

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

"Diseño de un proceso de control de calidad en la producción de metales
con comportamiento eutéctico"

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Edwin Andrés Mora Carrión

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2016

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres María Carrión y Edwin Mora, a Génesis Cárdenas por su apoyo incondicional, amor y paciencia; a mi tutor Ignacio Wiesner por su tiempo y conocimientos, a los ayudantes del cursos de Tratamientos térmicos Jorge Bonifaz y Hector Lindao, a los señores Jimmy Anchundia y Diego Luzuriaga por su colaboración para realizar pruebas a los probetas de las fundiciones.

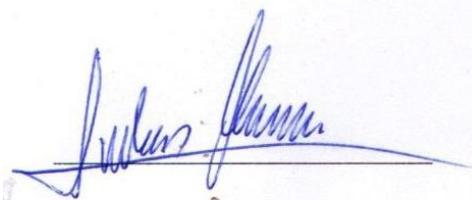
DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Edwin Andrés Mora Carrión

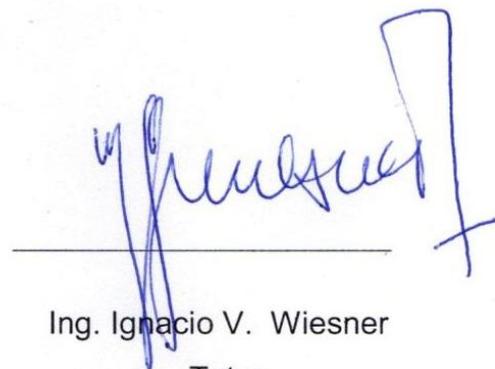
Ing. Ignacio Vicente Wiesner Falconí

Y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.



Edwin A. Mora Carrión

Autor



Ing. Ignacio V. Wiesner

Tutor

RESUMEN

En este proyecto se requiere elaborar un sistema para realizar análisis térmico de las fundiciones que presenten punto eutéctico como los son el hierro gris, maleable y dúctil, bronces, aleaciones de aluminio silicio entre otros, para poder determinar sus propiedades mecánicas y la concentración del material aleante, controlar la proporción de éstos asegura que no existirá retorno al horna de piezas que no cumplen con las normas.

Para llevarlo a cabo se construyó un sistema de muestreo con una termocupla tipo K, una cápsula elaborada con arena de sílice, un acondicionador de señal AD595 y una tarjeta de adquisición de datos de USB-6009 y un software con licencia educativa para realizar las pruebas.

Con el sistema de medición de temperatura se logró obtener la curva de enfriamiento del metal, con una selección adecuada del transductor de temperatura, el dimensionamiento de la muestra, la velocidad y la resolución del sistema de adquisición de datos arrojaron valores precisos de temperatura.

Se logró determinar la temperatura de liquidus para las aleaciones de plomo-estaño en varias concentraciones, también se comprobó que la cápsula de arena es la adecuada para realizar mediciones utilizando hierro gris, y la pintura cerámica resistió la temperatura y protegió la termocupla.

Palabras clave: punto eutéctico, sistema de adquisición de datos, curva de enfriamiento, análisis térmico

ABSTRACT

This project is required to develop a system for thermal analysis foundries presenting eutectic point as are gray iron, malleable and ductile, bronzes, silicon alloys aluminum among others, to determine their mechanical properties and the concentration of the material aleante, control the proportion of these ensures that there will be no return to horna parts that do not meet the standards.

To carry out a sampling system with a K type thermocouple was built, a capsule made from silica sand, a signal conditioner AD595 and card data acquisition USB-6009 and software educational license for testing .

With the temperature measurement system was achieved to obtain the cooling curve of metal, with a suitable selection of the temperature transducer, the sizing of the sample, the speed and resolution of the system data acquisition threw precise temperature values.

Was possible to determine the liquidus temperature for lead-tin alloys in various concentrations, it was also found that the capsule sand is suitable for measurements using gray iron, pottery and painting withstood the temperature and protected the thermocouple.

Keywords: eutectic point, data acquisition system, cooling curve, thermal analysis

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XI
ÍNDICE DE PLANOS.....	XIII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Marco teórico.....	3
1.3.1 Análisis térmico	3
1.3.2 Diagramas de equilibrio.....	4
1.3.3 Carbono equivalente	6
1.3.4 Relación entre TL y el carbono equivalente y las propiedades físicas del hierro.....	6
1.3.5 Instrumentación y control en las fundiciones.....	7
1.4 Análisis de alternativas de solución.....	9
1.4.1 Opción 1: Tipo crisol con termocupla en la base	9
1.4.2 Opción 2: Tipo crisol con tapa.	10
1.4.3 Opción 3: Dentro de una caja de moldeo	11
1.4.4 Matriz de solución.....	13

2	METODOLOGÍA DEL DISEÑO	16
2.1	Bases y consideraciones	18
2.2	Dimensionamiento de la muestra de colada de hierro gris	19
2.3	Dimensionamiento del espesor de la cápsula	27
2.4	Construcción de la cápsula para tomar muestras de hierro gris	31
2.5	Algoritmo para modificar el contenido de carbono	32
2.6	Selección del sensor	37
2.7	Selección del acondicionador de señal	40
	2.7.1 Selección del filtro	42
	2.7.2 Selección de la fuente de voltaje	43
2.8	Selección del sistema de adquisición de datos.	44
2.9	Programa de Lab VIEW	49
3	RESULTADOS	54
3.1	Ensayos realizados	54
	3.1.1 Hierro gris	54
	3.1.2 Aleación plomo estaño	56
	3.1.3 Ensayo con aluminio silicio	61
3.2	Tamaño de la muestra	63
3.3	Datos de la cápsula	63
3.4	Programa para calcular el contenido de carbono	65
3.5	Prototipo para realizar las mediciones de temperatura	65
3.6	Análisis de costo	66
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
4.1	Conclusiones	72
4.2	Recomendaciones	73
	Bibliografía	75

APÉNDICES.....	77
----------------	----

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASM	Sociedad Americana de Metales
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
DAQ	Adquisición de datos
CJC	Compensación de punto frío
ADC	Convertidor analógico digital
AC	Corriente alterna
DC	Corriente directa

SIMBOLOGÍA

Ce	Carbono equivalente
%Fe	Porcentaje en masa de hierro
%Si	Porcentaje en masa de silicio
T	Temperatura
TL	Temperatura de liquidus o de fusión
R	Resistencia a la tracción
HB	Dureza Brinell
V	Voltios
mV	Mili voltios
kS/s	Kilo muestras por segundo
uF	Micro faradio
B	Bit
Hz	Herzt
°C	Grado centígrado
K	Grado Kelvin
W	Watt
J	Joule
s	Segundo
Min	Minutos
m	metro
cm	centímetro
k	Conductividad térmica
h	coeficiente convectivo
Nu	Nusselt
Pr	Prandtl
Fo	Fourier
Bi	Biot
Gr	Grashof
c	Calor específico
L	Calor latente de fusión, longitud

ρ	Densidad
ν	Viscosidad cinemática
ϵ	Emisividad térmica
σ	Constante de Boltzman
Ra	Rayleigh
Lc	Longitud característica
D	Diámetro
r	radio
A	Área
V	Volumen
P	Perímetro
qc	Calor por ión
qr	Calor por radiación
Rk	Resistencia de conducción
Rh	Resistencia de convección

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Curva de enfriamiento de un metal puro	4
Figura 1.2 Elaboración del diagrama de equilibrio.	5
Figura 1.3 Diagrama de equilibrio Fe-C	5
Figura 1.4 Opción 1	10
Figura 1.5 Opción 2	11
Figura 1.6 Opción 3	12
Figura 2.1 Diagrama de flujo para el proceso de diseño	16
Figura 2.2 Tiempo de solidificación para una TL de 1200°C	21
Figura 2.3 Tiempo de solidificación para una TL de 1350°C	22
Figura 2.4 Tiempo de solidificación para una TL de 1150°C	22
Figura 2.5 Esquema de la muestra de colada	23
Figura 2.6 Solución de la ecuación 2.13	27
Figura 2.7 Esquema para el espesor de la cápsula	28
Figura 2.8 Analogía eléctrica	28
Figura 2.9 Curvas características V vs temperatura de las termocuplas	38
Figura 2.10 Costo internacional del platino y el rodio	39
Figura 2.11 Conexiones para el amplificador AD595	42
Figura 2.12 Filtro paso bajo	43
Figura 2.13 Diagrama de bloques del NI USB-6008/6009	48
Figura 2.14 Disposición de los terminales del NI USB-6008	48
Figura 2.15 ícono DBL	49
Figura 2.16 Función de aritmética compuesta	49
Figura 2.17 Formula Express VI	50
Figura 2.18 Estructura de casos	51
Figura 2.19 Configuración del DAQ	51
Figura 2.20 DAQMX Read para obtener la señal del DAQ	52
Figura 2.21 ícono para la medición de amplitud y nivel	53
Figura 3.1 Equipo para la adquisición de datos	55
Figura 3.2 Probeta de hierro gris	55

Figura 3.3 Curva de enfriamiento aleación Pb100-Sn0.....	57
Figura 3.4 Curva de enfriamiento aleación Pb77-Sn23.....	57
Figura 3.5 Curva de enfriamiento aleación Pb61-Sn39.....	58
Figura 3.6 Curva de enfriamiento aleación Pb52-Sn48.....	58
Figura 3.7 Diagrama de fase Pb-Sn	59
Figura 3.7 Curva de enfriamiento aleación Pb45-Sn55.....	59
Figura 3.8 Tiempo de respuesta de la termocupla	60
Figura 3.9 Curva de enfriamiento aleación Al90-Si10	61
Figura 3.10 Curva de enfriamiento aleación Al92-Si8	62
Figura 3.11 Dimensión de la cápsula	63
Figura 3.12 Esquema de la cápsula toma muestras	64
Figura 3.13 Prototipo para determinar el contenido de carbono.....	66
Figura 4.1 Esquema del proceso de control del hierro gris	79
Figura 4.2 Algoritmo para calcular el contenido de carbono	84
Figura 4.3 Interfaz del usuario.....	87
Figura 4.4 Programa de LabView.....	88
Figura 4.5 Estructura de los condicionales.....	89
Figura 4.6 Fórmulas para el cálculo del contenido de carbono	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Matriz de decisión.....	14
Tabla 1.2 Calificación de la matriz.....	15
Tabla 2.1 Propiedades del hierro y el molde	21
Tabla 2.2 Datos para determinar Bi.....	24
Tabla 2.3 Datos para determinar coeficiente convectivo	25
Tabla 2.4 Resultados para determinar el coeficiente convectivo.....	26
Tabla 2.5 Propiedades del hierro	26
Tabla 2.6 Datos para determinar el espesor de la cápsula	29
Tabla 2.7 Iteración para obtener Tso	30
Tabla 2.8 Composición Química de los Metales Base	34
Tabla 2.9 Costo de las termocuplas	39
Tabla 2.10 Composición química de la termocupla tipo K.....	40
Tabla 2.11 Características del amplificador AD 595.....	41
Tabla 2.12 Propiedades de la fuente de Poder	44
Tabla 2.13 Propiedades del DAQ.....	47
Tabla 3.1 Dimensiones de la cápsula.....	64
Tabla 3.2 Propiedades de la cápsula	64
Tabla 3.3 Características del equipo de medición.....	66
Tabla 3.4 Costo del prototipo	67
Tabla 3.5 Costos anuales de la empresa	68
Tabla 3.6 Gasto de energía.....	68
Tabla 4.1 Salarios	92
Tabla 4.2 Costo de los EPPs.....	93
Tabla 4.3 Costo de alimentación	93
Tabla 4.4 Costo de los servicios básicos	93
Tabla 4.5 Costo de la energía del horno	94
Tabla 4.6 Costo de la energía del molino	94
Tabla 4.7 Costo del GLP industrial.....	94
Tabla 4.8 Costo de la materia prima	94

Tabla 4.9 Costo de la materia prima usando 50% de hierro gris.....	94
Tabla 4.10 Costo de la materia prima sin utilizar hierro gris.....	95

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1. Plano isométrico del molde de la cápsula	97
Plano 2 .Plano del molde de la cápsula	97
Plano 3 .Plano del despiece del molde	97

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

Este reporte trata sobre el diseño de un sistema para tomar datos de temperatura de los metales que presenta punto eutéctico y realizar un análisis térmico para determinar sus propiedades mecánicas y la concentración de los elementos aleantes. Prestando especial énfasis en las fundiciones de hierro gris que son muy utilizadas por su versatilidad para fabricar elementos de máquina.

Este dispositivo puede ser usado en la producción de hierro gris sintético que se fabrica a partir de chatarra de acero carbono y silicio. El acero tiene un contenido bajo de carbono, entre 0.008 y 2% (NTE-INEN-662, 1982), mientras que las fundiciones de hierro fluctúan entre 2.20% hasta 4.20 % y el contenido de silicio está entre 1% y 3% (Guthrie & Jonas, 1993). El déficit de carbono puede ser suplido con grafito natural o artificial, coque de cubilote, antracita calcinada y carbón vegetal; pero el contenido de carbono e impurezas en cada uno de ellos es variable (fósforo y azufre) dependiendo del origen del carburizante (Janerka, Jesiersky, & Szajnar, 2012); mientras que el silicio puede ser añadido mediante granos de ferro-silicio que tiene una concentración de 73% Si y 24% Fe (QuimiNet.com, 2016) o también mediante chatarra de acero al silicio.

El hierro gris y sus propiedades se determinan por los contenidos de carbono y silicio que se llegan a conocer a partir de un análisis químico, de un ensayo de tracción y su dureza en la pieza fabricada (NTE-INEN-2481, 2009). Si los contenidos no son los adecuados se afectan las propiedades mecánicas, lo que ocasiona su rechazo y sus consecuentes pérdidas.

Si no se controla la calidad de la fundición antes de realizar el vertido se podría obtener una pieza con propiedades no adecuadas, para lo cual es indispensable fundirla en el horno, elaborar nuevos moldes y más horas de trabajo, en consecuencia se produce pérdida de dinero. Este proceso puede observarse en la fundición en el Taller "Intramet, que dura 4 horas con una carga de 400kg, lo que produce un aumento consumo de energía, tiempo y esfuerzo que se traduce en más costo de producción, el cual sale del margen de la ganancia del fundidor.

Para evitar estos inconvenientes se propone realizar un control de calidad en la colada antes de realizar el vertido, comprobar sus características físicas con un análisis térmico y corregir el contenido de carbono y silicio hasta alcanzar las especificaciones del hierro gris deseadas.

Tomando como referencia este valor se puede aplicar las ecuaciones encontradas por J. L. Enríquez para obtener el carbono equivalente, el cual es proporcional a la resistencia a la tracción y dureza del hierro. Dependiendo de los resultados se añade más carbono o metal base para modificar la composición química del caldo y conseguir un carbono equivalente consistente con las propiedades mecánicas de diseño, lo cual se verifica con un nuevo análisis térmico.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Diseñar un proceso de control de calidad en la producción de metales que presenten punto eutéctico mediante análisis térmico.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar la cápsula toma muestras de colada para fundiciones de hierro usando arena de sílice.

- Construir molde de la cápsula para facilitar su construcción.
- Desarrollar un programa en LabVIEW para determinar el carbono equivalente del hierro gris.
- Construir el sistema de adquisición de datos para registrar la curva de enfriamiento
- Analizar los datos obtenidos con el programa para determinar la temperatura de liquidus de los metales

1.3 Marco teórico

1.3.1 Análisis térmico

Se entiende como tal al estudio de las temperaturas por las que pasa el hierro desde que se vierte en un molde hasta que ha solidificado totalmente. Considerando la zona o intervalo de fusión, esa curva puede aportar información sobre:

- Composición química de la fundición, especialmente de los contenidos de carbono, silicio y fósforo.
- Modo de solidificación, es decir, naturaleza y morfología de las fases que se forman.

El análisis térmico consiste en enfriar una fundición hasta alcanzar la curva de liquidus, siendo el punto y temperatura de esta correspondiente al contenido de carbono hasta que comienza a separarse la austenita, la cual libera calor originando la detención isotérmica, que se manifestará en la curva de enfriamiento (Enríquez Berciano, 1981).

1.3.1.1 Curvas de enfriamiento

Las curvas de enfriamiento pueden emplearse para determinar los puntos de transición de las fases, tanto para metales puros como para aleaciones. Se obtienen al registrar la temperatura de un

material y compararla con el tiempo a medida que se enfría desde el punto de fusión hasta la solidificación. En la figura 1.1 se muestra la curva de enfriamiento para un metal puro, si se permite que este se enfríe en condiciones de equilibrio su temperatura cae continuamente a lo largo de la línea AB de la curva. En el punto de fusión comienza la solidificación y la figura se vuelve plana (segmento horizontal BC) y permanece así hasta que se completa. En la región BC el metal está en una fase sólida y líquida, a medida que se acerca al punto C la fracción de peso sólido de la mezcla aumenta hasta que se termina la solidificación. La temperatura permanece constante porque hay un equilibrio entre la pérdida de energía del metal por el molde y el calor latente suministrado gracias a la solidificación. Después de concluir en C, la curva de enfriamiento mostrará de nuevo una disminución de la temperatura en el tiempo (tramo CD) (Smith & Hashemi, 2006).

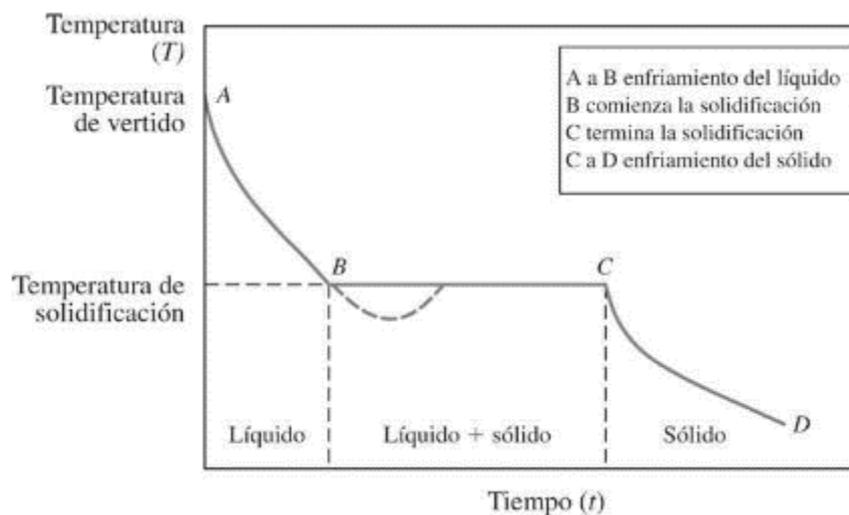


Figura 1.1. Curva de enfriamiento de un metal puro

Fuente: Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, William F Smith

1.3.2 Diagramas de equilibrio

El diagrama de equilibrio se determina con el uso de un análisis térmico por fusión y enfriamiento de una aleación conociendo su

composición y llevando el registro de las curvas de temperatura-tiempo como se muestra en la figura 1.2.

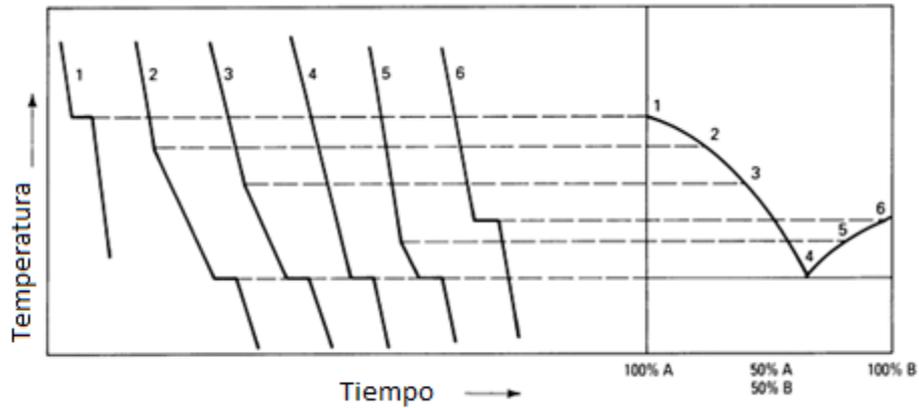


Figura 1.2 Elaboración del diagrama de equilibrio.

Fuente: K.W. Andrews, Physical Metallurgy, Vol 1, William Clowes & Sons, 1973

El diagrama de hierro carbono se construye de la misma manera expuesta en el párrafo anterior en la parte correspondiente a las fundiciones de 2% a 4.3% de Carbono. El diagrama de hierro carbono se detalla en la figura 1.3. El punto eutéctico en este material se encuentra en la concentración de 4.2% con una temperatura de 1152°C (Andrews, 1973).

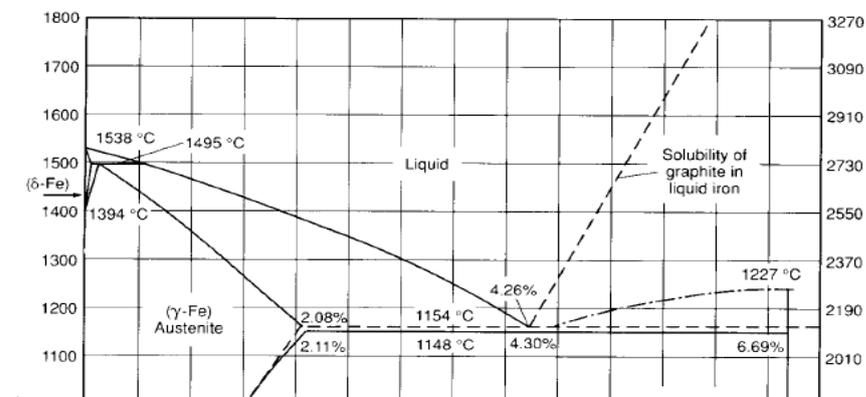


Figura 1.3 Diagrama de equilibrio Fe-C

Fuente: ASM Handbook, Vol 1. Properties and Selection: Irons, Steel, and High Performance Alloys

1.3.3 Carbono equivalente

Debido a que las fundiciones de hierro gris no son aleaciones binarias, sino ternarias, no se puede usar el diagrama de equilibrio Fe-C, ya que el contenido de silicio es significativo entre 1% y 3% en masa, por lo que se debe considerar su efecto sobre las fundiciones

Como se puede apreciar el silicio tiene una influencia en el diagrama de equilibrio del Fe-C. Si se compara la figura 1.3 con la 1.4 se observa que el punto eutéctico se desplaza hacia la izquierda por la presencia del silicio en la aleación (Piwowarsky, 1958); es por esta razón que se añade el concepto de carbono equivalente en las fundiciones de hierro para poder utilizar el diagrama Fe-C. Usando la aproximación el carbono equivalente se puede calcular de la siguiente forma:

$$Ce = \%C + \frac{\%Si}{3} \quad (1.1)$$

Donde:

- Ce: Carbono equivalente
- %C: porcentaje de carbono
- %Si: porcentaje de silicio.

Se omiten otros elementos aleantes como fósforo y magnesio porque su contenido en porcentaje en masa es menor a 0.1, que comparado con el contenido de carbono y silicio da como resultado un error de 2% (ASM_Casting, 1998).

1.3.4 Relación entre TL y el carbono equivalente y las propiedades físicas del hierro.

Enríquez Berciano (1981) sostiene que existe una relación entre el contenido de carbono y silicio (carbono equivalente) y la temperatura

de liquidus o de fusión. Esta relación está definida de la siguiente manera:

$$TL = 1513 - 85 * Ce \quad (1.2)$$

Donde:

- TL: temperatura de liquidus [°C]
- Ce: carbono equivalente

Esta ecuación tiene un coeficiente de correlación de 0.85, que se puede considerar bastante satisfactorio y es válida para el rango de 2.1% hasta 4.3% de Ce. También se puede resolver en sentido contrario, es decir, si se conoce la temperatura de liquidus, se puede determinar el carbono equivalente. Esta variable es de mucha utilidad, ya que en esta misma referencia se hace una investigación entre el carbono equivalente y las propiedades mecánicas, que son la resistencia a la tracción y la dureza Brinell. A continuación se describe estas funciones:

$$R = 82 - 15.6 * Ce \quad (1.3)$$

$$HB = 516 - 82 * Ce \quad (1.4)$$

Donde:

- R: Resistencia a la tracción [kpsi]
- HB: Dureza Brinell

Se observa que también están restringidas en el rango de 2.1% hasta 4.3% del Ce.

1.3.5 Instrumentación y control en las fundiciones

La instrumentación necesaria para realizar un análisis térmico es la termocupla tipo K (Cromel-Alumel), que puede medir temperaturas hasta de 1370°C. Su funcionamiento consiste en que la circulación

de corriente en un circuito formado por la unión de dos metales diferentes (unión de medida o caliente y unión de referencia o fría) que se mantienen a distintas temperaturas, efecto descubierto por Seebeck en 1821.

Esta circulación de corriente obedece a dos efectos termoeléctricos combinados: el efecto Peltier que provoca la liberación o absorción de calor en la unión de dos metales distintos cuando una corriente circula a través de esta y el efecto Thomson que consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperatura (Creus Solé, 1997).

El control en las fundiciones artesanales en Guayaquil es muy rústico, por ejemplo, para determinar la temperatura de colado se sumerge una barra de acero en el material fundido y si al retirarla se encuentra adherido el hierro no es la adecuada para ser vertida en los moldes; por otro lado si solo presenta escoria y esta se desprende fácilmente golpeándola, el metal estará listo para realizar el vertido.

En los talleres de fundición no se verifica la calidad de la chatarra de hierro con la que se trabaja, de tal forma que no se comprueban sus propiedades mecánicas y químicas, dando como resultado una pieza con propiedades mecánicas desconocidas.

Una mejor práctica es el uso de la cuña de temple, que consiste en un pequeño prisma triangular de 2 centímetros de base y 8 de altura y de profundidad, por medio del cual el hierro fundido se cuele en un molde metálico para que su enfriamiento ocurra rápidamente, luego se rompe por la mitad para observar la sección transversal triangular, posteriormente en la punta más aguda se observará una región

blanca hasta tornarse gris conforme se avanza hasta la base. Este método es cualitativo y solo indica que si la parte blanca es abundante el contenido de carbono es bajo, mientras que si es pequeña la proporción es alta; pero no indica el porcentaje en peso de este material. En la referencia del Dr. Enríquez esta prueba no es concluyente y no abunda en discusiones para explicar su relación (Enríquez Berciano, 1981).

1.4 Análisis de alternativas de solución

Para obtener el mejor diseño de la cápsula toma-muestras se establecen las siguientes opciones:

- Tipo crisol con la termocupla en la base.
- Tipo crisol con tapa y en ella está ubicada la termocupla.
- Dentro de una caja de moldeo.

1.4.1 Opción 1: Tipo crisol con termocupla en la base

Para la fabricación de la cápsula se necesita menor cantidad de arena de sílice y por lo tanto menor dióxido de carbono (CO₂), que se utiliza para formar gel de carbonato de sodio que actúa como aglomerante, lo que implica mantener unidos los granos de arena.

Para hacer las cápsulas se necesita un molde de aluminio, que facilitará la construcción de ellas, ya que como mínimo se deben preparar dos para cada colada que se realiza, en el caso de necesitar un nuevo muestreo.

La termocupla se introduce por la parte inferior de la cápsula, junto con la arena de sílice en el molde de aluminio, puesto que se perderá la parte de la unión expuesta al hierro fundido. Existe otra alternativa que consiste en empotrar el termopar con dos segmentos cortos de

cable junto con la arena en el molde, los cuales se empatan a una extensión del mismo material. Si bien esta opción permite mayor facilidad al momento de moldear se pierde una mayor cantidad de este componente.

El diseño de forma para esta variante se muestra en la figura 1.4.

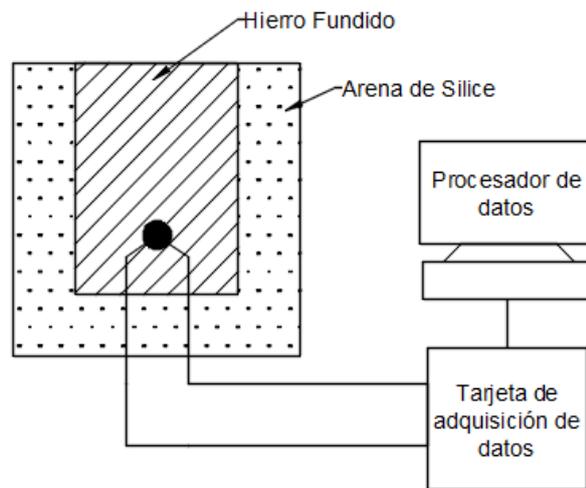


Figura 1.4 Opción 1

Elaboración propia

1.4.2 Opción 2: Tipo crisol con tapa.

La construcción de la cápsula se hará con dos moldes, uno para esta y otro para la tapa, dentro de la cual van los cables de la termocupla, con el fin de disminuir la transferencia de calor. Para evitar perder el termopar antes de que ocurra la solidificación del molde se coloca una protección cerámica resistente a temperaturas de alrededor de 1500°C, lo que aumentaría la capacitancia térmica del transductor (termocupla + protección cerámica). El problema de la alta capacitancia se debe al corto tiempo que el cliente requiere para obtener la medición y no le da oportunidad al transductor térmico para alcanzar la estabilidad.

El diseño de forma para esta opción se muestra en la figura 1.5.

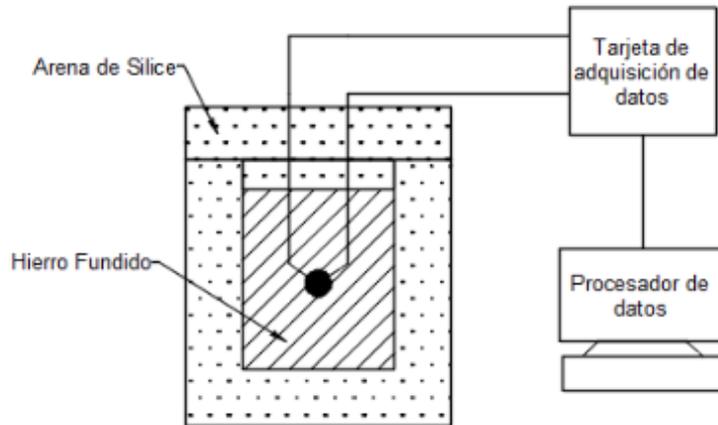


Figura 1.5 Opción 2

Elaboración propia

1.4.3 Opción 3: Dentro de una caja de moldeo

La última opción para diseñar la cápsula es utilizar una caja para moldeo, con una dimensión de 200x200x200, elegida por su pequeño tamaño, en la cual se colocará la arena que toma la forma de cilindro.

Para mantener la forma de cilindro de la muestra se debe apisonar la arena de moldeo (arena + bentonita + agua) con un modelo que conserve esta forma.

En las cercanías del agujero se usa arena nueva; mientras que en los alrededores se utiliza reciclada, la cual debe ser tamizada porque pueden encontrarse restos de escoria o hierro, posteriormente se la muele para eliminar los grumos.

El diseño de forma para esta opción se muestra en la figura 1.6. en el que se aprecia la muestra de hierro gris, el transductor de temperatura, la caja de moldea elaborada con perfiles laminados en frío denominados canales, el sistema de adquisición y el procesador de datos.

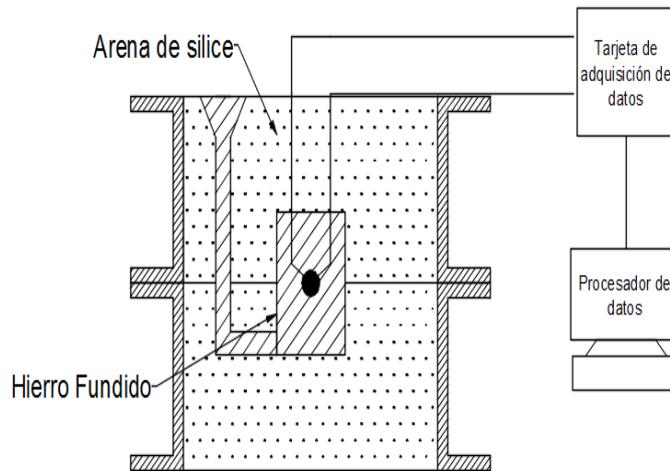


Figura 1.6 Opción 3

Elaboración Propia

La termocupla se coloca por la parte superior y en el centro de la muestra, ya que ésta es la última zona en solidificarse.

Con respecto a la transferencia de calor este diseño aumenta la resistencia, ya que las paredes de arena son muy gruesas y se pueden considerar como adiabáticas, siendo el área de transferencia el círculo superior del bebedero, lo cual aumenta el tiempo de enfriamiento.

Todos los diseños deben precalentarse antes de realizar el colado para evitar puntos de solidificación y obtener datos erróneos, lo cual se realiza con un soplete de gas licuado de petróleo (GLP) y en la opción 1 y 2 se coloca las cápsulas dentro de un horno de GLP o combustible líquido. La preparación de las cápsulas se debe realizar cerca del horno en que se funde el hierro para evitar pérdidas de calor durante la transportación de la muestra.

Se recomienda en la opción 1 y 2 colocar las cápsulas en la parte superior del horno para realizar el precalentado usando la radiación

térmica producto de la fundición del hierro, para lo cual se requiere un par de pinzas que las sujetarán con el fin de evitar que caigan en la colada. Se debe tener cuidado con los cables de la termocupla, puesto que si se juntan crearán una nueva unión y los datos obtenidos serán equivocados.

1.4.4 Matriz de solución

Para el diseño de la cápsula porta muestras se tendrán como parámetros de evaluación: costo, tamaño, tiempo de preparación, facilidad de movilización, tiempo y ecología.

Costo.- se prefiere el diseño que genere menor costo en su fabricación, es decir la que utilice menos material.

Tamaño.- el tamaño y el costo están muy ligados, si el tamaño es pequeño consumimos menos materias primas.

El tiempo de preparación.- El tiempo de preparación se disminuye si se crean moldes. La opción 1 necesita un modelo, la opción 2 tiene dos, mientras que la opción tres requiere más tiempo para llenar la caja y apisonar.

Facilidad de movilización.- si el tamaño es reducido aumenta la movilidad. Esta capsula debe transportarse de su lugar de fabricación hasta un punto cercano del horno.

Tiempo de muestro.- el tiempo no debe sobrepasar de 2 a 3 minutos, ya que si lo hace el horno permanecerá más tiempo encendido y retrasará las operaciones posteriores.

Ecología.- En este parámetro se toma en cuenta la cantidad de CO₂ necesaria para aglutinar la arena y el GLP para precalentar la

cápsula, antes de realizar las medidas. Teniendo en cuenta estos requisitos se realiza la matriz de selección para escoger la mejor opción.

La matriz de selección se detalla en la tabla 1.1 y su método de empleo consiste en colocar en la primera columna las ponderaciones que el diseñador desea para cada parámetro, la segunda columna se utilizará para calificar cada una de las opciones, en la cual todos tienen una calificación de excelente según la tabla 1.2.

En cada una de las opciones existen dos subcolumnas, la primera es la calificación que el diseñador le asigna, la cual se detalla en la tabla 1.2 y la segunda corresponde a la ponderación del parámetro. Al final se suman las cantidades de las opciones y se divide para 120.

Tabla 1.1 Matriz de decisión

Parámetros	Ponderación		Opción 1		Opción 2		Opción 3	
Costo	7	28	E	28	E	28	B	21
Tamaño	6	24	E	24	E	24	R	12
Tiempo de preparación	5	20	B	15	R	10	M	5
Facilidad de movilización	3	12	B	9	B	9	R	6
Tiempo de muestreo	5	20	R	10	R	10	R	10
Ecología	4	16	B	12	R	8	R	8
Total		120		98		89		62
Porcentual				82		74,17		51,67

Elaboración Propia

Tabla 1.2 Calificación de la matriz

Calificación	
Excelente:E	4
Bueno:B	3
Regular:R	2
Malo:M	1

Elaboración propia

La opción 1 es que mejor se ajusta a los parámetros definidos por el diseñador ya que obtuvo un puntaje de 82/100 siendo la mayor entre las demás opciones. Sobre este diseño de forma se desarrollará a lo largo de este documento.

CAPÍTULO 2

2 METODOLOGÍA DEL DISEÑO

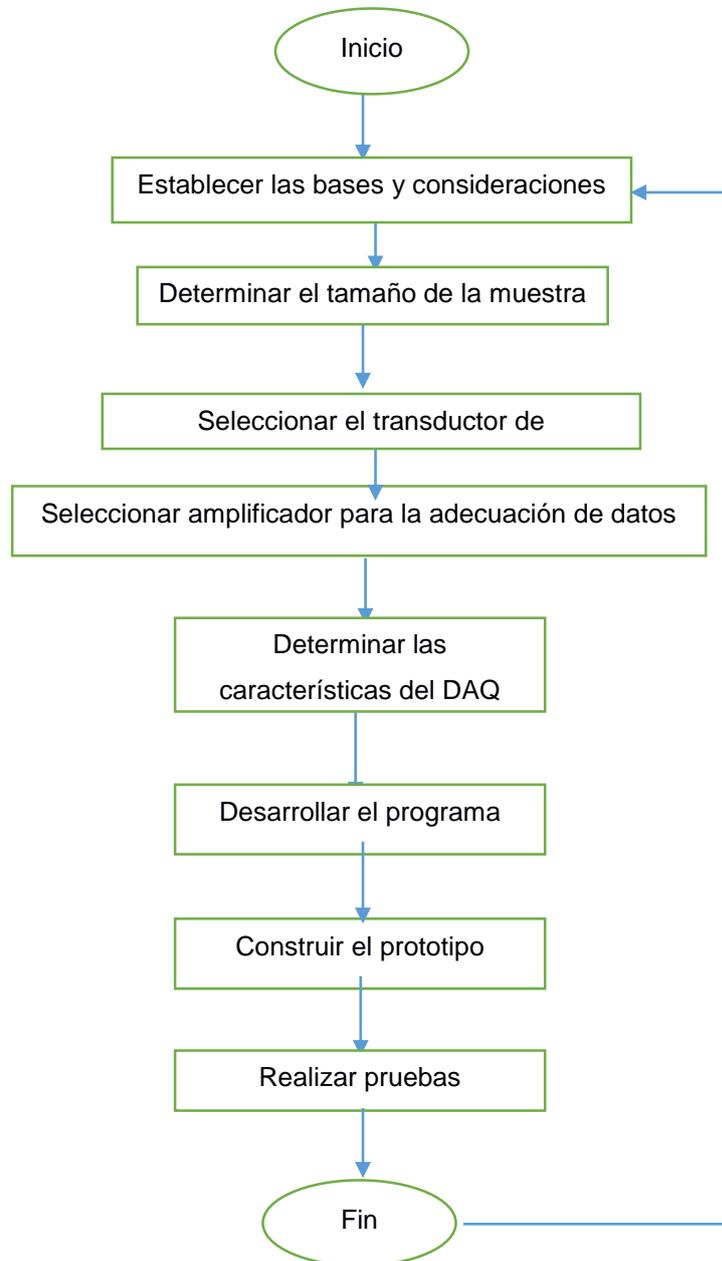


Figura 2.1 Diagrama de flujo para el proceso de diseño

Elaboración propia

Este diseño empieza con el dimensionamiento de la muestra de colada que se va a tomar del horno, para realizar este cálculo se utiliza como modelo

matemático la ecuación de Chvorinov, que permite determinar el tiempo de solidificación total dependiendo de la relación volumen área, y un valor que dependerá de las propiedades del molde de arena de sílice. Luego se estima el tiempo que la probeta se enfría desde la temperatura de vertido hasta la temperatura de liquidus esperada y el espesor de la cápsula de arena.

Posterior al dimensionamiento de la muestra se debe seleccionar el tipo de transductor que se necesita para tomar los datos de temperatura y registrar la curva de enfriamiento. Para realizar esta tarea se comparará las diferentes curvas de respuesta de las diferentes termocuplas y seleccionar las que puedan medir en los rangos que se encuentra la muestra de hierro gris, la decisión final se debe tomar en relación a su costo, se debe elegir la más económica, con esto se espera reducir el costo final del prototipo.

A continuación se debe seleccionar el amplificador de señal, este debe multiplicar la señal de salida de la termocupla, linealizarla y realizar la compensación de la junta fría, para que las mediciones no dependan de la temperatura ambiente.

Luego se selecciona el sistema de adquisición de datos, este debe ser compatible con el software académico disponible en la universidad y debe tomar los datos tan rápido como el mínimo cambio que se presenta en la medición, que es el tiempo de respuesta. Con esto se espera tener la mejor representación posible del enfriamiento de la muestra dentro de la cápsula.

Por último se desarrolla el programa en LABVIEW para procesar los datos obtenidos de la muestra de hierro gris y visualizar la curva de enfriamiento, con esto se espera determinar la temperatura de liquidus del metal y realizar los cálculos para obtener el carbono equivalente a partir de este dato.

Cuando se tenga seleccionados todos los dispositivos y determinado el tamaño de la muestra se procede a construir el prototipo para realizar las

mediciones de temperatura. Este prototipo será de ayuda para detectar posibles fallas en el diseño o en alguna consideración cuando sean desarrolladas las pruebas, de presentarse alguna inconformidad durante estas se debe regresar a la primera etapa y modificar. Esta metodología se resume en la figura que se presenta a continuación en forma de diagrama de flujo.

2.1 Bases y consideraciones

Las bases y condiciones que se establecen para este proceso son las siguientes:

- El diseño del tamaño de la muestra y el espesor de la cápsula se realizarán para que soporten las temperaturas del hierro gris, ya que es la materia con mayor punto de fusión y de mayor uso en las fundiciones.
- El contenido de carbono debe encontrarse entre 2.5% y 3.8% para el caso del hierro gris.
- El contenido de silicio debe estar comprendido entre 1.2% hasta 2.6% para el hierro gris.
- El contenido de Mn es de 0.6 máximo y del fósforo y azufre es de 0.1 %.
- La temperatura de liquidus estará ubicada entre 1200°C y 1370°C, dependiendo del contenido de carbono.
- La capsula debe ser elaborada con arena de sílice más silicato de sodio gaseada con dióxido de carbono.
- El tiempo de la prueba debe ser de 3 minutos como máximo
- Usar transferencia de calor en estado transitorio para determinar el tamaño de la muestra de colada de hierro gris.
- La temperatura de sobrecalentamiento debe ser de 1420°C.
- La resolución del equipo de medición es de 1°C
- La termocupla que se utilizará es de tipo K (Cromel-Alumel).

- Se utilizará un chip AD-595 para realizar el acondicionamiento de la señal proveniente de la termocupla.
- Se usará una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) NI USB 6008 que puede registrar 10K muestras por segundo.

2.2 Dimensionamiento de la muestra de colada de hierro gris

Para dimensionar la muestra de hierro gris se requiere tener una dimensión inicial, para realizarlo se utiliza la regla de Chvorinov, con esto se espera conseguir un volumen con el cual partir para utilizar con la ecuaciones de transferencia de calor en estado transitorio para determinar el tiempo de enfriamiento desde la temperatura de vertido hasta la temperatura de liquidus.

Para determinar las dimensiones de la muestra de colada se utilizará la ecuación de Chvorinov (Kotschi, 1992), esta determina el tiempo total de solidificación en función del volumen y el área de la fundición, esta relación se presenta a continuación:

$$t = K * \left(\frac{V}{A}\right)^2 \quad (2.1)$$

Donde:

- t: tiempo de solidificación [min],
- K: constante del molde [min/m²]
- V: volumen de la fundición [m³]
- A: área de la fundición [m²]

La constante del molde también depende de las propiedades del metal, estas propiedades son: conductividad térmica, densidad, calor específico, y calor latente del metal fundido. También depende de las temperatura con las que se trabaja, que son: temperatura de solidificación, inicial del molde y de sobrecalentamiento (temperatura de

vertido menos temperatura de liquidus). El valor de K se obtiene de la siguiente ecuación (ASM_Casting, 1998):

$$K = \left(\frac{\rho_m * L}{T_L - T_o} \right)^2 * \left(\frac{\pi}{4 * k * \rho * c} \right) * \left[1 + \left(\frac{c_m * \Delta T_s}{L} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

Donde:

- T_L : temperatura de fusión o liquidus [K]
- T_o : temperatura inicial del molde [K]
- ΔT_s : $T_{\text{vertido}} - T_L$: sobrecalentamiento [K]
- L: calor latente de fusión [J.kg⁻¹]
- k = conductividad térmica del molde [W.m⁻¹.K⁻¹]
- ρ = densidad del molde [kg.m⁻³]
- c = calor específico del molde [J.kg⁻¹.K⁻¹]
- ρ_m = densidad del metal [kg.m⁻³]
- c_m = calor específico del metal [J.kg⁻¹.K⁻¹]

El cálculo de la constante del molde se realizará con los datos de (Incropera & De Witt, 1999), estos datos están dados para hierro puro y no para una aleación ternaria de hierro, carbono y silicio, no obstante permitirá realizar una primera aproximación del valor requerido, el mismo que se deberá corregir con los ensayos que se realicen. A continuación en la tabla 2.1 se muestra el valor de las propiedades, las unidades se especifican en la lista que describe los términos de la ecuación de la constante del molde.

Tabla 2.1 Propiedades del hierro y el molde

	Hierro	Arena
k	31,4	0,27
rho	7870	1515
cp	654	800
L	293E+03	-
To	-	303
Tvertido	1693	

Fuente: Fundamentos de Transferencia, Frank Incropera
Elaboración Propia

La figura 2.2, 2.3 y 2.4 muestran las variaciones que se pueden hacer cuando se utiliza la regla de Chvorinov, y en todas las figuras se obtienen menores tiempos cuando el diámetro es igual a la altura, las líneas de color azul en las figuras, se debe tener en cuenta que esta relación contempla el tiempo desde que empieza la solidificación, pasando por la fase de líquido y sólido hasta llegar a solidificarse completamente a la temperatura eutéctica que es 1150°C.

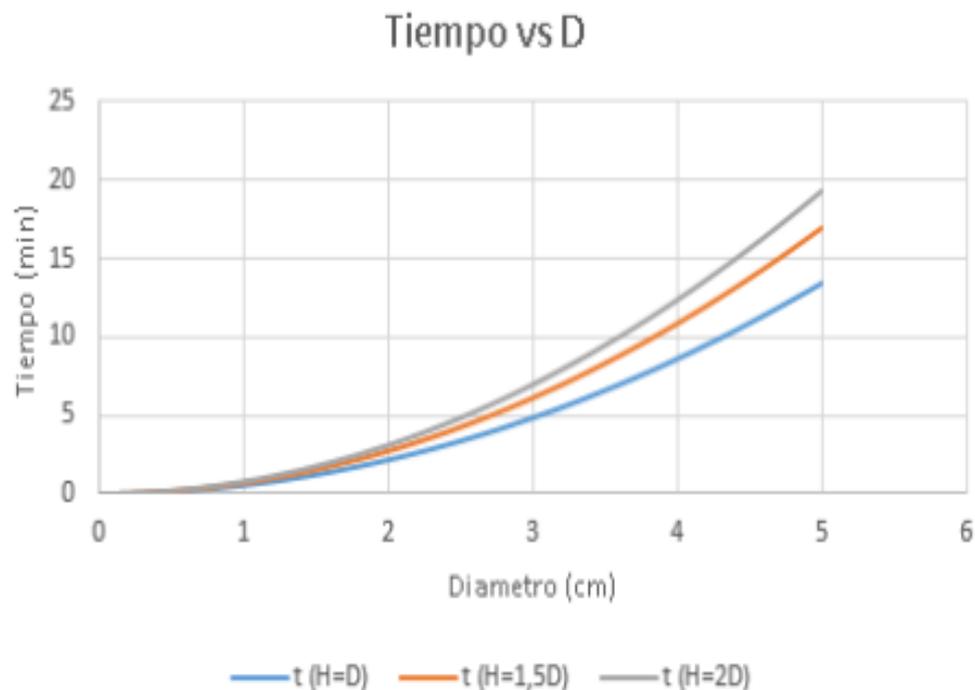


Figura 2.2 Tiempo de solidificación para una TL de 1200°C

Elaboración propia

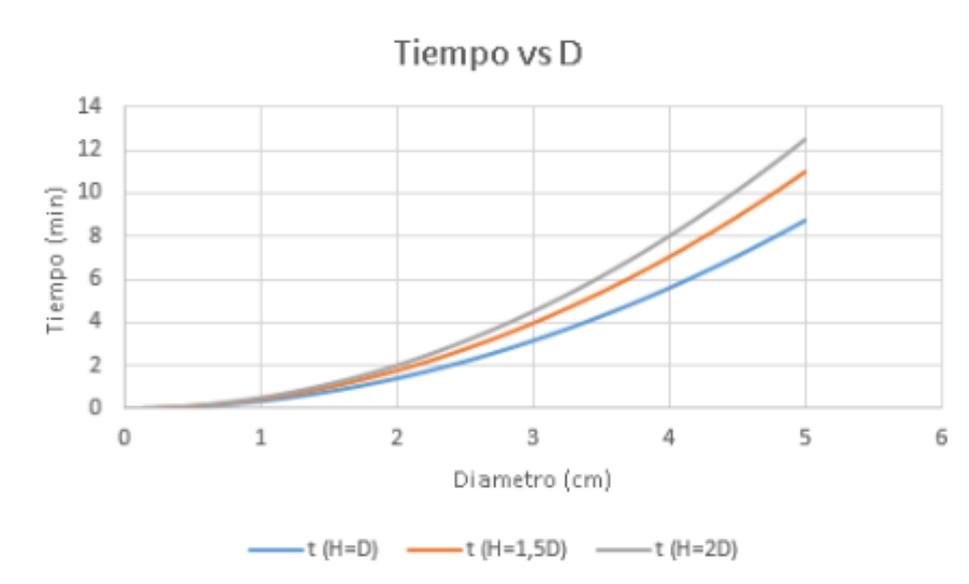


Figura 2.3 Tiempo de solidificación para una TL de 1350°C

Elaboración propia

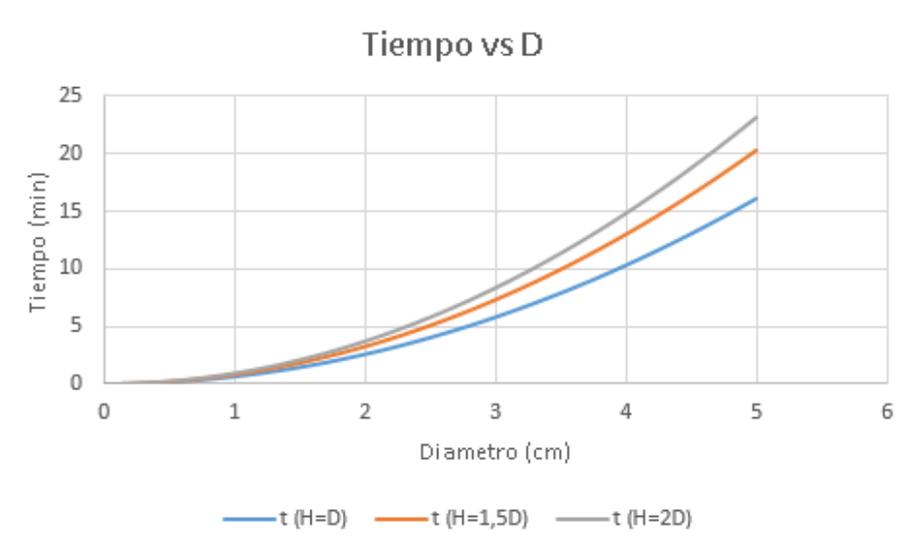


Figura 2.4 Tiempo de solidificación para una TL de 1150°C

Elaboración propia

De la figura 2.3 se observa que tiene las pendientes de tiempo/diámetro más pequeñas, para este proyecto se establece un tiempo de 6 minutos, resultando una probeta con 4 cm de diámetro y altura.

- Resultado $D = H = 4\text{cm}$

Ahora con este volumen se determina el tiempo de solidificación, utilizando transferencia de calor en estado transitorio unidimensional, teniendo las siguientes asunciones:

- El área de transferencia de calor ocurre solo por el área superior del cilindro, considerando adiabática las demás áreas que están en contacto con el molde de arena.
- Las propiedades del metal se mantienen constantes.
- La temperatura de la cara superior del cilindro se fija a 1220°C que es una temperatura media para el rango de TL del hierro gris.

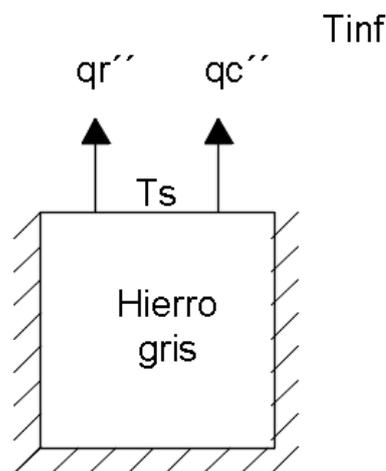


Figura 2.5 Esquema de la muestra de colada

Elaboración propia

Aplicando la ecuación de la conservación de la energía se tiene

$$-(qr'' + qc'')As = \rho cV \frac{dT}{dt} \quad (2.3)$$

Donde:

- qr : calor de radiación por unidad de área [W/m^2]
- qc : calor de convección por unidad de área [W/m^2]
- T_{inf} : temperatura ambiente [K]
- T_s : temperatura superficial [K]
- ρ : densidad [kg/m^3]
- c : calor específico [$J/kg.K$]

- V: volumen [m³]
- A_s: área de transferencia de calor
- dT/dt: diferencial de temperatura respecto al tiempo.

Esta ecuación se cumple si la resistencia interna es despreciable, esto es si el número de Biot es menor que 0.1.

$$Bi = \frac{hL_c}{k} \quad (2.4)$$

$$L_c = \frac{V}{A_s} = \frac{\frac{\pi}{4}D^2D}{\frac{\pi}{4}D^2} = D \quad (2.5)$$

En la tabla 2.2 se muestran los datos para realizar los cálculos para determinar el número de Biot

Tabla 2.2 Datos para determinar Bi

Lc	k
0.04	31.4

Elaboración propia

Donde:

- Bi: número de Biot
- h: coeficiente convectivo del aire [W/m².K]
- Lc: longitud característica [m]
- k: conductividad térmica del metal[W/m².K]

El valor del coeficiente convectivo del aire se determina con la ecuación de convección libre sobre una placa horizontal con la superficie superior caliente.

$$T_f = \frac{T_s + T_{inf}}{2} \quad (2.6)$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (2.7)$$

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_{inf})L^3}{\nu^2} \quad (2.8)$$

$$L = \frac{As}{P} \quad (2.9)$$

$$Ra_L = Gr_L Pr \quad (2.10)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.54Ra_L^{\frac{1}{4}} \quad (10^4 \leq Ra_L \leq 10^7) \quad (2.11)$$

$$h = \frac{Nu_L k}{L} \quad (2.12)$$

Donde:

- Nu_L: número de Nusselt
- Ra_L: número de Rayleigh
- Gr_L: número de Grashof
- Pr: número de Prandtl
- g: gravedad [m/s²]
- β: 1/T_f [K⁻¹]
- L: longitud característica [m]
- P= perímetro [m]
- ν: viscosidad cinemática [m²/s]
- T_f= temperatura de película [K]

Todas las propiedades del aire de las ecuaciones 2.6 hasta 2.12 deben evaluarse a T_f, los datos para reemplazarlos en estas se encuentran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Datos para determinar coeficiente convectivo

T _s	T _f	B	ν	Pr	k
1500	900	0,00111	1,02E-04	0,72	6,20E-02

Fuente: Incropera F., Fundamentos de Transferencia de calor

Elaboración propia

Se reemplaza los datos de la tabla anterior en las ecuaciones 2.6 a 2.12 y se obtienen los resultados que se presentan en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Resultados para determinar el coeficiente convectivo

L	v	Gr	Ra	Nu	h
0,02	1,02E-04	1,01E+04	7,24E+03	4,98E+00	15,44

Elaboración propia

Volviendo a la ecuación 2.4 el número de Biot es 0.02 por lo tanto es válida la asunción de resistencia interna despreciable.

Resolviendo la ecuación 2.3 y despejando dT se tiene:

$$dT = -\frac{1}{\rho c D} [h(T - T_{inf}) + \epsilon \sigma (T^4 - T_{inf}^4)] dt \quad (2.13)$$

Donde:

- ϵ : emisividad del hierro
- σ : constante de Boltzman [w/m²k⁴]

Los datos para resolver la ecuación 2.13 se encuentran en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Propiedades del hierro

ρ	c	D	h	T _{inf}	ϵ	σ
7870	654	0.04	15.44	303	0.38	5.67E-08

Fuente: Incropera F., Fundamentos de Transferencia de calor

Elaboración propia

Utilizando el método de Runge Kutta de cuarto orden se resuelve la ecuación 2.13, obteniendo como resultado la curva de enfriamiento que se muestra en la figura 2.6.

Condiciones para este método son:

- Temperatura de partida: 1673 K
- $\Delta t = 0.1$ segundos
- Tiempo total: 300 segundos

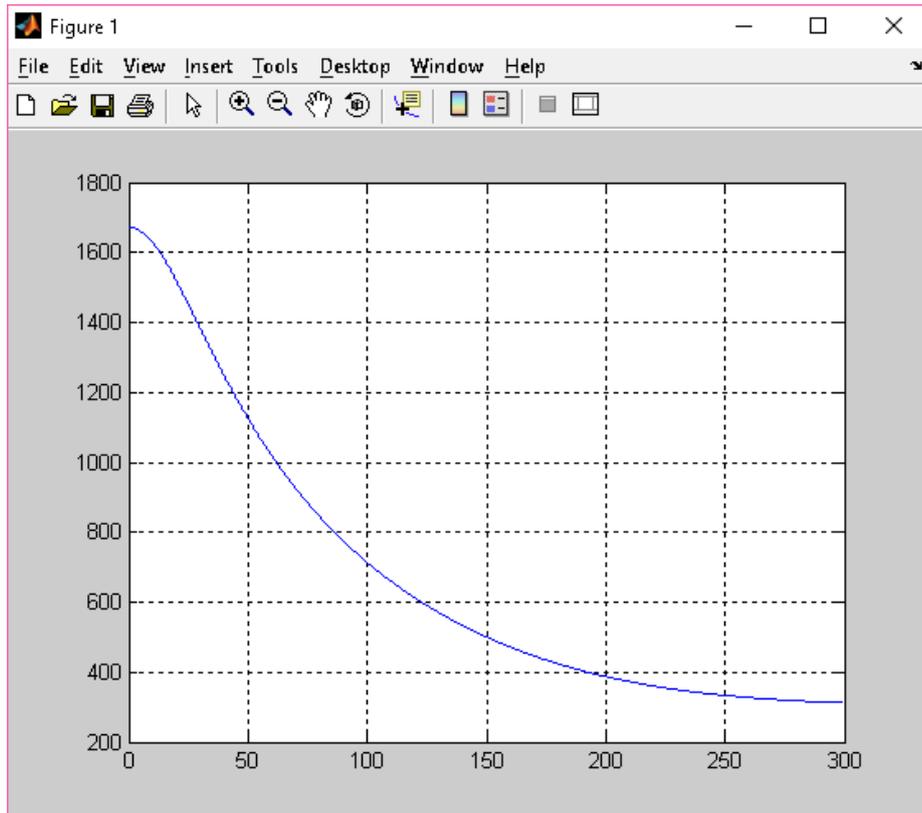


Figura 2.6 Solución de la ecuación 2.13

Elaboración propia

Cuando la temperatura de liquidus es 1400 K el tiempo es de 30 segundos.

2.3 Dimensionamiento del espesor de la cápsula

El cálculo de espesor de la pared del crisol se lo realizará con transferencia de calor en estado estable. De la sección anterior se observa que el tiempo de enfriamiento desde la temperatura de colado a la de liquidus es tan corto como 30 segundos, luego de esto la velocidad disminuye y se mantiene casi constante ya que hay un detenimiento térmico debido al calor latente de solidificación cuando el metal alcanza los 1150°C.

Asunciones:

- Transferencia de calor en estado estable.

- Temperatura interna de la cápsula constante de 1150°C
- No se consideran los efectos de la radiación.
- El flujo de calor es unidimensional en la dirección radial.

En la figura 2.7 y 2.8 se muestran el esquema de la cápsula de arena de sílice y de la analogía eléctrica respectivamente.

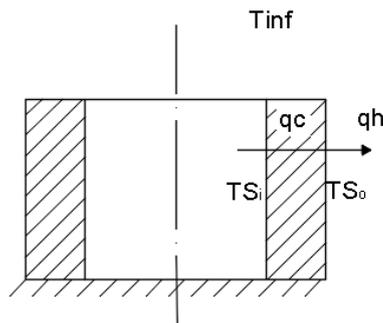


Figura 2.7 Esquema para el espesor de la cápsula

Elaboración propia

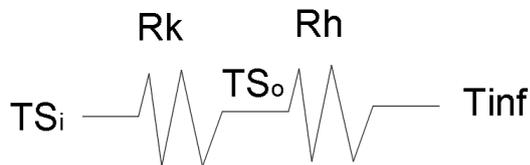


Figura 2.8 Analogía eléctrica

Elaboración propia

De la figura 2.8 se puede establecer la siguiente ecuación:

$$\frac{T_{so} - T_{inf}}{R_h} = \frac{T_{si} - T_{so}}{R_k} \quad (2.14)$$

Donde:

$$R_h = \frac{1}{2\pi r_o h} \quad (2.15)$$

$$R_k = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k} \quad (2.16)$$

Donde:

- Tso: temperatura superficial exterior [K]

- Tsi: temperatura superficial interior[K]
- Rh: Resistencia convectiva [W/mK]
- Rk: Resistencia conductiva [W/mK]
- ro: radio exterior [m]
- ri: radio interior [m]

Se reemplaza la ecuación 2.15 y 2.16 en 2.14y luego se despeja la temperatura de la superficie exterior (Tso).

$$T_{so} = \frac{\frac{kT_{si}}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} + r_o h T_{inf}}{r_o h + \frac{k}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}} \quad (2.17)$$

Los datos para determinar la temperatura de la superficie exterior de la cápsula se detallan en la tabla 2.6

Tabla 2.6 Datos para determinar el espesor de la cápsula

k	Tsi	ri	ro	T inf
0.27	1150	0.02	0.0325	300

Elaboración propia

Aunque se requiere determinar el espesor de la capsula, realizar el despeje del radio exterior de la ecuación 2.14 ya que se encuentra dentro de un logaritmo natural, así que se establece este valor arbitrariamente, y se define un límite de 700 °C para la temperatura superficial, que es suficiente para ser manipulada con pinzas.

Ahora se requiere determinar h utilizando la ecuación de convección libre para pared plana vertical, siempre que se cumpla la siguiente restricción (Incropera & De Witt, 1999):

$$\frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr_L^{1/4}} \quad (2.18)$$

Donde:

- L: la altura del cilindro de arena [m]

Para determinar el coeficiente de convección (h) se utiliza la siguiente ecuación:

$$Nu_L = 0.68 + \frac{0.67Ra_L^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad Ra_L \leq 10^9 \quad (2.19)$$

Debido a que se requiere una temperatura de la superficie exterior para determinar las propiedades del aire, se debe establecer una arbitrariamente hasta obtener h y reemplazarla en la ecuación 2.17 y corregir la temperatura. Se debe iterar hasta que se igualan las temperaturas.

En

Tabla 2.7 Iteración para obtener Tso

p	Tso	Tf	B	Ts-Tinf	L	v	Pr	k
1	900	600	0,00167	600	0,054	5,27E-05	0,658	4,69E-02
2	959,5	630	0,00159	659,5	0,054	5,65E-05	0,687	4,08E-02
3	998,7	649	0,00154	698,72	0,054	5,65E-05	0,687	4,08E-02

p	Gr	Ra	Nu	h	Tso
1	5,56E+05	3,66E+05	13,22	11,48	959,5
2	5,08E+05	3,49E+05	13,13	9,92	998,7
3	5,22E+05	3,58E+05	13,22	9,98	997,0

Elaboración propia

La temperatura Tso es de 997 K o 724 °C que está muy cercano a lo establecido anteriormente. Es por esto que el espesor de la cápsula es de 0.015 m.

2.4 Construcción de la cápsula para tomar muestras de hierro gris

Ahora que se conoce las dimensiones que tiene la muestra de metal y la cápsula de arena de sílice se realiza un molde de aluminio y PVC para facilitar la construcción del crisol, con esto se espera obtener un recipiente con espesor homogéneo, rápida fabricación y su proceso repetible.

A continuación se enlista el procedimiento para preparar la cápsula toma muestras:

- Tomar 10000 cm³ de arena de sílice y eliminar los grumos aplastándolos con una pala o introducir en el molino mezclador.
- Prepara el silicato de potasio mezclando 100cm³ de esto con otros 100 cm³ de agua y agitarlos hasta que la mezcla se vuelva homogénea.
- Mezclar la arena con el silicato de potasio reducido con agua, la mejor forma de hacerlo es colocar la mezcla sobre una mesa limpia y mezclarla con las manos, colocándola entre las palmas y frotarlas. La forma de comprobar la consistencia de la combinación consiste en tomar un puñado, apretar y si conserva la forma su consistencia es adecuada caso contrario añadir 10 cm³ más de silicato.
- Ahora se prepara el molde que consiste en una base de aluminio, la misma que tiene guías para colocar un cilindro del mismo material y un tubo de PVC que le darán la forma de la cápsula; sobre el cilindro se colocan 2 alambres de cobre sólido # 12, estos harán los orificios para introducir la termocupla.. Los planos de este se encuentran en el apéndice de planos.
- Introducir la arena y apisonarla en el molde, luego eliminar el exceso de arena para producir superficie plana en la base de la cápsula.
- Dar golpes leves en el tubo de PVC para desprender la arena, luego retirar la base y voltear el tubo con la arena sin que esta se derrame, y aflojar el cilindro de aluminio.

- Realizar pequeñas perforaciones en la arena con un alambre delgado, luego rosear CO₂ en la arena por 10 segundos, esto endurecerá la arena.
- Remover el tubo y el cilindro, y ahora estará lista la cápsula para realizar mediciones.

2.5 Algoritmo para modificar el contenido de carbono

El algoritmo que se desarrollará, tiene el objetivo de calcular el exceso o ausencia de carbono y entrega como resultado la cantidad de este material que debe ser añadido para aumentar su contenido, o si se requiere disminuirlo entrega la masa de acero estructural que debe ser añadido.

El flujograma presenta cuatro símbolos, el círculo, el paralelogramo, el rectángulo y el rombo. El primero indica el inicio o fin del programa, el segundo indica las entradas que el usuario debe entregar, el tercero son los procesos que el programa debe realizar y el cuarto es un condicional, y toma una decisión si se cumple con el requisito que se encuentra dentro de él.

Para empezar se debe introducir los datos de la masa de las chatarras de hierro gris, acero estructural y eléctrico, también se debe introducir la cantidad de grafito que es el carburizante.

El segundo "Input" se introduce el límite superior e inferior del contenido de carbono según la norma NTE INEN 2481 para el grado requerido por el cliente. Estos límites se encuentran tabulada en la sección de apéndices.

Otro ingreso es la temperatura de liquidus obtenido por la termocupla, este dato se obtiene visualmente de la curva de enfriamiento de la colada de hierro, este punto representa una discontinuidad mientras la curva decae. Si no se presenta una discontinuidad quiere decir que la composición es eutéctica, con un porcentaje de carbono igual a 4,2%.

El siguiente símbolo es el rectángulo, aquí se realiza un proceso con los datos obtenidos de la termocupla, se realiza el cálculo del carbono equivalente, resistencia a la tracción y dureza con las formulas 1.2, 1.3, y 1.4 respectivamente. Estas e son ecuaciones son:

$$C_e = \frac{1513 - T_L}{85}$$

$$R = 82 - 15.6 * C_e$$

$$HB = 516 - 82 * C_e$$

Donde:

- T_L : temperatura de liquidus censado con la termocupla [°C].
- C_e : carbono equivalente, es adimensional.
- R : resistencia a la tracción [Kpsi].
- H : dureza en escala Brinell

El cálculo que sigue es de los porcentajes de carbono y silicio de la colada, para realizarlo es necesario determinar el contenido total de masa de la colada, y se suma el aporte de chatarra de hierro gris, acero estructura y eléctrico y el grafito. Luego se determina el contenido de carbono y silicio teórico, de las normas NTE INEN 2481, 2167 para el hierro gris y el acero respectivamente y la norma ASTM WK35463 para el acero eléctrico. Los porcentajes de los elementos aleantes son los siguientes:

Tabla 2.8 Composición Química de los Metales Base

Material	%C	%Si
Hierro gris	3.0	2.0
Acero eléctrico	0.02	4.5
Acero estructural	0.3	0.2
Grafito	100	0

Fuente: Instituto ecuatoriano de normalización
Elaboración propia

Los porcentajes de la tabla 2.2 son datos promedios que son obtenidos de las normas; con estos datos se obtiene el aporte en masa de carbono y silicio de cada uno de los metales base utilizando las siguientes ecuaciones

$$mt = mFe + mAes + mAel + mc \quad (2.20)$$

$$Sit = \frac{0.02 * mFe + 0.002 * mAes + 0.045 * mAel}{mt} \quad (2.21)$$

$$Ct = \frac{mc + 0.03 * mFe + 0.003 * mAes + 0.0002 * mAel}{mt} \quad (2.22)$$

Donde:

- mFe: masa de hierro gris [Kg].
- mAes: masa de acero estructural [Kg].
- mAel: masa de acero eléctrico [Kg].
- mt: masa total de la colada [Kg].
- Sit: porcentaje de silicio teórico.
- Ct: porcentaje de carbono teórico

Estos datos permiten calcular el contenido de carbono real, ya que se utiliza la fórmula del carbono equivalente y se despeja el carbono, el

valor de C_e y S_{it} se remplazan en la formula. C_e se obtiene de la colada con la termocupla, pero S_{it} es un dato teórico calculado con las normas, esto se acepta ya que el silicio se conserva en la colada mientras que el carbono no, debido a que se puede combustionar al momento de introducir el grafito, y este tiene una eficiencia de difusión entre 85 y 90% (Janerka, Jesiersky, & Szajnar, 2012).

$$C = C_{eq} - \frac{S_{it}}{3} \quad (2.23)$$

Donde:

- C : contenido real de carbono

A continuación se calcula la eficiencia del carbono, comparando el contenido real contra el contenido teórico

$$n_c = \frac{C}{C_t} \quad (2.24)$$

Donde

- n_c : eficiencia del carburizante

Luego se calcula el contenido medio de carbono de la norma y el diferencial de este con respecto al real, estos datos ayudaran a determinar la masa de grafito o acero estructural que se debe añadir para modificar el contenido de este, las formulas son:

$$C_n = \frac{C_s + C_i}{2} \quad (2.25)$$

$$dC = C_n - C \quad (2.26)$$

Donde:

- C_n : contenido medio de carbono de la norma
- dC : diferencia de contenido de carbono entre la norma y el real
- C_s : máximo contenido de carbono permitido por la norma.

- C_i : mínimo contenido de carbono permitido por la norma.

Una vez que se tienen estos datos, se debe determinar si la concentración de C es la adecuada, para estos se debe comprobar si el contenido de carbono es menor que el límite inferior de la norma, si se cumple esto, entonces se debe añadir más grafito para aumentar su contenido, la cantidad que se debe añadir es:

$$dmc = \frac{dC * mt}{(100 - dC) * nc} \quad (2.27)$$

Pero si el contenido de carbono real es mayor al de la norma se debe añadir más acero estructural para reducirlo, los cálculos necesarios para determinar la cantidad de material que se debe añadir es la siguiente:

$$mcn = C * mt \quad (2.28)$$

$$mtn = \frac{100 * mcn}{C_n} \quad (2.29)$$

$$dmAes = mtn - mt \quad (2.30)$$

Donde:

- mcn : nueva masa de carbono [Kg].
- Mtn : nueva masa total [Kg]
- $dmAes$: diferencia de masa que se debe añadir [Kg].

Por otra parte, si no se cumplen las condiciones anteriores, es decir si el contenido está dentro del rango del contenido de carbono de la norma, la colada estará lista para ser vertida en los moldes de arena.

Cuando se realiza una corrección en la colada añadiendo masa de grafito o acero se debe realizar una medición y comprobar el contenido

de carbono. El diagrama de flujo para este algoritmo se encuentra en el apéndice C.

2.6 Selección del sensor

Como se estableció en las bases y condiciones de este proyecto la temperatura que se debe registrar se encuentra en el intervalo de 1150°C hasta 1380°C, y por lo tanto el sensor debe operar dentro de este rango. En la figura que se encuentra a continuación se presenta las curvas de temperatura vs mV de las termocuplas que existen en el medio.

De la figura 2.9 se puede concluir que las termocuplas que pueden censar las temperaturas requeridas son:

- Termocupla tipo K cromel alumel
- Termocupla tipo R platino-platino rodio13%
- Termocupla tipo S platino-platino rodio10%
- Termocupla tipo B platino rodio6%- platino rodio30%

Estas termocuplas alcanzan a medir 1500 °C, y este límite de temperatura es suficiente para registrar los datos en la fundición de hierro gris, que es el metal con el punto de fusión más alto en los ensayos que se realizarán en este proyecto.

Las termocuplas tipo R, S y B están conformadas por metales preciosos, el platino tiene un costo promedio de 1054\$/oz mientras que el rodio cuesta 608\$/oz. Estos precios se reflejan en la figura 2.10, estos valores

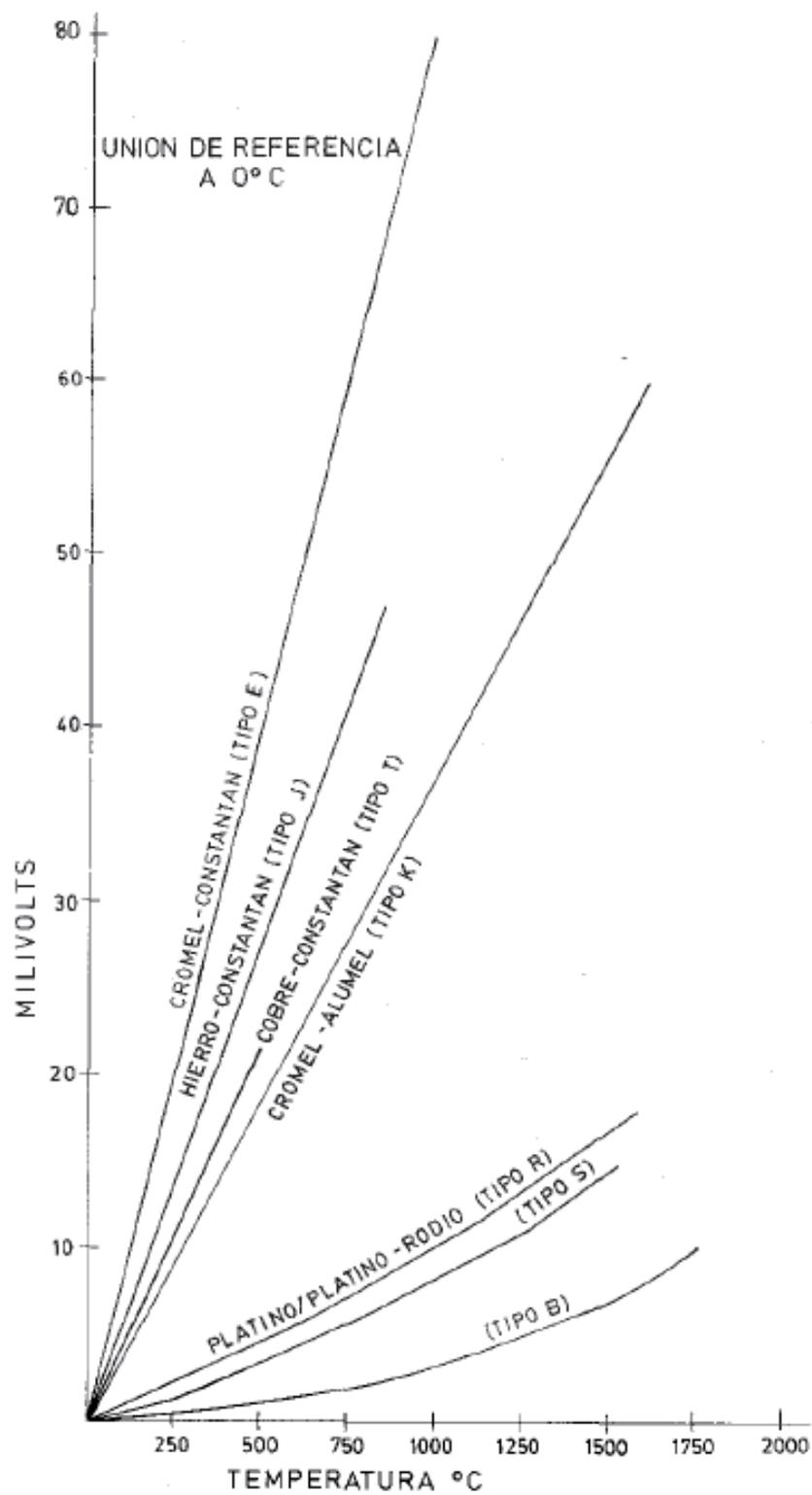


Figura 2.9 Curvas características V vs temperatura de las termocuplas

Fuente: Instrumentación industria, Antonio Creus 6 edición



Figura 2.10 Costo internacional del platino y el rodio

Fuente: Kitko Metals Inc.3

De esta grafica se puede concluir que el costo de las termocuplas constituidas por estos metales resulta costoso para este prototipo. Por eso se escoge el sensor tipo K que es más económico. A pesar que los tipos R, S y B pueden operar a temperaturas de hasta 1600°C.

Los costos de las termocuplas según el fabricante Omega se especifican en la siguiente tabla. Se observa que el precio de los sensores de platino-rodio cuestan 21.5 veces más que los de cromel-alumel.

Tabla 2.9 Costo de las termocuplas

Tipo de termocupla	Costo
R, S o B	\$ 425,00
K	\$ 19,80

Fuente: <http://www.omega.com>

Elaboración propia

La composición química de este transductor de temperatura es la siguiente:

Tabla 2.10 Composición química de la termocupla tipo K

Termoelemento	Composición química				
	Cr	Mn	Si	Ni	Al
Cromel (KP)	10	-	-	90	-
Alumel (KN)	-	2	1	95	2

Fuente: instrumentación Industrial, Antonio Creus, 6ta edición

Elaboración propia

Debido al alto coste de las demás se selecciona la termocupla tipo K. El tipo de señal es analógica (mv) y la información que se puede obtener es de nivel. La pendiente de la curva característica de la termocupla tipo K es de 44.40 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

2.7 Selección del acondicionador de señal

Debido a que la señal obtenida de la termocupla es de la magnitud de micro voltios, se debe ampliar la señal, filtrarla para atenuar el ruido y realizar la compensación de junta fría, para que pueda ser leída con facilidad por el sistema de adquisición de datos (DAQ por sus siglas en inglés).

Los dispositivos DAQ pueden medir señales entre $\pm 5\text{ V}$ o $\pm 10\text{ V}$, por esta razón es necesario amplificar la señal de la termocupla para cubrir este rango y de esta manera mejorar la precisión y el rendimiento del sistema de adquisición de datos. También se debe corregir el efecto de la unión fría para que la medida no dependa de la temperatura ambiente. El comportamiento del transductor es exponencial en el rango de 0°C hasta 1370°C , por lo que se debe linealizar esta curva. Para realizar estos tipos de acondicionamientos se selecciona el circuito integrado AD595 de la empresa Analog Device.

El AD595 es un amplificador de instrumentación y compensador de unión fría de termopar en un chip monolítico. Combina un punto de referencia de frío con un amplificador de precalibrado para producir un nivel alto (10 mV / ° C) de salida directamente de la señal del termopar.

Las características del amplificador de la termocupla tipo K son:

Tabla 2.11 Características del amplificador AD 595

	Mínimo	Máximo	Unidad
Índices absolutos máximos			
+Vs a -Vs		36	V
Voltaje de entrada diferencial	-Vs	+ Vs	V
Temperatura de operación	-55	+125	°C
Medición de temperatura			
Error de Calibración a 25°C		+3	°C
Estabilidad vs temperatura		+0.05	°C/°C
Error de la ganancia		+1.5	%
Función de transferencia nominal		10	mV/°C
Características del amplificador			
Ganancia de lazo cerrado	247.3		
Posición del voltaje de entrada	(temperatura en °C)x 40.44uV/°C		uV
Rango de la entrada diferencial	-10	+50	mV
Rango de la salida de voltaje	0	+Vs-2	V
Requerimiento de poder			
Operación	(+Vs a -Vs) <=30		V

Fuente: Analog Device

Elaboración propia

Debido a que el voltaje de salida de la termocupla no es lineal con respecto a la temperatura, el CI AD595 amplifica linealmente la señal compensada, la siguiente función de transferencia debe ser utilizada para obtener el valor real del voltaje de salida, donde los 11 uV son la compensación de junta fría.

$$AD595 = (\text{voltaje tipo } K + 11 \mu V) * 247.3 \quad (2.31)$$

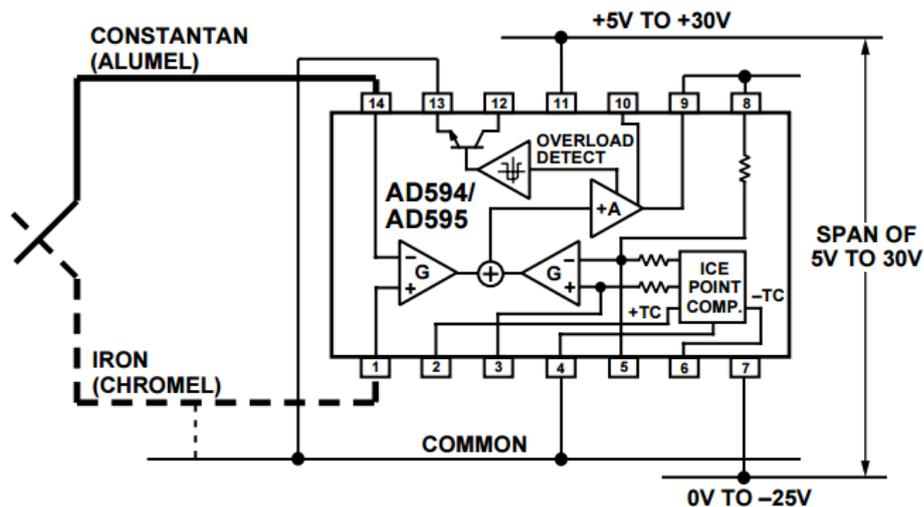


Figura 2.11 Conexiones para el amplificador AD595

Fuente: Analog Device

Los terminales 8 y 9 se conectan al filtro para reducir el ruido captado por la termocupla y luego se conecta el sistema de adquisición de datos.

2.7.1 Selección del filtro

Debido a que la termocupla es propensa a adquirir ruido de las ondas de radio, tv, telecomunicaciones y de la toma de voltaje a la que se conecta la fuente de poder; por esto es necesario colocar un filtro

para reducir todas estas señales que pueden interferir con la medición de temperatura.

Como la señal que se obtiene de la termocupla es del tipo de nivel, no es necesario captar frecuencia o amplitud de onda, por esto se coloca un filtro “paso bajo” que consta de una resistencia y un capacitor. Este filtro permite el paso de las frecuencias más bajas y atenúa las altas. El filtro paso bajo se muestra en la figura 2.12

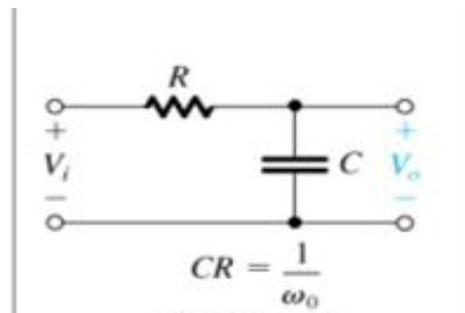


Figura 2.12 Filtro paso bajo

Fuente: www.slideplayers.es

Donde:

- C : es el valor del Capacitor $F = 10 \mu F$
- R : es el valor de la resistencia $\Omega = 10k \Omega$
- ω_0 : es la frecuencia de corte $= 1/0.1 = 10Hz$

Este filtro permite el paso de las frecuencias menores o iguales a ω_0 y atenúa las frecuencias mayores.

2.7.2 Selección de la fuente de voltaje

Como se especifica en las características del datasheet del AD595 la fuente de voltaje puede ser hasta de 30 V de corriente directa, y

sí el amplificador tiene una relación de 10 mV/°C y para medir hasta 1370°C se necesita 13700 mv o 13.7 V se necesita una alimentación de al menos 13.7 voltios en otras palabra el rango de la fuente de voltaje debe ser:

$$13.7V \leq \text{Fuente de voltaje} \leq 30V \quad (2.32)$$

Es por este motivo que se selecciona una fuente con las siguientes características:

Tabla 2.12 Propiedades de la fuente de Poder

AC adapter Toshiba	Voltaje	Corriente	Frecuencia
Input	100-240 V AC	1.6 A	50-60 Hz
Ouput	19 V DC	3.42 A	-

Elaboración propia

2.8 Selección del sistema de adquisición de datos.

Ahora se necesita convertir la señal analógica filtrada, amplificada y compensada a una digital, para esto se necesita determinar el ancho de palabra del Convertidor Analógico/Digital (ADC por sus siglas en inglés) del sistema de adquisición de datos. Esto con el objetivo de lograr una mejor representación de la señal de entrada. El ancho de palabra se mide en Bits

A continuación se presenta los niveles que se puede representar con la cantidad de bits:

$$\# \text{ de niveles} = 2^n \quad (2.33)$$

Donde:

n: es el número de bits.

Mientras mayor es el número de niveles mejor se puede representar la señal analógica.

El rango de medición del DAQ se encuentra entre $\pm 5V$ y $\pm 10V$, el segundo valor es el que interesa para este proyecto ya que la entrada de voltaje proveniente del amplificador es de 13700 mv y esta se puede medir con una entrada diferencial de voltaje. Se utiliza este tipo de ingreso ya que la conexión de la termocupla es de tipo flotante ya que no está referenciada o aterrizada.

Como se definió en las bases y condiciones, se requiere que el sistema de medición registre la temperatura con una resolución de $1^{\circ}C$, este en mili voltios representa un valor de 10, convirtiéndose este en la máxima resolución que puede tener el DAQ. Con la siguiente fórmula se la resolución:

$$\text{Resolución} = \text{rango} / 2^{\text{bits}} \quad (2.34)$$

Donde:

- Resolución= 10 mv
- Rango= 20000mv

Reemplazando los datos en la ecuación 2.34 da un número de bits igual a 10.97, por lo tanto se debe tener un DAQ con un ancho de palabra de 11 bits o mayor. Pero el número estándar es el de 12 para estos dispositivos, es por eso que se escoge este valor para el prototipo.

Con los 12 bits de ancho de palabra se tiene una resolución de 4.88 mv, que convertidos a grados centígrados serían 0.488.

Para finalizar con los parámetros necesarios para seleccionar el DAQ, se necesita determinar la velocidad de muestreo. Mediante pruebas

realizadas con aleaciones estaño plomo se logró determinar que el tiempo de respuesta de la termocupla es de 5.2 segundos.

Es decir, si se tiene la termocupla a temperatura ambiente y se somete a la temperatura de la colada de 1370 °C, que es el límite de medición de este transductor, demorara este intervalo de tiempo y la tasa de temperatura-tiempo y milivoltios-tiempo será

$$\frac{\text{Temperatura}}{\text{Tiempo}} = 257.7 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}} \quad (2.35)$$

$$\frac{\text{milivoltios}}{\text{Tiempo}} = 2577 \frac{\text{mv}}{\text{s}} \quad (2.36)$$

Ahora si se espera que se tome una muestra por la mínima señal que se pueda medir, esto es

$$\frac{1\text{muestra}}{0.488 \text{ mv}} \quad (2.37)$$

La velocidad de muestreo para la máxima tasa de cambio es

$$\text{velocidad de muestreo} = 5.28 \frac{\text{kS}}{\text{s}} \quad (2.38)$$

La velocidad de muestreo de la DAQ debe ser de 5.28 kS/s o superior. La velocidad nominal más cercana que existe es la de 10 kS/s, con una velocidad casi del doble de la requerida.

Las características necesarias para la DAQ del proyecto se detallan en la tabla a continuación:

Tabla 2.13 Propiedades del DAQ

Propiedades del DAQ	
Ancho de palabra	12 Bits
Velocidad de muestreo	10 kS/s
Entradas analógicas	Diferenciales
Rango de medición	± 10 voltios

Elaboración propia

Estas propiedades se cumplen con el DAQ NI USB-6008 que es un dispositivo alimentado por BUS USB que es un dispositivo de adquisición de datos multifunción

El esquema de adquisición de datos se presenta en la figura a continuación, en ella se muestra la entradas analógicas (AI) que son las que se utilizaran para este proyecto, el convertidor analógico digital de 8 canales el micro controlador USB para recibir la información del ADC y enviarla a la PC y la alimentación de voltaje, los otros bloques corresponden a las salidas analógicas (AO) y las entradas y salidas digitales (digital I/O) que no serán usadas para este trabajo.

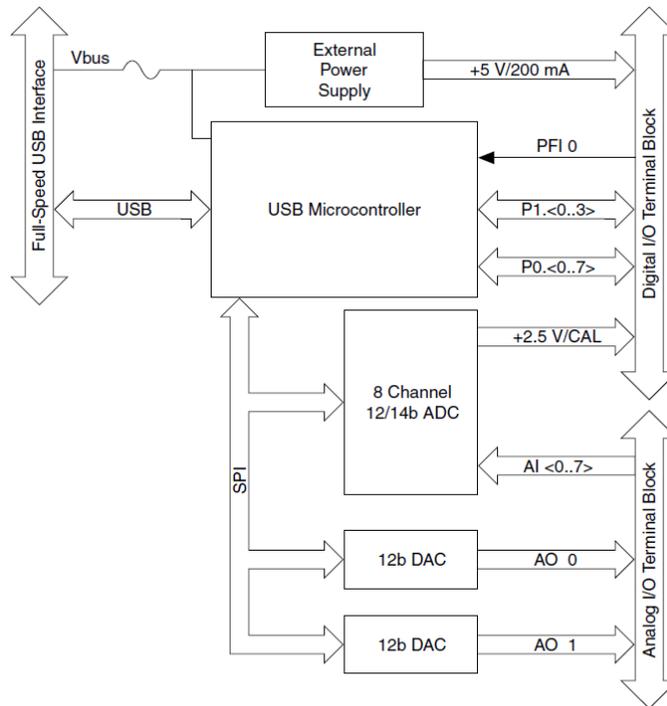


Figura 2.13 Diagrama de bloques del NI USB-6008/6009

Fuente: National Instrument

Las entradas analógicas diferenciales que se van a utilizar para el proyecto son la AI2 (AI2+) y AI6 (AI2-) del DAQ, que según la numeración de los pines corresponde al número 8 el terminal positivo y 9 al terminal negativo.

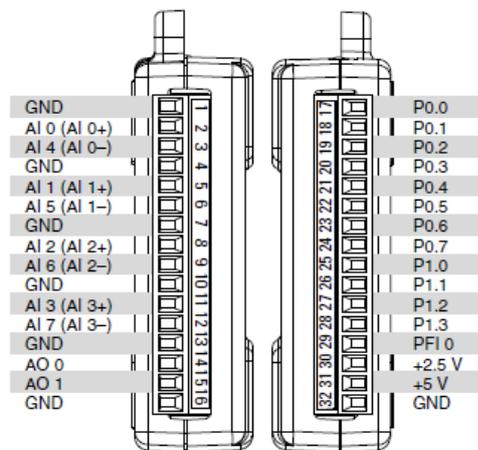


Figura 2.14 Disposición de los terminales del NI USB-6008

Fuente: National Instrument

2.9 Programa de Lab VIEW

El programa que va a ser desarrollado debe seguir el algoritmo presentado en secciones anteriores, para esto se utiliza para lograrlo se utiliza la programación gráfica de LabVIEW.

El programa empieza realizando todas las operaciones detalladas en la sección de algoritmo, para esto se deben dar las entradas que son las masa de cada uno de los materiales base, para realizar esto se utiliza el ícono DBL de la paleta numérica y se da un clic derecho sobre el para fijarlo como control, entonces aparecerá una flecha hacia la derecha, como se muestra en la figura a continuación



Figura 2.15 ícono DBL

Fuente: LAbVIEW Professional Development System

También se utilizara en icono de Función de Aritmética Compuesta, este es un sumador utilizado para calcular la masa total de la colada de hierro, también se encuentra en la paleta numérica. Su forma se presenta a continuación.

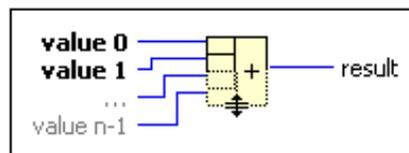


Figura 2.16 Función de aritmética compuesta

Fuente: LAbVIEW Professional Development System

Ahora para realizar los cálculos más complejos se utiliza la función “Formula Express VI” de la paleta “Scripts and Formulas” en ella se introducen todas las variables de los iconos DBL y realizando doble clic sobre él se abre una ventana en la que se debe introducir la operación

matemática que se requiere realizar, del lado izquierdo se introducen los valores de las variables y el resultado se obtiene del lado derecho. El icono tiene la siguiente estructura

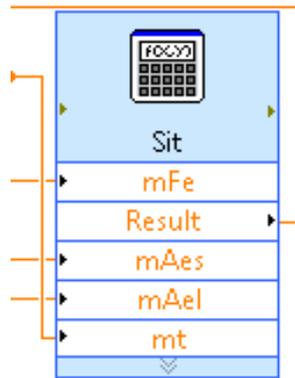


Figura 2.17 Formula Express VI

Fuente: LAbVIEW Professional Development System

Para mostrar los resultados del ícono anterior se utiliza un DBL pero esta vez configurado como indicador, la única diferencia con el otro es que presentará una flecha en el lado izquierdo. Estas flechas deben unirse mediante líneas dependiendo de la operación que se necesita realizar.

El Programa para realizar estos cálculos para el proyecto se presentan en la sección de Apéndices E: Programas de LabVIEW.

Para realizar las comparaciones se debe determinar si el contenido de carbono es el adecuado o está por debajo o sobre el contenido permitido de carbono. Para esto se utilizan estructura de casos de la paleta de estructuras y comparadores de menor y mayor de la paleta de comparadores como se muestra en la figura a continuación.

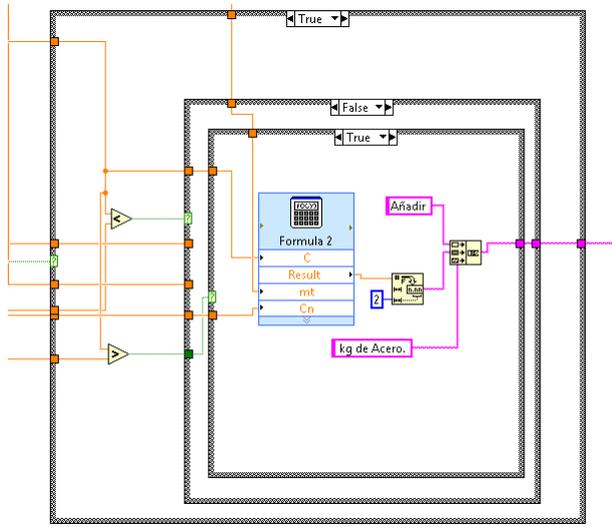


Figura 2.18 Estructura de casos

Fuente: LABVIEW Professional Development System

El programa para el registro de los datos de la termocupla empieza configurando el NI DAQ, para esto se accede a la paleta “DAQmx-Data Acquisition” y seleccionar el icono DAQ asistent. Aquí se configura las operaciones de entrada que se requiere del dispositivo, en este caso se requiere adquirir una señal analógica de voltaje, entonces se realiza la selección como se muestra en la figura a continuación.

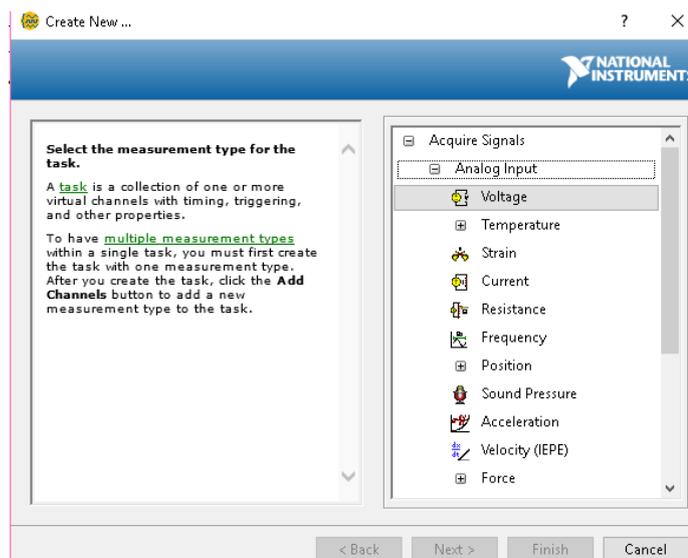


Figura 2.19 Configuración del DAQ

Fuente: LABVIEW Professional Development System

Luego se seleccionan las entradas AI2 Y AI6 que son las entradas analógicas diferenciales del DAQ, con esta configuración el dispositivo está listo para conectarse al computador.

Ahora se debe realizar un programa para adquirir, visualizar y registrar la información del DAQ, para esto se utiliza el icono DAQMX Read de la misma paleta del icono anterior, en esta paleta se colocan los siguientes parámetros mostrados en la figura

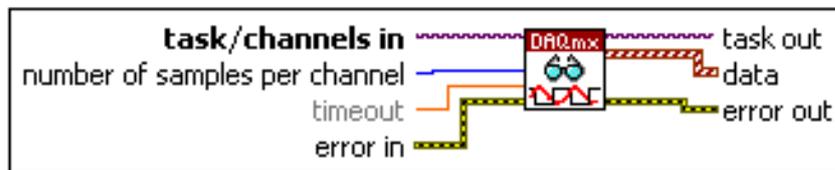


Figura 2.20 DAQMX Read para obtener la señal del DAQ

Fuente: LAbVIEW Professional Development System

Donde:

- Task/chanel in es el nombre de la tarea o el canal con el que la aplicación opera
- Number of samples per channel es la cantidad de muestras que se toman por canal.
- Timeout especifica la cantidad de tiempo en segundo para que los datos estén disponibles.
- Error in decibes si es que existe algún error antes u durante el funcionamiento del programa.
- Task out es una referencia de la tarea después de que el programa corre.
- Data muestra los datos en dos dimensiones el arreglo de las muestras.
- Error out contiene errores de la información

De la salida de DATA se realiza se utiliza el icono “Amplitude and level measurement” que transforma el voltaje en una señal. En esta parte se realiza un filtro de la señal por software, para reducir el nivel de ruido adquirido por la termocupla. El icono tiene la siguiente estructura.

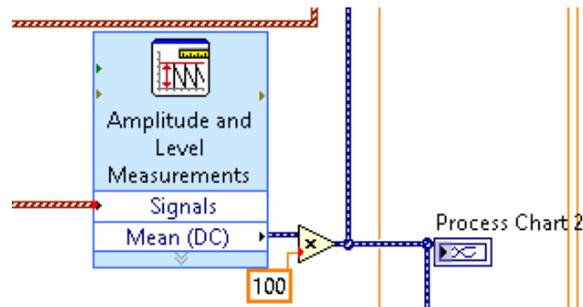


Figura 2.21 ícono para la medición de amplitud y nivel

Fuente: LAbVIEW Professional Development System

Luego se multiplica la señal por 100 para obtener el equivalente en °C luego se utiliza el icono de Process Chart para visualizar los datos de la señal versus tiempo. El programa completo se muestra en la sección de apéndices E.

CAPÍTULO 3

3 RESULTADOS

3.1 Ensayos realizados

3.1.1 Hierro gris

El ensayo de hierro gris tuvo el objetivo de probar el sistema de adquisición de datos y especialmente la cápsula de arena a temperatura de vertido.

Los datos de este experimento fueron:

- Volumen de control: 60 cm³
- Masa de la probeta: 500 g
- Temperatura de la colada: superior a 1450°C
- Termocupla: tipo K con alambres de 1 mm
- Temperatura de la cápsula: ambiente
- Metal de llenado: hierro gris de al Ce alto.
- Protección de la termocupla: pintura con 80%de alúmina y 20%de bentonita más silicato de sodio secando en el horno.

El equipo que se utilizó para el ensayo se muestra en la figura 3.1

La curva de enfriamiento no se logró registrar por que se cometió un error con la programación de la dirección para almacenar los datos, y los estos no se guardaron

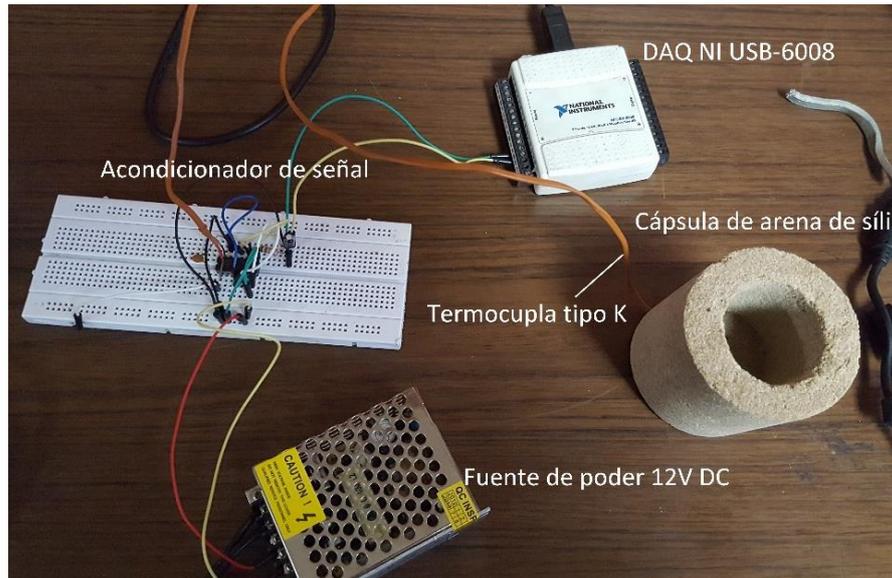


Figura 3.1 Equipo para la adquisición de datos

Elaboración propia

Mientras que la capsula soportó de manera satisfactoria el contenido del metal fundido, aunque al final esta se fracturo, pero se debía a la expansión lateral de la probeta con un diámetro de 41 mm 1 mm que el molde.



Figura 3.2 Probeta de hierro gris

Elaboración propia

En la segunda figura se observa parte de la termocupla que se encontraba protegida por la pintura cerámica, debido a la manipulación por un operador la pintura quedó desigual y parte de

ella quedo embebida en el hierro y por eso se observa la forma desigual.

El tiempo de ensayo de la cápsula duró 30 segundos aproximadamente con lo que se acepta el cálculo de transferencia de calor en estado transitorio del capítulo 2.

De este ensayo se puede concluir que el comportamiento de la cápsula respondió a las expectativas y que el sistema de adquisición de datos necesita ser revisado para respaldar la información obtenida.

3.1.2 Aleación plomo estaño

El objetivo de este ensayo fue probar el sistema de adquisición de datos para determinar la curva de enfriamiento de la aleación plomo estaño.

Los datos del experimento fueron:

- Volumen de control: 20 cm³
- Masa de la probeta: 60-100 g
- Temperatura de la colada: entre 450°C y 500°C
- Termocupla: tipo K con alambres de 1 mm
- Temperatura de la cápsula: igual que la colada
- Metal de llenado: plomo y estaño.
- Protección de la termocupla: sin protección cerámica

El equipo que se utilizó es el que se encuentra en la figura 3.1.

Los resultados de este ensayo fueron las curvas de enfriamiento de las aleaciones Pb-SN, en las que se puede apreciar la temperatura

de liquidus, en las figuras 3.3 hasta 3.7 se observan las curvas de enfriamiento con varias concentraciones de Pb-Sn.

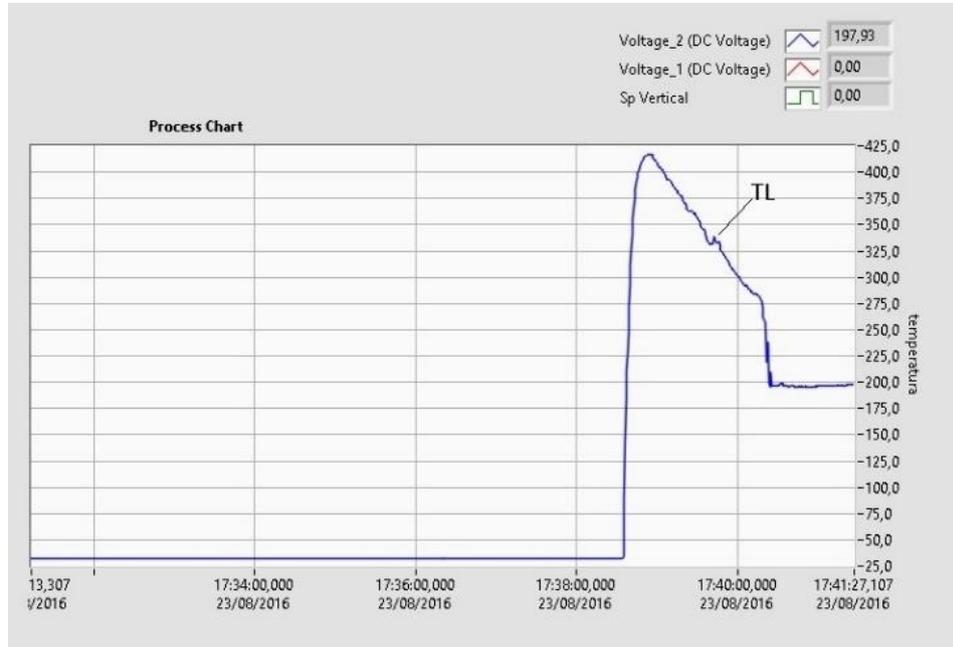


Figura 3.3 Curva de enfriamiento aleación Pb100-Sn0

Elaboración propia

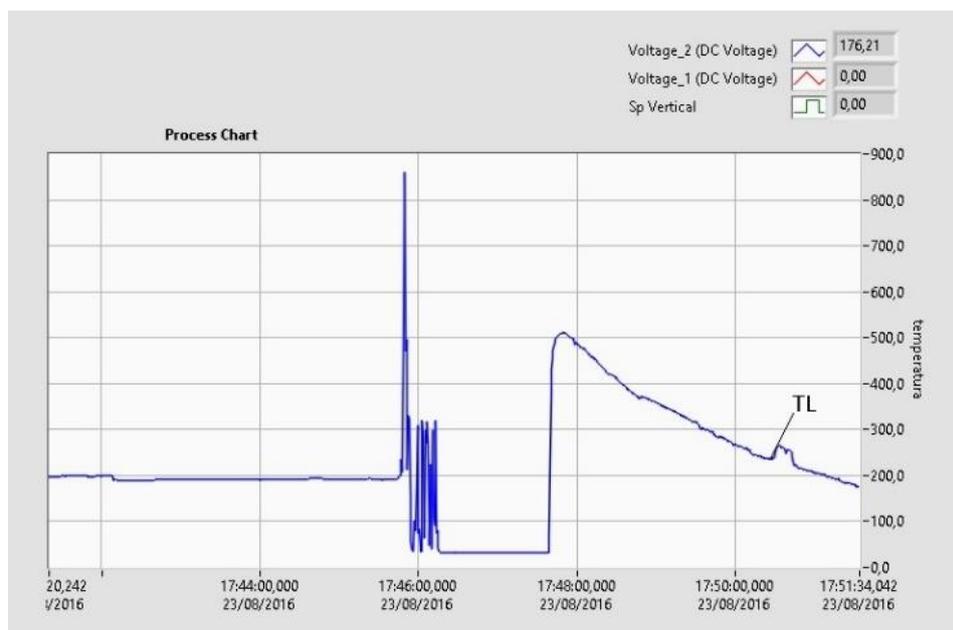


Figura 3.4 Curva de enfriamiento aleación Pb77-Sn23

Elaboración propia

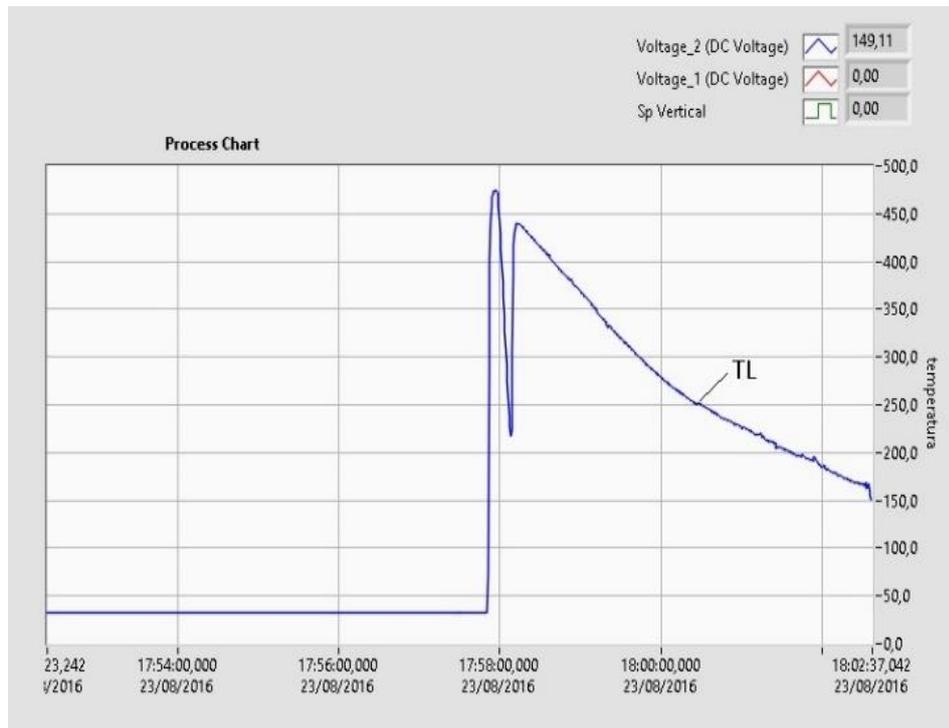


Figura 3.5 Curva de enfriamiento aleación Pb61-Sn39

Elaboración propia

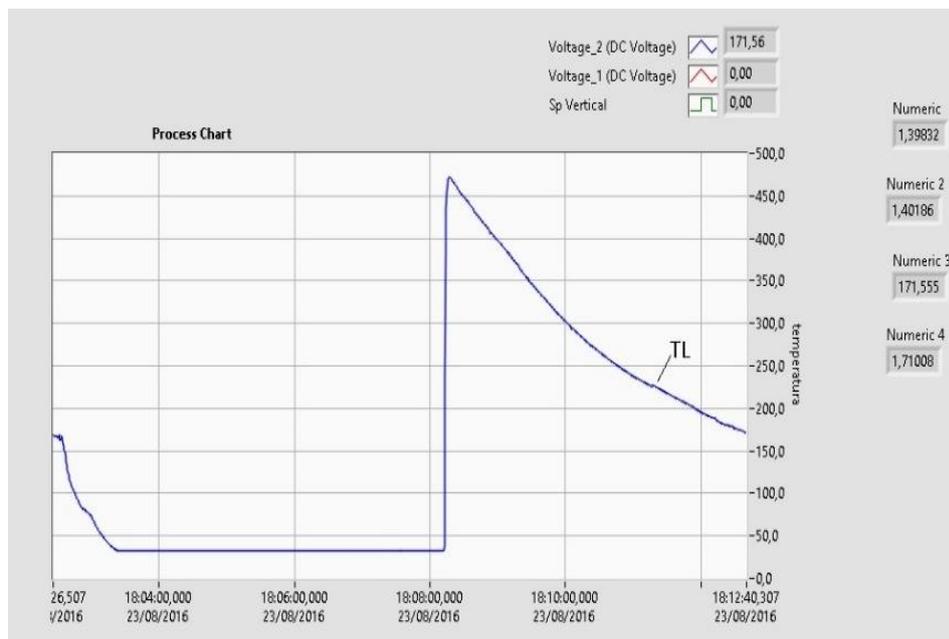


Figura 3.6 Curva de enfriamiento aleación Pb52-Sn48

Elaboración propia

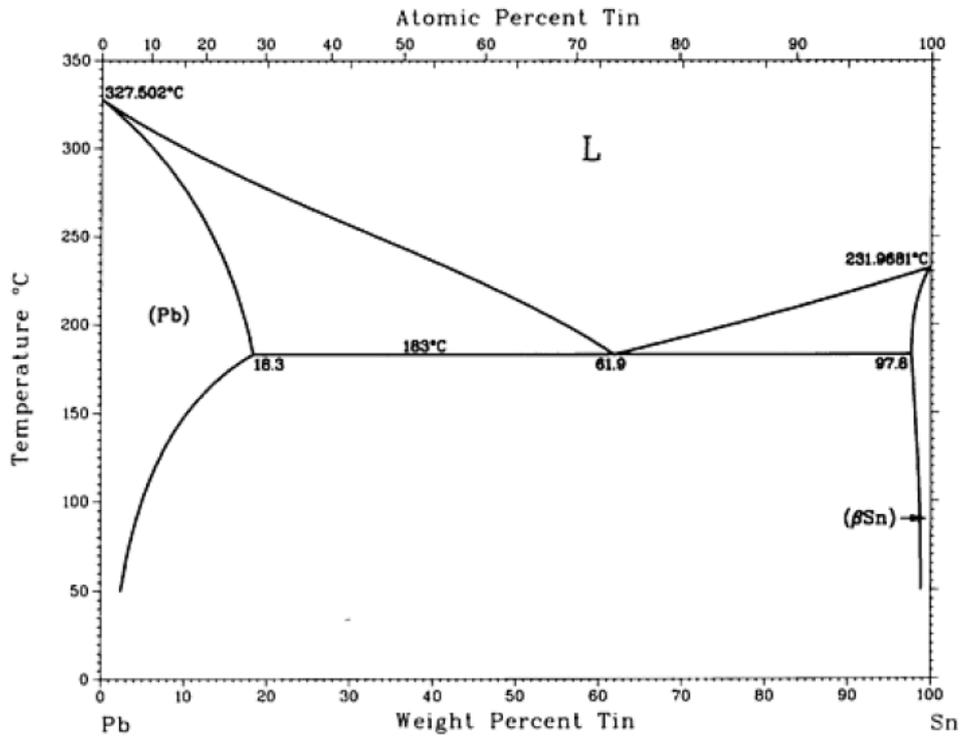


Figura 3.7 Diagrama de fase Pb-Sn

Fuente: ASM Handbook, vol 15: casting

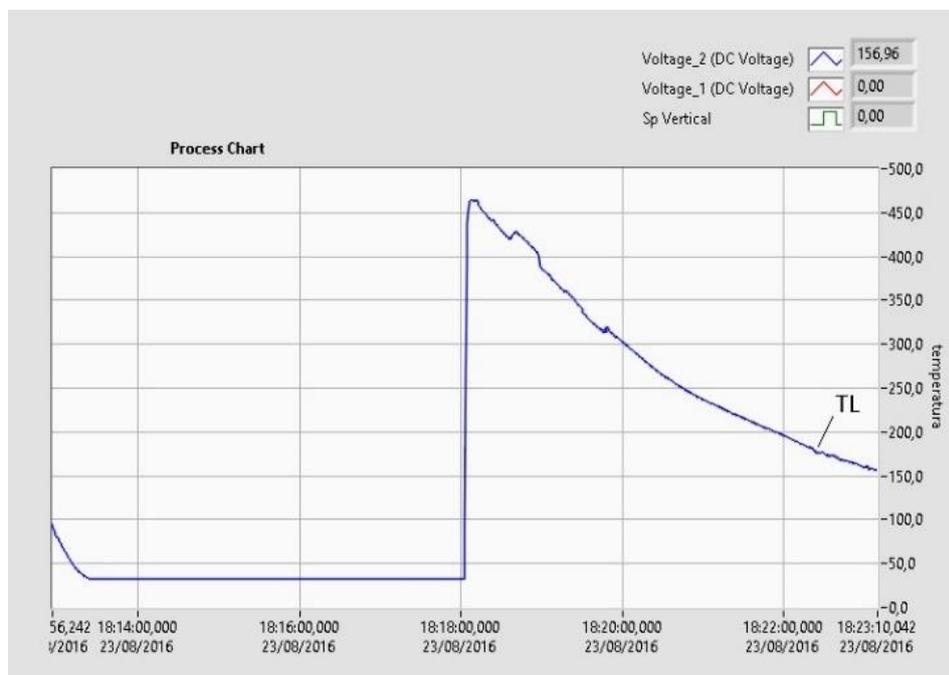


Figura 3.8 Curva de enfriamiento aleación Pb45-Sn55

Elaboración propia

El tiempo de respuesta de la termocupla es de 5.6 segundos como se muestra en la figura 3.8.

$$t_{\text{respuesta}} = 5.6 \text{ segundos}$$

En este ensayo no existió problema con el registro de las curvas de enfriamiento por parte del equipo, el tiempo de respuesta de la termocupla fu satisfactorio, sobre todo si la tasa de enfriamiento del metal es lenta como se observa en los ensayos realizados

De esta practica se puede concluir, que el sistema de adquisición de datos tiene la velocidad suficiente para registra cambios de temperatura tan rápidos como 450°C en 5 segundos.

El la temperatura de liquidus es facil de observar cuando el punto de interes esta alejado del punto eutéctico, mientras mas se acerca la aleación a 60% se dificulta la obtención de este punto ya que en las graficas se observa curvas suavizadas sin saltos o cambios de pendiente apreciable, eso punto se lograron efinir comparandolos con el diagrama de fase de Pb-Sn,

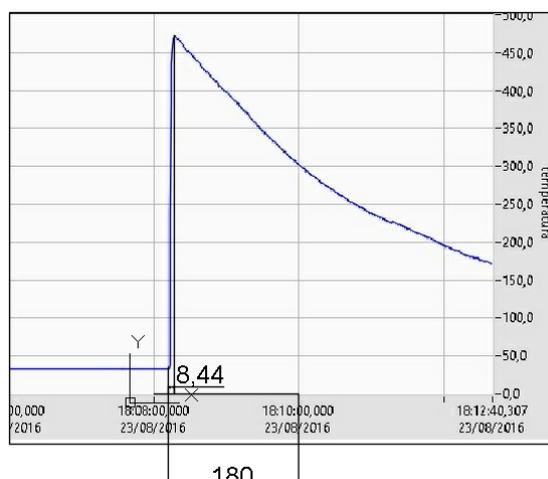


Figura 3.9 Tiempo de respuesta de la termocupla

Elaboración propia

3.1.3 Ensayo con aluminio silicio

El objetivo de este ensayo fue probar el sistema de adquisición de datos para determinar la curva de enfriamiento de la aleación aluminio silicio

Los datos del experimento fueron:

- Volumen de control: 50 cm³
- Masa de la probeta: 100 g
- Temperatura de la colada: entre sobre 700°C
- Termocupla: tipo K con alambres de 1 mm
- Temperatura de la cápsula: igual que la colada
- Metal de llenado: Aleación aluminio silicio
- Protección de la termocupla: sin protección cerámica

El equipo que se utilizó es el que se encuentra en la figura 3.1.

Los resultados de este ensayo fueron las curvas de enfriamiento de las aleaciones Al-Si, en las que se puede apreciar la temperatura de liquidus, en las figuras 3.10 y 3.11 se observan las curvas de enfriamiento para aleaciones de este metal.

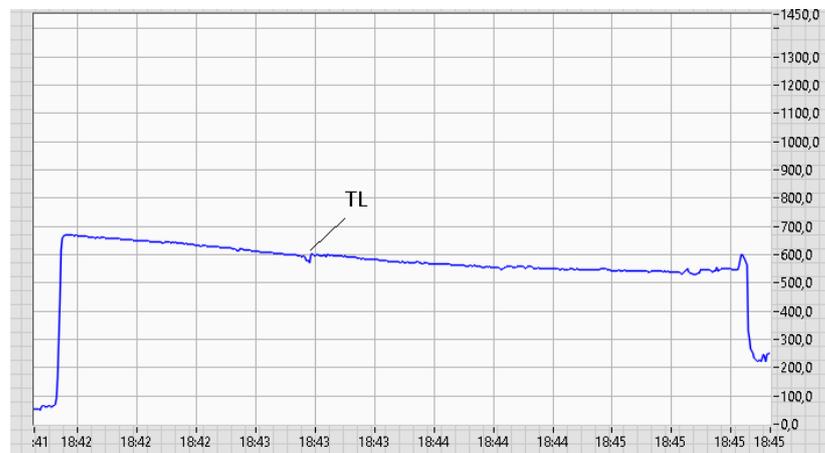


Figura 3.10 Curva de enfriamiento aleación Al90-Si10

Elaboración propia

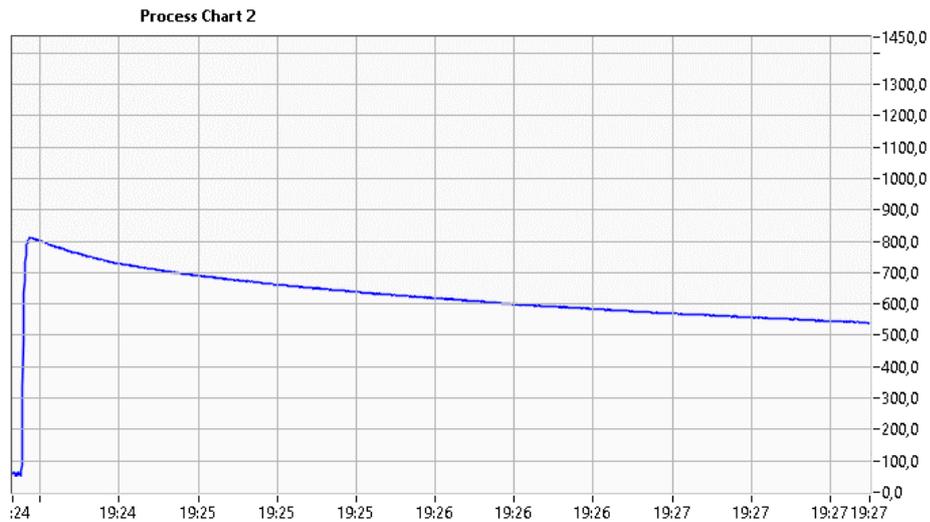


Figura 3.11 Curva de enfriamiento aleación Al92-Si8

Elaboración propia

En este ensayo no existió problema con el registro de las curvas de enfriamiento por parte del equipo, el tiempo de respuesta de la termocupla fue satisfactorio. Se observa en las graficas que el tiempo de respuesta de la termocupla es de 5 segundo

De esta practica se puede concluir, que el sistema de adquisición de datos tiene la velocidad suficiente para registra cambios de temperatua tan rápidos como 750°C en 5 segundos.

En la figura 3.9 se puede observa una discontinuidad en 600 °C que esta acorde con la temperatura de liquidus, mientras que en la figura 3.10 no se puede observar discontinuidad alguna, esta curva es suave en a lo largo del tiempo de registro, de esta no se puede establecer la temperatura de liquidus, que debe estar alrededor de 610° según la concentracion de elemntos alenates. Con este tipo de inconveniente es recomendable determinar la pendiente de la curva obteniendo la derivada con diferencias finitas y encontrar la discontinuidad que indicará cual es punto de interes y determinar la concentración de los elementos.

3.2 Tamaño de la muestra

Los resultados que se obtuvo para el tamaño de la muestra se muestran en la figura 3.12

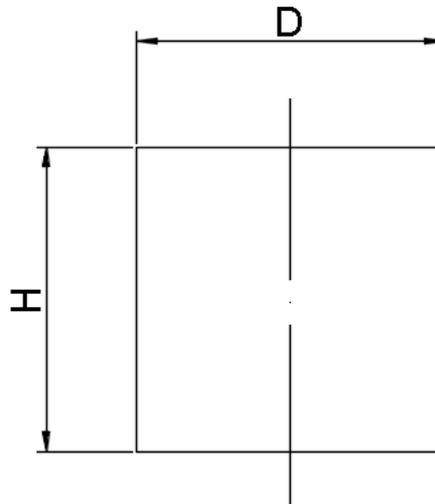


Figura 3.12 Dimensión de la cápsula

Elaboración propia

Donde:

- D: diámetro de 4 cm
- H: altura de 4 cm

Esos datos se obtuvieron con la regla de Chvorinov y luego se comprobó sus dimensiones con el cálculo de transferencia de calor en estado transitorio, que arrojaron un tiempo bastante bajo de 30 segundos, que se establecieron para el material con la mayor temperatura de vertido. Según lo observado por el ensayo en el hierro gris, la velocidad de solidificación es muy rápida y si corresponde con la aproximación de sólido con resistencia interna despreciable.

3.3 Datos de la cápsula

La cápsula para tomar muestras de hierro gris elaborado con arena de sílice tiene las dimensiones que se presentan en la tabla 3.1 y su aspecto físico se representa en el esquema de la figura 3.13.

Tabla 3.1 Dimensiones de la cápsula

	H	h	DI	DO	e
mm	75	54	40	66	15

Elaboración Propia

Donde:

- H es la altura total de la cápsula
- h es la altura que tendría la muestra
- DI el diámetro interior de la cápsula
- DO el diámetro exterior de la cápsula
- e es la separación de los orificios para introducir la termocupla

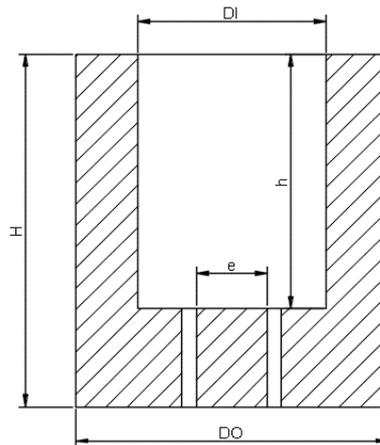


Figura 3.13 Esquema de la cápsula toma muestras

Elaboración propia

En la tabla 3.2 se mostrará las propiedades de la cápsula

Tabla 3.2 Propiedades de la cápsula

Masa	Capacidad	Temperatura de operación
300 g	60 cm ³ o 0.5kg de colada de hierro	Hasta 1600 °C

Elaboración Propia

Estos datos fueron obtenidos haciendo un análisis de transferencia de calor en estado estable, con la finalidad de facilitar el cálculo. Asumir que el enfriamiento del hierro fue muy rápido hasta la solidificación fue correcto y también que cuando llega al punto de solidificación de 1150°C empieza n enfriamiento lento, como se muestra con los otros metales.

3.4 Programa para calcular el contenido de carbono

El programa para obtener la concentración de carbono en la colada consiste en introducir los datos de masa de los metales base para esta y el grafito, el programa desarrollado en base al algoritmo que se expuso en el capítulo anterior realiza los cálculos y determina las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción y dureza, también indica cual es el contenido de carbono y la masa de grafito o acero se debe añadir para modificarlos.

Este programa no se utilizó en este proyecto ya que no se midió la temperatura de liquidus, y sin ella no se puede determinar ni uno de las propiedades antes mencionadas.

3.5 Prototipo para realizar las mediciones de temperatura

El prototipo de este proyecto consta de un computador con el programa LabVIEW, una tarjeta de adquisición de datos, un circuito para el acondicionamiento de la señal, la termocupla y la cápsula toma muestras.

En la figura 3.14 se muestra el equipo lista para realizar las primeras pruebas, los elementos como la fuente de poder, el circuito acondicionador de señal y la tarjeta de adquisición de datos no se encuentran aún protegidas ya que se puede presentar problemas durante la prueba y será necesario arreglar alguna parte del conjunto.

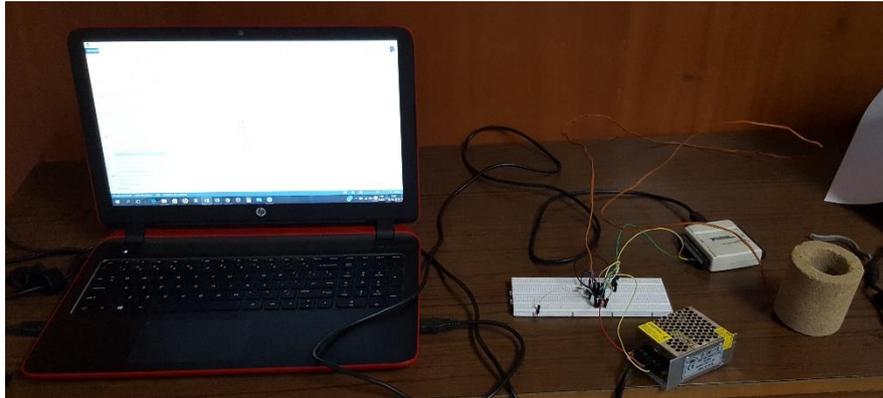


Figura 3.14 Prototipo para determinar el contenido de carbono

Elaboración propia

Las características de este equipo de adquisición de datos se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Características del equipo de medición

Rango de medición	0-1370°C
Tipo de sensor	Termocupla tipo K
Velocidad de muestreo	Hasta 10 kS/s
Resolución	0.488 °C
Tiempo de respuesta	5.2 segundos
Constante de tiempo	1.2 segundos
Error	±1.5 %

Elaboración propia

3.6 Análisis de costo

El análisis de costo se realizó con respecto a la producción de hierro gris, que es el material de mayor producción en el Taller Intramet y los cálculos de salarios se calcularon con respecto a una proyección del gerente para producir 30 toneladas de este metal.

El costo del prototipo se detalla en la tabla 3.4, en esta se toma en cuenta el costo del software, si bien es cierto que se utilizó una licencia educativa para desarrollar el programa, se deberá obtener una para instalarlo en la industria y no incumplir con los derechos de autor de esta compañía.

Tabla 3.4 Costo del prototipo

Licencia del Software National Instrument LabVIEW 2014	\$ 1.200,00
Tarjeta de adquisición de datos NI USB-6008	\$ 250,00
Termocupla tipo K (5m)	\$ 80,00
Chip AD 595	\$ 21,00
Capacitores y resistencia	\$ 1,00
Baquelita de cobre	\$ 5,00
Fuente de poder de 12 V.	\$ 20,00
Programador	\$ 300,00
Impresión en la baquelita.	\$ 30,00
Molde para la cápsula	\$ 15,00
Arena de sílice con silicato de sodio (300g)	\$ 0,50
Pruebas	\$ 100,00
Total	\$ 2.022,50

Elaboración propia

La utilidad de este equipo se pone a prueba cada vez que este registra una concentración incorrecta del contenido de carbono, pues así evita pérdidas de tiempo de trabajo y energía, estos costos se detallan en la tabla 3.4.

En la sección de Apéndices, se encuentran los detalles de cada uno de estos rubros. También se debe considerar el costo de la energía consumida por el horno de inducción, el molino mezclador que prepara la arena para los moldes y el GLP para secarlos estos gastos se

muestran en la tabla 3.5 y corresponde al monto necesario para fundir 400 kg de hierro gris en 4 horas.

Tabla 3.5 Costos anuales de la empresa

Gasto anuales	
Salarios	\$ 85.166,13
Alimentos	\$ 8.125,00
Servicios Básicos	\$ 9.120,00
EPP	\$ 828,00
total	\$ 103.239,13
Gasto por mes	\$ 8.603,26
Gasto por día	\$ 430,16

Elaboración propia

Tabla 3.6 Gasto de energía

Costo de Energía	
Horno	\$ 157,61
Molino	\$ 2,54
GLP	\$ 13,15
Total	\$ 173,31

Elaboración propia

Ahora se realiza un análisis costo-beneficio comparando el costo del prototipo contra los gastos por día de la empresa más el costo de la energía para fundir 400 kg de hierro gris que es la cantidad que se funde en este periodo de tiempo.

$$i = \frac{(\text{costo del prototipo})}{\text{gastos por colada corregida}}$$

$$i = 3.35$$

Este el valor de i indica la cantidad de correcciones que el prototipo debe corregir el contenido de carbono para que la empresa recupere la inversión del mismo. No se deben contar las coladas que tengan una concentración adecuada.

El primer objetivo específico que es el diseño de la cápsula para tomar muestras de la colada de hierro gris define el trabajo a realizar para hacer el sistema de toma de datos mediante el análisis térmico, para el mismo se definieron las características técnicas para que el contenido de metal líquido pueda mantenerse mientras la termocupla pueda registrar la temperatura y su comportamiento en el enfriamiento

El material para su elaboración debía ser de baja conductividad térmica y por eso se escogió la arena de sílice de la zona de Limón Indanza de la provincia de Morona Santiago que es una zona minera y se puede conseguir este material con una granulometría entre 70 y 100 mesh, lo cual es apropiado para el proceso de consolidación de forma con silicato de sodio y gas carbónico dando como resultado resistencia a la compresión de 350 lb/in².

También se definió el diseño de forma y se encontró que la mejor forma para conservar el calor, tomando en consideración la posición de la termocupla, era cilíndrica y por medio de los cálculos utilizando la regla de Chvorinov se llegó a definir sus medidas, la que son 66 mm de diámetro exterior, 40mm de interior y 75 mm de altura.

Los ensayos realizados con las aleaciones estaño-plomo dieron como resultado que funciono de manera apropiad puesto que la termocupla pudo registra las curvas de enfriamiento identificado la temperatura de liquidus que para este estudio es el punto básico del análisis térmico.

Por otro lado la ubicación de la termocupla se encontró, a través de ensayos, que las mejores lecturas se consiguieron en la posición vertical introducido por la parte inferior puesto que dio más facilidad para realizar el sellado con material refractario, en cambio en las otras posiciones radialmente o por arriba no fueron tan efectivas y por ende las cápsulas toma muestras responden al diseño de sensor vertical.

También se verificó la masa requerida para el ensayo, en su cálculo se tuvo que considerar el tiempo de permanencia en estado líquido, en definitiva para el caso de hierro gris la cantidad óptima resultó de 500 g y tomando en cuenta que el meta superó los 1500 °C en el momento de llenado se tuvo que realizar un recubrimiento refractario protector de la termocupla y que se aplica en forma de pintura pastosa y se deja secar a 150 °C. Ésta práctica permitió hacer las lecturas sin daño de la termocupla.

Con respecto a la construcción de un molde para elaborar las cápsulas de arena se lo desarrolla con la finalidad de tener una forma siempre igual y para que no exista error humano en la consecución en la forma de ésta y su posterior acoplamiento con la termocupla. Se observó que era conveniente hacer un molde metálico y establecer las operaciones manuales de la manufactura de esta pieza.

El resultado fue el esperado ya que la forma es constante, también la resistencia y el tiempo de elaboración es tan bajo como tres minutos con la ventaja del uso de la mezcla de arena de sílice con silicato de sodio gaseado con dióxido de carbono se puede decir que la cápsula toma muestras tiene larga vida y se las puede almacenar hasta que se las requiera, no es necesario que sean elaboradas el día que se realiza la fundición porque son prácticamente inalterables con el tiempo. Este objetivo específico proporcionó un método de hacerlo fácil, rápido y económico.

Con respecto al sistema de adquisición de datos se utilizó una termocupla que resiste hasta 1370°C y su protección cerámica la protege para realizar mediciones para temperaturas superiores. La velocidad del sistema de adquisición de datos fue de 10KS/s cuando se requería 5.28 KS/s, así que con una velocidad mayor se aseguró que todos los puntos de la señal analógica se pudieran discretizar en una señal digital sin perder detalles de temperatura.

CAPÍTULO 4

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El diseño de la cápsula se realizó tomando en cuenta la regla de Chvorinov y transferencia de calor en estado transitorio, con el que se dese obtuvo un tiempo de solidificación total de 3 minutos en la fundición de hierro gris. Los diseños que se realizan utilizando esta ecuación debe ser sometidos a pruebas para determinar la verdadera constante del molde, puesto que el valor con el que se trabajó se obtuvo de una formula en la que no se toma en cuenta las dimensiones del molde.
- El molde se construyó con una aleación de aluminio, con el que se construyeron las cápsula para realizar la prueba con el hierro gris, el tiempo medio de construcción de cada una de ellas fue de 3 minutos y todas las que se construyeron conservaron las mismas dimensiones de lo que se puede que se puede concluir que con este molde se obtuvo un proceso repetible y sin variaciones en las dimensiones.
- Se realizó el programa para realizar el cálculo de carbono equivalente y las propiedades mecánicas en el hierro gris, se realizó los cálculos para realizar la compensación del carbono de ser necesario; mas no se puso a prueba ya que el ensayo realizado con este metal no fue del todo satisfactorio, en particular para medir la temperatura de liquidus.
- Para construir el sistema de adquisición se tuvo que fabricar la cápsula con la arena de sílice construir el sistema de adquisición de datos el mismo que consta de un amplificador con compensación de junta fría para termocuplas tipo K pre calibrado

(AD 595), un filtro paso bajo de salida con una frecuencia de corte de 10 Hz para filtrar el ruido proveniente de la red eléctrica (60 HZ) una DAQ NI USB-6009 y el programa LAbVIEW. Este sistema proporcionó importante información para el proyecto como determinar el tiempo de respuesta de la termocupla y las curvas de enfriamientos de las aleaciones estaño plomo (ver Apéndice G)

- La temperatura de liquidus obtenida con las aleaciones de plomo estaño fueron muy cercanas a las establecidas en un diagrama de fase para estos materiales, sus variaciones se debieron a los contaminantes presentes en la materia prima que se utilizó.

4.2 Recomendaciones

- La producción de hierro gris es la antesala para la producción de hierro maleable, este consiste en realizar un tratamiento al primero a una temperatura de 900°C, este proceso cambiara la forma del grafito de laminar a esferoidal, reduciendo el efecto de concentrador de esfuerzo. Esta nueva forma en la que se encuentra el carbono permite tener una mayor resistencia a la tracción y más ductilidad en el metal.
- El uso de chatarra de acero estructural y eléctrico si hierro gris como base se justifica solo si en el mercado este no está disponible, ya que sus aleantes (C y Si) son muy costosos.
- Este proyecto también es de ayuda para probar un carburizante más barato que el grafito, este es el caso del carbón vegetal que tiene un costo de \$2/kg, esto reducirá a 0.27\$ el kilogramo de la materia prima para la producción de hierro gris sintético,

convirtiéndose así en una opción más económica que la chatarra. El cálculo de este costo se encuentra detallado en la sección de apéndices.

- También se recomienda realizar la producción de hierro nodular sintético, partiendo de la chatarra de acero. A diferencia de hierro gris este tiene un contenido bajo de azufre y fosforo, por eso el uso de esta chatarra beneficia su producción, pero una vez más se necesita aumentar su contenido de carbono y controlar su contenido. También se utiliza utilizar magnesio para que se produzca la formación de nódulos en lugar de las láminas de grafito.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrews, K. W. (1973). *Physical Metallurgy, Vol 1*. William Clowes & Sons.
- ASM. (1998). ASM handbook Vol. 15 Casting.
- Creus Solé, A. (1997). Termopares. En *Instrumentación Industrial* (págs. 237-238). Barcelona: Alfomega.
- Enríquez Berciano, J. L. (1981). Caráctersíticas Mecánicas. En J. L. Enríquez Berciano, *El Análisis Térmico de la Fundición y las Propiedades de la misma* (págs. 77-81). Sevilla: Universidad Complutense de Madrid.
- Enríquez Berciano, J. L. (1981). *El Análisis Térmico de las Fundición y las Propiedades de la Misma*. Sevilla: Universidad Complutense de Madrid.
- Guthrie , R., & Jonas, J. (1993). Carbon and Low - Alloy Steel. En *ASM Handbook, Volume 1* (pág. 212). ASM International Handbook Committee.
- Incropera, F. P., & De Witt, D. P. (1999). Conducción en estado transitorio. En *Fundamentos de transferencia de calor* (págs. 212-263). Mexico: Prentice Hall.
- INEN, I. E. (2009). Composición Química del Hierro Gris. En *Fundiciones de Hierro Gris. Requerimientos* (págs. 9-10). Quito.
- Janerka, K., Jesiersky, J., & Szajnar, J. (2012). Quality and properties of the cast iron produced on the steel scrap base. *Archives of Materials Science and Engineering*, 92-102.
- Kotschi, R. M. (1992). Design Casting. En *ASM Handbook Vol. 15 Casting* (págs. 1308-1309). ASM International.
- NTE-INEN-2215, I. E. (1998). Composición. En *NTE INEN 2215 Perfiles laminados en caliente. Requisitos* (págs. 2-3). Quito.
- NTE-INEN-2481, I. E. (2009). Requisitos. En *Fundición de Hierro Gris. Requerimientos. NTE INEN 2481*. (pág. 5). Quito.
- NTE-INEN-662, I. E. (1982). Definiciones. En *NTE INEN 662 Definiciones y Designaciones de los Principales Productos Siderurgicos. Clasificación* (pág. 1). Quito.
- Orellana, C. (17 de Junio de 2016). Costos de las diferente chatarras. (A. Mora, Entrevistador)
- Piowarsky, E. (1958). *Hochwertiges Gusseisen*. Springer-Verlag.

QuimiNet.com. (13 de Junio de 2016). *Quiminet.com*. Obtenido de <http://www.quiminet.com/articulos/todo-acerca-de-las-ferroaleaciones-y-el-ferro-silicio-2820628.htm>

Smith, W. F., & Hashemi, J. (2006). Fundamentos de la Ciencia y la Ingeniería de Materiales. Mexico: McGraw-Hill.

APÉNDICES

Apéndice A
DIAGRAMA DEL PROCESO DE CONTROL DEL HIERRO
GRIS

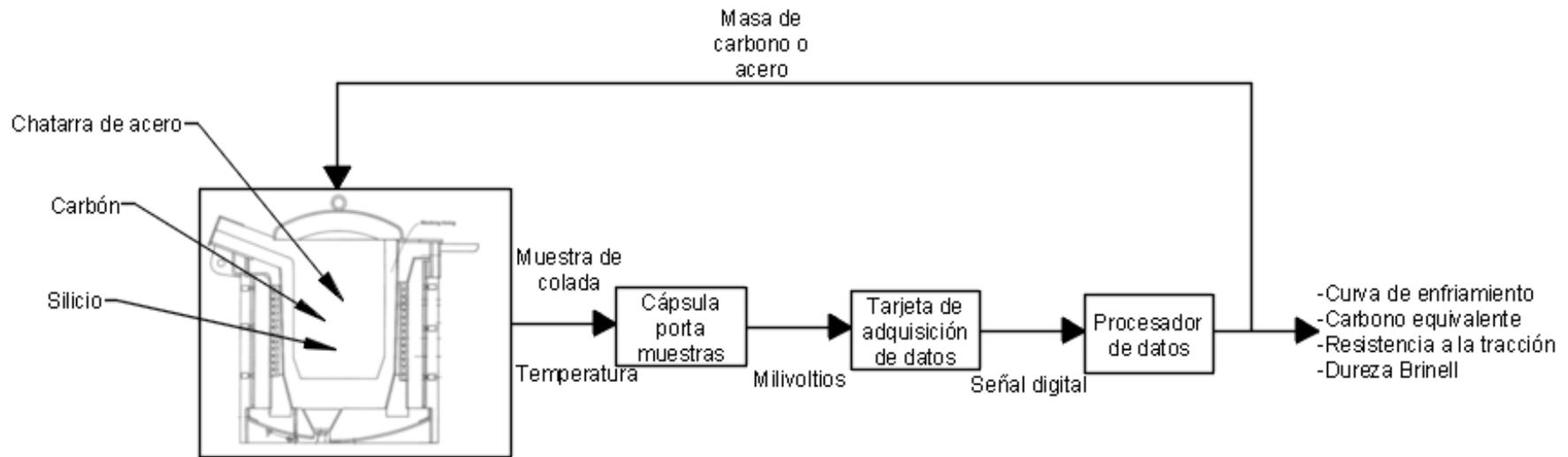


Figura 4.1 Esquema del proceso de control del hierro gris

Elaboración propia

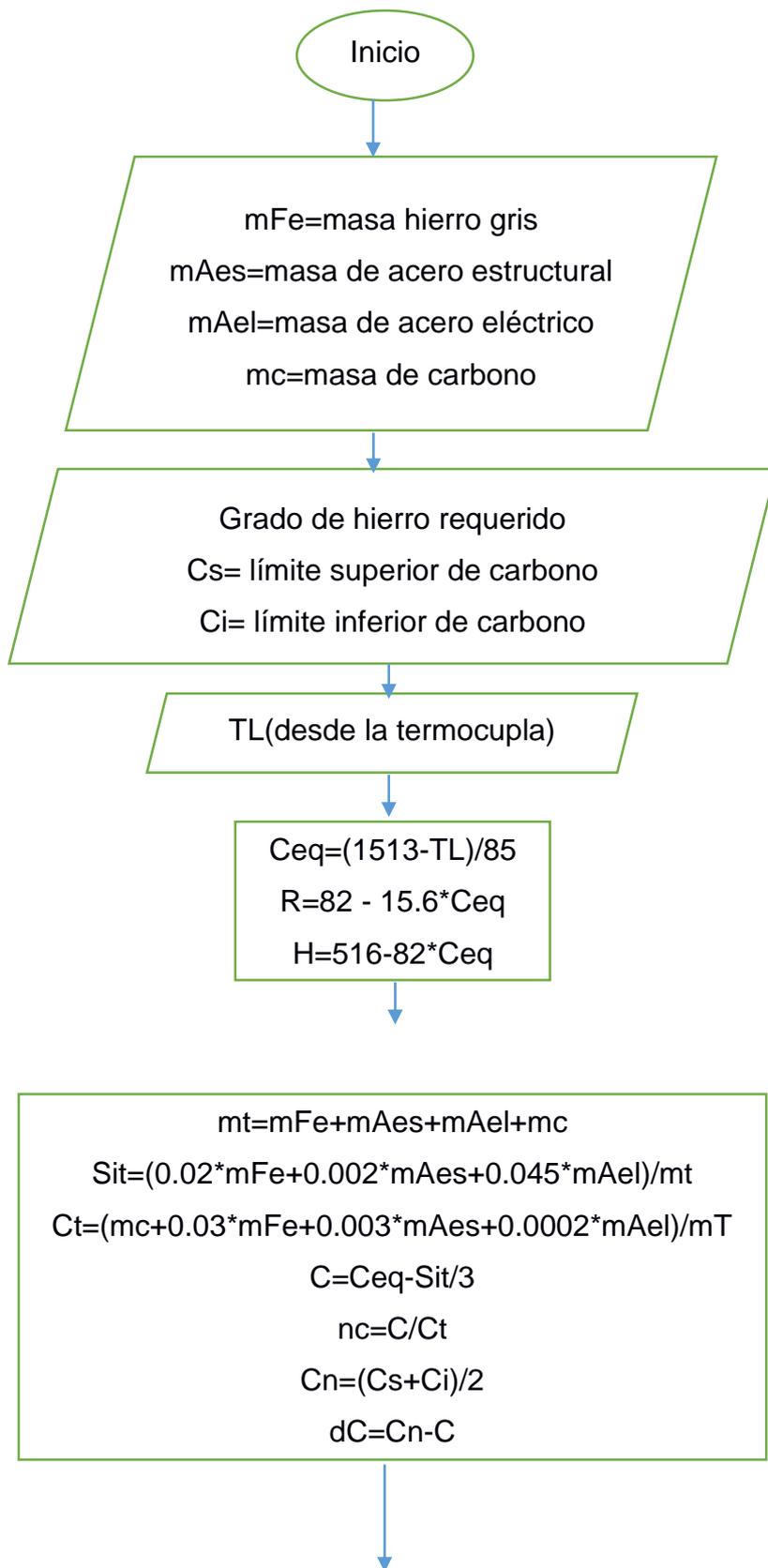
Apéndice B

Tabla de la composición química de hierro gris

TIPO/ CLASE	COMPOSICIÓN					
	C	Si	P	S	Mn	C equivalente
	%	%	%	%	%	Promedio
Nº 150 sección delgada 2,2 cm	3,50 - 3,80	2,40 a 2,60	0,20 - 0,80	0,08 - 0,13	0,50 - 0,70	4,56
Nº 150 sección media 3,10 cm	3,40 - 3,80	2,30 - 2,50	0,20 - 0,80	0,08 - 0,08	-----	4,34
Nº 150 sección gruesa 5,10 cm	3,10 - 3,30	2,20 - 2,40	0,20 - 0,40	0,08 - 0,13	0,50 - 0,80	3,98
Nº 175 sección delgada 2,2 cm.	3,30 - 3,50	2,20 - 2,40	0,20 - 0,50	0,08 - 0,13	0,50 - 0,80	4,2
Nº 175 sección media 3,10 cm.	3,20 - 3,40	2,20 - 2,40	0,15 - 0,40	0,08 - 0,12	0,50 - 0,80	4,08
Nº 175 sección gruesa 5,10 cm.	3,00 - 3,30	1,90 - 2,20	0,15 - 0,25	0,08 - 0,12	0,50 - 0,80	3,82
Nº 200 sección delgada 2,2 cm.	3,20 - 3,40	2,10 - 2,30	0,15 - 0,30	0,08 - 0,12	0,50 - 0,80	4,03
Nº 200 sección media 3,10 cm.	3,10 - 3,30	2,10 - 2,30	0,15 - 0,25	-----	-----	3,92
Nº 200 sección gruesa 5,10 cm.	2,90 - 3,20	1,70 - 2,10	0,15 - 0,25	0,08 - 0,12	0,45 - 0,70	3,68
Nº 225 sección delgada 2,2 cm.	3,20 - 3,40	2,10 - 2,30	0,15 - 0,30	0,08 - 0,12	0,50 - 0,80	4,03
Nº 225 sección media 3,10 cm.	3,10 - 3,30	2,10 - 2,30	0,15 - 0,25	-----	-----	3,92
Nº 225 sección gruesa 5,10 cm.	2,90 - 3,20	1,70 - 2,10	0,15 - 0,25	0,08 - 0,12	0,45 - 0,70	3,68
Nº 250 sección delgada 2,2 cm.	3,10 - 3,30	2,00 - 2,20	0,15 - 0,30	0,08 - 0,12	0,45 - 0,70	3,9
Nº 250 sección media 3,10 cm.	3,00 - 3,25	1,80 - 2,10	0,15 - 0,25	0,07 - 0,12	0,46 - 0,70	3,77
Nº 250 sección gruesa 5,10 cm.	2,80 - 3,10	1,60 - 2,00	0,10 - 0,20	0,08 - 0,12	0,45 - 0,70	3,54
Nº 275 sección delgada 2,2 cm.	3,00 - 3,20	1,90 - 2,20	0,10 - 0,25	0,07 - 0,12	0,45 - 0,65	3,77
Nº 275 sección media 3,10 cm.	2,95 a 3,15	1,70 - 2,00	0,10 - 0,20	0,08 - 0,11	0,45 - 0,70	3,65
Nº 275 sección gruesa 5,10 cm.	2,75 - 3,00	1,50 - 1,90	0,07 - 0,15	0,05 - 0,12	0,50 - 0,70	3,42
Nº 300 sección delgada 2,2 cm.	3,00 - 3,20	1,90 - 2,20	0,10 - 0,25	0,07 - 0,12	0,45 - 0,65	3,77
Nº 300 sección media 3,10 cm.	2,95 a 3,15	1,70 - 2,00	0,10 - 0,20	0,08 - 0,11	0,45 - 0,70	3,65
Nº 300 sección gruesa 5,10 cm.	2,75 - 3,00	1,50 - 1,90	0,07 - 0,15	0,05 - 0,12	0,50 - 0,70	3,42
Nº 325 sección delgada 2,2 cm.	2,90 - 3,10	1,70 - 2,10	0,10 - 0,20	0,08 - 0,12	0,50 - 0,70	3,62
Nº 325 sección media 3,10 cm.	2,70 - 3,00	1,70 - 2,00	0,10 - 0,20	0,08 - 0,11	0,60 - 0,80	3,45
Nº 325 sección gruesa 5,10 cm.	2,55 - 2,85	1,40 - 1,70	0,07 - 0,15	0,08 - 0,11	0,60 - 0,80	3,2
Nº 350 sección delgada 2,2 cm.	2,90 - 3,10	1,70 - 2,10	0,10 - 0,20	0,08 - 0,12	0,50 - 0,70	3,62
Nº 350 sección media 3,10 cm.	2,70 - 3,00	1,70 - 2,00	0,10 - 0,20	0,08 - 0,11	0,60 - 0,80	3,45
Nº 350 sección gruesa 5,10 cm.	2,55 - 2,85	1,40 - 1,70	0,07 - 0,15	0,08 - 0,11	0,60 - 0,80	3,2
Nº 375 sección delgada 2,2 cm.	2,70 - 3,00	1,90 - 2,20	0,10 - 0,20	0,08 - 0,12	0,50 - 0,70	3,51
Nº 375 sección media 3,10 cm.	2,50 - 2,85	1,90 - 2,10	0,05 - 0,15	0,05 - 0,10	0,70 - 1,00	3,37
Nº 375 sección gruesa 5,10 cm.	2,50 - 2,80	1,20 - 1,50	0,07 - 0,15	0,05 - 0,12	0,50 - 0,80	3,09
Nº 400 sección delgada 2,2 cm.	2,70 - 3,00	1,90 - 2,20	0,10 - 0,20	0,08 - 0,12	0,50 - 0,70	3,51
Nº 400 sección media 3,10 cm.	2,50 - 2,85	1,90 - 2,10	0,05 - 0,15	0,05 - 0,10	0,70 - 1,00	3,37
Nº 400 sección gruesa 5,10 cm.	2,50 - 2,80	1,20 - 1,50	0,07 - 0,15	0,05 - 0,12	0,50 - 0,80	3,09

El carbono equivalente es calculado de la siguiente manera: El contenido de carbono más 0,3 veces la suma del contenido de silicio y boro; Algunos usan el contenido de carbono más 1/3 el contenido de silicio.

APÉNDICE C
ALGORITMO PARA EL CÁLCULO Y CORRECCIÓN DE
CONTENIDO DE C



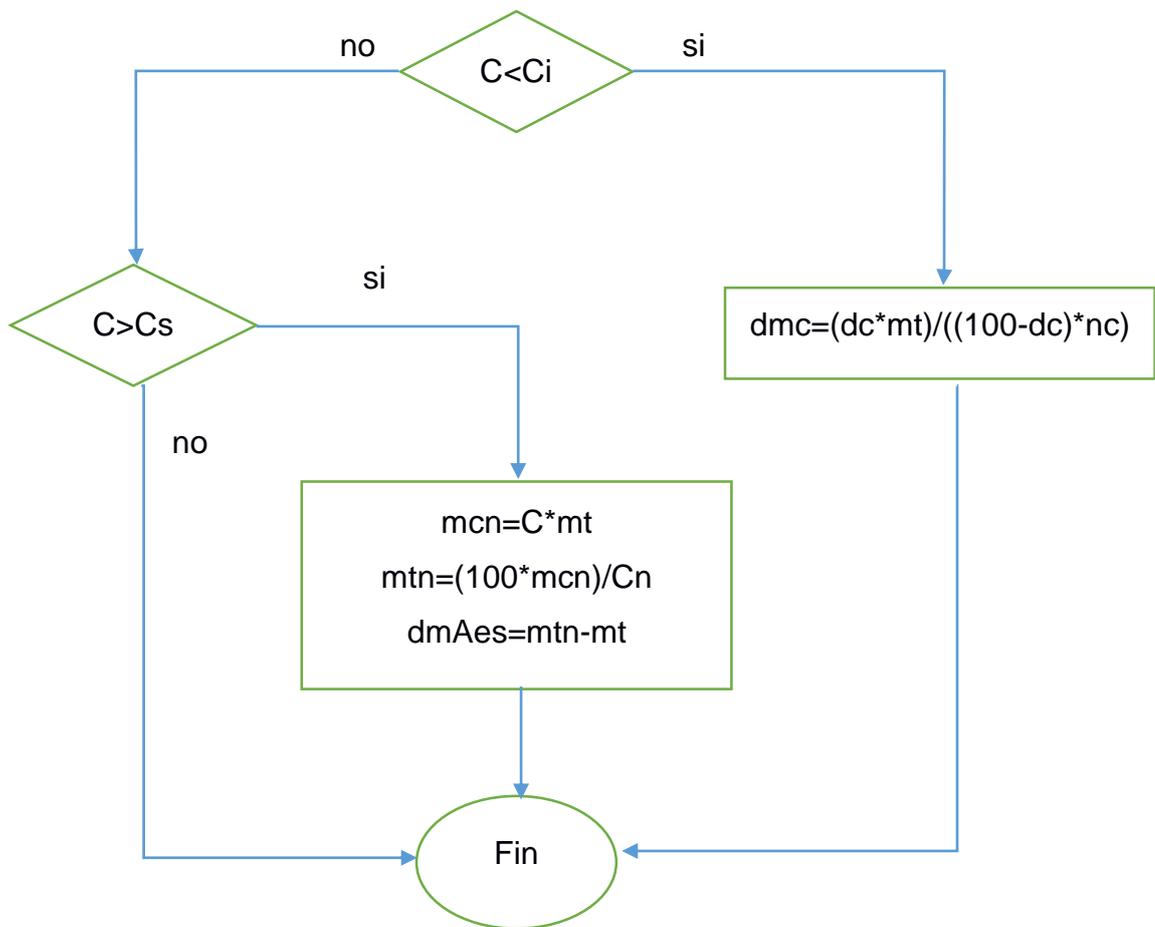


Figura 4.2 Algoritmo para calcular el contenido de carbono

Donde:

- mFe es a masa de hierro gris en Kg.
- mAes es la masa de acero estructural en Kg.
- mAel es la masa de acero eléctrico en Kg.
- Cs es el límite superior del contenido de carbono de la norma en %.
- Ci es el límite inferior del contenido de carbono de la norma en %.
- TL es la temperatura de liquidus censado con la termocupla en °C.
- Ceq es el carbono equivalente, es adimensional.
- R es la resistencia a la tracción Kpsi.
- H es la dureza en escala Brinell.
- mt es la masa total de la colada en Kg.

- S_{it} es el porcentaje de silicio teórico.
- C_t es el porcentaje de carbono teórico.
- C es el contenido real de carbono de la colada en %
- n_c es la eficiencia de recarburización.
- C_n es el contenido medio de carbono de la norma
- dC es la diferencia entre el contenido medio y el real
- d_{mc} es la diferencia de masa de carbono que se debe añadir
- m_{cn} es la nueva masa de carbono.
- m_{tn} es la nueva masa total
- d_{mAes} es la diferencia de masa que se debe añadir

Apéndice D
Programa de Labview

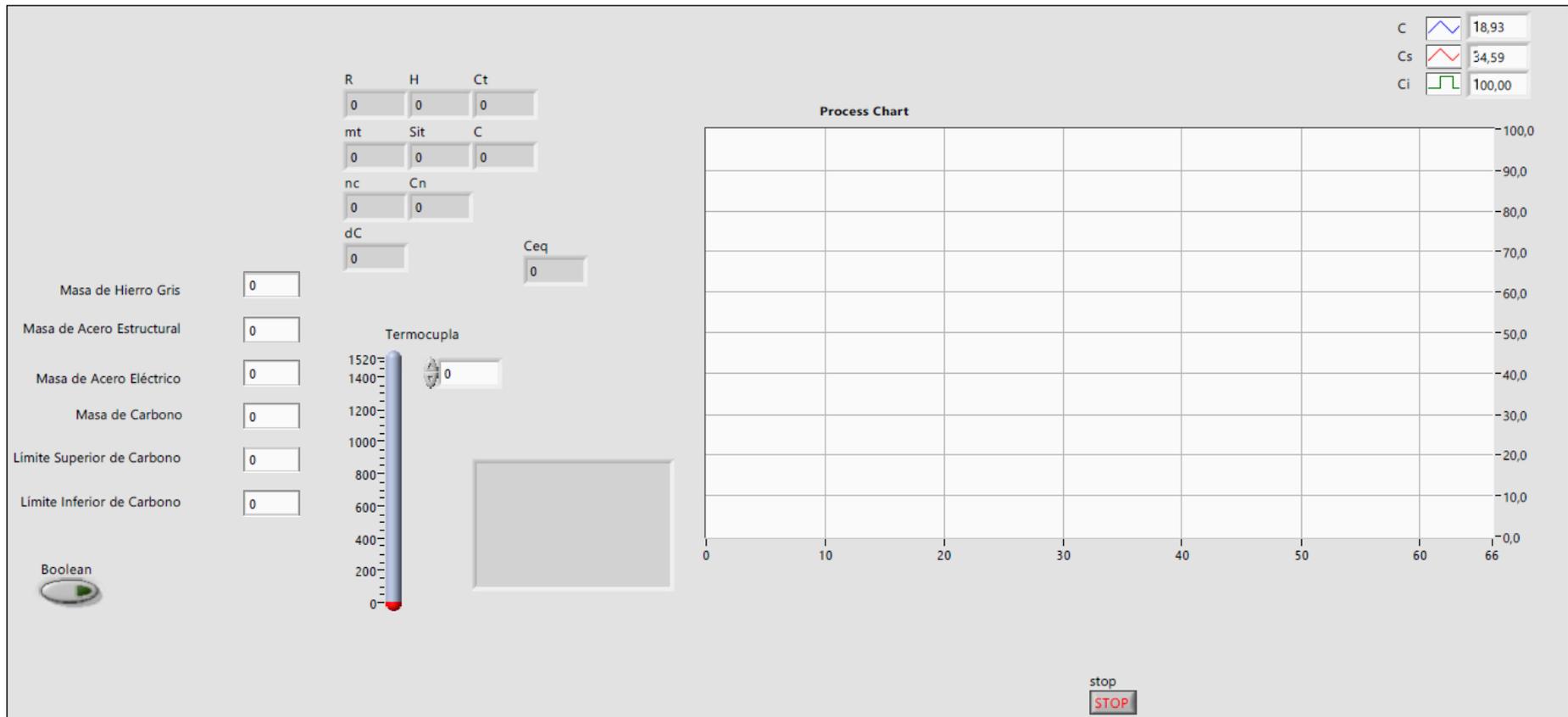


Figura 4.3 Interfaz del usuario

Elaboración Propia

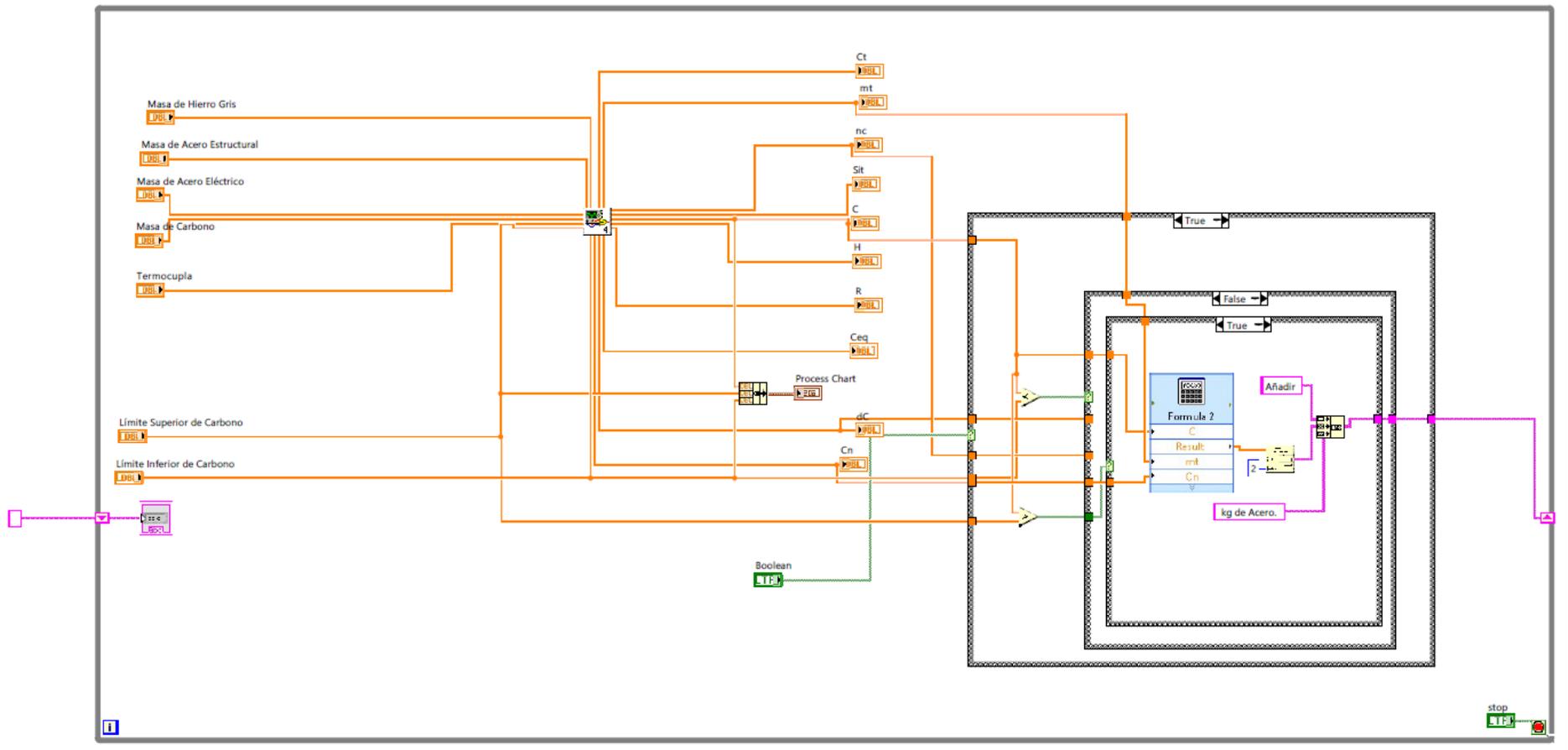


Figura 4.4 Programa de LabView

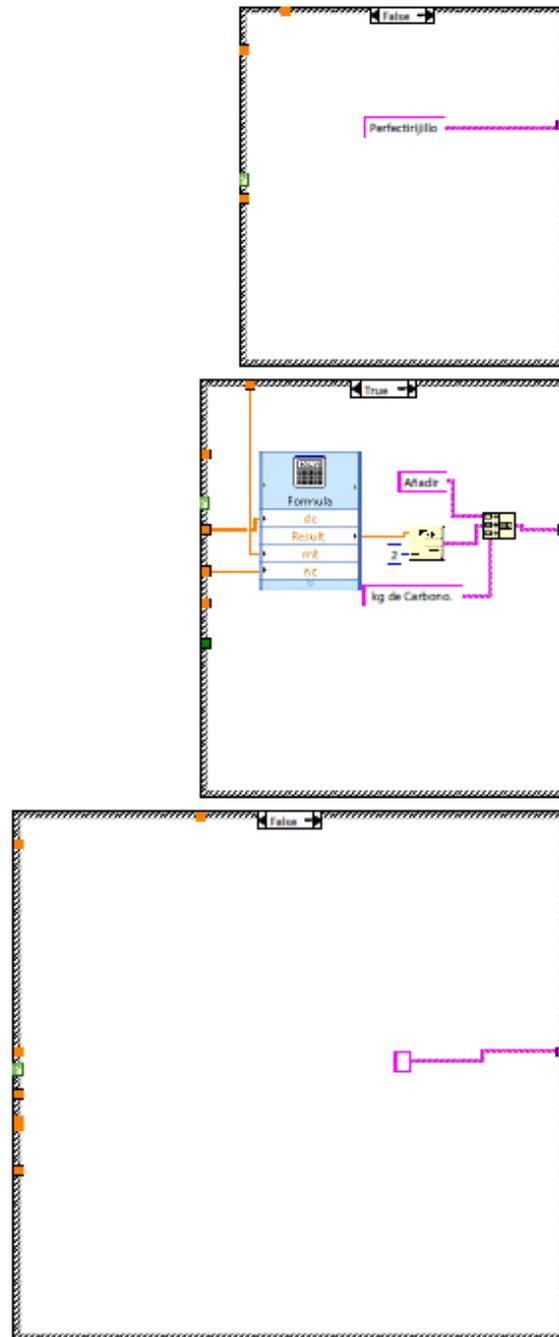


Figura 4.5 Estructura de los condicionales

Elaboración propia

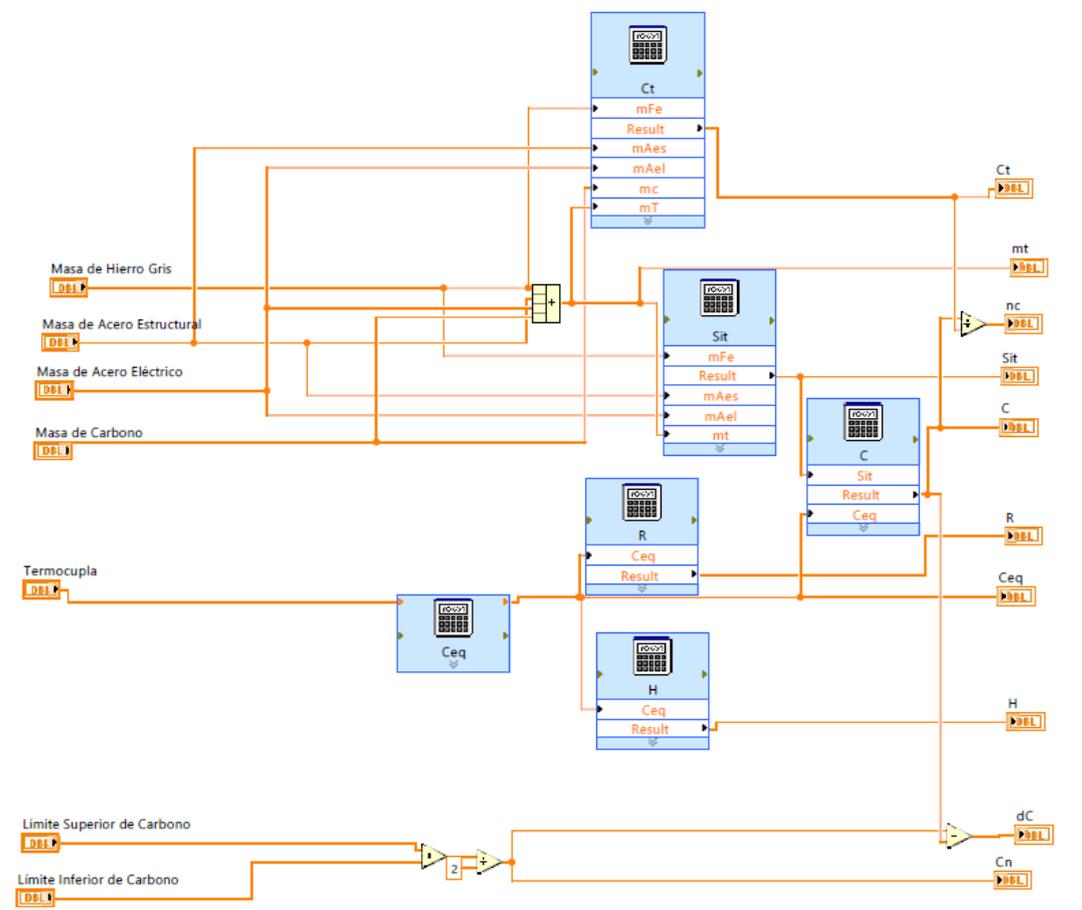


Figura 4.6 Fórmulas para el cálculo del contenido de carbono

Elaboración propia

Apéndice E
Estimación de costos

Tabla 4.1 Salarios

Cargo	Cantidad	Sueldo	Anual	Décimo tercero	Décimo cuarto	Fondo de reserva	Aporte patronal	Subtotal	Total
Gerente general	1	1000	12000	1000	366	1000	1338	15704	\$ 15.704,00
Gerente administrativo	1	700	8400	700	366	700	936,6	11102,6	\$ 11.102,60
Gerente de planta	1	800	9600	800	366	800	1070,4	12636,4	\$ 12.636,40
Soldador	1	450	5400	450	366	450	602,1	7268,1	\$ 7.268,10
Auxiliar	1	366	4392	366	366	366	489,708	5979,708	\$ 5.979,71
Moldeador	2	450	5400	450	366	450	602,1	7268,1	\$ 14.536,20
Auxiliar	1	366	4392	366	366	366	489,708	5979,708	\$ 5.979,71
Cocinero	1	366	4392	366	366	366	489,708	5979,708	\$ 5.979,71
Limpieza	1	366	4392	366	366	366	489,708	5979,708	\$ 5.979,71
Total									\$ 85.166,13

Elaboración propia

Tabla 4.2 Costo de los EPPs

Equipo de protección personal	Cant. Por año	Costo unitario	# de obreros	Total
Camisa	2	10	7	140
Pantalón	1	20	7	140
Botas	1	40	7	280
Mangas	1	6	4	24
Mascara para soldar	1	10	1	10
Delantal	1	6	4	24
Casco	1	15	7	105
Guantes	3	5	7	105
				828

Elaboración propia

Tabla 4.3 Costo de alimentación

Alimentos	Costo unitario	Anual por persona	Subtotal
Media mañana	1	250	\$ 2500
Almuerzo	2	500	\$ 5000
Agua	0,25	62,5	\$ 625
			\$ 8125

Elaboración propia

Tabla 4.4 Costo de los servicios básicos

Servicios Básicos	por mes
luz	150
agua	50
internet	30
arriendo	400
impuesto	50
seguro	80
total	760

Elaboración propia

Tabla 4.5 Costo de la energía del horno

Masa de hierro	Tiempo	Potencia del Horno	Costo del KW-H	Costo de fundir 400 kg
400 kg	4 Horas	433	0.091 \$/kw-h	\$ 157.61

Elaboración propia

Tabla 4.6 Costo de la energía del molino

Masa de hierro	Tiempo de uso	Potencia del molino	Costo del KW-H	Costo de fundir 400 kg
400 kg	1.5	25 Hp (18.64 kw)	0.091 \$/kw-h	\$ 2.54

Elaboración propia

Tabla 4.7 Costo del GLP industrial

Masa de GLP	Tiempo de uso	Potencia	Costo \$/kg	Costo del Glp
15 kg	-	-	0.87	\$ 13.15

Elaboración propia

Tabla 4.8 Costo de la materia prima

Materia prima	\$/kg
Hierro gris	0,35
Acero estructural	0,16
Acero eléctrico	0,16
Grafito	6
Ferrosilicio	5

Elaboración propia

Tabla 4.9 Costo de la materia prima usando 50% de hierro gris

	Kg	\$
hierro gris	200	70
acero estructural	100	16
acero eléctrico	100	16
grafito	6	36

Ferrosilicio	4	20
Total	410	158
Costo por kilo	0,385	

Elaboración propia

Tabla 4.10 Costo de la materia prima sin utilizar hierro gris

	Kg	\$
Acero estructural	200	32
Acero eléctrico	200	32
Grafito	14,12	84,71
Ferrosilicio	4	20
Total	418,12	168,71
Costo por kilo	0,403	

Elaboración propia

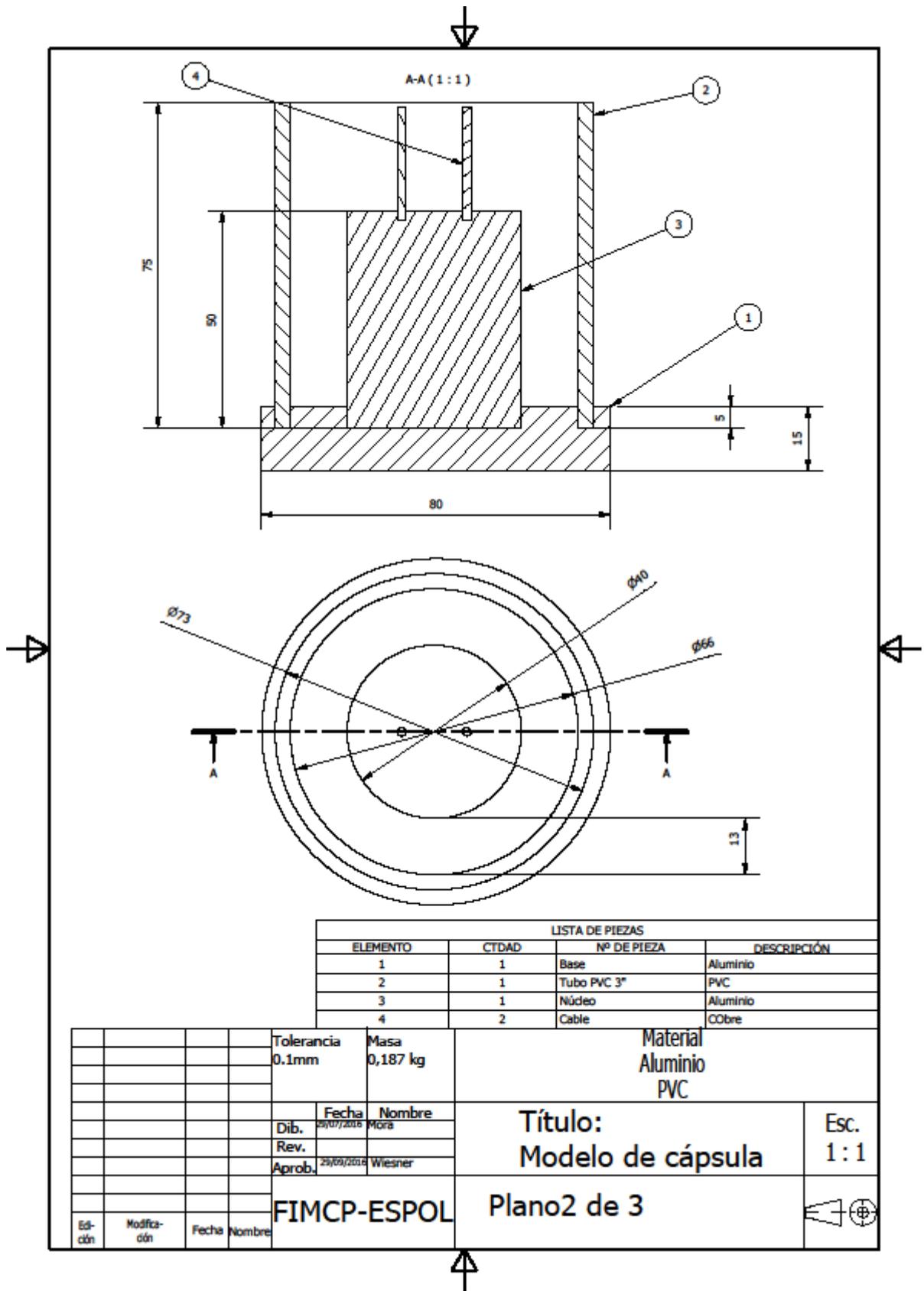
Apéndices F

Planos

Plano 1. Plano isométrico del molde de la cápsula

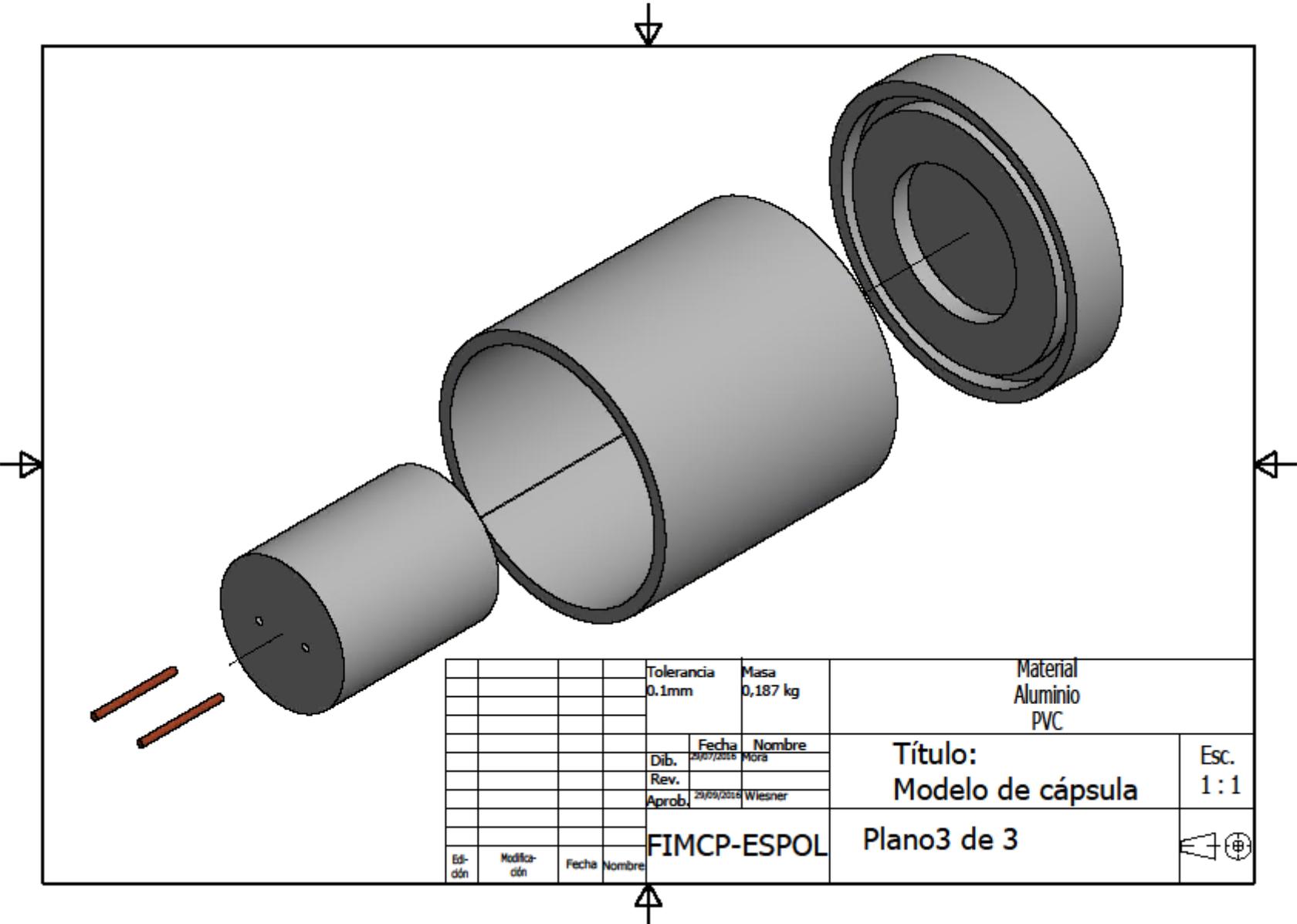
Plano 2 .Plano del molde de la cápsula

Plano 3 .Plano del despiece del molde



LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Base	Aluminio
2	1	Tubo PVC 3"	PVC
3	1	Núcleo	Aluminio
4	2	Cable	Cobre

			Tolerancia 0.1mm	Masa 0,187 kg	Material Aluminio PVC	
			Fecha 29/07/2016	Nombre Mora	Título: Modelo de cápsula	
			Rev.	Wiesner	Esc. 1 : 1	
			Aprob.		Plano2 de 3	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	FIMCP-ESPOL		



				Tolerancia 0.1mm	Masa 0,187 kg	Material Aluminio PVC	
						Título: Modelo de cápsula	Esc. 1:1
						Plano3 de 3	
Edi- ción	Modifi- ción	Fecha	Nombre	FIMCP-ESPOL			

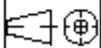
Tolerancia
0.1mm
 Masa
0,187 kg
 Dib. 24/07/2016 MORA
 Rev.
 Aprob. 29/09/2016 Wiesner

Material
Aluminio
PVC

Título:
Modelo de cápsula

Esc.
1:1

Plano3 de 3



FIMCP-ESPOL

Edi-
ción Modifi-
ción Fecha Nombre