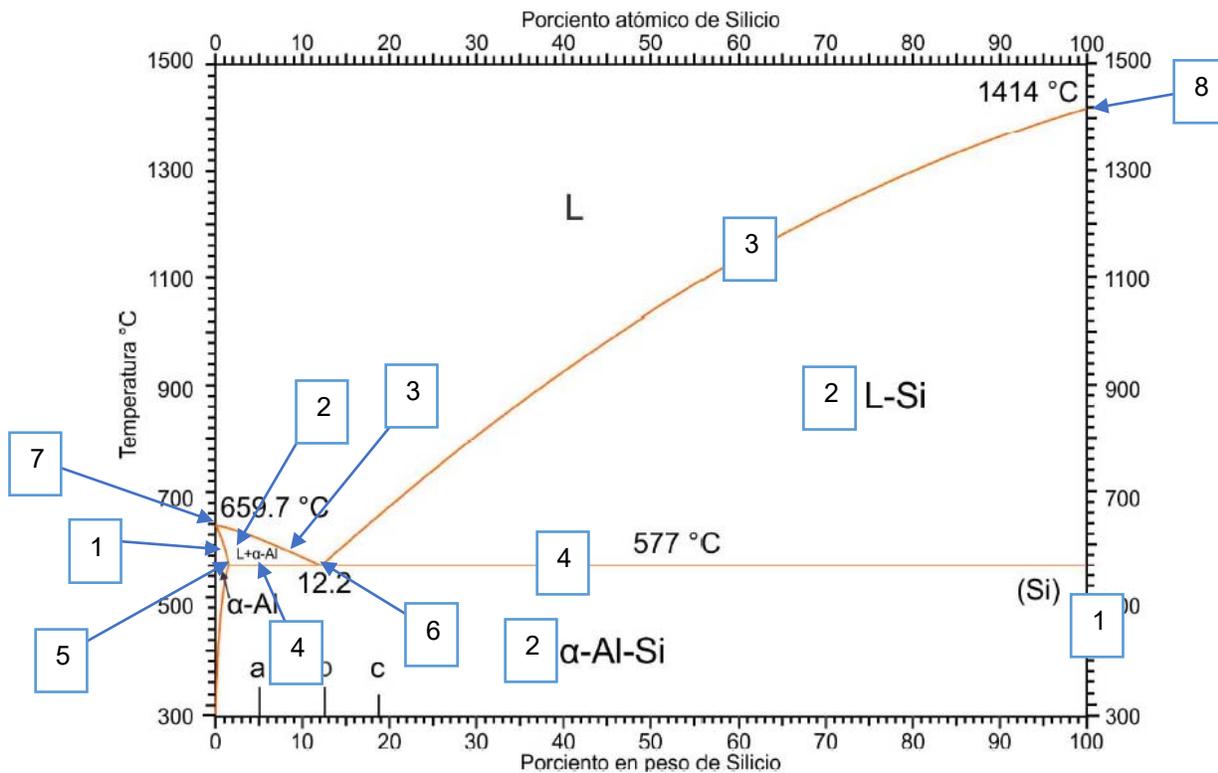


Figura 3. Diagrama de fases de Aluminio-Silicio [6].

Las aleaciones aluminio -silicio constituyen del 85% al 90% del total de piezas fundidas producidas de aluminio [4]. Las aleaciones de aluminio que contienen el silicio como el principal elemento de aleación ofrecen una excelente resistencia a la corrosión, pueden ser mecanizadas y presentan buena fluidez. Debido a la presencia de Si, la aleación tiene una reducción en el rango de fusión sin producir fragilidad, por lo que es utilizada como alambre de soldadura.

La aleación de Al-Si se obtiene mediante proceso de fundición que consiste en introducir aluminio primario o chatarra de aluminio en un horno. Fundido el metal, se agregan los elementos aleantes, principalmente el Si metálico.

Es importante para la productividad de una planta de fundición estudiar los fenómenos que intervienen durante el mezclado y la disolución de elementos aleantes. En este sentido el proceso de rotor-inyector que sirve para desgasificar al aluminio se puede emplear en un estudio cinético de disolución de Si en aluminio por las condiciones controladas de agitación que se obtienen con esta técnica, las cuales son necesarias en los procesos de disolución controlados por el transporte de masa. Por esto, a continuación, se describe en forma resumida la técnica del rotor-inyector.

1.3. Desgasificado: técnica del rotor-inyector.

Aunque en este trabajo, no se realiza el desgasificado de aluminio, si se utiliza el sistema rotor-inyector, vale la pena revisar aspectos generales del proceso de desgasificación con el propósito de entender su funcionamiento. Así que se describe la desgasificación de aluminio.

En la desgasificación del aluminio líquido mediante la técnica del rotor-inyector, que por cierto es la técnica más eficiente para remover hidrógeno de todas las disponibles para tal efecto (ver **Figura 4**), el hidrógeno que se encuentra disuelto en el aluminio líquido proveniente de la humedad debe eliminarse ya que de lo contrario producirá poros en las piezas solidificadas de aluminio con lo cual sus propiedades mecánicas se verán mermadas.

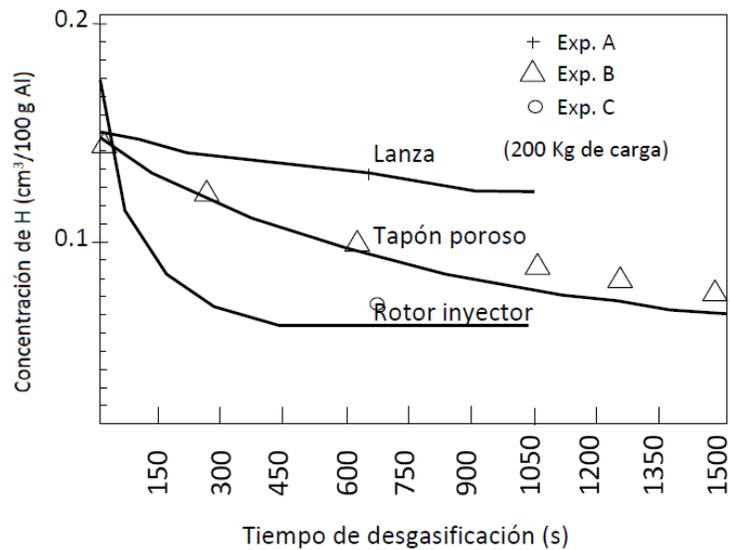


Figura 4. Cinética de remoción de hidrogeno con diferentes técnicas de desgasificación con purga de gases; lanza, tapón poroso y rotor en 200 Kg de aleación Al-7%Si-0.5%Mg para un flujo de gas de 6L/min [7].

El método introduce el gas de tratamiento en el metal fundido a través de un rotor que gira rápidamente, el cual promueve convección y difusión turbulenta (ver **Figura 5**). Una medida de la eficiencia de esta agitación en reactores tipo batch agitados mecánicamente con propela o rotor es el uso del concepto de tiempo de mezclado.

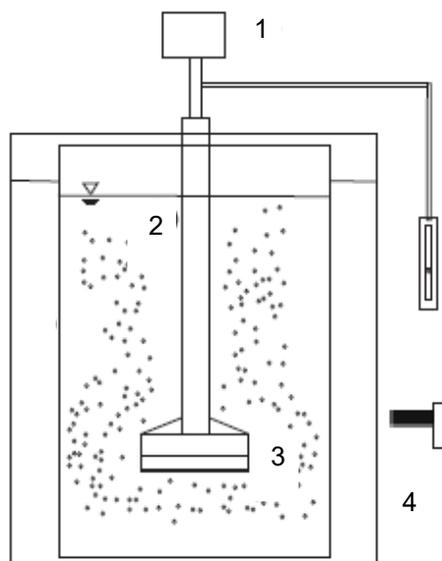
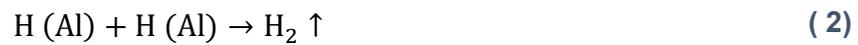


Figura 5. Esquema de desgasificación por rotor-inyector 1) motor, 2) eje impulsor, 3) rotor-inyector, 4) crisol [8].

La mayor parte del hidrógeno disuelto en el aluminio fundido proviene de la disociación del vapor de agua en la superficie del aluminio líquido de acuerdo con la reacción:



Esta reacción es favorecida por la temperatura de la fusión. El vapor de agua que entra en contacto con aluminio líquido se disocia y los átomos de hidrogeno, los cuales se encuentran en forma monoatómica (H) en el metal líquido, se difunden a una región de menor concentración. El mecanismo de desgasificación, consiste en el transporte del hidrógeno desde el seno del metal hacia las burbujas del gas de arrastre (Ar o N₂), esto debido a las diferencias de presión parcial de hidrógeno entre el gas de arrastre y el aluminio líquido [4]. Los átomos de hidrógeno se combinan sobre la superficie de la burbuja formando moléculas de gas diatómico (H₂) que ingresan a la burbuja. La siguiente reacción expresa la combinación de dos átomos de hidrógeno para formar una molécula gaseosa:



1.3.1. Agitación.

La agitación se refiere a forzar un fluido mecánicamente para que adquiera movimiento en el interior de un contenedor [9].

La agitación mecánica a través del uso de mezcladores es la forma de mezclado más utilizada, especialmente cuando simultáneamente se realiza el burbujeo con gas a través de estos dispositivos. Debido a la variedad de necesidades y objetivos del proceso, se han desarrollado varias geometrías de mezcladores. Un buen resultado de mezclado es importante para minimizar los costos de inversión y operación, proporcionando altos rendimientos cuando la transferencia de masa es limitante y, por lo tanto, aumenta la rentabilidad de los procesos de producción.

El proceso de agitación mecánica con mezcladores mecánicos se produce bajo condiciones de flujo laminar o turbulento, dependiendo del número de Reynolds del impulsor, el cual es definido como:

$$\text{Re} = \frac{\rho \text{ND}^2}{\mu} \quad (3)$$

Donde Re es el número de Reynolds, ρ es la densidad del fluido a ser agitado, N son las revoluciones por minuto del agitador, D es el diámetro del agitador y μ es la viscosidad dinámica del fluido.

Para los números de Reynolds por debajo de aproximadamente 10, el proceso es laminar. Las condiciones totalmente turbulentas se consiguen con números de Reynolds superiores a 10^4 , y el flujo se considera transicional entre estos dos regímenes y obviamente cuando el Re está entre estos dos valores. [9]

El mecanismo fundamental de la agitación implica la transferencia de cantidad de movimiento desde el mezclador hacia el seno del material usando paletas de rotor giratorias.

1.3.2. Mezclado.

El mezclado es una operación física en la cual hay una reducción de la no uniformidad. Tiene como finalidad homogenizar el fluido, es decir, se busca eliminar los gradientes de concentración, temperatura u otras propiedades [9], [10].

La mezcla de fluidos se lleva a cabo en recipientes agitados mecánicamente para una variedad de objetivos, incluyendo homogeneizar fases individuales o múltiples en términos de concentración de componentes, propiedades físicas y temperatura, también se busca incrementar los mecanismos de transferencia de masa en las mismas fases o interfaciales. [9]

El mezclado es fundamental para la industria, entre las que se encuentran la metalúrgica, farmacéutica, cerámica, química, alimentaria, cosmética, entre otras.

1.3.3. Tiempo de mezclado.

El tiempo de mezclado se define como el tiempo en el cual una mezcla alcanza un cierto grado de homogeneidad. El tiempo de mezclado óptimo se puede obtener con un grado de 90% de homogeneidad [9], pero para el presente trabajo se empleó el criterio

del 95%, es decir, se considera que el tiempo de mezclado es el tiempo que le toma a un soluto (Silicio) alcanzar $\pm 5\%$ de la composición de equilibrio.

El tiempo de mezclado es de gran importancia ya que, si es muy grande, aumenta el consumo de potencia y este a su vez se refleja en el incremento de los costos de producción, los cuales pueden llegar a ser sumamente altos.

1.3.4. Tipos de impulsores o mezcladores.

Los impulsores típicos utilizados para mezclar se dividen en diferentes clases generales, basadas en los patrones de flujo creados, en las aplicaciones o inclusive en sus características geométricas especiales. Las clasificaciones también definen los tipos de aplicación para los cuales se usan estos impulsores. En la **Tabla 4** se presenta una clasificación de mezcladores y en la **Figura 6** se presentan dibujos de las distintas clases y geometrías de uso industrial.

Tabla 4. Clasificación de los distintos tipos de impulsores [9].

Tipo de impulsor	Características geométricas
<i>Flujo axial.</i>	Hélice, turbina de cuchilla inclinada, hidroplanos.
<i>Flujo radial.</i>	Impulsor de hoja plana, turbina de disco (Rushton), turbina de hoja hueca (Smith).
<i>Alto corte.</i>	Disco, barra, impulsor de cuchilla puntiaguda.
<i>Especialidad.</i>	Impulsor de la curva del retiro, impulsor de barrido, impulsor del resorte, turbinas alineadas de vidrio.
<i>Arriba abajo.</i>	Discos, placa, círculos.

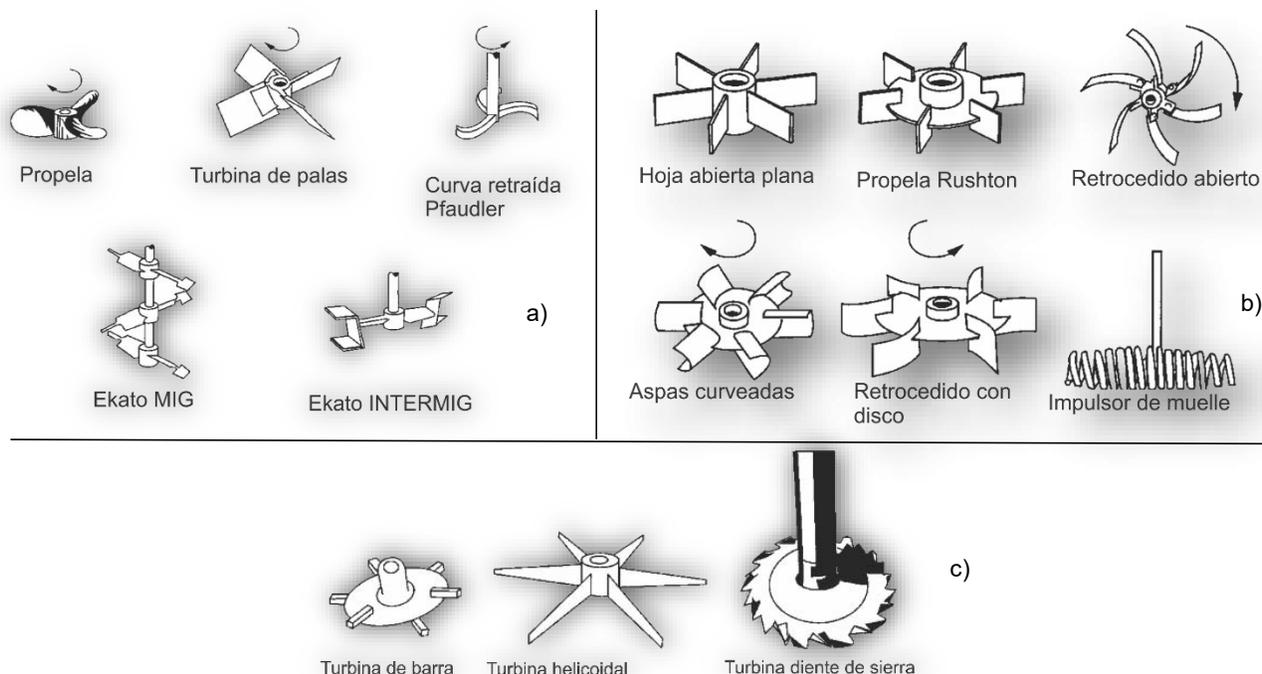


Figura 6. Imágenes de los diferentes tipos de rotor a) impulsores de flujo axial, b) impulsores de flujo radial, c) impulsores de alto corte [9].

1.3.5. Rotor-estator.

La principal característica de un rotor-estator es el rotor de alta velocidad (el elemento mezclador accionado) muy cerca de un estator (el elemento mezclador fijo). Los mezcladores rotor-estator se utilizan en las industrias química, bioquímica, agrícola, de cosméticos y de procesamiento de alimentos. Se emplean en muchas operaciones de proceso que involucran: a) homogenización, b) dispersión, c) emulsificación, d) molienda, e) disolución, f) reacción química, g) interrupción celular y h) coagulación (debido al cizallamiento) [9].

Su uso principal incluye la producción de látex, adhesivos, productos de cuidado personal y limpieza, dispersión y micro-dispersiones de productos químicos, y formulaciones de pesticidas agrícolas.

Estos mezcladores pueden ahorrar tiempo debido a la energía altamente localizada y la alta velocidad de cizallamiento que introducen en el sistema. Aunque la capacidad de realizar múltiples operaciones es un beneficio, también hace que los mezcladores de rotor-estator sean difíciles de entender.

A pesar de su uso generalizado, la comprensión actual de los dispositivos rotor-estator no tiene casi ninguna base fundamental. Existen pocas teorías para predecir, o protocolos experimentales sistemáticos para evaluar el desempeño de estos mezcladores. De hecho, hay muy pocas publicaciones sobre procesamiento rotor-estator.

1.3.6. Bombeo.

El bombeo es la cantidad de material descargado por el rotor, es decir, la cantidad de material líquido que sale en la descarga por la región del rotor del impulsor por unidad de tiempo. Esta cantidad es una característica importante del proceso y desempeña un papel importante cuando se calcula el tiempo de mezclado, este cambia con la geometría y el tamaño del rotor [9].

Para obtener la capacidad de bombeo de un mezclador rotor-estator discontinuo, es necesario medir el campo de velocidad que entra y / o emana de la cabeza del mezclador. Dado que esto suele ser tedioso y requiere instrumentación sofisticada, existen pocos datos de capacidad de bombeo para dispositivos discontinuos. Como alternativa, el recipiente puede estar equipado con un impulsor axial estándar para proporcionar un mezclado en masa. La ubicación del mezclador afecta tanto la capacidad de bombeo como el tiempo de mezcla [8].

1.4. Revisión bibliográfica.

Debido a que industrialmente no se utiliza el rotor inyector para disolución y mezclado, no se encuentra trabajo alguno sobre el tema, sin embargo, se encuentran algunos trabajos sobre disolución de partículas sólidas en baños líquidos. Nuevamente, se justifica este trabajo desarrollado ya que el equipo provee condiciones controladas de agitación por lo que se facilita el estudio cinético de transporte de masa durante la disolución de silicio en aluminio.

Mehran Seyed y colaboradores [11] estudiaron la disolución de cilindros sólidos de Si en un baño de Al en un tanque giratorio, bajo condiciones de convección natural y

forzada. Donde buscan acelerar el proceso de disolución de Si en Al líquido; primero estudiando el sobrecalentamiento en el baño líquido y segundo con convección natural y forzada.

Como resultados obtuvieron que el Si tiene una disolución inicial más rápida con sobrecalentamientos altos en comparación con los bajos (ver **Figura 7**), así como también se presenta una mayor disolución de Si a 20 RPM (máximas revoluciones de trabajo), lo que indica que la transferencia de masa a través de la capa límite controla el proceso de disolución, por lo que para tener una disolución en menor tiempo por parte del Si recomiendan algún tipo de agitación en el baño.

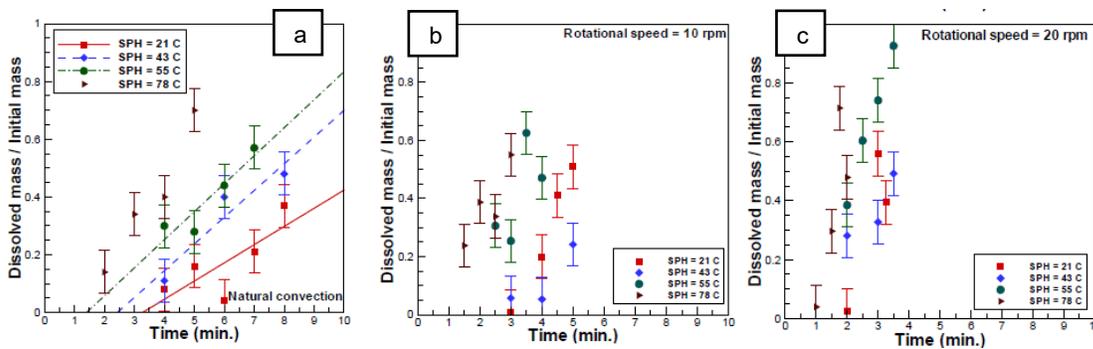


Figura 7. Gráficos del efecto del sobrecalentamiento sobre la velocidad de disolución de una adición cilíndrica de Si en Al a) en condiciones de convección natural, b) en convección forzada a 10 rpm, c) en convección forzada a 20 rpm [11].

La disolución de Si en Al es un proceso de transferencia de masa, que es cuantificado por el coeficiente de transferencia de masa, el cual es una función de las condiciones de funcionamiento. Para su caso calcularon el coeficiente medio de transferencia de masa K_m (m/s) mediante la ecuación:

$$K_m = \frac{m''_{ave}}{C_{sat} - C_b} \quad (4)$$

Donde C_{sat} es la concentración de saturación de la adición en el líquido a la temperatura T (° C) y C_b es la concentración de Si en el seno del líquido. El flujo de masa promedio m''_{ave} de la adición de sólidos al líquido desde $t = 0$ (momento en que el cilindro está completamente sumergido en el baño) hasta el tiempo t (cuando el cilindro es retirado del baño) puede calcularse como:

$$m''_{ave} = \frac{m_d}{tA_{ave}} \quad (5)$$

Dónde m_d es la masa disuelta de la muestra de Si y A_{ave} es la superficie de interfaz sólido/líquido promedio. Observaron que el coeficiente de transferencia de masa aumenta conforme la velocidad de rotación aumenta, por lo que el coeficiente de masa lo definen como:

$$K_m = \frac{D_{Si/Al}}{\delta_m} \quad (6)$$

Donde $D_{Si/Al}$ es el coeficiente de difusión binaria y δ_m es el espesor de la capa límite de masa. Con esta ecuación y sus resultados experimentales indica como el espesor de la capa límite disminuye cuando el fluido se agita en la proximidad de la barra. Una disminución en el espesor de la capa límite de transferencia de masa implica una menor resistencia al transporte de especies desde la interfaz sólido/líquido hasta la mayor parte del líquido, y por lo tanto aumenta la velocidad de disolución.

Por otro lado, Argyropoulos y Sismanis [12] investigaron la cinética de transferencia de masa del niobio puro en acero líquido. El niobio puro tiene un punto de fusión de 2467°C, unos 867°C mayor que la temperatura de acero típica de 1600°C. En su trabajo sumergieron cilindros de niobio en acero líquido y midieron la transferencia de masa a partir de mediciones de peso. Durante la experimentación observaron la formación de una capa de acero en el cilindro de niobio, que identificaron como el periodo en que se forma una cascara de acero. También observaron un segundo periodo que llamaron de disolución libre.

Utilizaron un modelo matemático para predecir: 1) el tiempo de iniciación para la reacción de la interfaz niobio/acero, 2) el período de la cáscara de acero, y 3) los efectos de la generación de calor en la interfaz niobio / acero. Para dicho modelo se asumió que el baño no tenía agitación (convección natural).

En el periodo de la formación de la cascara de acero en el niobio observaron una reacción que tuvo lugar en la interface de acero/niobio, a medida que esta aumentaba de espesor la solubilidad disminuía.

Durante el período de disolución libre y en el frente de disolución, los moles netos de niobio que se pierden del cilindro por unidad de tiempo son iguales a los moles netos de niobio que se difunden en un baño de acero por unidad de tiempo, lo cual se expresa como:

$$-\frac{d}{dt}\left(\frac{\pi r^2 L \rho_{Nb*s}}{M_{NB}}\right) = k_{Nb} 2\pi r L (C_{Nb}^{*L} - C_{Nb}^{Bulk}) \quad (7)$$

Donde L es la longitud del cilindro sumergido, ρ_{Nb*s} es la densidad del niobio, M_{NB} es el peso molecular del niobio, k_{Nb} es el coeficiente experimental de transferencia de masa, C_{Nb}^{*L} es la concentración de niobio en el acero a la temperatura T y C_{Nb}^{Bulk} es la concentración inicial del niobio en el acero líquido.

Ya que L , ρ_{Nb*s} y M_{NB} son independientes del tiempo y C_{Nb}^{Bulk} es muy pequeña y tiende a cero, la ecuación anterior se reduce a:

$$-\frac{d(r)}{dt}\left(\frac{k_{Nb} * M_{NB}}{\rho_{Nb*s}}\right) C_{Nb}^{*L} = 0 \quad (8)$$

De la ecuación 8 se obtuvieron los coeficientes de transferencia de masa realizando un análisis de regresión:

$$\log K_{Nb}^{off} = A - \frac{B}{T} \quad (9)$$

Donde K_{Nb}^{off} es el coeficiente experimental de transferencia de masa en condiciones estáticas. Los valores obtenidos para las constantes fueron para $A=2.5416 \pm 0.419$ y $B = 8982.4 \pm 795.8$. Los coeficientes de transferencias de masa obtenidos para convección forzada son mayores en comparación con los de convección natural por lo que deducen que las características de flujo de fluido en la intercara Niobio/acero tiene un gran efecto sobre la velocidad de disolución, por lo que la etapa de control en la velocidad en la transferencia de masa es la difusión a través de una capa limite.

Utilizaron una correlación adimensional la cual describe la transferencia de masa por convección en cilindros verticales y placas planas:

$$Sh = 0.13(Gr_m * Sc)^{1/3} \quad (10)$$

J.K. Wright [13] investigó la velocidad de disolución isotérmica de varillas de acero en fundiciones de hierro-carbono con convección natural y con convección forzada inyectando gas inerte. El objetivo era proporcionar información sobre el efecto de las condiciones de agitación con gas sobre la cinética de disolución del acero en baño de hierro-carbono en condiciones similares a las encontradas en los procesos de fusión.

Sus resultados se dividieron en tres partes, a) disolución de la barra por convección natural en un baño de 1 kg de hierro-carbono, b) disolución bajo convección forzada en un baño de 1kg y c) disolución bajo convección forzada en un baño de 25 kg.

Para el caso de convección natural (a) se observó que las varillas o probetas se disolvieron de forma homogénea. En la **Figura 8** se observa el efecto de la temperatura del baño para la disolución de las probetas, los diámetros disminuyen linealmente con el tiempo de inmersión por lo que las velocidades de disolución son constantes bajo condiciones isotérmicas.

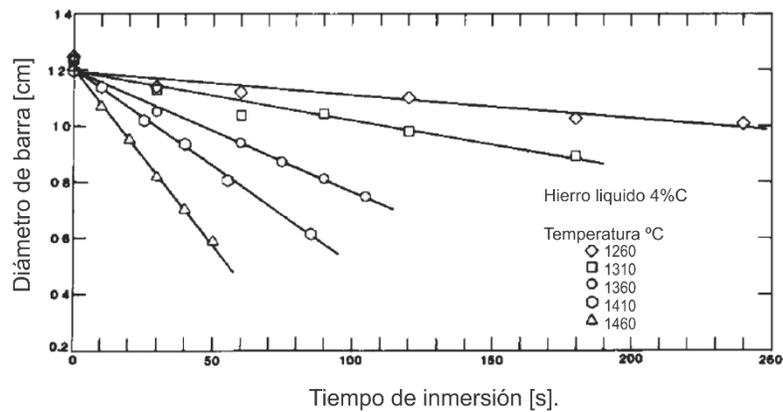


Figura 8. Gráfico del efecto de la temperatura de fusión sobre la disolución de las probetas en condición de convección natural [13].

Suponen que el mecanismo que controla la velocidad de disolución es la difusión de carbono. Ajustaron los datos experimentales a correlaciones de manera que el coeficiente de masa fuera predecible en función de las condiciones de agitación del baño:

$$Sh = a(Gr_m * Sc)^m \quad (11)$$

Donde Sh es el número de Sherwood, Gr_m es el número de Grashof, Sc es el número de Schmidt, a y m son las constantes empíricas. El número de Sherwood incorpora el coeficiente de transporte de masa:

$$Sh = \frac{k_m L}{d} \quad (12)$$

Donde k_m es el coeficiente de transferencia de masa, L es la longitud sumergida de la probeta. Según los datos experimentales obtuvieron los valores de a y m y sustituyendo en la ecuación 12 para convección natural turbulenta se obtiene:

$$Sh = 0.13(Gr_m * Sc)^{0.34} \quad (13)$$

En el caso de convección forzada (b), en 1 kg de baño, se produjo un efecto similar al de convección natural, la disolución de las probetas fue prácticamente uniforme en la superficie. En la **Figura 9a** se muestra que los diámetros de las probetas disminuyen linealmente con el tiempo de inmersión, así como también se observa un aumento en las velocidades de disolución con el aumento de agitación con gas.

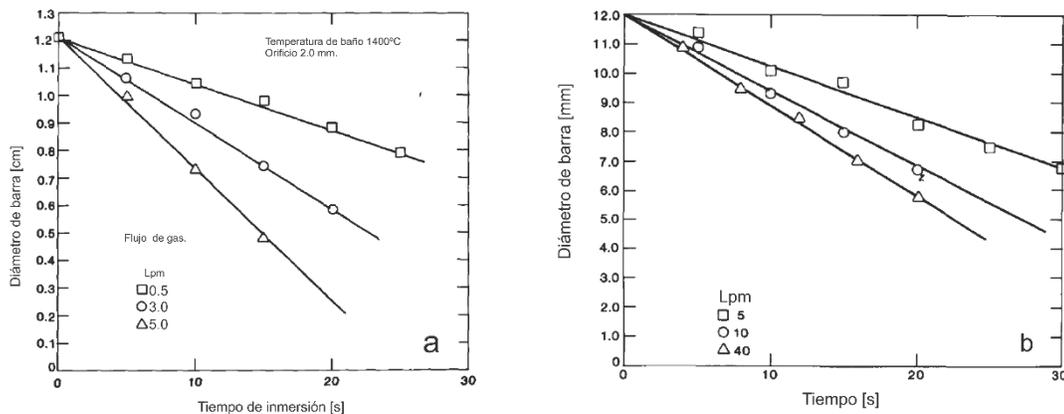


Figura 9. Gráfico de la disminución del diámetro de las probetas a) para un orificio de 2 mm a velocidades bajas de agitación con gas b) para un orificio de 160 mm a velocidades altas de agitación con gas.

Pera el caso de convección forzada para el baño de 25 kg observaron una reducción mayor en el diámetro al nivel superior del baño, en la **Figura 9b** se muestra el gráfico de la disminución de los diámetros con respecto al tiempo de inmersión.

Las velocidades de disolución aumentan con incrementos en las tasas de inyección de gas. Los coeficientes de transferencia de masa medidos muestran la siguiente dependencia del flujo de inyección de gas:

$$k_m \propto (Q)^{0.21} \quad (14)$$

Donde k_m es el coeficiente de transferencia de masa y Q es el flujo de gas. Una comparación de los coeficientes experimentales de transferencia de masa con correlaciones adimensionales para la disolución de la barra de acero en condiciones hidrodinámicas conocidas dio lugar a una relación dependiente de velocidad de la pluma de gas con respecto al flujo de gas inyectado:

$$u \propto Q^{0.31} \quad (15)$$

El valor absoluto de u dependía de la configuración del aparato utilizado, y se requiere más trabajo para identificar los efectos del flujo masivo contra el turbulento y la geometría del sistema.

Kim y Pehlke [14] estudiaron las velocidades de disolución de acero 1045 y de Ferrovac E en un baño de hierro saturado de carbono, en condiciones isotérmicas y con condiciones de convección natural y convección forzada.

Para el sistema con convección natural observaron que el diámetro disminuye linealmente con el tiempo de inmersión y que la velocidad de disolución, $v = -\frac{dr}{dt}$, es constante para condiciones isotérmicas como se puede ver en la **Figura 10**.

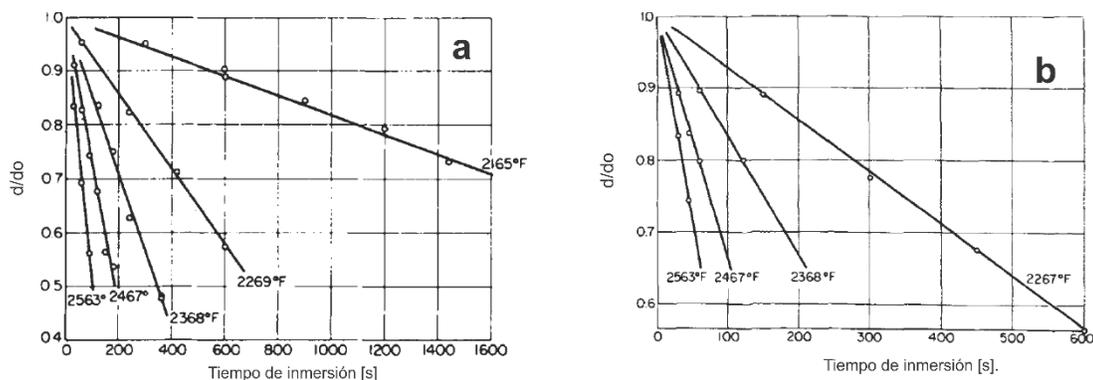


Figura 10. Gráficos de la disolución con convección natural de a) Ferrovac E en baño de Hierro saturado de carbono, b) acero 1045 en baño de Hierro saturado de carbono.

Con las velocidades obtenidas se relacionó el número de Sherwood y el producto de Grashof-Schmidt, donde el número de Sherwood vario entre 60-120 y el de Grashof-Schmidt $6.9 \times 10^8 - 7.7 \times 10^9$, y de acuerdo a una regresión lineal de logaritmos dieron los valores de las constantes a de 0.149 y m de 0.294 de la ecuación 12 y de este modo obtener el coeficiente de transporte de masa por convección natural según la siguiente ecuación:

$$Sh = 0.149(Gr_m * Sc)^{0.294} \quad (16)$$

Para el sistema con convección forzada observaron que los diámetros de los cilindros no aumentaron, en cambio se observó una formación de ranuras alrededor de las probetas a altas velocidades, por el contrario, a velocidades bajas la superficie de la muestra era lisa como se muestran en la **Figura 11**. La formación de las ranuras fue causada por los vórtices desarrollados en el líquido alrededor de la probeta cilíndrica.

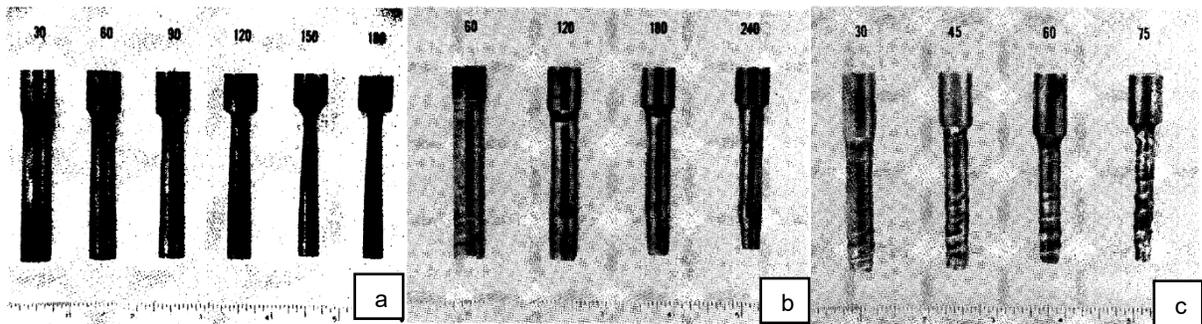


Figura 11. Probetas de Ferrovac E después de la disolución en un baño de hierro saturado de carbono a) con convección natural a 2467 °F, b) convección forzada con 100 rpm a 2278 °F c) convección forzada con 900 rpm a 2278 °F. Los números en la parte superior indican el tiempo de inmersión en segundos.

Los números de Schmidt, Reynolds, las constantes b y n en la ecuación 17 fueron evaluados a prueba y error obteniendo los valores para $n = 0.3295$ y $b = 0.1121$.

$$j_d = b * Re^{-n} \quad (17)$$

Donde j_d es el factor de transferencia de masa, Re es el número de Reynolds, b y n son las constantes experimentales. Proponen para obtener del efecto de la velocidad del fluido sobre el coeficiente de transporte de masa la ecuación:

$$k_m = constante * (d)^{0.341} (\Omega)^{0.670} \quad (18)$$

Dónde d es el diámetro y Ω es el número de rotaciones por minuto. Se encontró que la velocidad de disolución estaba controlada por transferencia de masa en la fase líquida y el proceso de transferencia de masa estaba dominado por convección natural cuando la muestra estaba sin movimiento y por convección forzada cuando la muestra se giraba.

En el caso de Argyropoulos y Guthrie [15] estudiaron la cinética de disolución de cilindros de titanio en baños de acero. Identificaron dos periodos de disolución: un período de formación de coraza de acero y un período de disolución libre. Durante el primer período hay formación de coraza de acero solidificada en el cilindro de Ti después de la inmersión inicial (ver **Figura 12**). Este fenómeno desencadenó una disolución exotérmica de la superficie interna del acero. Como resultado los tiempos de fusión de la cáscara disminuyen. En el segundo período de disolución observaron que la temperatura superficial del cilindro de titanio expuesto se elevó por encima de la temperatura del baño, obtenido un fenómeno de disolución exotérmica continua, acelerando el proceso de disolución.

Desarrollaron un modelo matemático simplificado del proceso para describir los complejos fenómenos de transferencia de calor y masa asociados.

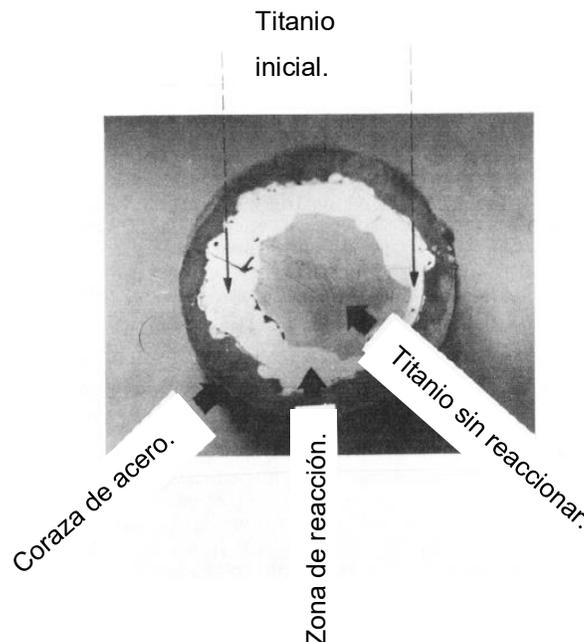


Figura 12. Sección transversal del cilindro de titanio en formación de coraza de acero y la zona de reacción.

Para el modelo matemático se consideró que la conducción axial es despreciable, por lo que solo se consideró la dirección radial. Parten de las siguientes expresiones para la conducción de calor transitorio del titanio y la coraza de acero:

Cilindro de titanio.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\alpha_{Ti}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) ; 0 \leq r \leq r_1 , \quad 0 \leq t \leq t_{total} \quad (19)$$

Coraza de acero.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\alpha_{Fe}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) ; r_1 \leq r \leq r_2 , \quad 0 \leq t \leq t_{total} \quad (20)$$

Para las condiciones iniciales consideraron que la temperatura del cilindro es uniforme y de forma similar la temperatura del baño inicial es constante:

$$\text{Para } t = 0 ; \quad 0 \leq r \leq r_1 , \quad \theta = \theta_0 \quad (21)$$

$$t = 0 ; \quad r > r_1 , \quad \theta = \theta_B \quad (22)$$

Establecieron cinco condiciones de frontera de las cuales la más importante es:

$$\begin{aligned} t_R \leq t \leq t_{total} , \quad r = r_1 \\ -k_{Fe} \frac{\partial \theta}{\partial r} + N_{Ti} Q_{Ti} = -k_{Ti} \frac{\partial \theta}{\partial r} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\text{Cundo } t_R = 0 \text{ y } N_{Ti} = k_{Ti} \left(C_{Ti} - C_{\frac{Fe}{Ti}} \right)$$

Los fenómenos de transferencia de masa que se llevan a cabo en la intercara de la pared de acero se expresan en la ecuación anterior, donde se presenta en coeficiente de transferencia de masa.

Haping Sun [16] estudió la disolución interfacial de carbono y la transferencia de masa en el hierro líquido con ayuda de un modelo cinético, donde se observó que la velocidad de la reacción está limitada por la transferencia de masa en el baño. En el sistema observó dos etapas: 1) disolución desde la fase sólida de carbono a través de la interfaz sólido-líquido, 2) transferencia de masa de carbón desde la interfaz sólido-líquido al seno del líquido:

$$C_{solid} \rightarrow [C]^*$$

$$r_r = Ak_r \left(a_{solid} - \frac{a_c^*}{K_r} \right) \quad (24)$$

$$[C]^* \rightarrow [C]$$

$$r_m = \frac{Ak_m \rho_m}{100} ([C]^* - [C]) \quad (25)$$

Como las reacciones se producen en serie las velocidades son iguales. La fuerza motriz, los parámetros cinéticos y termodinámicos para la disolución de carbono es limitada por la transferencia de masa por lo que son diferentes de la reacción interfacial.

El presente trabajo parte de un estudio previo donde se trató de medir la disolución de partículas de silicio en aluminio variando la geometría del rotor, la temperatura del baño y la velocidad de agitación. Se encontró que las mejores condiciones de operación para el sistema son a 780 °C y 250 rpm con el rotor de 5 aspas. Cabe mencionar que en el trabajo no se estudió el efecto que tiene el tamaño de partícula.

En este trabajo se estudiará el efecto del tamaño de partícula sobre la velocidad de disolución en una aleación Al- Si, utilizando el sistema de rotor inyector que se utiliza para desgasificar.

Hipótesis.

- ✚ Al disminuir el tamaño de partícula aumentará el tiempo de mezclado químico, manteniendo el resto de las variables de proceso constantes, aunque el rendimiento disminuirá
- ✚ El rotor diseñado en la Facultad de Química de la UNAM, acelerará la cinética de mezclado respecto al rotor diseñado anteriormente.

Objetivos.

- ✚ Estudiar el efecto que tiene el tamaño de partícula en el tiempo de aleado y en el rendimiento del aleante en un sistema binario Al-Si usando el rotor-inyector.
- ✚ Estudiar el efecto que tiene el diseño del rotor en el tiempo de aleado en un sistema binario Al-Si.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA DE TRABAJO.

Industrialmente es de gran importancia estudiar los fenómenos que intervienen durante el mezclado y la disolución de los elementos aleantes ya que esto impacta directamente a la productividad y al rendimiento o costo de producción de una planta de fundición. Aunque el proceso de rotor-inyector no se usa industrialmente para alear sino para desgasificar al aluminio o para eliminar elementos indeseables, es interesante usarlo para agitar el baño y medir cinéticas de disolución de aluminio que son difíciles de medir en hornos de inducción o de reverbero porque se desconoce las velocidades de agitación en esos hornos. De esta forma, un estudio de disolución de silicio en aluminio con el rotor podrá generar conocimiento sólido bajo condiciones de experimentación controladas, incluyendo el efecto del tamaño de la partícula del Si, que ayuden a entender el proceso de disolución y con éste incrementar la productividad acelerando los procesos que consisten en el transporte de masa.

El presente trabajo estudia los mecanismos cinéticos que intervienen al disolver silicio metálico en un baño de aluminio puro comercial con ayuda de agitación mecánica con un dispositivo que incluye el rotor-inyector (ver **Figura 13**). Por tal razón, es de gran importancia conocer el diagrama de fases Al-Si. Con base al diagrama de fases ya detallado, se puede asegurar que para la experimentación propuesta no hay opción a que se dé el fenómeno de fusión por parte del Si, por el contrario, se asegura que exista disolución del Si en Al, ya que el punto de fusión del Si es de 1414°C y la temperatura de experimentación es de 780°C (ver **Figura 14**).

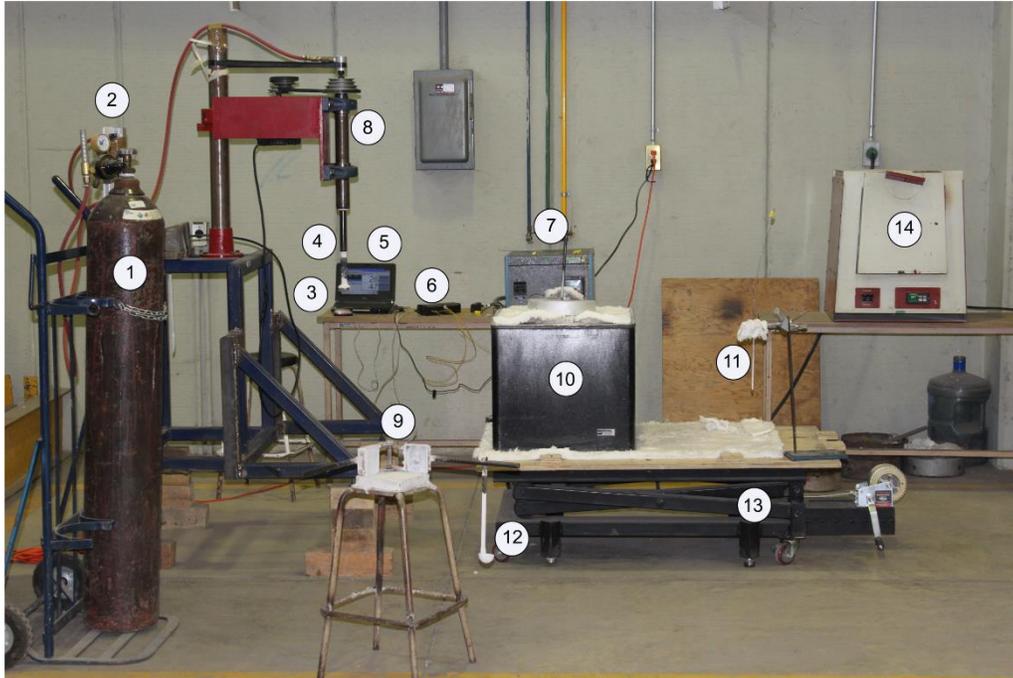


Figura 13. Imagen del equipo montado que se empleó para la experimentación, 1) tanque de gas argón, 2) flujometro, 3) rotor, 4) Flecha del rotor, 5) computadora con el software, 6) adquisidor de datos, 7) controlador de temperatura, 8) motor del rotor-inyector, 9) molde para la muestra, 10) horno de piso de resistencia, 11) termopar tipo K, 12) cuchara para toma de muestra, 13) mesa elevadora manual, 14) mufla.

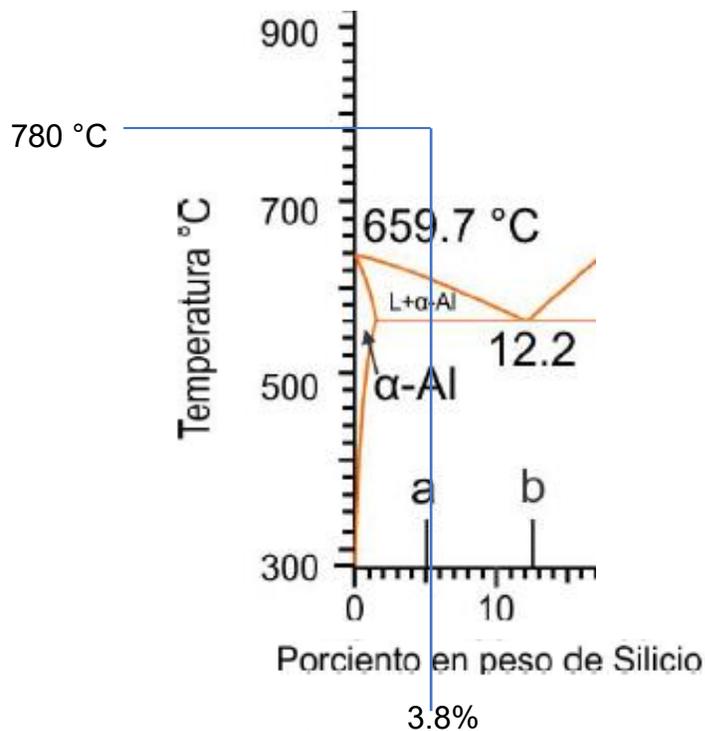


Figura 14. Diagrama de fases Aluminio-Silicio mostrando la temperatura de trabajo y el % Si objetivo en el proceso de aleación propuesto [6].

Se usaron en la experimentación dos rotores distintos que se muestran en la **Figura 15**. Uno de ellos es un rotor comercial que se usa actualmente en plantas mexicanas y el otro es un diseño propuesto en este grupo en otros trabajos [17]. También se desea definir de manera cuantitativa el papel que juega el tamaño de partícula sobre el tiempo de disolución de Si en Al, determinando el tamaño óptimo de partícula que favorezca y acelere la disolución, así como también aumente el rendimiento de este aleante. Se sabe que la cinética de disolución de aleantes depende del tamaño de partícula.

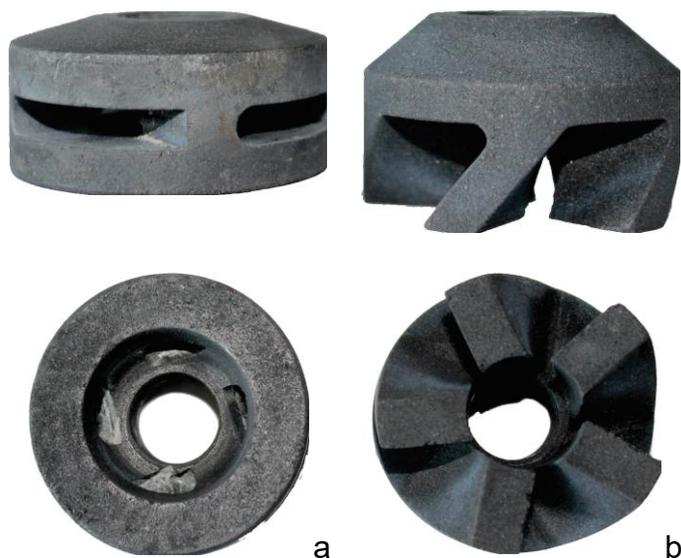


Figura 15. Fotografías de los rotores empleados en la experimentación a) estándar vista frontal e inferior, b) 5 aspas vista frontal e inferior.

La experimentación consistió en fabricar una aleación Al-3.8%Si partiendo de aluminio puro comercial e incorporando Si metálico a temperatura ambiente y diferentes tamaños de partícula. Se aplicó agitación mecánica, donde se empleó un dispositivo con sistema de rotor-inyector, para el cual se utilizaron dos rotores de diferentes geometrías, estándar y 5 aspas. Como se puede observar en la **Tabla 5** se presentan las variables de los 8 experimentos realizados, la geometría del rotor y los 4 tamaños de partícula. El baño del metal se mantuvo a temperatura constante de 780°C, al igual que la velocidad del rotor la cual fue de 250 rpm [18]. También se empleó un flujo de gas argón de grado industrial mínimo con el objeto de evitar que a los rotores se les solidifique aluminio.

Tabla 5. Variables empleadas en la experimentación.

N° de Experimento	Geometría de Rotor	Tamaño de partícula
1	5 aspas	3/4 in
2	5 aspas	1/2 in
3	5 aspas	1/4 in
4	5 aspas	0.131 in
5	Estándar	3/4 in
6	Estándar	1/2 in
7	Estándar	1/4 in
8	Estándar	0.131 in

El efecto de la geometría del rotor se ha estudiado muy poco por lo que la determinación de este efecto sobre el mezclado es algo innovador, lo cual es una contribución importante en la disolución de elementos aleantes en la industria de fundición optimizando los procesos.

2.1. Balance de carga.

Antes de comenzar con la experimentación es indispensable conocer las cantidades requeridas de material, en este caso, para fabricar 5 Kg de una aleación Al-3.8%Si. Para determinar la cantidad de Al se consideró un rendimiento de este metal del 97% y una concentración final de 96.2%. En el caso del Si se tomó un rendimiento del 93.321%, la cual se obtuvo del promedio de eficiencias tomadas de una tesis realizada anteriormente [18].

Balance para aluminio:

$$Al^o = 5 \text{ Kg Aleación} \frac{\left(\frac{96.2\% Al^o}{100\%}\right)}{\left(\frac{97\%}{100\%}\right)} = 4.959 \text{ Kg Al} \quad (26)$$

Balance para silicio:

$$Si = 5 \text{ Kg Aleación} \frac{\left(\frac{3.8\% Si}{100\%}\right)}{\left(\frac{93.321\%}{100\%}\right)} \left(\frac{1000 \text{ gr}}{1 \text{ Kg}}\right) = 204 \text{ gr Si} \quad (27)$$

2.2. Preparación de las cargas de aluminio puro (comercial).

La preparación de las cargas de Al consistió en una re-fusión de 4 lingotes de aproximadamente 10 Kg, los cuales se cortaron por la mitad obteniendo dimensiones adecuadas para el ingreso en el crisol (ver **Figura 16**).

El resultado de la re-fusión fueron lingotes 250 ± 50 gr, los cuales se pesaron y etiquetaron, con ellos se formaron cargas de aproximadamente 5 Kg, teniendo al final 8 cargas. (Ver **Figura 17**).

El propósito de obtener lingotes pequeños es tener las dimensiones adecuadas para precalentarlos en una mufla, ordenándolos de tal modo que el transporte de energía sea más fácil y homogéneo, así como también el tamaño apropiado para su ingreso en el crisol A-20 que se usa durante la prueba.

Las cargas se precalientan con ayuda de una mufla, la finalidad de dicho precalentamiento es acelerar el proceso de fusión dentro del crisol optimizando el tiempo, de igual forma hay disminución de mermas por oxidación del aluminio.

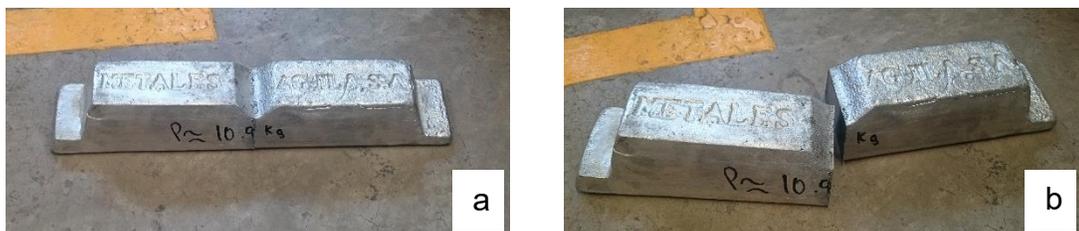


Figura 16. Imagen de los lingotes a) antes del corte, b) después del corte.



Figura 17. Imagen de las cargas de aluminio utilizadas para la experimentación, lingotes e $250 \text{ g} \pm 50$ g.

2.3. Preparación de las cargas de silicio.

El silicio metálico del que se parte tiene dimensiones muy grandes en su forma comercial en comparación al tamaño de partícula requerido, por esta razón se procedió a triturar el Si empleando una trituradora primaria (**Figura 18**), con la cual se obtienen partículas de diversos tamaños.

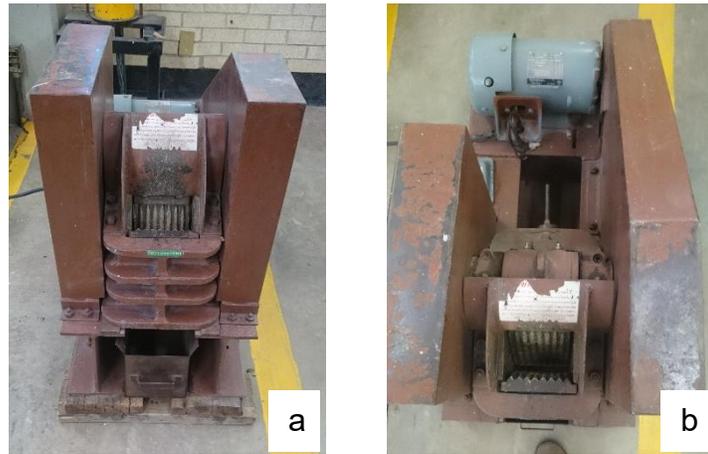


Figura 18. Imagen de la trituradora de quijada utilizada para la trituración primaria. A) Vista frontal, b) vista superior.

Seguida de la trituración se realizó un cribado para obtener los siguientes tamaños de partícula: $\frac{3}{4}$ in (19.05 mm), $\frac{1}{2}$ in (12.7 mm), $\frac{1}{4}$ in (6.35 mm) y 0.131 in (3.327 mm). El cribado se inicia con una malla de 1 in y finaliza con el pan (ver **Figuras 19 y 20**).

Con base al balance de carga se pesaron 204 gr de Si, con esta cantidad se formaron 4 paquetes de aproximadamente 50 gr (ver **Figura 21**). La finalidad de envolver las partículas con papel aluminio es facilitar la incorporación de las partículas de Si en el metal líquido y aumentar el rendimiento evitando la oxidación que se produce al estar en contacto con el ambiente. El papel aluminio se pesó con antelación. Esto se realiza para cada experimento (ver **Tabla 5**).



Figura 19. Imagen de a) conjunto de mallas utilizadas para el cribado de silicio, b) equipo utilizado para cribar (RO-TAP).

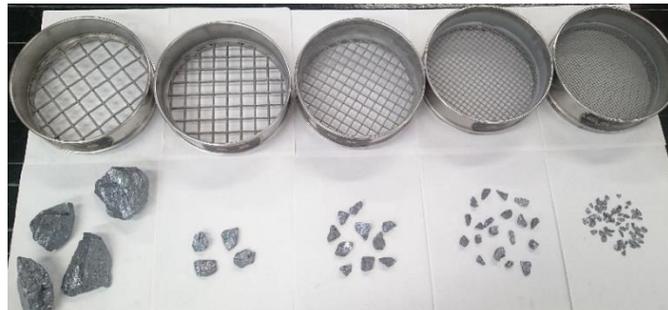


Figura 20. Imagen de las mallas comenzando por el tamaño de apertura más grande (1 in) de lado izquierdo y terminando con el tamaño más pequeño (0.131 in) lado derecho. En la parte inferior del lado izquierdo se observa el tamaño de partícula de Si del que se partió para la obtención de los tamaños deseados, seguido de los tamaños $\frac{3}{4}$ in, $\frac{1}{2}$ in, $\frac{1}{4}$ in y 0.131 in.



Figura 21. Imagen de los paquetes de silicio formados con papel aluminio.

2.4. Experimentación.

Es de gran importancia tener en cuenta las medidas de seguridad durante toda la experimentación.

Para la experimentación se utilizó un horno de resistencia de piso para fundir el metal y una mufla de caja para precalentar la carga antes de introducirla al horno.

La experimentación inició con el precalentamiento de horno y mufla. Llegada a la temperatura de trabajo en la mufla se comienza a meter la carga (ver **Figura 22**), con el objetivo de disminuir los tiempos de fusión dentro del crisol y la oxidación.

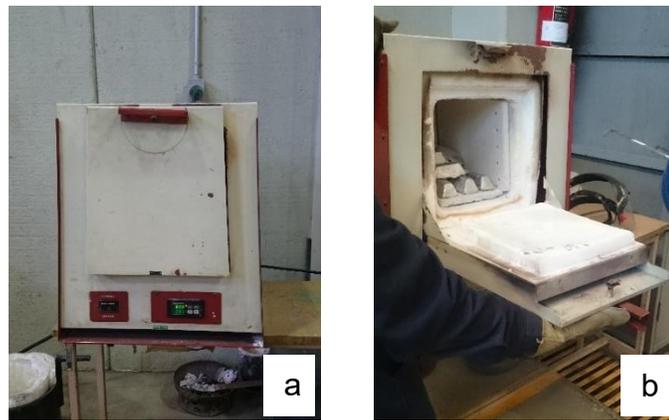


Figura 22. Imagen de a) mufla utilizada para el precalentamiento de los lingotes, b) mufla abierta mostrando el arreglo de la carga.

Alcanzada la temperatura en horno se comenzaron a cargar poco a poco los lingotes precalentados conforme se va fundiendo el metal, introducida toda la carga y fundida se esperó a llegar a temperatura de trabajo en horno.

Obtenida dicha temperatura se precalentó el rotor sumergiéndolo en el baño de aluminio por 5 min, pasado el tiempo se retiró del metal líquido. En la **Figura 23** se presenta el equipo rotor inyector usado en este trabajo.

Nuevamente se dejó que el baño alcanzara la temperatura de trabajo. En éste punto es de gran importancia mencionar que para sumergir el rotor en el baño se debe de tener

un flujo pequeño de gas argón, es decir, presión positiva o de lo contrario este se tapaná solidificando el metal en el rotor.

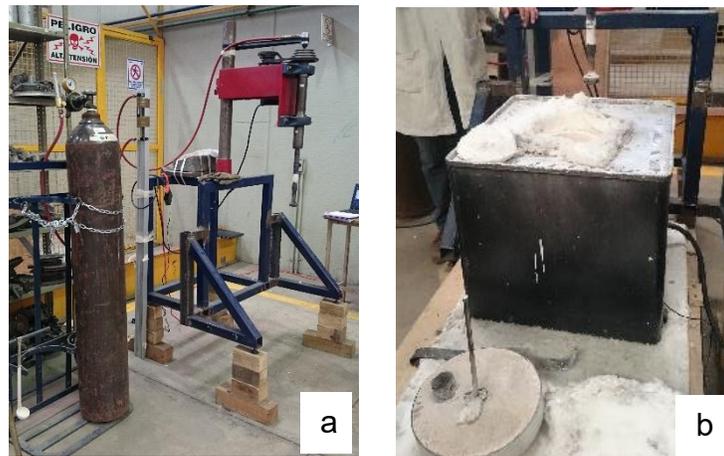


Figura 23. Imagen de a) equipo montado del rotor inyector, b) horno de piso y de resistencia utilizado para la experimentación.

Llegada a la temperatura de trabajo se sumerge por segunda ocasión el rotor en el baño y se toma la primera muestra de metal líquido (blanco), a continuación, se empieza a cronometrar el tiempo justo en el momento en que se adicionan los paquetes de Si en el baño e inicia la toma de las muestras para cada tiempo establecido: 10 s, 30 s, 1 min, 2 min, 3 min 5 min, 7.5 min, 10 min, 15 min, 20 min, y 25 min (ver **Figura 24**).



Figura 24. Imagen de las muestras obtenidas de cuatro experimentos, tomadas a los diferentes tiempos según el procedimiento experimental.

Es de gran interés mantener la temperatura constante durante la experimentación, lo cual se logró con el precalentamiento de la carga en la mufla y solo se fundió en el horno de resistencia, así de este modo, se evita la inercia de la temperatura en el aluminio si

se fundiese en un horno de gas o se evitaría la pérdida de energía al pasar de un horno a otro.

Cabe señalar que para asegurar la temperatura del baño se monitoreó con ayuda de un adquisidor de datos y un termopar tipo k (ver **Figura 25**).

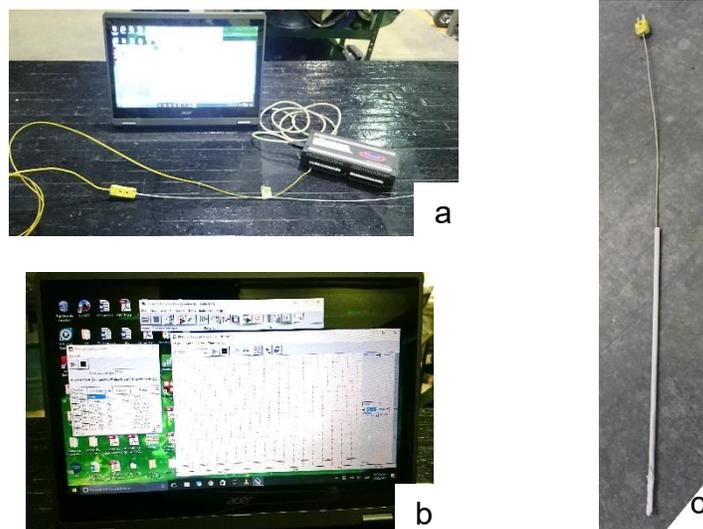


Figura 25. Imagen de a) adquisidor de datos DaqView, b) detalle del programa para adquirir datos “Personal DaqView”, c) termopar tipo K cubierto por un tubo de vidrio sellado.

Un termopar tipo K se sumergió en el baño con el objetivo de monitorear permanentemente la temperatura del baño durante cada experimento. Para evitar la disolución, éste se protegió con tubo de vidrio sellado por la parte inferior como se muestra en la **Figura 25c**. En la **Figura 26** se muestra la curva de la temperatura durante una experimentación, en la que se aprecia de color rojo la temperatura de trabajo en el baño (780 °C), de color verde la temperatura mínima (772 °C) obtenida durante la experimentación en el metal líquido y de color amarillo la temperatura máxima (782 °C) durante la experimentación. De esta forma se observa que la temperatura no varió mucho con respecto a la temperatura de trabajo, se estuvo 2°C por arriba y 8°C por abajo.

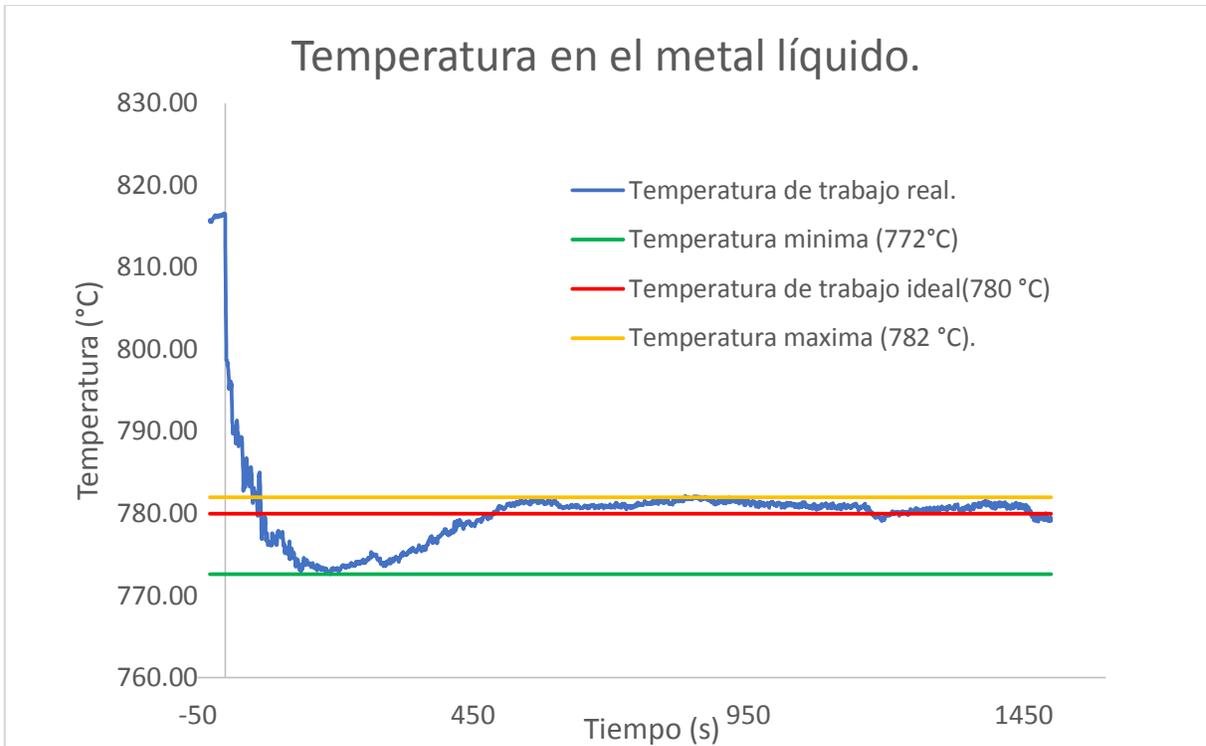


Figura 26. Curva de la variación en la temperatura del baño durante una experimentación de disolución.

Regresando a la toma de las probetas, éstas se marcan, se pesan y se desbastan dejando una cara plana. A continuación, se procede a efectuar el análisis en el espectrómetro de emisión atómica (ver **Figura 27**).

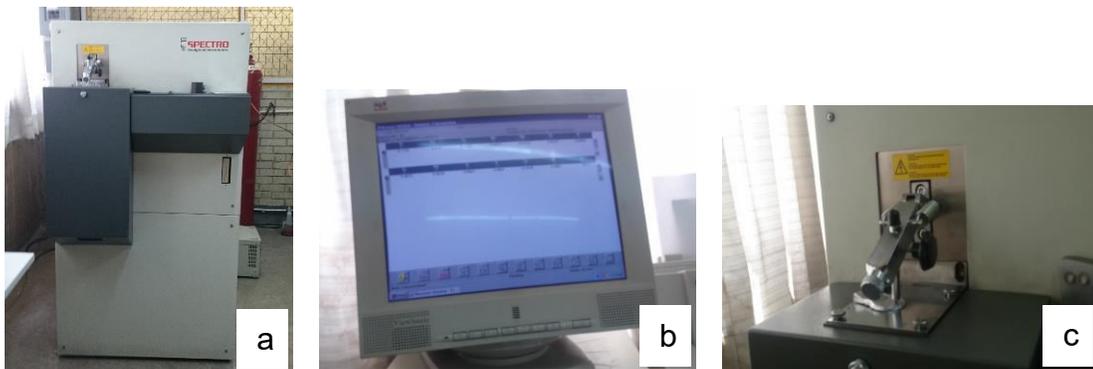


Figura 27. Imagen del a) equipo de análisis de chispa SPECTRO Analytical Instruments, b) programa Measure Window-Elements-Concentration utilizado para el espectro, c) Toma típica del análisis de chispa para una moneda.

2.5. Procesamiento de datos.

2.5.1. Balance de materia.

Para el balance de materia se toman los pesos iniciales del Al puro comercial (m_{Al}°), masa del papel aluminio utilizado para empaquetar el Si (m_{papel}), masa del Si inicial (m_{Si}°), así como también los pesos finales de masa de las monedas (m_M^t) a cada tiempo y masa final de la aleación en forma de lingotes (m_{ale}). Con estos datos se calculan las pérdidas de material (Pe_{ale}) según la ecuación:

$$Pe_{ale} = m_{Al}^{\circ} + m_{papel} + m_{Si}^{\circ} - m_{ale} - \sum m_M^t \quad (28)$$

Los resultados se muestran en la **Tabla 7** en la sección de resultados.

2.5.2. Rendimiento de silicio.

Para la obtener el rendimiento de Si, en primer lugar, se calcula masa total de Si en la aleación, partiendo de la siguiente ecuación:

$$m_{Si}^T = m_{ale} \left(\frac{C_{Si}^F}{100} \right) + \sum m_M^t \left(\frac{C_{Si}^t}{100} \right) \quad (29)$$

Donde C_{Si}^F es la concentración final de silicio en la aleación en forma de lingotes, C_{Si}^t es la concentración de silicio en la moneda al tiempo t.

Obtenida la masa total de Si se calcula el rendimiento de Si (Ren_{Si}), con la siguiente ecuación que básicamente se calcula dividiendo la masa de silicio detectada en la aleación solidificada entre el silicio pesado originalmente:

$$Ren_{Si} = \frac{m_{Si}^T}{m_{Si}^{\circ}} * 100 \quad (30)$$

Los resultados para cada experimentación se presentan en la **Tabla 8**, en la sección de resultados.

2.5.3. Curvas de tiempo contra concentración adimensional.

En cuanto la obtención de las curvas de evolución de tiempo con respecto a la concentración adimensional primero se calculó la concentración real de silicio, $C_{real\ Si}^t$, es decir, la cantidad que se disolvió de Si a cada tiempo establecido restando la cantidad de silicio presente en la aleación. Esto se obtiene de la siguiente ecuación:

$$C_{real\ Si}^t = C_{Si}^t - C_{Si}^o \quad (31)$$

Donde C_{Si}^t es la concentración de Si a determinado tiempo y C_{Si}^o es la concentración inicial del Si en el aluminio puro comercial. Seguido de esto se calcula la concentración adimensional (C_{adm}^t) para cada tiempo, con la ecuación:

$$C_{adm}^t = \frac{C_{real\ Si}^t}{C_{real\ Si}^F} \quad (32)$$

Donde $C_{real\ Si}^F$ es la concentración real de la última moneda de cada experimento. Las curvas obtenidas se presentan en la sección de resultados.

2.5.4. Tiempo de mezclado.

Para la determinación del tiempo de mezclado (t_{mix}) se emplearon las curvas de concentración adimensional vs tiempo. Utilizando el criterio del 95% para la uniformidad química se hacen dos rectas horizontales a las concentraciones de $\pm 5\%$ la concentración de equilibrio (ver **Figura 28**), dando una ventana de mezclado en la que cuando la curva de la evolución de silicio entre en dicha ventana sin salir de ella, se considera a ese punto en el tiempo, como el tiempo de mezclado.

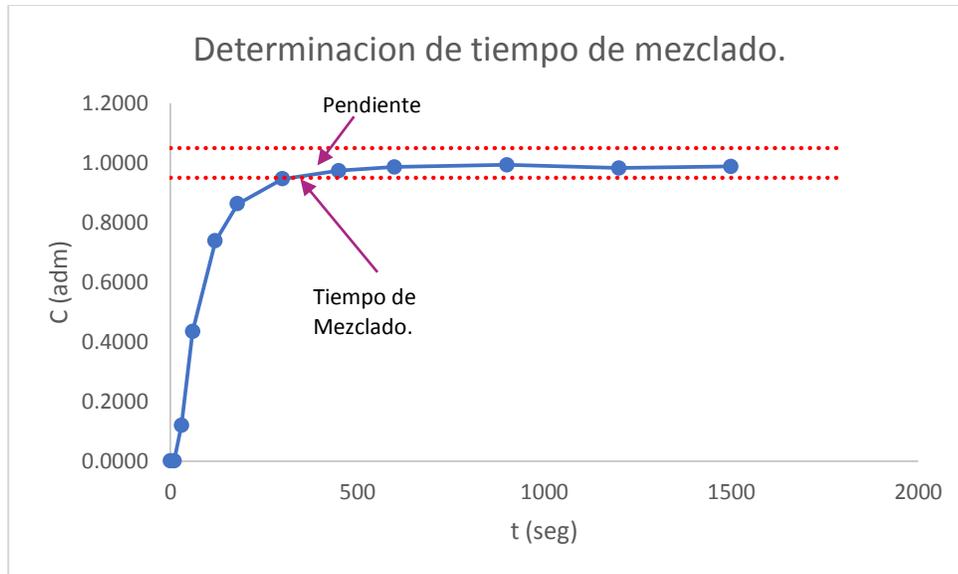


Figura 28. Curva de evolución de tiempo contra la concentración adimensional para el rotor de 5 aspas con tamaño de partícula de $\frac{1}{2}$ in, ilustrando el procedimiento gráfico para obtener el tiempo de mezclado.

El tiempo de mezclado se obtiene de manera precisa analizando la pendiente de la **Figura 22** justo al entrar a la ventana de mezclado. La pendiente (m) se toma del primer punto que cruza línea de 0.95 (C_{mix}) y el punto anterior, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$m = \frac{\Delta C}{\Delta t} = \frac{C_{adm}^{t_2} - C_{adm}^{t_1}}{t_2 - t_1} \quad (33)$$

Donde $C_{adm}^{t_2}$ y t_2 es la concentración adimensional y el tiempo del punto que se encuentra por debajo del 1.05 (C_{mix}); $C_{adm}^{t_1}$ y t_1 es la concentración adimensional y el tiempo del punto que se encuentra por arriba del 0.95 o la concentración de mezclado C_{mix} respectivamente.

Pero se sabe que la pendiente en el tiempo de mezclado es:

$$m = \frac{C_{adm}^{t_2} - C_{mix}}{t_2 - t_{mix}} \quad (34)$$

Donde C_{mix} y t_{mix} es la concentración adimensional y el tiempo de mezclado. Así que despejando t_{mix} de la ecuación anterior se obtiene el tiempo de mezclado, el cual se reporta en la **Tabla 9**, según la siguiente ecuación.

$$t_{mix} = t_2 - \frac{(C_{adm}^{t_2} - C_{mix})}{m} \quad (35)$$

2.5.5. Curvas de área interfacial vs tiempo.

Para la obtención de las curvas del área interfacial instantánea y total de las partículas de Si es necesario, en primer lugar, calcular el área total de superficie de las partículas de Si para cada tiempo (A_T^t). Para este cálculo se hace la suposición de que las partículas son esféricas, y el tamaño de malla es el diámetro de partícula. Se obtiene el área total de la siguiente ecuación:

$$A_T^t = A_{part}^t * N^{\circ}p \quad (36)$$

Donde A_{part}^t es el área por partícula a diferentes tiempos y $N^{\circ}p$ es el número de partículas. Pero se sabe que el número de partículas se obtiene como:

$$N^{\circ}p = \frac{m_{Si}^t}{m_{part}} \quad (37)$$

Donde m_{Si}^t es la masa de silicio en la aleación al tiempo t y m_{part} es la masa por partícula. Por otro lado, la m_{part} se puede obtener con la relación de la densidad y el volumen:

$$m_{part} = V_{part}^o * \rho_{Si} \quad (38)$$

Y el volumen de cada partícula V_{part}^o , se obtiene con la siguiente ecuación:

$$V_{part}^o = \frac{4}{3} \pi r_o^3 \quad (39)$$

Donde r_0 es el radio inicial de las partículas de Si. Sustituyendo **38** y **37** en **36** se obtiene la siguiente ecuación que describe el área interfacial instantánea y total de las partículas:

$$A_T^t = A_{part}^t * \frac{m_{Si\ ale}^0}{V_{part}^0 * \rho_{Si}} \quad (40)$$

Para conocer A_{part}^t a cada tiempo se parte de la ecuación:

$$A_{part}^t = 4 * \pi * r^t \quad (41)$$

Donde r^t es el radio de partícula al tiempo t. Pero r^t se obtiene a partir de la ecuación del volumen de la partícula:

$$V_{part}^t = \frac{4}{3} \pi r^t{}^3 \quad (42)$$

Despejando el radio queda la siguiente ecuación:

$$r^t = \sqrt[3]{\frac{3V_{part}^t}{4\pi}} \quad (43)$$

Para calcular el volumen individual de cada partícula al tiempo t se utiliza la ecuación:

$$V_{part}^t = \frac{V_{SiT}^t}{N^o p} \quad (44)$$

Donde V_{SiT}^t es el volumen de Si total a diferentes tiempos. Para este cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_{SiT}^t = \frac{m_{part}^t}{\rho_{Si}} \quad (45)$$

Donde m_{part}^t es la masa de la partícula al tiempo t. Para calcularlo se emplea la siguiente ecuación:

$$m_{part}^t = m_{part}^{t-1} - m_{Si\ dis}^t \quad (46)$$

Donde m_{part}^{t-1} es la masa del Si sólido del punto anterior y $m_{Si\ dis}^t$ es la masa de Si disuelto al tiempo t. Para el cálculo de $m_{Si\ dis}^t$ partimos de la ecuación de concentración de Si:

$$C_{Si}^t = \frac{m_{Si\ ale}^{t-1} + m_{Si\ dis}^t}{m_{ale}^t + m_{Si\ dis}^t} * 100 \quad (47)$$

Despejando $m_{Si\ dis}^t$ queda la ecuación:

$$m_{Si\ dis}^t = \frac{\frac{C_{Si}^t * m_{ale}^t}{100} - m_{Si\ ale}^{t-1}}{1 - \frac{C_{Si}^t}{100}} \quad (48)$$

Pero se sabe que para calcular la masa de la aleación al tiempo t:

$$m_{ale}^t = m_{Al}^o + m_{Si\ dis}^t - m_M^t \quad (49)$$

Donde m_{ale}^{t-1} es la masa inicial de Al puro comercial, $m_{Si\ dis}^t$ es la masa de Si disuelta a el tiempo t y m_M^t es la masa de las monedas obtenidas en los tiempos anteriores. Conocidos los valores se calculó el área total de transferencia por tamaño de partícula a través del tiempo.

2.5.6. Cinéticas de disolución.

Para la obtención del producto del coeficiente de transferencia de masa y el área de la partícula (kA) se parte de la siguiente ecuación que proviene de un balance global de masa de silicio en el baño:

$$kA = V_{ale} * \frac{\Delta C}{\Delta t} * \left(\frac{1}{C_{eq.} - C_t} \right) \quad (50)$$

Donde V es el volumen de la aleación al tiempo t, $\frac{\Delta C}{\Delta t}$ es la derivada de la concentración de silicio respecto al tiempo al tiempo t, C_t es la concentración adimensional al tiempo t y $C_{eq.}$ es la concentración al equilibrio.

Es importante mencionar que para los cálculos del tiempo cero se realizó una derivada hacia adelante, en los puntos centrales se empleó la derivada central y para el último tiempo la derivada hacia atrás, con las siguientes ecuaciones:

$$m_{adelante} = \frac{\Delta C}{\Delta t} = \frac{C_2 - C_1}{t_2 - t_1} \quad (51)$$

$$m_{central} = \frac{\Delta C}{\Delta t} = \frac{C_{i+2} - C_i}{t_{i+2} - t_i} \quad (52)$$

$$m_{atrás} = \frac{\Delta C}{\Delta t} = \frac{C_{n-i} - C_n}{t_{n-i} - t_n} \quad (53)$$

Donde C_2 y t_2 es la concentración adimensional y el tiempo del dato a los 10 segundos, C_1 y t_1 es la concentración y el tiempo del dato al tiempo cero, C_{i+2} y t_{i+2} es la concentración y el tiempo del dato al tiempo $t+2$, C_n y t_n es la concentración y el tiempo a un determinado tiempo, C_{n-i} y t_{n-i} es la concentración y el tiempo del penúltimo dato, C_n y t_n es la concentración adimensional y el tiempo del último dato.

Para los cálculos del volumen de la aleación se utilizó la densidad de Aluminio líquido a 780°C (1053.15K), la cual se obtuvo mediante la siguiente ecuación que se ajusta al comportamiento del aluminio líquido, en Kg/m³:

$$\rho_{Al}(T) = -0.00009T^2 - 0.0706T + 2522.1 \quad \text{para } 933K < T < 1400K \quad (54)$$

Entonces, el volumen de la aleación (V_{ale}) se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_{ale} = \frac{m_{ale}}{\rho_{Al}(T)} \quad (55)$$

Donde m_{ale} es la masa de la aleación y $\rho_{Al}(T)$ es la densidad del aluminio líquido.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1. Composición química.

En la **Tabla 6** se muestra, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos por el análisis de químico de la primera moneda (blanco) del primer experimento (rotor de 5 aspas y tamaño de partícula de 0.131 in). En el anexo se presentan los resultados obtenidos de los análisis químicos para cada probeta según la geometría del rotor y el tamaño de partícula.

Tabla 6. Composición química de la moneda al tiempo 0 del primer experimento.

Composición química al tiempo 0.									
	% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Zn	% Ni	% Ti	% V	% Al
1	0.0835	0.2480	0.0057	0.0083	0.0305	0.0028	0.0436	0.0080	99.6
2	0.0721	0.2596	0.0057	0.0085	0.0310	0.0026	0.0436	0.0080	99.6
3	0.0803	0.2508	0.0057	0.0086	0.0640	0.0025	0.0441	0.0091	99.6
\bar{x}	0.0786	0.2528	0.0057	0.0085	0.0418	0.0026	0.0438	0.0084	99.6

Con base a los resultados de las composiciones químicas se realizaron la mayoría de los cálculos.

3.2. Balance de materia.

La **Tabla 7** muestran las pérdidas de material obtenidas de la experimentación (columna 8) según el rotor (columna 1) y el tamaño de partícula (columna 2) utilizados en cada experimentación. El cálculo se basa en los pesos iniciales del Al puro comercial (columna 3), papel aluminio utilizado para empaquetar el Si (columna 4), silicio particulado (columna 5), los pesos obtenidos al final de la experimentación de la masa total de las monedas (columna 6) y la cantidad de aleación fabricada (columna 7).

Tabla 7. Balance de materia.

Tipo de rotor	Tamaño de partícula	Al puro (g)	Papel Al (g)	Si (g)	Monedas (g)	Al-3.8Si (g)	Pérdidas (g)
5 aspas.	0.131	5024.82	5.41	204.07	359.1	4826.93	48.27
	¼	5012.37	4.7	204.36	493.29	4711.85	16.29
	½	5008.74	3.9	204.3	385.09	4814.49	17.36
	¾	4616.68	4.74	204.74	386.22	4416.8	23.14
Estándar.	0.131	5002.99	6.37	204.04	335.87	4832.88	44.65
	¼	5009.71	6.16	204.32	352.82	4843.07	24.3
	½	5012.63	6.48	204.26	352.12	4843.07	28.18
	¾	5005.28	5.38	204.32	347.73	4808.83	58.42

La pérdida de material no es alta, apenas se encuentra por debajo del 2%. Como se observa en la **Tabla 7** las pérdidas son mayores con el rotor estándar en comparación con el rotor de 5 aspas, pero solo con el tamaño de partícula de 0.131 in la pérdida es mayor con el rotor de 5 aspas que con el rotor estándar. Al ser muy poca la cantidad de pérdida, está no se relaciona de manera directa con el tipo de rotor empleado, pues estas pérdidas se pueden deber al material que quedó en herramientas o algún pequeño derrame durante la experimentación, así como también las pérdidas asociadas con la oxidación que pueden variar de experimento a experimento.

3.3. Rendimiento del silicio.

En la **Tabla 8** y la **Figura 29** se muestra el rendimiento del Si según el tamaño de partícula y el rotor empleado. Como se observa en ambos rotores el rendimiento varía según el tamaño de partícula, teniendo un rendimiento menor en el tamaño de partícula de 0.131 in para ambos rotores. El mejor rendimiento para el rotor de 5 aspas se encuentra en el tamaño de partícula de ¾ in mientras que para el caso del rotor estándar se encuentra a un tamaño de partícula de ½ in. En general para el caso del rotor de 5 aspas los mejores rendimientos son a tamaños de partícula grandes, mientras que en el caso del rotor estándar se encuentran en los tamaños de partícula intermedios (¼ y ½ in).

Tabla 8. Rendimiento de Si según el rotor y el tamaño de partícula.

Rotor	Tamaño de partícula (in)	Rendimiento de Si (%)
5 aspas.	0.131	87.103
	1/4	89.769
	1/2	90.999
	3/4	92.552
	0.0661	40.731
Estándar.	0.131	84.836
	1/4	95.585
	1/2	95.763
	3/4	94.763

En la **Figura 29** se observa que el rendimiento tiende a aumentar con el tamaño de partícula en el caso del rotor de 5 aspas. Por otro lado, el rotor estándar tiene un rendimiento máximo en el tamaño de partícula de $\frac{1}{2}$ in y decae en el siguiente tamaño de partícula. Con el tamaño más fino de 0.131 in, el rotor de 5 aspas es el que presenta un mayor rendimiento y en los siguientes tamaños de partícula, el rotor estándar presenta un mejor rendimiento. Las diferencias entre las eficiencias oscilan entre 2 y 6%, por lo que en realidad ni el tamaño de partícula ni el tipo de rotor influyen significativamente en el rendimiento de silicio.

El rendimiento del Si varía según el tamaño de partícula, por lo que sería importante considerar el rendimiento particular de cada tamaño de partícula como dato para realizar el balance de carga. Para esta experimentación se utilizó un rendimiento determinado en una tesis anterior [18] que manejó un tamaño de partícula que se encuentra entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ in ($\frac{5}{16}$ in). Entonces, estrictamente hablando, se tendría que determinar un rendimiento según el tamaño de partícula y con él realizar un balance de carga específico. Finalmente, respecto al rendimiento del silicio, se ha comprobado la hipótesis de trabajo en donde se supuso que el rendimiento de silicio disminuiría con el decremento en el tamaño de partícula.

La explicación de por qué baja ligeramente el rendimiento de silicio con tamaños iniciales finos de partícula, se puede justificar observando de cerca la experimentación,

en donde al agregar el silicio particulado envuelto en papel aluminio y fundiéndose este papel, las partículas de silicio se observan flotando sobre la superficie libre del aluminio líquido, es decir, no están inmersas en el seno del metal. Entonces, las partículas de silicio se aglomeran (sobre todo en un crisol pequeño como el usado A20) y esto provoca aún menor contacto metal-partícula, lo cual puede explicar una oxidación de Si mayor con mayor número de partículas como es el caso de tamaños pequeños. La flotabilidad del silicio sobre el baño se debe a la diferencia de densidades entre las partículas sólidas y el aluminio líquido. Otro factor que probablemente explica el menor rendimiento de Si a tamaños finos de partícula, es debido a la pérdida de partículas de silicio durante la toma de muestras, las cuales se obtenían con una cuchara y como el tamaño de partícula era fino, esas muestras captaban o arrastraban partículas de silicio sin disolver, lo cual impacta en el rendimiento de silicio al final de la disolución.

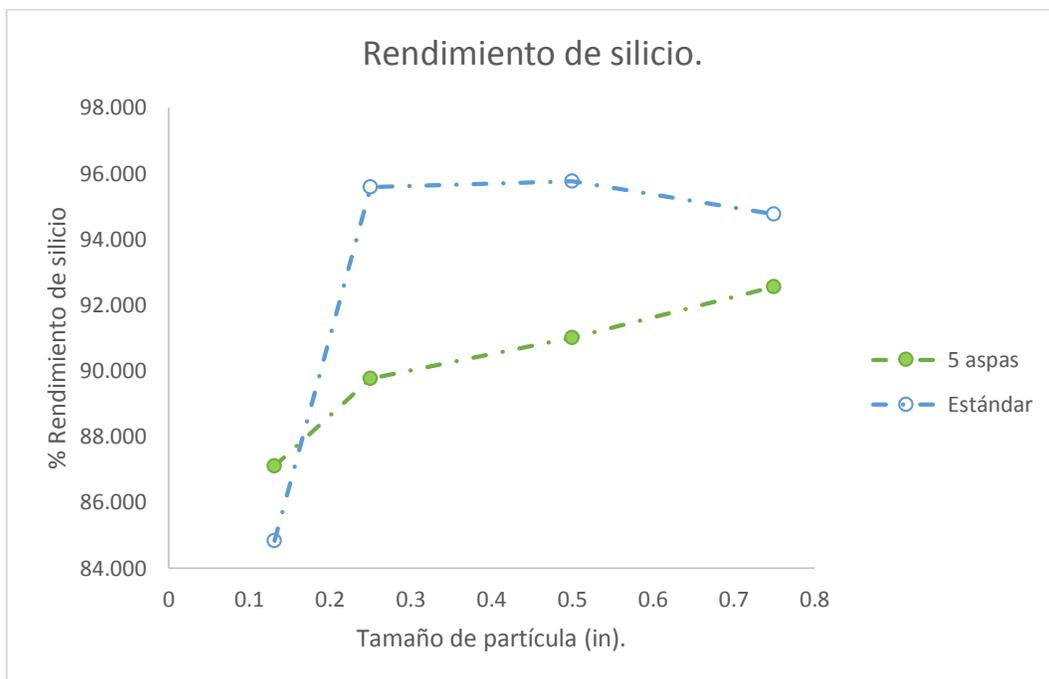


Figura 29. Curva de rendimiento de Si contra el tamaño de partícula para los rotores de 5 aspas y estándar.

Con el fin de comprender mejor el comportamiento de las partículas de silicio a tamaños pequeños se realizó un experimento con un tamaño de partícula aún más pequeño de 0.0661 in empleando el rotor de 5 aspas. En la **Figura 30** se presenta la gráfica del rendimiento de silicio, en el cual se anexa la experimentación antes

mencionada en color rojo, donde se observa que el rendimiento baja drásticamente hasta en más de un 50% en comparación con el tamaño de partícula de 0.131 in.

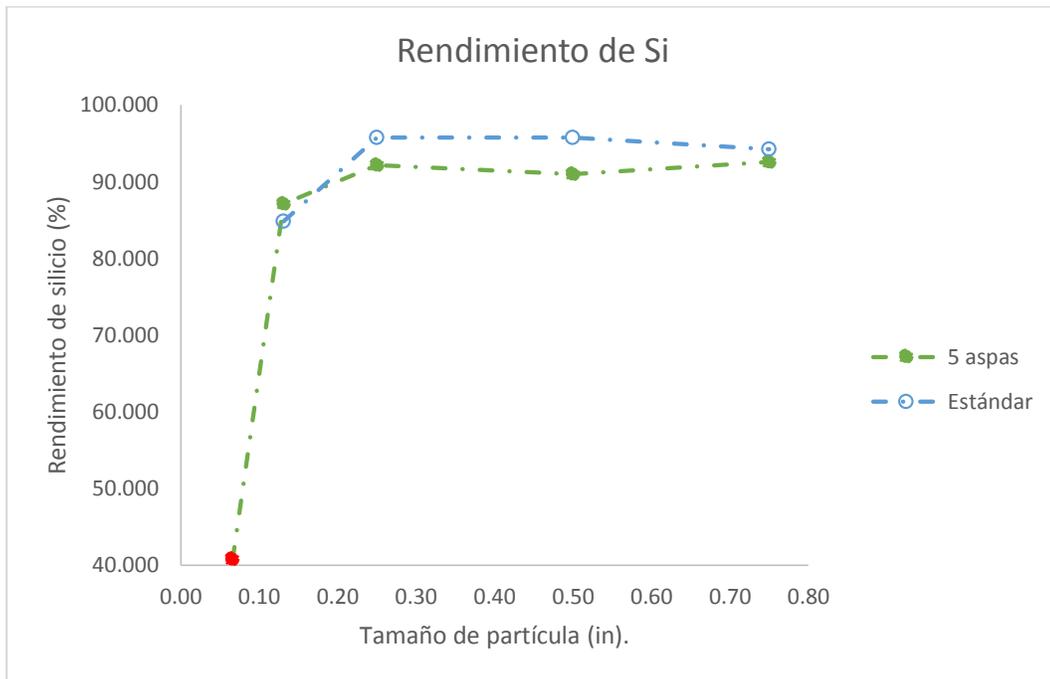


Figura 30. Curva de rendimiento de Si contra tiempo para ambos rotores, donde se anexa, de color rojo, el rendimiento del Si para un tamaño de partícula de 0.0661 in.

Con este resultado se puede asegurar que el rendimiento depende en gran medida del tamaño de partícula, a menor tamaño de partícula menor rendimiento. Al finalizar el tiempo estimado para la disolución de Si aún se encontraban partículas sin disolver en la superficie del baño (ver **Figura 31**), estas se quedaron flotando sin incorporarse, siendo de este modo una de las razones de mayor peso para la explicación de la baja eficiencia a tamaños pequeños.

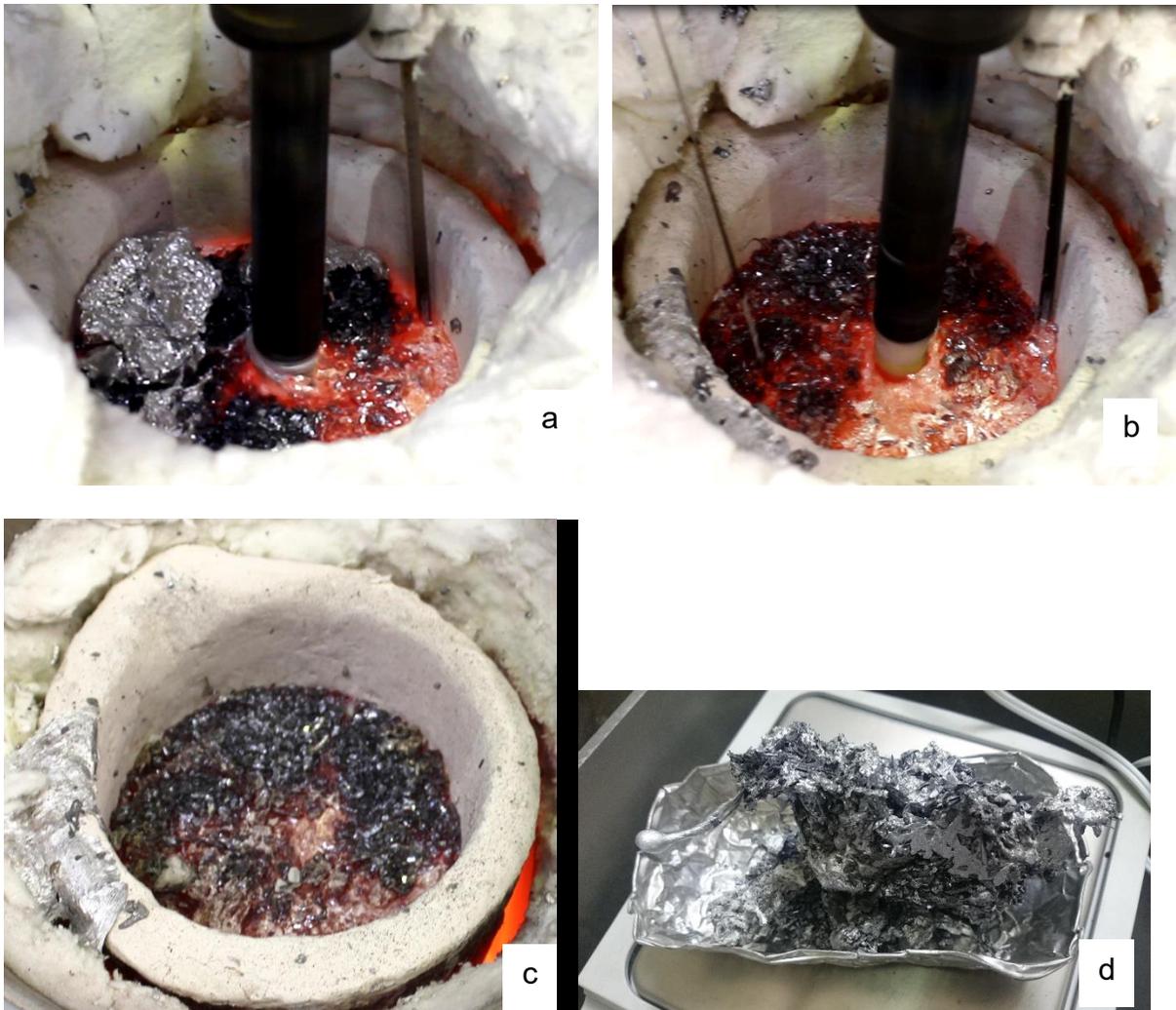


Figura 31. Imagen de Si a) a los primeros minutos del experimento, b) a mitad del experimento, c) al finalizar el experimento, c) silicio sin disolver al termino del experimento con escoria y aluminio.

3.4. Curvas de concentración.

En general, para todos los experimentos se observa, en las **Figuras 32 y 33**, que la evolución del contenido de Si en aluminio es similar en cuanto a su forma, en donde inicialmente hay un acelerado incremento en la concentración de silicio en el tiempo y poco a poco, conforme se aproxima el valor de la concentración de silicio al equilibrio, esa pendiente baja hasta hacerse eventualmente cero al final del experimento. La diferencia entre cada curva es la pendiente en los primeros instantes del experimento. La pendiente inicial, distinta en cada caso, de la evolución de silicio en el tiempo indica la rapidez con la que se disuelve el silicio en aluminio en los primeros segundos. Otra

diferencia entre los distintos casos es el tiempo en alcanzar la concentración de silicio al equilibrio.

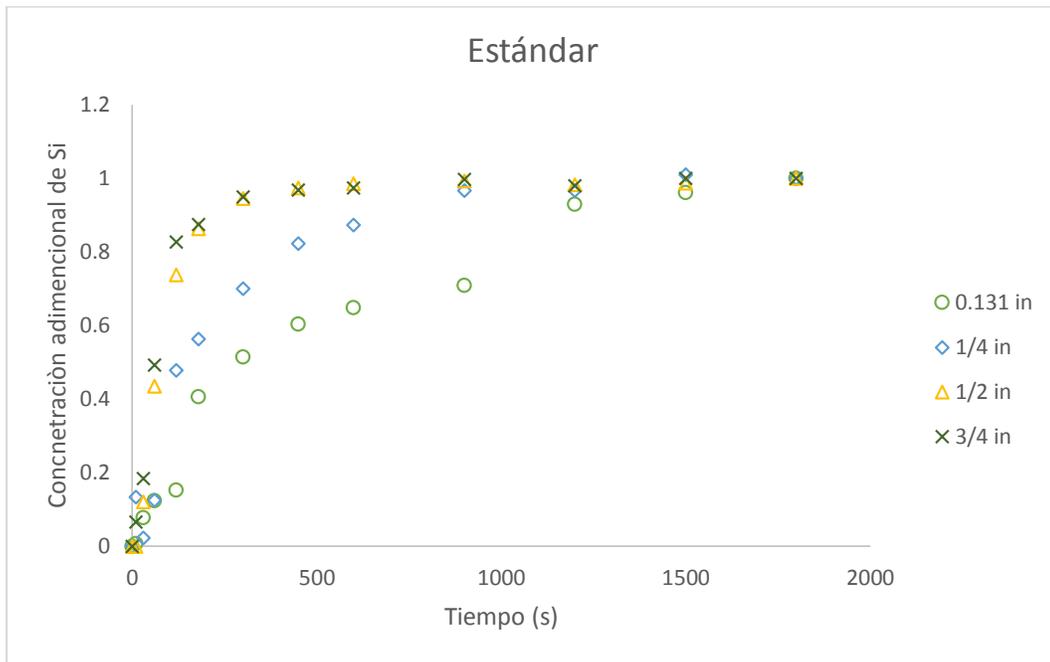


Figura 32. Curva de evolución de la concentración adimensional de silicio con el tiempo para el rotor Estándar a diferentes tamaños de partícula.

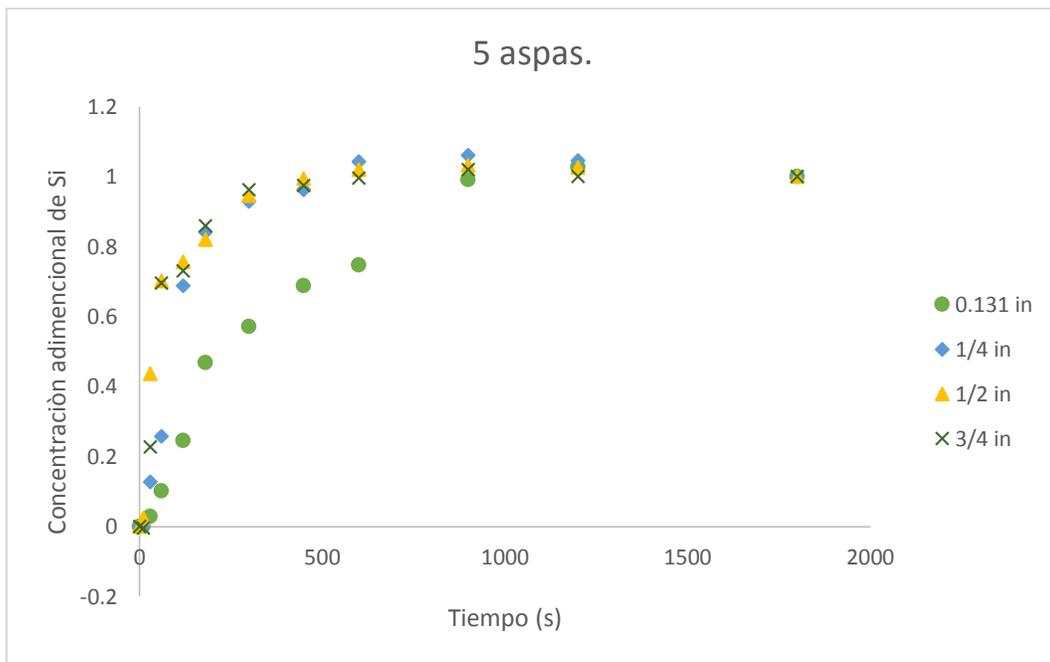


Figura 33. Curva de evolución de la concentración adimensional de silicio con el tiempo para el rotor de 5 aspas a diferentes tamaños de partícula.

Como se puede observar en las **Figuras 32 y 33**, con el tamaño de partícula de 0.131 in se presenta el tiempo más prolongado para alcanzar la concentración de equilibrio final, mientras que para los tamaños de partícula mayores ($\frac{3}{4}$ y $\frac{1}{2}$ in) su comportamiento es muy similar y requieren de un menor tiempo para alcanzar la composición de silicio en equilibrio. Se nota que el rotor de 5 aspas logra la concentración de equilibrio casi al mismo tiempo para los 3 tamaños más grandes de partícula, mientras que el rotor estándar logra el mezclado químico rápidamente solo para los dos tamaños de partícula mayores y para los dos tamaños finos el equilibrio se alcanza en más tiempo. Esto sugiere un mejor desempeño del rotor de 5 aspas en comparación del estándar para disolver rápidamente Si y también se entiende que a partir de tamaños de partícula de $\frac{1}{2}$ in y mayores, el mezclado se logra rápidamente y a la misma velocidad, es decir, la cinética deja de depender del tamaño de partícula e incluso tampoco depende del tipo de rotor.

En las **Figuras 34, 35, 36 y 37** se observa la comparación de la disolución de Si con respecto al tiempo, variando el tipo de rotor y comparando el mismo tamaño de partícula.

Se aprecia de las **Figuras 34 y 35** que con los tamaños de partícula de 0.131 y $\frac{1}{4}$ in, la agitación con el rotor de 5 aspas acelera el proceso de mezclado en comparación con el rotor estándar. Para el caso de los tamaños de partícula mayores ($\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ in) el comportamiento entre rotores es muy similar, y nuevamente se puede afirmar que a tamaños grandes la cinética de disolución deja de depender del tipo de rotor y del tamaño de partícula (ver **Figura 36 y 37**).

La cinética de disolución de partículas de silicio sólidas en baños de aluminio líquido se sabe que está controlada por la transferencia de masa y en algunos casos también por el transporte de energía. En particular en procesos de disolución donde no hay fusión de partículas, el transporte de masa controla la cinética de disolución [19].

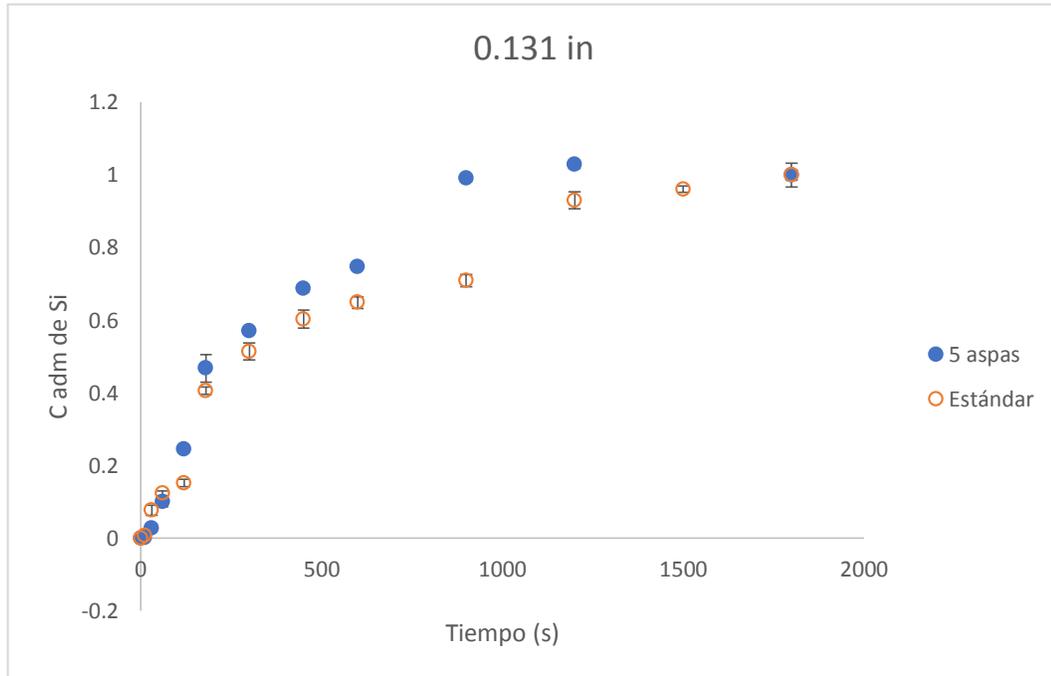


Figura 34. Curva de evolución de la concentración adimensional de silicio con el tiempo, comparando los rotores de 5 aspas y estándar para un tamaño de partícula de 0.131 in.

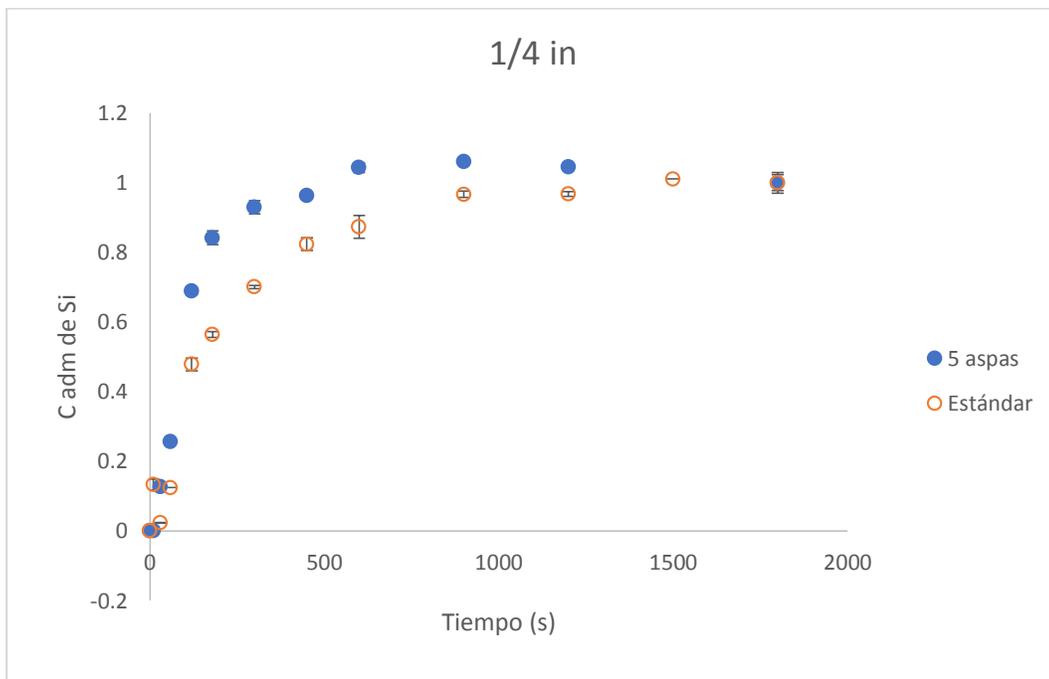


Figura 35. Curva de evolución de la concentración adimensional de silicio con el tiempo, comparando los rotores de 5 aspas y estándar para un tamaño de partícula de 1/4 in.

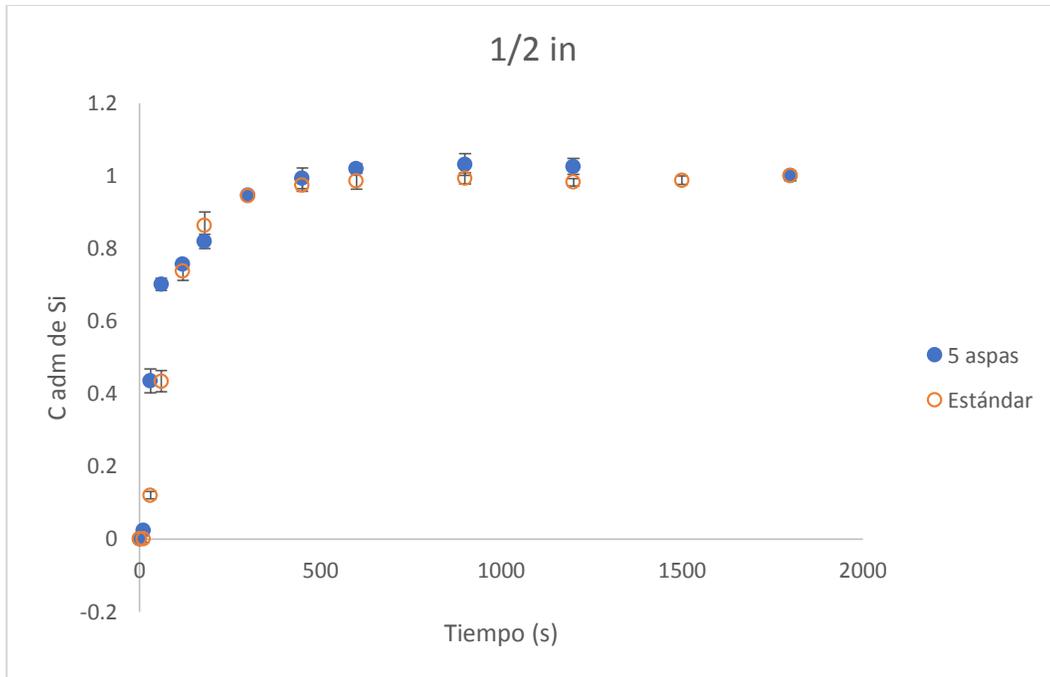


Figura 36. Curva de evolución de la concentración adimensional de silicio con el tiempo, comparando los rotores de 5 aspas y estándar para un tamaño de partícula de $\frac{1}{2}$ in.

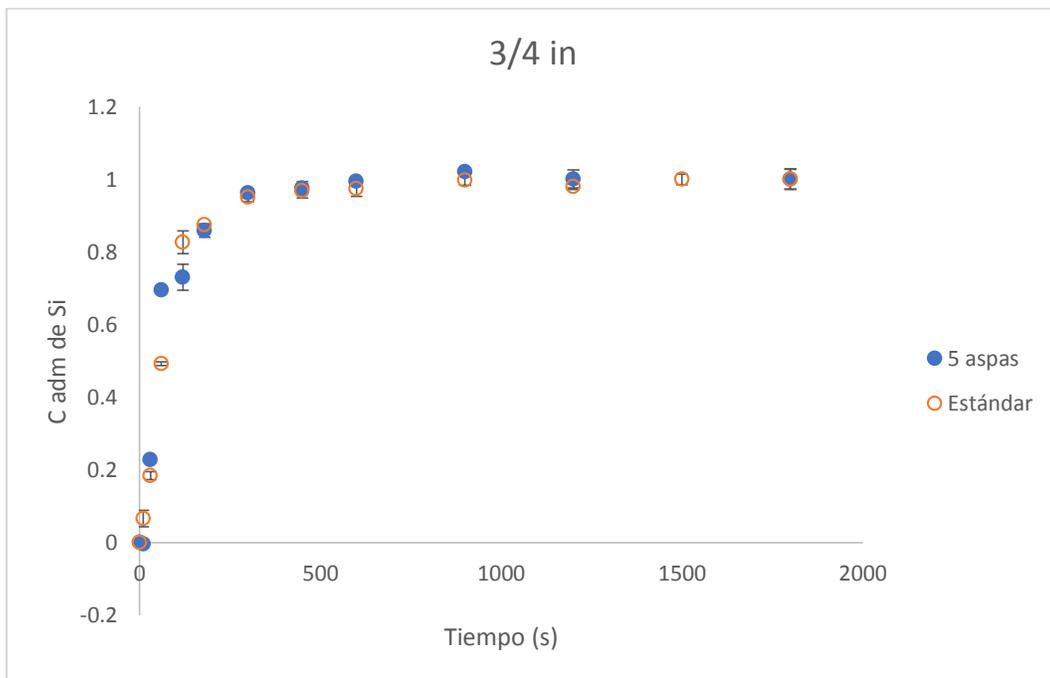


Figura 37. Curva de evolución de la concentración adimensional de silicio con el tiempo, comparando los rotores de 5 aspas y estándar para un tamaño de partícula de $\frac{3}{4}$ in.

El proceso de disolución de silicio en aluminio presumiblemente comprende de las siguientes etapas: a) formación de una costra sólida de líquido subenfriado que se da cuando las partículas sólidas frías tocan el baño caliente y de la intensidad de este choque térmico depende el tamaño de esta coraza que retarda el proceso de disolución, b) refusión de la coraza y paralelamente difusión en estado sólido de silicio desde la partícula de silicio al baño de aluminio a través de esta coraza, c) transferencia de masa por difusión de silicio en el líquido desde la intercara sólido-líquido al seno del líquido a través de una capa límite delgada de fluido y d) convección y dispersión turbulenta de silicio desde el final de la capa límite hacia el seno del líquido donde el silicio se mezcla. Estas son las etapas de transporte que intervienen en el proceso de disolución, aunque para partículas finas se notó otro control que más adelante se explicará. Del análisis de cada una de estas etapas es que se puede explicar el comportamiento cinético observado para la disolución de silicio.

De entrada, se conoce que la última etapa es rápida en este trabajo, ya que el líquido está bien agitado por la acción del rotor, por lo que se descarta como etapa controlante en el análisis. Los resultados sugieren que hay dos mecanismos de disolución distintos dependiendo del tamaño de partícula: 1) el primer mecanismo aplica para tamaños grandes de partícula de silicio ($\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ in) donde la cinética no depende ni del tamaño ni del tipo de rotor, 2) el segundo mecanismo aplica a tamaños más finos de partícula ($\frac{1}{4}$ y 0.131 in) en donde el efecto del rotor y del tamaño de la partícula si es significativo.

Para el primer mecanismo (partículas grandes) el hecho de que haya poca área interfacial, está asociada a poca coraza formada y por lo tanto la formación y refusión de esta no es significativa. También, en las partículas grandes se notó que se incorporan al seno del fluido y eso acelera su disolución. Además, la etapa (c) que se refiere a la difusión de Si a través de la capa límite hidrodinámica tampoco es importante, ya que se sabe que el rotor de 5 aspas agita mejor que el estándar [17], y como la cinética resultó insensible a estos cambios de geometría del rotor, se deduce que el tamaño de la capa límite no es importante. Por lo tanto, se propone que para partículas grandes la cinética es rápida pero está controlada por la difusión de silicio en la coraza y por la refusión de esta. Se podría acelerar la disolución de estas partículas grandes aumentando las rpm del rotor, lo que aceleraría un poco el tiempo para refundir la coraza.

Para partículas pequeñas el efecto del rotor es importante, así como el tamaño de partícula. El rotor de 5 aspas agita mejor que el estándar [17] y por lo tanto el rotor de 5 aspas generará una capa límite hidrodinámica menor que el estándar y también menor tamaño de la coraza [19]. Por otro lado, se vio en los experimentos que con tamaños menores de partícula de silicio, por la baja densidad de estas, las partículas sólidas flotan en la superficie y estas partículas casi no se mojan en el metal, por lo tanto, el área de las partículas forma interfaces aire-sólido y sólido-sólido (ver **Figura 31**) y disminuye la intercara sólido-líquido, lo cual aunado a que estas partículas finas no se logran incorporar al seno del líquido y consecuentemente el tiempo de disolución es mayor a menor tamaño de partícula. También hay un problema de mojabilidad entre las partículas y el baño que evita la inmersión de las partículas en el baño. Entonces, el control de la disolución con finas partículas pasa por la falta de contacto e incorporación de estas en el baño.

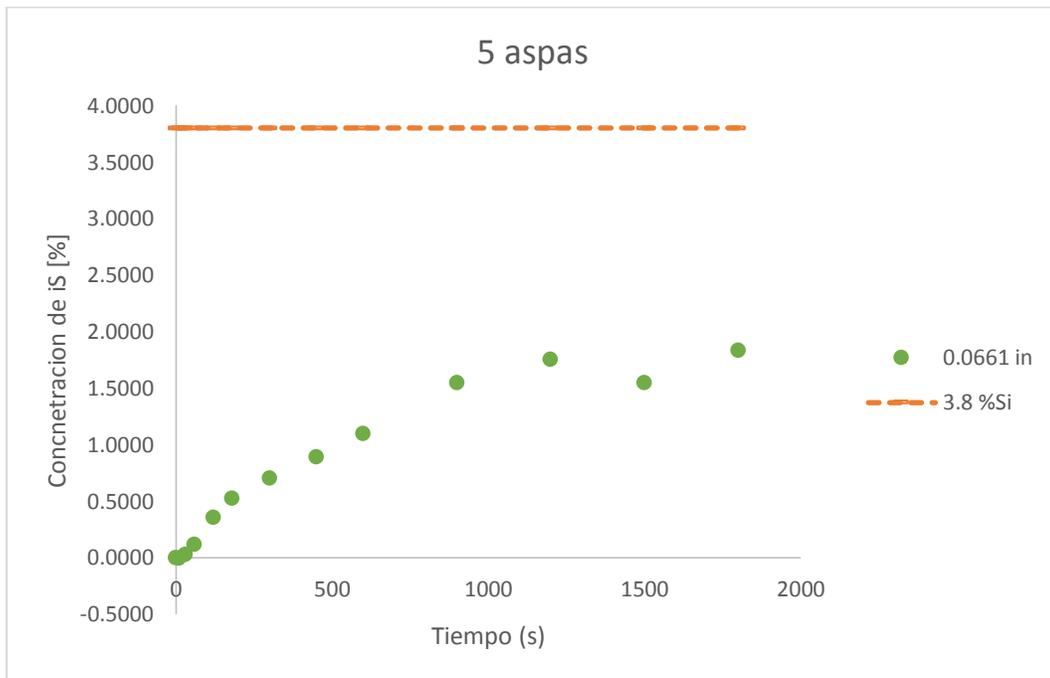


Figura 38 Curva de evolución de la concentración adimensional de Si Vs el tiempo para tamaño de partícula de 0.0661 in.

En efecto, se propuso de manera extra un experimento con tamaños de partícula aún menores y se decidió un tamaño de 0.0661 in para probar que efectivamente, a menor

tamaño no se logran mojar las partículas de silicio y al no tocar al metal líquido y estar en la superficie del baño, se baja la cinética de disolución de manera significativa y además se disminuye sensiblemente el rendimiento. En la **Figura 38** se observa, de color verde, la evolución de la concentración con respecto al tiempo de la incorporación de las partículas de silicio de 0.0661 in en el baño de aluminio y de color anaranjado la concentración final deseada (3.8 %Si). La concentración de silicio no se acerca a la concentración deseada, reforzando el planteamiento de que el silicio, a tamaños de partícula pequeños, flota sin sumergirse por completo e impidiendo que el área interfacial sea aprovechada para la transferencia de masa.

3.5. Tiempo de mezclado.

En la **Tabla 9** y en la **Figura 39** se presentan los tiempos de mezclado para cada rotor, 5 aspas y estándar, en función del tamaño de partícula. El procedimiento para obtener este tiempo final de mezclado a partir de las curvas de evolución de la concentración con el tiempo, se detalló en la sección de la metodología y aquí solo se recuerda que es el criterio del 95% de uniformidad el que se usó en este trabajo para determinar experimentalmente el tiempo de mezclado. Sin importar el tipo de rotor, se ve que el tiempo de mezclado disminuye al aumentar el tamaño de partícula, hasta alcanzar los dos tamaños mayores en los cuales el tiempo de mezclado es independiente tanto del tipo de rotor como del tamaño de partícula. Para el tamaño de partícula de 0.131 in el tiempo disminuye en casi un 40% con el rotor de 5 aspas en comparación con el rotor estándar. El tamaño de partícula de $\frac{1}{4}$ in presenta un mejor tiempo de mezclado con el rotor de 5 aspas, disminuyendo su tiempo en más de un 50% en comparación con el tiempo de mezclado del rotor estándar. Para tamaño de partícula de $\frac{1}{2}$ in la diferencia ya no es notoria entre rotores, aunque el rotor de 5 aspas sigue siendo el que presenta un mejor tiempo de mezclado con aproximadamente un 3% por debajo del estándar. En el caso de tamaño de partícula de $\frac{3}{4}$ in el tiempo de mezclado sigue siendo muy similar al anterior con una diferencia de casi un 5%, con un leve aumento con respecto al tiempo de $\frac{1}{2}$ in.

Tabla 9. *Tiempos de mezclado en segundos para los rotores de 5 espas y estándar a diferentes tamaños de partícula.*

Tamaño de partícula (in)	Tiempos de mezcla para rotor de 5 espas.	Tiempos de mezcla para rotor estándar.
0.131	849.56	1392.3
1/4	391.72	846.46
1/2	312.17	322.22
3/4	285.19	299.3

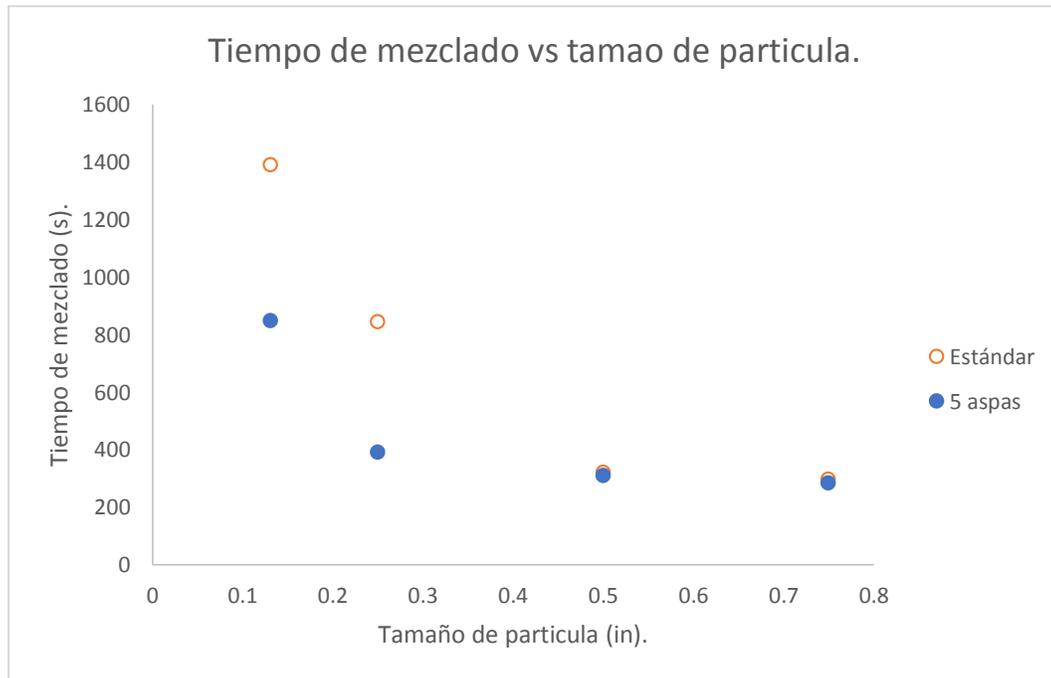


Figura 39. *Tiempos de mezclado obtenidos experimentalmente en función del tamaño de partícula para cada tipo de rotor.*

Haciendo una regresión multilínea en el programa Statgraphics X64, usando logaritmos de los tiempos de mezclado, tamaño de partícula y del tipo de rotor (rotor de 5 espas se le asignó un valor numérico de 1 y al estándar de 2 para el análisis numérico),

se encontró la siguiente correlación para el tiempo de mezclado (T_{mix}) en función del tipo de rotor (Rot) y tamaño de partícula (T_p) con un coeficiente de correlación $r^2 = 0.8995$:

$$T_{mix} = 175.8462441 * T_p^{-0.780401} * Rot^{0.484921} \quad (56)$$

Donde T_p es tamaño de partícula en μm y Rot es el tipo de rotor. Analizando los exponentes de la ecuación **56**, se aprecia que al incrementar T_p disminuye el tiempo de mezclado y que al pasar del rotor de 5 aspas al estándar aumenta el tiempo de mezclado. De las dos variables analizadas, la más importante cuantitativamente hablando es el tamaño de partícula, lo que indica inequívocamente que el poco contacto sólido-líquido debida a la flotabilidad y al poco mojado de las partículas en el baño, es decir, su poca incorporación al baño es la razón que controla la cinética de disolución para partículas finas.

Analizando el tiempo de mezclado, es evidente que solo a tamaños finos de partícula se tiene un efecto significativo en cuanto al tamaño de partícula y del tipo de rotor sobre el tiempo de mezclado. Esto refuerza la idea de que la falta de mojado, la excesiva flotabilidad y la poca incorporación de estas partículas en el baño, mayormente con tamaños finos controlan el proceso de disolución. El rotor de 5 aspas agita mejor que el rotor estándar y esto significa que el rotor de 5 aspas y de alguna forma ayuda a mojar e incorporar las partículas al seno del líquido y consecuentemente mejora el mezclado.

Esta conclusión es muy significativa, porque se podría pensar que a tamaños finos, con mayor área interfacial, el proceso de disolución se aceleraría, pero resulta lo opuesto, ya que al tener mayor área superficial no ayuda a mejorar la cinética de disolución sino a formar intercara aire-sólido ya que las partículas flotan y se aglomeran con un mínimo contacto partícula-líquido, mayor aglomeración de partículas y una menos eficiente transferencia de masa.

A continuación, se presentan estimaciones basadas en los datos experimentales de dos parámetros cinéticos importantes (kA y A) que van a reforzar las explicaciones encontradas en las cinéticas de disolución.

3.6. Cinéticas de disolución.

En la **Tabla 10** se presentan los coeficientes de transferencia de masa multiplicados por el área interfacial, para cada experimento a diferentes tiempos.

Tabla 10. Coeficiente de transferencia de masa (kA) calculado para cada experimento a diferentes tiempos.

Tiempo (s)	5 aspas				Estándar			
	0.131 in	¼ in	½ in	¾ in	0.131 in	¼ in	½ in	¾ in
0	2.87E-07	7.91E-08	5.15E-06	1.68E-05	1.62E-06	1.64E-06	1.19E-07	1.41E-05
10	2.00E-06	8.92E-06	3.14E-05	1.66E-05	5.48E-06	---	8.51E-06	1.39E-05
30	4.31E-06	1.23E-05	5.11E-05	3.33E-05	5.28E-06	4.49E-06	2.09E-05	2.21E-05
60	5.59E-06	1.75E-05	2.54E-05	4.11E-05	1.98E-06	1.22E-05	2.58E-05	2.99E-05
120	8.44E-06	3.27E-05	8.58E-06	1.12E-05	---	1.49E-05	2.91E-05	3.93E-05
180	7.12E-06	1.76E-05	1.23E-05	2.04E-05	---	5.99E-06	1.80E-05	1.17E-05
300	3.96E-06	1.32E-05	2.52E-05	2.56E-05	3.13E-06	6.78E-06	1.62E-05	1.49E-05
450	3.91E-06	2.11E-05	---	9.74E-06	2.36E-06	6.86E-06	1.11E-05	5.30E-06
600	5.53E-06	---	---	---	1.40E-06	5.26E-06	6.59E-06	5.10E-06
900	---	---	---	---	3.33E-06	9.77E-06	---	7.17E-06
1200	---	2.96E-06	2.78E-06	---	---	4.61E-06	---	5.03E-07
1500	---	---	---	---	---	---	5.02E-06	---

En la **Figura 40** se graficaron los coeficientes de transferencia de masa contra el tiempo en segundos reportados en la **Tabla 10** para el rotor de 5 aspas, en donde se aprecia que la mayor rapidez en la transferencia de masa se presenta cuando el tamaño promedio de la partícula de silicio es de ¾ de in y para ½ in, seguido del tamaño de ¼ in y el de menor rapidez es el tamaño más fino, es decir de 0.131 in.

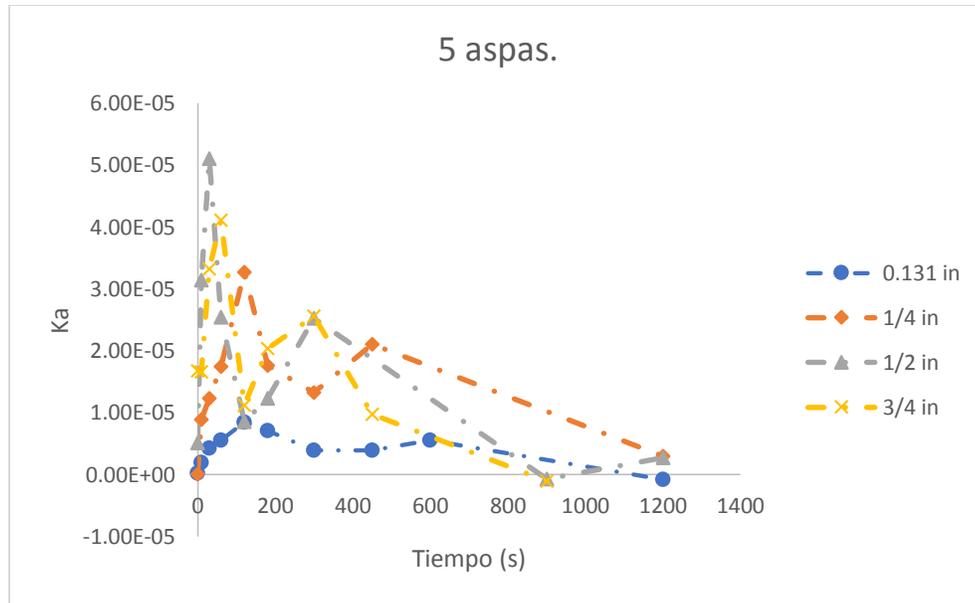


Figura 40. Curva de evolución de tiempo contra el coeficiente de transferencia de masa (k_A) para el rotor de 5 aspas para diferentes tamaños de partícula.

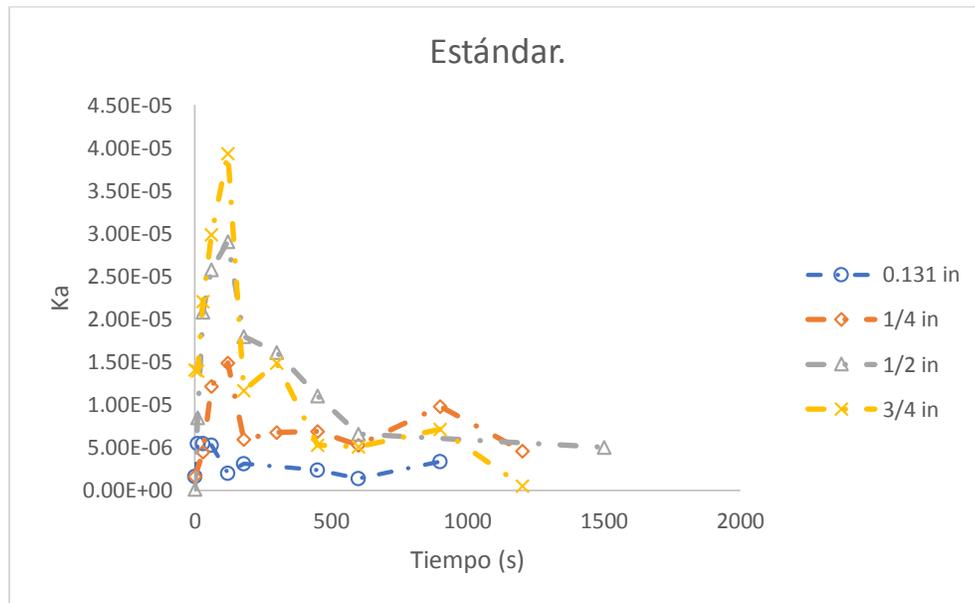


Figura 41. Curva de evolución de tiempo contra el coeficiente de transferencia de masa (k_A) para el rotor estándar para diferentes tamaños de partícula.

Para el caso del rotor estándar se nota, en la **Figura 41**, que el tamaño de partícula de $\frac{3}{4}$ in presenta una mayor rapidez comparado con los demás tamaños. Las rapidezces disminuyen con la disminución en el tamaño promedio de partícula de silicio.

Comparando los resultados de la **Tabla 10** y de las **Figuras 40 y 41**, podemos notar que las rapidezces para el rotor de 5 aspas son mayores a las del estándar.

Las constantes cinéticas altas para tamaños grandes de partículas sin importar el rotor coinciden con las consideraciones ya señaladas, es decir, la formación de poca coraza al inicio de la incorporación de las partículas aleantes sólidas y la inmediata y fácil inmersión de estas partículas grandes en el seno del líquido, ayuda a tener cinéticas rápidas, mientras que para los tamaños finos, con gran flotabilidad, poca mojabilidad y poca inmersión, la cinética se retarda y entonces, el rotor de 5 aspas ayuda a acelerar la disolución porque se agita mejor el baño y consecuentemente las partículas entran en mayor contacto íntimo con el baño que con el rotor estándar.

En las **Figuras 42 y 43** se observa el comportamiento del área interfacial teórica de las partículas sólidas de silicio con respecto al tiempo, donde se observa claramente que en general el área interfacial calculada disminuye con el tiempo. No se nota una gran diferencia en el área interfacial calculada para ambos rotores. El área interfacial calculada a partir de las ecuaciones **36 a 41** predice áreas mayores a las esperadas al final de la disolución, especialmente para tamaños de partícula finos. Se esperaría que las áreas interfaciales finales sean cero cuando se ha disuelto toda la partícula de silicio, pero los cálculos de estas ecuaciones predicen áreas interfaciales finitas sobre todo para tamaños de partícula pequeños, por lo que el procedimiento de cálculo debe tener un error numérico. También se aprecia que el área interfacial decrece rápidamente en los primeros segundos de disolución, que coincide con los valores máximos del coeficiente de transferencia de masa (ver **Figuras 40 y 41**) y también coincide con las pendientes grandes en la evolución del silicio con el tiempo de las **Figuras 32 y 33**. Finalmente las áreas más grandes están asociadas a tamaños de partículas menores.

Simplemente, se confirma que los tamaños pequeños de partículas presentan inicialmente mayor área interfacial, pero que esta área en vez de servir para promover transferencia de silicio desde la partícula al seno del baño, sirve para formar intercara aire-sólido y sólido-sólido sin mojabilidad con el metal y sin contacto con este por inmersión, por lo que se retarda el proceso de disolución. Conforme el proceso de disolución transcurre disminuyen las áreas interfaciales, entonces las cinéticas se igualan

para todos los casos de partículas y los dos rotores empleados, además de que la fuerza motriz para el transporte de masa va disminuyendo.

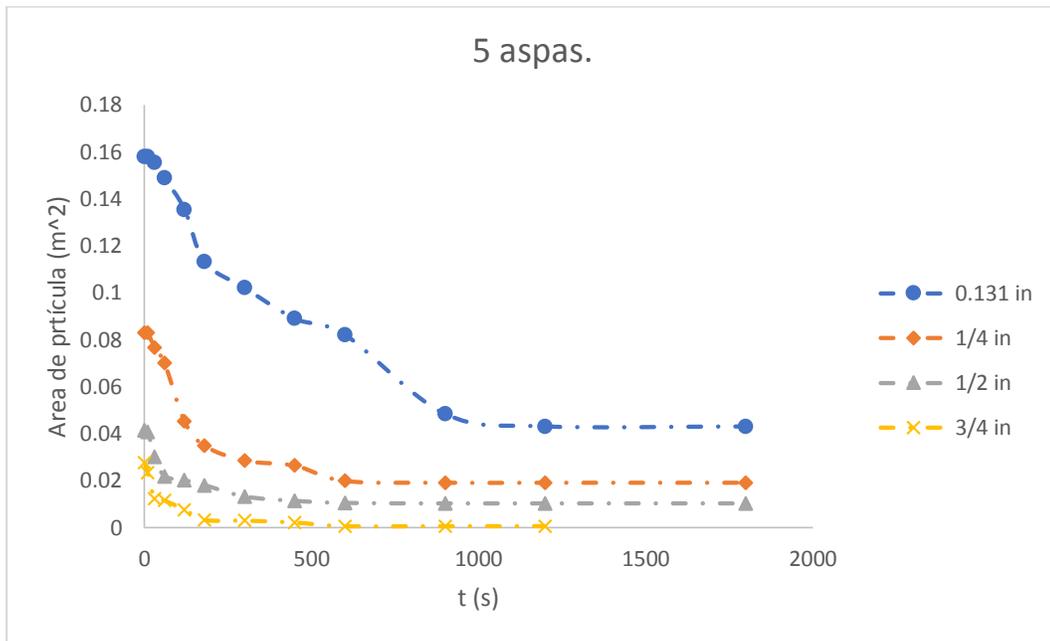


Figura 42. Curva de evolución del área interfacial con el tiempo para el rotor 5 aspas a diferentes tamaños de partícula.

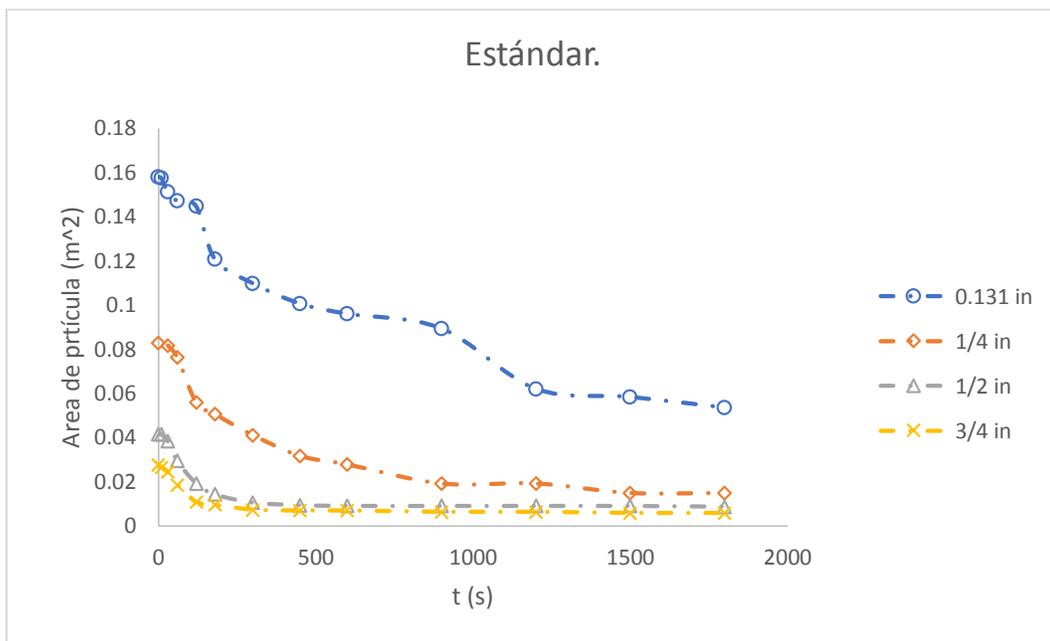


Figura 43. Curva de evolución del área interfacial con el tiempo para el rotor estándar a diferentes tamaños de partícula.

3.7. Correlaciones de tiempo mezclado y rendimiento de Si en función del tamaño de partícula y tipo de rotor.

Para el ajuste de las curvas experimentales del tiempo final de mezclado y el rendimiento de silicio en función del tamaño de la partícula de silicio, tanto para el rotor estándar como para el rotor de 5 aspas, se utilizó el programa Table curve 2D V5.01, con el que se obtuvieron las ecuaciones que se asemejan más a los resultados obtenidos. En las **Figuras 44** y **45** se presentan estas interpolaciones donde los puntos, son los datos experimentales y las líneas son las ecuaciones interpoladas.

Tiempo de mezclado.

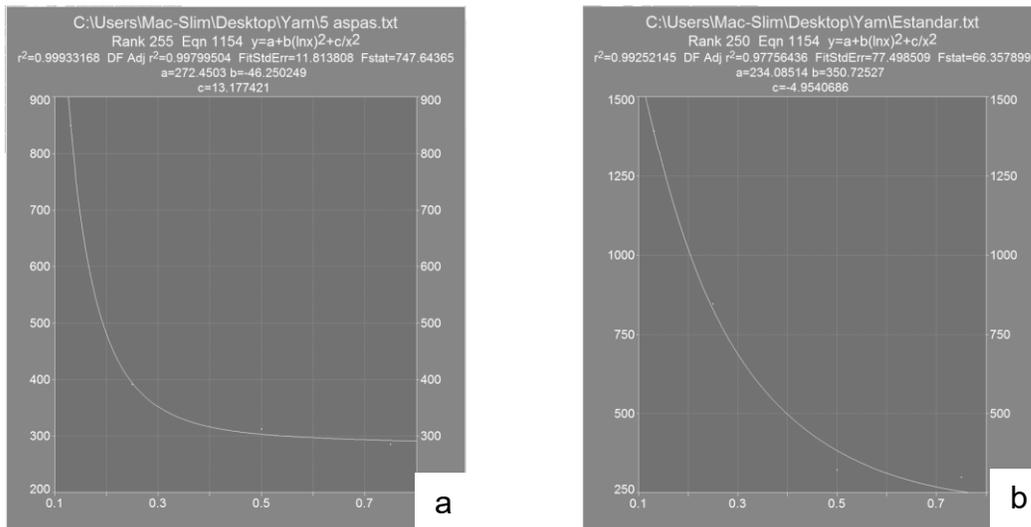


Figura 44. Curvas de evolución del tiempo de mezclado con respecto a tamaño de partícula, obtenidas con el programa Table curve2D V5.01 para el rotor de a) 5 aspas y b) estándar.

En la **Figura 44a** se observa que para el rotor de 5 aspas la curva tiene un tiempo de mezclado mínimo a tamaños de partícula grandes, por lo que mientras más grande es el tamaño de partícula menor será el tiempo de mezclado. Para la gráfica del rotor estándar (**Figura 44b**), la interpolación usada presenta una tendencia similar a la del rotor de 5 aspas quizás siendo más pronunciada la pendiente decreciente a tamaños grandes de partícula. Ambas interpolaciones fueron hechas con la misma ecuación:

$$t_{mix} = a + b(\ln(Tp))^2 + \frac{c}{Tp^2} \quad (57)$$

Donde Tp es el tamaño de partícula en pulgadas. Solo varían los valores de los coeficientes a , b y c . En la **Tabla 11** se enlistan los valores de los coeficientes para cada rotor.

Tabla 11. Coeficientes obtenidos por Table curve2D V5.01 para el tiempo de mezclado.

Coeficientes	5 aspas	Estándar
a	89.995921	272.4503
b	4.5282923	46.250249
c	0.025020975	13.177421

3.8. Rendimiento de silicio.

La **Figura 45** muestra las curvas interpoladas del rendimiento de Si para ambos rotores en función del tamaño de partícula, donde para el caso del rotor de 5 aspas se observa que el rendimiento aumenta con el tamaño de partícula, mientras que el estándar presenta un máximo entre los tamaños de $\frac{1}{4}$ in y $\frac{1}{2}$ in. De la misma manera que el caso de interpolación del tiempo de mezclado, para interpolar el rendimiento se usó una misma ecuación para ambos rotores:

$$Ren_{Si} = a + bTp^2 + \frac{c \ln(Tp)}{Tp^2} \quad (58)$$

Similarmente, dependiendo del rotor varían los coeficientes a , b y c . Los coeficientes se muestran en la **Tabla 12**.

Tabla 12. Coeficientes obtenidos por Table curve2D V5.01 para el rendimiento de silicio.

Coeficientes	5 aspas	Estándar
a	89.995921	98.052727
b	4.5282923	6.0529853
c	0.025010975	0.1102369

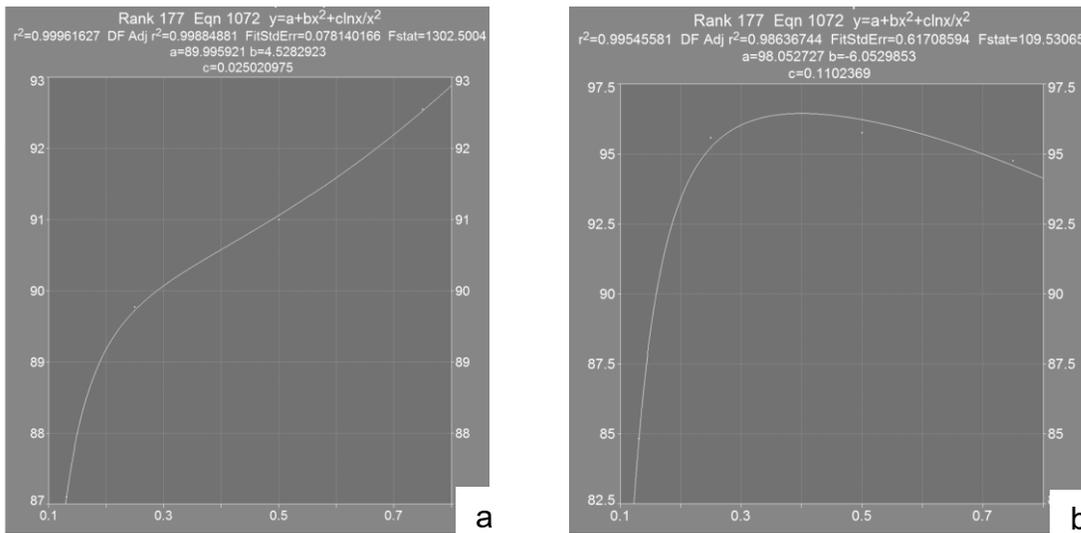
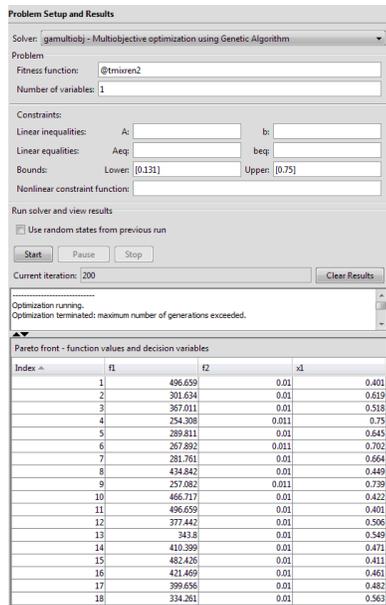


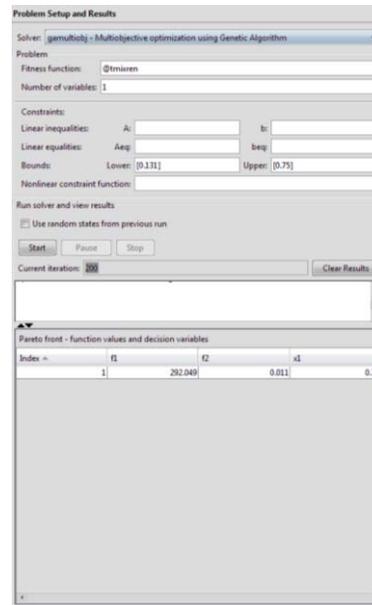
Figura 45. Curvas de evolución del rendimiento con respecto a tamaño de partícula, obtenidas con el programa Table curve2D V5.01 para el rotor de a) 5 aspas y b) estándar.

3.8. Optimización del proceso de disolución.

Las ecuaciones obtenidas del Table curve 2D V5.01 (ecuaciones **57** y **58**) se trataron en el programa MatLab para la obtención de los puntos óptimos, es decir, aquellos valores de tamaño de partícula que simultáneamente maximizan el rendimiento y minimizan el tiempo de mezclado, los cuales se encuentran en la **Tabla 13**. Cabe señalar que se hizo una optimización para el rotor de 5 aspas y una distinta para el rotor estándar. Por eso la **Tabla 13** presenta estas dos optimizaciones señaladas para ambos rotores. Otra consideración es que los límites del tamaño de partícula usados fueron los mismos que en la experimentación, es decir, 0.131 in y $\frac{3}{4}$ in. Además, se utilizó el algoritmo de optimización multiobjetivo llamado “algoritmo genético”, el cual está programado en MatLab. En la **Figura 46** se presentan a manera de ilustración las optimizaciones hechas en MatLab.



a



b

Figura 46. Optimizaciones hechas en MatLab usando el algoritmo genético para a) rotor estándar, b) rotor de 5 aspas.

Tabla 13. Puntos óptimos para el rotor de 5 aspas y estándar según la optimización por el programa MatLab

5 aspas.			Estándar.		
Tiempo de mezclado (s).	Tamaño de partícula (in).	Rendimiento (%).	Tiempo de mezclado (s).	Tamaño de partícula (in).	Rendimiento (%).
292	0.75	92.53	497	0.40	96.45
			472	0.42	96.44
			459	0.43	96.43
			427	0.46	96.38
			413	0.47	96.34
			401	0.48	96.30
			369	0.52	96.17
			355	0.53	96.08
			339	0.56	95.98
			322	0.58	95.83
			313	0.60	95.73
			304	0.62	95.62
			283	0.66	95.31
			275	0.68	95.15
			259	0.73	94.74
			254	0.75	94.59

Como se observa en la **Tabla 13** para el rotor de 5 aspas solo marca como optimo al tamaño de partícula mayor (3/4 in) dando un rendimiento de Si mayor al 92% y un tiempo de mezclado de aproximadamente 292 segundos. En cambio, para el rotor estándar se obtuvo un Frente de Pareto que proporciona un rango de rendimientos de silicio, así como un rango de tiempos de mezclado óptimos. Este Frente de Pareto se presenta en la **Figura 47**. El rango de rendimiento de silicio va de 94.59% a 96.45% mientras que el rango de tiempo de mezclado va de 254 a 497 segundos. Obviamente el rango de rendimiento de silicio es mucho más estrecho desde el punto de vista práctico que el rango de tiempos de mezclado, por lo que se puede sugerir sacrificar menos de un dos por ciento en el rendimiento de silicio para acelerar el mezclado en casi 4 minutos. Por lo tanto, el tamaño de partícula de silicio óptimo para el rotor estándar es de 0.75 in.

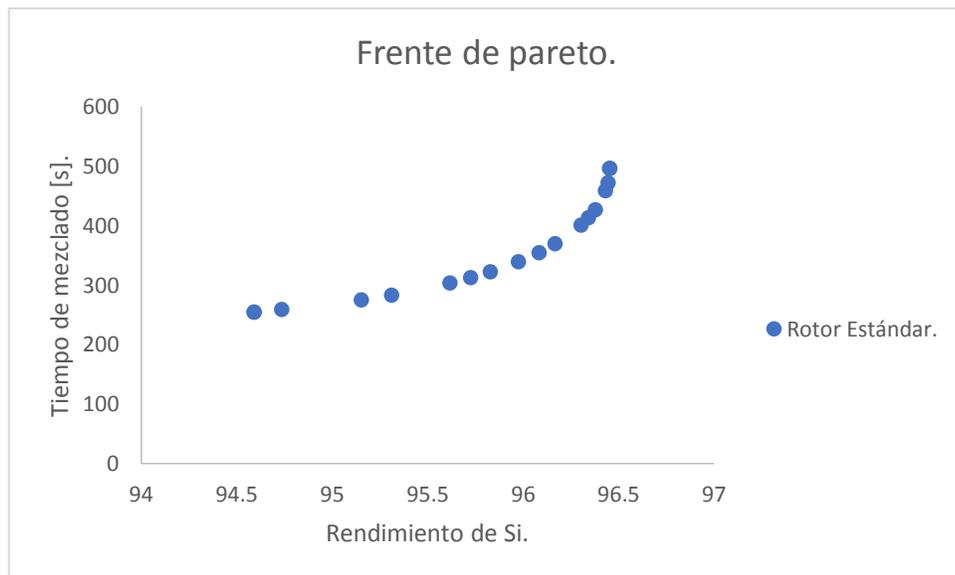


Figura 47. Frente de Pareto mostrando los tiempos de mezclado y rendimientos óptimos para el rotor estándar.

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES.

Se realizó un estudio experimental para analizar el efecto del tamaño de partícula y tipo de rotor en la cinética de disolución de Si en aluminio para formar una aleación Al-3.8% Si usando condiciones controladas de agitación con el aparato de desgasificación conocido como rotor-inyector. Las principales conclusiones son:

1. Para partículas sólidas grandes de silicio ($\frac{3}{4}$ y $\frac{1}{2}$ in) bajo las mismas condiciones de temperatura y de rpm del rotor, la cinética de disolución es independiente del tipo o geometría de rotor y del tamaño de partícula. El tiempo de mezclado es prácticamente independiente de estas dos variables.
2. Para partículas sólidas pequeñas de silicio ($\frac{1}{4}$, y 0.131 in) bajo las mismas condiciones de temperatura y de rpm del rotor, la cinética de disolución depende fuertemente del tamaño de partícula y del tipo de rotor, siendo el de 5 espas mejor que el estándar y mientras disminuye el tamaño de partícula se aumenta el tiempo de mezclado. Inclusive con tamaño aún menor de 0.066 in ya no se logró disolver el silicio en 30 minutos de prueba y su rendimiento bajo considerablemente.
3. En cuanto al rendimiento de silicio, se puede afirmar que éste no es afectado significativamente ni por el tipo de rotor ni por el tamaño de partícula de Si ya que los rendimientos oscilan entre 84 y 96%, aunque el rotor estándar es superior al de 5 espas (excepto para el tamaño de 0.131 in) y que al aumentar el tamaño de partícula en general se mejora el rendimiento.
4. Se proponen dos mecanismos controlantes de las cinéticas de disolución: 1) un mecanismo aplica para tamaños grandes de partícula de silicio ($\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ in) donde la cinética no depende ni del tamaño ni del tipo de rotor y donde se propone que la cinética es rápida pero está controlada por la difusión de silicio en la coraza y por la refusión de esta; 2) el segundo mecanismo aplica a tamaños más finos de partícula ($\frac{1}{4}$ y 0.131 in) en donde el efecto del rotor y del tamaño de la partícula si

es significativo y donde se sugiere que la etapa controlante puede ser el poco contacto íntimo entre las partículas y el baño, por la flotabilidad y el poco mojado que las partículas más finas exhiben.

5. Se encontró que el tamaño óptimo, para una rápida disolución de silicio usando el rotor de 5 aspas, fue de $\frac{3}{4}$ in con un tiempo total de mezclado de 292 segundos y 92.53% de rendimiento.

6. Se encontró que el tamaño óptimo para una rápida disolución de silicio usando el rotor estándar fue de 0.75 in con un tiempo total de mezclado de 254 segundos y 94.59 % de rendimiento.

Referencias.

[1] Modern casting, December 2016, 50TH *Census of world casting production*. [En línea]. USA. Pp 25-27. [Consultado 14/04/2017] Disponible en:

<http://www.afsinc.org/multimedia/contentMC.cfm?ItemNumber=19617&RDtoken=58876&userID=41248>

[2] ASM HANDBOOK. Vol. 2, 1990, *Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials*. USA. Pp. 17-31, 484-491.

[3] AFS Foundry alloys. Vol 2. *Solidification characteristics of aluminium alloys*. USA.

[4] John E. Gruzleski, Bernard M. Closset. *The treatment of liquid Aluminium-Silicon alloys*. The American Foundrymen's Society, Inc. USA 1990, pp. 1-25, 143-184.

[5] *La industria del aluminio en México* [en línea], Banco nacional de Comercio Exterior. México, Ciudad de México. [Consultado 17/04/2017]. Disponible en internet: <http://www.revistacomercioexterior.com/>

[6] Erika Gutiérrez D. (2015), *Estudio experimental de la disolución de aluminio puro en baños de una aleación eutéctica Al-Si*, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Ciudad de México, México, pp. 4.

[7] Geoffrey K. Singworth. "Practical degassing of aluminum". *Modern Casting*, March 1988, USA.

[8] Mancilla Ernesto, Garduño Isaías E. (2016), *Estudio hidrodinámico de rotores-inyectores sobre la cinética de desgasificado de aluminio*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, México, pp. 144-147.

[9] Edward L. Paul, *Handbook of industrial mixing, science and practice*, A John Wiley & Sons, INC., USA, pp. 391-506,

[10] Arcelia Segura Herrera (1998), *Reducción de tiempo de mezclado en tanques agitados por medio de perturbaciones geométricas y dinámicas con fluidos No-Newtonianos*, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Ciudad de México, México, pp. 9-12.

- [11] Mehran Seyed Ahmadi, Stavros A. Argyropoulos (2011), *Dissolution studies of Si metal in liquid Al under different forced convection conditions*, Light Metals, The minerals, Metals and materials society, pp. 809-814.
- [12] Argyropoulos Stavros A., Panayiotis G. Sismanis (1991), *The mass transfer kinetics of niobium solution into liquid steel*. Metallurgical Transactions B, USA, pp. 417-427.
- [13] J. K. Wright, (1989), *Steel dissolution in quiescent and gas stirred Fe/C melts*, Metallurgical Transactions B, USA, pp. 363-374.
- [14] Kim Yeung U, Pehlke Robert D. (1974), *Mass Transfer during dissolution of a solid into liquid in the iron-carbon system*, Metallurgical Transactions B, USA, pp. 2527-2532.
- [15] Argyropoulos Stavros A., Guthrie Roderick I.L., (1984), *The dissolution of titanium in liquid steel*, Metallurgical Transactions B, USA, pp. 47-58.
- [16] Sun Haiping, (2005), *Factors influencing dissolution of carbonaceous materials in liquid iron*, Metallurgical Transactions B, USA, pp. 893-894.
- [17] Itzayana Padilla Hernández (2017), *Análisis del desempeño de dos rotores nuevos para el desgasificado de aluminio asistido por modelado físico y matemático*, Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, México, Facultad de Química, Ciudad de México, pp. 66- 127.
- [18] Jenifer Alexia Archer A. (2017), *Análisis de mezclado químico de dos rotores nuevos para el desgasificado de aluminio*, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, México, Ciudad de México, Facultad de Química, pp. 25, 30-49.
- [19] Luis Enrique Jardón Pérez (2014), *Estudio experimental y teórico de la fusión de Al en baños de Al*, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, México, Facultad de Química, Ciudad de México, pp. 56-118.

ANEXO I. Impresión de las determinaciones de composición química promedio obtenidas por espectrometría de emisión durante la experimentación al final de cada experimento.

Experimento A con las variables: tamaño de partícula de 0.131 in y rotor 5 aspas.

Program: AL-011

03/09/2017 12:32:19 PM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL

Average (n=3)

Elements: Concentration

Muestra No.: A12

Quality:

Usuario: YAMILETT GARCIA

Analista: DR. ADRIAN M. AMARO VILLEDA

Comentarios: ASIGNATURA PORYECTO

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
\bar{x}	3.567	0.2135	0.0056	0.0089	<0.0050	0.0279	0.0023	<0.0010	<0.0020
	Ti	V	Co	Sr	Al				
	%	%	%	%	%				
\bar{x}	0.0444	0.0091	<0.0020	0.0002	96.1				

Experimento B con las variables: tamaño de partícula de ¼ in y rotor 5 aspas.

Program: AL-011

03/09/2017 01:21:14 PM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL

Average (n=3)

Elements: Concentration

Muestra No.: B12

Quality:

Usuario: YAMILETT GARCIA

Analista: DR. ADRIAN M. AMARO VILLEDA

Comentarios: ASIGNATURA PROYECTO

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
\bar{x}	3.645	0.1958	0.0052	0.0098	<0.0050	0.0418	0.0017	0.0011	<0.0020
	Ti	V	Co	Sr	Al				
	%	%	%	%	%				
\bar{x}	0.0600	0.0114	<0.0020	0.0002	96.0				

Experimento C para las variables: tamaño de partícula de 1/2 in y rotor 5 aspas.

Program: AL-011

03/09/2017 01:55:25 PM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL

Average (n=3)

Elements: Concentration

Muestra No.: C12

Quality:

Usuario: YAMILETT GARCIA

Analista: DR. ADRIAN M. AMARO VILLEDA

Comentarios: ASIGNATURA POYECTO

	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Pb</i>
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
<i>-</i>									
<i>x</i>	<i>3.648</i>	<i>0.2124</i>	<i>0.0055</i>	<i>0.0092</i>	<i><0.0050</i>	<i>0.0287</i>	<i>0.0025</i>	<i>0.0013</i>	<i><0.0020</i>
	<i>Ti</i>	<i>V</i>	<i>Co</i>	<i>Sr</i>	<i>Al</i>				
	%	%	%	%	%				
<i>-</i>									
<i>x</i>	<i>0.0434</i>	<i>0.0095</i>	<i><0.0020</i>	<i>0.0002</i>	<i>96.0</i>				

Experimento D para las variables: tamaño de partícula de 3/4 in y rotor 5 aspas.

Program: AL-011

03/09/2017 02:26:28 PM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL

Average (n=3)

Elements: Concentration

Muestra No.: D12

Quality:

Usuario: YAMILETT GARCIA

Analista: DR. ADRIAN M. AMARO VILLEDA

Comentarios: ASIGNATURA PROYECTO

	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Pb</i>
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
<i>-</i>									
<i>x</i>	<i>4.048</i>	<i>0.2238</i>	<i>0.0056</i>	<i>0.0098</i>	<i><0.0050</i>	<i>0.0324</i>	<i>0.0026</i>	<i>0.0013</i>	<i><0.0020</i>
	<i>Ti</i>	<i>V</i>	<i>Co</i>	<i>Sr</i>	<i>Al</i>				
	%	%	%	%	%				
<i>-</i>									
<i>x</i>	<i>0.0468</i>	<i>0.0102</i>	<i><0.0020</i>	<i>0.0002</i>	<i>95.6</i>				

Experimento E para las variables: tamaño de partícula de 0.103 in y rotor estándar

Program: AL-011

04/04/2017 10:20:51 AM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL

Average (n=3)

Elements: Concentration

Muestra No.: E13

Quality:

Usuario: YAMILETT GARCIA

Analista: DR. ADRIAN M. AMAO VILLEDA

Comentarios: ASIGNATURA PROYECTO

	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Pb</i>
	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>
<i>-</i>									
<i>x</i>	<i>3.479</i>	<i>0.2033</i>	<i>0.0054</i>	<i>0.0097</i>	<i><0.0050</i>	<i>0.0455</i>	<i>0.0018</i>	<i>0.0012</i>	<i>0.0021</i>
	<i>Ti</i>	<i>V</i>	<i>Co</i>	<i>Sr</i>	<i>Al</i>				
	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>				
<i>-</i>									
<i>x</i>	<i>0.0564</i>	<i>0.0103</i>	<i><0.0020</i>	<i>0.0002</i>	<i>96.2</i>				

Experimento F para las variables: tamaño de partícula de ¼ in y rotor estándar.

Program: AL-011

04/04/2017 10:57:01 AM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL

Average (n=3)

Elements: Concentration

Muestra No.: F13

Quality:

Usuario: YAMILETT GARCIA

Analista: DR. ADRIAN M. AMARO VILLEDA

Comentarios: ASIGNATURA PROYECTO

	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Pb</i>
	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>
<i>-</i>									
<i>x</i>	<i>3.868</i>	<i>0.2451</i>	<i>0.0074</i>	<i>0.0149</i>	<i>0.0052</i>	<i>0.0599</i>	<i>0.0090</i>	<i>0.0028</i>	<i>0.0033</i>
	<i>Ti</i>	<i>V</i>	<i>Co</i>	<i>Sr</i>	<i>Al</i>				
	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>				
<i>-</i>									
<i>x</i>	<i>0.0608</i>	<i>0.0308</i>	<i>0.0074</i>	<i>0.0003</i>	<i><95.7</i>				

Experimento G para las variables: tamaño de partícula de 1/2 in y rotor estándar.

Program: AL-011

04/04/2017 11:36:44 AM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL

Elements: Concentration

Average (n=3)

Muestra No.: G13

Quality:

Usuario: YAMILETT GARCIA

Analista: DR. ADRIAN M. AMARO VILLEDA

Comentarios: ASIGNATURA PROYECTO

	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Pb</i>
\bar{x}	3.848	0.2231	0.0058	0.0092	<0.0050	0.0360	0.0023	0.0010	0.0021
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
	<i>Ti</i>	<i>V</i>	<i>Co</i>	<i>Sr</i>	<i>Al</i>				
\bar{x}	0.0425	0.0095	<0.0020	0.0002	95.8				
	%	%	%	%	%				

Experimento H para las variables: tamaño de partícula de 3/4 in y rotor estándar.

Program: AL-011

04/04/2017 12:13:40 PM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL

Elements: Concentration

Average (n=3)

Muestra No.: H13

Quality:

Usuario: YAMILETT GARCIA VIGUERAS

Analista: DR. ADRIAN M. AMARO VILLEDA

Comentarios: ASIGNATURA PROYECTO

	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Pb</i>
\bar{x}	3.833	0.2479	0.0057	0.0096	<0.0050	0.0286	0.0024	<0.0010	<0.0020
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
	<i>Ti</i>	<i>V</i>	<i>Co</i>	<i>Sr</i>	<i>Al</i>				
\bar{x}	0.0467	0.0100	<0.0020	0.0002	95.8				
	%	%	%	%	%				

Experimento I para las variables: tamaño de partícula de 0.0661 in y rotor 5 aspas.

Program: AL-011

06/23/2017 01:08:02 PM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL

Average (n=3)

Elements: Concentration

Muestra No.: 113

Quality:

Usuario: Yamilett Garcia Viguera

Analista: Dr. Adrian M. Amaro Villeda

Comentarios: Tesis

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
\bar{x}	1.896	0.2116	0.0054	0.0099	<0.0050	0.0354	0.0030	0.0020	0.0023
	Ti	V	Co	Sr	Al				
	%	%	%	%	%				
\bar{x}	0.0465	0.0081	<0.0020	0.0003	97.8				