

# SOFTWARE DE ANÁLISIS TÉRMICO DUAL SATD



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2004

SOFTWARE DE ANÁLISIS TÉRMICO DUAL  
SATD

EDINSON GERARDO BECERRA SÁNCHEZ  
CARLOS AUGUSTO VERA ARCINIEGAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2004

SOFTWARE DE ANÁLISIS TÉRMICO DUAL  
SATD

EDINSON GERARDO BECERRA SÁNCHEZ  
CARLOS AUGUSTO VERA ARCINIEGAS

Trabajo de grado para optar el título de  
INGENIERO ELECTRÓNICO

Director:  
ING. JOSE ALEJANDRO AMAYA PALACIO UIS  
Codirector:  
ING. ARNALDO ALONSO BAQUERO UIS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2004

*A Dios por darme la vida.*

*A mi Madre y mi Padre que  
trabajaron en su juventud para  
darme esta oportunidad.*

*A mis hermanos quienes han creído  
en mi*

*A mis hijos Edson Estiben,  
Johann Julian, Andrés David,  
Diana Carolina, Natalia, Liseth  
Cecilia, Juan Felipe, Sebastián  
Fernando y Cristian.*

*A mi incondicional y gran amiga  
Adriana Milena Cáceres R.*

*Carlos Augusto Vera Arciniegas*

*A Dios por permitirme vivir y  
hacerme quien soy.*

*A mi Madre por acompañarme y  
apoyarme siempre a pesar de las  
adversidades y por brindarme su amor .*

*A mis sobrinos Camilito Y  
Nicolás por ser mi fuente de  
inspiración.*

*A mi Padre y a toda mi familia que  
siempre creen en mi.*

*A, y especialmente a mi tío  
Hernando por confiar en mi y esperar  
mi ayuda .*

*Edinson Gerardo Becerra Sánchez*

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los profesores, de la Escuela de Ingeniería Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones, especialmente al profesor y amigo José Alejandro Amaya y al profesor Ricardo Gálvez S. por su infinita colaboración. Al profesor, de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, Arnaldo Alonso Baquero, por su asesoría en los conceptos metalúrgicos y de fundición. A los técnicos del laboratorio de fundición, Daniel, Mario y Javier por su ayuda en la ejecución de pruebas y constante motivación para la elaboración de este trabajo. A todas las personas que de una u otra manera nos colaboraron en el desarrollo de este trabajo.

A nuestros familiares y amigos, en quienes encontramos un soporte constante durante la ejecución de este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN.....   | 4  |
| 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y MATEMÁTICA DE LAS FUNDICIONES Y EL ANÁLISIS TÉRMICO ..... | 6  |
| 1.1 MICROESTRUCTURA DE LAS FUNDICIONES .....  | 6  |
| 1.1.1 Grafito.....  | 6  |
| 1.1.2 Cementita.....  | 7  |
| 1.1.3 Ferrita.....  | 7  |
| 1.1.4 Austenita.....  | 7  |
| 1.1.5 Perlita.....  | 7  |
| 1.2 CLASIFICACIÓN DE LAS FUNDICIONES .....  | 8  |
| 1.2.1 Fundiciones Grises.....   | 9  |
| 1.2.2 Fundiciones Blancas.....  | 9  |
| 1.3 ALEACIONES Fe-C PURAS .....   | 10 |
| 1.4 ALEACIONES Fe-C POLICOMPONENTES .....   | 12 |
| 1.4.1 Temperatura de liquidus TGL.....  | 13 |
| 1.4.2 Temperatura de Liquidus TAL.....  | 15 |
| 1.4.3 Temperatura de Solidus Ts.....  | 16 |
| 1.4.4 Coordenadas Eutécticas TE y CET.....  | 16 |
| 1.4.5 Rango de temperaturas $\Delta TE = TE - CET$ .....                              | 17 |
| 1.4.6 Carbono equivalente eutéctico CEe y grado de saturación eutéctico Sc .....      | 17 |
| 1.5 ANÁLISIS TÉRMICO DE LAS FUNDICIONES.....  | 18 |
| 1.5.1 Primera y segunda derivada de la curva de enfriamiento o calentamiento.....     | 19 |
| 1.6 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS CURVAS DE ENFRIAMIENTO.....                      | 19 |
| 1.6.1 Curva de Enfriamiento en Solidificación Blanca.....                             | 19 |
| 1.6.2 Curva de Enfriamiento en Solidificación gris.....                               | 20 |
| 2. PLANTEAMIENTO Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ANÁLISIS TÉRMICO DUAL SATD.....         | 26 |
| 2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE ANÁLISIS TÉRMICO DUAL IMPLEMENTADO, SATD.....  | 27 |
| 2.1.1 Termocuplas.....  | 30 |
| 2.1.2 Copas o crisoles y lanza de inmersión.....                                      | 31 |
| 2.1.3 Cables compensados y conectores.....  | 32 |
| 2.1.4 Unidad conversora.....  | 33 |
| 2.1.5 Computador personal.....  | 33 |
| 3. UNIDAD CONVERSORA.....   | 34 |
| 3.1 FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....   | 34 |
| 3.2 TARJETA DE CIRCUITO IMPRESO 6BP04-2.....  | 35 |
| 3.2.1 Módulos 6B11.....   | 36 |
| 3.2.2 Conector RS-232C (RS-232 CONECTOR).....   | 39 |
| 3.2.3 Conversor RS-232C a RS-485.....   | 40 |

|  |    |
|--|----|
| 3.2.4 Conector RS-485. ....  | 41 |
| 3.2.5 Repetidor RS-485. ....   | 41 |
| 3.2.6 Sensores CJC. ....   | 41 |
| 3.2.7 Puente para configuración. ....                                    | 41 |
| 3.2.8 Diodo Shunt. ....  | 41 |
| 3.2.9 Fusible. ....  | 41 |
| 3.2.10 Indicadores de estado. ....                                       | 41 |
| 4. SOFTWARE DE ANÁLISIS TÉRMICO DUAL, SATD. ....                         | 43 |
| 4.1 CRITERIOS DE DISTINCIÓN DEL SOFTWARE UTILIZADO. ....                 | 43 |
| 4.2 INTRODUCCIÓN AL TRABAJO CON LABVIEW 6.i. ....                        | 43 |
| 4.2.1 Adquisición de datos con LabVIEW 6.i. ....                         | 43 |
| 4.2.2 Estructura de los instrumentos virtuales. ....                     | 44 |
| 4.2.3 Programación modular. ....   | 44 |
| 4.3 SOFTWARE ELABORADO. ....   | 44 |
| 4.3.1 Inicialización de variables y configuración del puerto serie. .... | 45 |
| 4.3.2 Adquisición de las señales. ....                                   | 47 |
| 4.3.3 Compensación y Ajuste. ....  | 48 |
| 4.3.4 Procesamiento. ....  | 51 |
| 4.3.5 Almacenamiento y presentación. ....                                | 62 |
| 4.3.6 Procesamiento lanza. ....  | 65 |
| 4.3.7 Barra de menús. ....   | 65 |
| 5. MANUAL DE USUARIO. ....   | 76 |
| SISTEMA DE ANÁLISIS TÉRMICO DUAL. ....                                   | 76 |
| SATD. ....   | 76 |
| 5.1 INTRODUCCIÓN. ....   | 76 |
| 5.2 REQUERIMIENTOS DE HARDWARE Y SOFTWARE. ....                          | 76 |
| 5.2.1 Unidad Conversora. ....  | 76 |
| 5.2.2 Computador. ....   | 77 |
| 5.2.3 Copas, lanza y Soportes. ....                                      | 77 |
| 5.2.4 Cables compensados y conectores. ....                              | 77 |
| 5.2.5 Pistola para calibración. ....                                     | 77 |
| 5.3 PRECONFIGURACIÓN DEL SISTEMA. ....                                   | 77 |
| 5.4 OPERACIÓN NORMAL. ....   | 78 |
| 5.5 BARRA DE MENÚS. ....   | 81 |
| 5.5.1 Redibujar. ....  | 81 |
| 5.5.2 Configuración. ....  | 82 |
| 5.5.3 General. ....  | 90 |
| 5.5.4 Hw. ....   | 91 |
| 5.5.5 Sw. ....   | 91 |
| 5.5.6 Calibración. ....  | 91 |
| 5.5.7 Diagnostico. ....  | 92 |
| 5.5.8 C.F.B. y C.F.G. ....   | 94 |
| 5.5.9 Imprimir. ....   | 95 |
| 5.5.10 Ayuda. ....   | 95 |
| 5.5.11 Salir. ....   | 95 |

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS..... 97  
CONCLUSIONES..... 103  
RECOMENDACIONES..... 104  
BIBLIOGRAFÍA..... 105  
ANEXOS ..... 109

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Fundición gris con estructura totalmente ferrítica (A) y totalmente perlítica (B)..            | 9  |
| Figura 2. Microestructura de una fundición Blanca. ....  | 10 |
| Figura 3. Diagrama de equilibrio para aleaciones Fe-C puras .....  | 11 |
| Figura 4. Sistema de equilibrio ternario hierro-carbono-silicio. ....                                    | 14 |
| Figura 5. Curva de enfriamiento y sus derivadas. ....  | 20 |
| Figura 6. Curvas de enfriamiento de solidificación gris y blanca y sus derivadas.....                    | 21 |
| Figura 7. Diagrama a bloques del MELTLAB.....  | 26 |
| Figura 8. Esquema general del Sistema de Análisis Térmico Dual .....                                     | 29 |
| Figura 9. Termocuplas usadas en el SATD.....   | 30 |
| Figura 10. Termocupla tipo K incrustada en una copa de arena .....                                       | 30 |
| Figura 11. Copa de arena y soporte donde se instala.....   | 31 |
| Figura 12. Lanza de Inmersión.....   | 32 |
| Figura 13. Cables compensados y conectores.....  | 32 |
| Figura 14. Unidad Conversora .....   | 34 |
| Figura 15. Fuente de Alimentación de Potencia.....   | 35 |
| Figura 16. Tarjeta de circuito impreso 6BP04-2.....  | 35 |
| Figura 17. Esquema de la tarjeta 6BP04-2.....  | 36 |
| Figura 18. Módulos 6B11 .....  | 37 |
| Figura 19. Diagrama a bloques del módulo 6B11 .....  | 39 |
| Figura 20. Cable RS-232C .....   | 40 |
| Figura 21. Diagrama a bloques del software implementado.....   | 46 |
| Figura 22. Configuración del puerto serie. ....  | 47 |
| Figura 23. Enviar comando de conversión por el puerto serie en LabVIEW. ....                             | 48 |
| Figura 24. Leer respuesta de conversión del buffer de recepción del puerto serie de<br>LabVIEW.....      | 48 |
| Figura 25. Petición y lectura de la temperatura de unión fría CJC.....                                   | 49 |
| Figura 26. Icono conversor de temperatura a milivoltios. ....  | 49 |
| Figura 27. Icono conversor de mili-voltios a grados centígrados. ....                                    | 50 |
| Figura 28. Rutina para ajustar la tabla mV - °C de la termocupla tipo K. ....                            | 51 |
| Figura 29. Etapas de procesamiento de los datos. ....  | 52 |
| Figura 30. Rutina para la implementación del filtro de media móvil.....                                  | 53 |
| Figura 31. VI Derivative x(t).....   | 54 |
| Figura 32. Calculo de la primera y segunda derivada. ....  | 55 |
| Figura 33. Algoritmo Preguntas y Cálculos Blancos. ....  | 57 |
| Figura 34. Algoritmo Preguntas y Cálculos Grises. ....   | 58 |
| Figura 35. Sub. vi de Preguntas y Cálculos Blancos y Preguntas y Cálculos Grises.....                    | 59 |
| Figura 36. Programación en LabVIEW para tomar una ruta que lleva a capturar un punto<br>específico. .... | 59 |
| Figura 37. Programación en LabVIEW para capturar T <sub>máx</sub> . ....                                 | 60 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 38. Código implementado para calcular el porcentaje de austenita y eutéctico formado.....                         | 61 |
| Figura 39. Cálculo del %C haciendo uso de la herramienta “formula node”.....   | 62 |
| Figura 40. Rutina implementada para salvar los datos.....  | 62 |
| Figura 41. Presentación del SATD.....  | 64 |
| Figura 42. Herramienta TipStrip.....   | 65 |
| Figura 43. Código para el procesamiento de la Lanza.....   | 65 |
| Figura 44. Diagrama a bloques de las opciones adicionales que se presentan en la barra de menús del SATD.....            | 67 |
| Figura 45. Estructura case multiple usada para elegir el sub.VI a ejecutar.....  | 68 |
| Figura 46. Subrutina para seleccionar un archivo a visualizar.....   | 68 |
| Figura 47. Almacenamiento, modificación y lectura de los datos de configuración.....                                     | 70 |
| Figura 48. Calibración de los canales.....   | 71 |
| Figura 49. Rutina implementado para el sub.VI diagnostico.....   | 72 |
| Figura 50. Implementación de los cursores.....   | 73 |
| Figura 51. Icono usado para imprimir el panel frontal del SATD.....  | 73 |
| Figura 52. Rutina implementada para salir del SATD.....  | 74 |
| Figura 53. Conexiones correctas de los cables compensados en los tomas.....  | 78 |
| Figura 54. Presentación principal del SATD.....  | 79 |
| Figura 55. Posición correcta de las copas en los soportes.....   | 80 |
| Figura 56. Archivos almacenados de adquisiciones previas.....  | 82 |
| Figura 57. Menú de configuración.....  | 83 |
| Figura 58. Contraseña de acceso al menú configuración.....   | 84 |
| Figura 59. Menú de configuración COPA No. 1.....   | 85 |
| Figura 60. Menú de configuración LANZA.....  | 86 |
| Figura 61. Rangos Químicos.....  | 87 |
| Figura 62. Constantes químicas.....  | 88 |
| Figura 63. Límites de Captura.....   | 89 |
| Figura 64. Presentación de la pantalla.....  | 90 |
| Figura 65. Panel frontal de la herramienta de Calibración.....   | 92 |
| Figura 66. Pistola para la Calibración de los cables compensados.....  | 92 |
| Figura 67. Diagnostico.....  | 93 |
| Figura 68. Cursores en acción.....   | 94 |
| Figura 69. Herramientas de cursor, zoom y desplazamiento.....  | 95 |
| Figura 70. Ayuda SATD.....   | 95 |
| Figura 71. Salir del sistema.....  | 96 |
| Figura 72. Obtención de las muestra para análisis.....   | 97 |
| Figura 73. Muestras de fundición blanca y gris obtenidas.....  | 98 |
| Figura 74. Muestra analizada por espectrometría de chispa (Sicolsa S.A.).....  | 98 |
| Figura 75. Fotografía tomada a los resultados entregados por el análisis de espectrometría de chispa (Sicolsa S.A.)..... | 99 |

## LISTA DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1. Coordenadas de los puntos característicos del diagrama Fe – C puro.....        | 11  |
| Tabla 2. Constante $b_i$ y $m_i$ de los elementos más importantes en la fundición. .... | 13  |
| Tabla 3. Teclas de navegación para las opciones del menú.....                           | 81  |
| Tabla 4. Resultados entregados por el análisis de espectrometría de chispa .....        | 99  |
| Tabla 5. Resultados obtenidos en los tres ensayos hechos con el <i>SATD</i> .....       | 100 |

## LISTA DE ANEXOS

|  |     |
|--|-----|
| A. TERMOCUPLAS, CABLES COMPENSADOS Y CONECTORES.....                                 | 110 |
| B. REFERENCIAS TÉCNICAS DE LA SERIE 6B.....  | 117 |
| C. EL PUERTO SERIE DEL PC.....   | 121 |
| D. CONFIGURACIÓN, CONVERSIÓN Y ESTADO DE LOS MÓDULOS DE<br>ENTRADA ANÁLOGA 6B11..... | 134 |
| E. DIFERENCIACIÓN NUMÉRICA.....  | 150 |
| F. REGRESIÓN POLINOMIAL CON MÍNIMOS CUADRADOS.....                                   | 155 |

**TITULO\*: SOFTWARE DE ANÁLISIS TÉRMICO DUAL, SATD.**

**Autores: EDINSON GERARDO BECERRA SÁNCHEZ  
CARLOS AUGUSTO VERA ARCINIEGAS\*\*.**

**Palabras claves:** Equipo Análisis Térmico fundiciones, composición química, composición metalúrgica

**Descripción o contenido:** El Software de Análisis Térmico Dual, **SATD**, hace parte de una organización de dispositivos que tienen como función específica generar una herramienta de ayuda para el análisis de fundiciones en la industria metalúrgica.

En general el hardware que usa el **SATD** está conformado por un conjunto de tres sensores que transducen variaciones de temperatura en señales eléctricas. Dos de las temperaturas a medir provienen de una muestra de metal tomada de un horno cubilote en dos copas de arena que proporcionan un registro gráfico del enfriamiento de la muestra; la otra surge de la inmersión de una lanza en un crisol de vertido e informa la temperatura promedio de la fundición.

A partir del análisis de cada curva de enfriamiento y sus derivadas de temperatura respecto al tiempo, se encuentran puntos de inflexión o temperaturas críticas, que hacen parte de fórmulas como variables independientes para determinar parámetros de la composición química y metalúrgicos como son:

- Carbono Equivalente CE
- Porcentaje de Carbono %C
- Porcentaje de Silicio %Si
- Temperaturas eutécticas TCE y TGE
- Recalescencia REC
- Grado de subenfriamiento °Sub
- Tendencia a rechupes  $\Phi$
- Enfriamiento delta ED
- Porcentajes de Austenita y Eutéctico formado

El **SATD** es elaborado en el lenguaje de programación LabVIEW 6.i, es un sistema que trabaja en tiempo real, es decir, a medida que se van obteniendo datos, se linealizan, se presentan en pantalla, se analizan para identificar si corresponden a puntos críticos o de inflexión y se entregan los resultados correspondientes. Desde el punto de vista del ingeniero metalúrgico, el **SATD** es muy ventajoso, pues se comporta como un sistema realimentado, que procura la calidad de las piezas en fundición, antes de verter en los moldes.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad De Ingenierías Físico – Mecánicas, Escuela De Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Jose Alejandro Amaya Palacio

**TITLE<sup>\*</sup>: SOFTWARE OF DUAL THERMAL ANALYSIS, SATD.**

**Authors: EDINSON GERARDO BECERRA SÁNCHEZ  
CARLOS AUGUSTO VERA ARCINIEGAS <sup>\*\*</sup>.**

**Key words:** Equip Analysis Thermal foundries, chemical composition, composition metallurgy

**Description or content:** The Software of Dual Thermal Analysis, SATD, makes part of an organization of devices that has as function it specifies to generate a tool of help for the analysis of foundries in the industry metalúrgica.

In general the hardware that the SATD uses is conformed by a group of three sensors that they transform variations of temperature into electric signs. Two of the temperatures to measure come from a taken metal sample of an furnace cubilote in two cups of sand that provide a graphic registration of the cooling of the sample; the other one arises of the immersion of a lance in a hearth of having poured and she informs the temperature average of the foundry.

Starting from the analysis of each cooling curve and their derived of temperature regarding the time, they are inflection points or critical temperatures that make part of formulas like independent variables to determine parameters of the chemical composition and metallurgists like they are:

|  |      |
|--|------|
| Carbon Equivalent                            | CE   |
| Percentage of Carbon                         | % C  |
| Percentage of Silicon                        | % Si |
| Temperatures eutectics TCE and TGE           |      |
| Recalescence                                 | REC  |
| Undercooling of grade                        | °Sub |
| Tendency to shrinkage                        |      |
| Delta Freezing                               | ED   |
| Percentages of Austenita and formed Eutético |      |

The SATD is elaborated in the programming language LabVIEW 6.i, it is that is to say a system that works in real time, as they leave obtaining data, you linealizan, is presented in screen, they are analyzed to identify if they correspond to critical points or of inflection and they surrender the corresponding results. From the engineer's metallurgist point of view, the SATD is very advantageous, because he/she behaves as a system realimentado that offers the quality of the pieces in foundry, before pouring in the molds.

---

\* Grade work

\*\*Facultad De Ingenierías Físico – Mecánicas, Escuela De Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Jose Alejandro Amaya Palacio

## INTRODUCCIÓN

El control microestructural en las fundiciones es de máxima relevancia en el procesamiento de aleaciones avanzadas. De hecho, la microestructura de cualquier material dependerá de la historia térmica mediante una interacción compleja de diferentes eventos relacionados, por ejemplo la transferencia de calor, el gradiente de temperatura impuesto, el subenfriamiento, la nucleación y las tasas de crecimiento.

Cada día se le exige al fundidor, la obtención de piezas de características definidas; es decir, que cumplan con unos rangos de composición química determinados. Así el fundidor desea saber dos cosas cuando el metal es fundido en el horno:

¿El metal cuenta con la especificación requerida, y puede ser vertido?

¿Si no cuenta con la especificación, qué se necesita hacer para corregirla antes de verter en los moldes?

Cuanto más rápida la respuesta este disponible, más rápido será la corrección de la fundición, que ayudaría a aumentar la calidad y el número de fundiciones en un tiempo establecido.

Diferente a un taller de mecanizado, donde una pieza es trabajada, sus dimensiones se pueden comprobar durante el proceso y corregir hasta obtener los resultados requeridos, en una fundición de hierro, el metal deriva sus características durante su enfriamiento, y medir o realizar cambios durante este período no es posible. ¡Así, una vez que el metal se vierta en el molde, el "muerto es colado", literalmente!. Se descubren las características metalúrgicas cuando la pieza del molde se envía a mecanizado. Si se encuentra duro para mecanizar ha sucedido probablemente que la colada tiene carburos del límite de grano (que son imposibles de ver en el microscopio o medir usando un probador de dureza). O si la colada se encuentra porosa, significa que el bastidor o material colado tiene microporosidad.

Esto hace necesaria la realización de análisis químicos inmediatos. Los análisis por espectrometría, fluorescencia de rayos X, absorción atómica, son interesantes, pero requieren de una elevada inversión y el análisis es costoso.

Es posible superar estos problemas usando técnicas de análisis térmico para determinar la química básica y los parámetros metalúrgicos principales del metal y hacer las correcciones en el horno de fundición antes de verter.

El Análisis térmico o la manera de ver cómo un metal se solidifica, ha sufrido una evolución espectacular en esta década, y cada día se posiciona como el análisis que mejor se adapta a las condiciones de operación de las plantas de fundición.

El desarrollo y diseño de los componentes electrónicos que conforman un equipo de análisis térmico dual, lo consolidan como una herramienta de control muy apreciada en la búsqueda de la calidad de las fundiciones, ya que el avance tecnológico propone el manejo digital de fenómenos físicos continuos como la temperatura. Los dispositivos convertidores análogos digitales de elevada resolución y exactitud y los computadores personales de alta velocidad, acompañados por un notorio avance en el diseño de los programas (software) han permitido que el método del análisis térmico no solo determine la composición química de la fundición, representada en el valor del carbono equivalente, sino que permite además, visualizar su solidificación. De esta manera se puede conocer con antelación a la colada de las piezas, la tendencia de la fundición a dar una estructura determinada.

En este trabajo de grado se implementa la técnica de análisis térmico moderno en la elaboración de un Software de Análisis Térmico Dual *SATD*, que cuantifica adecuadamente la composición química y parámetros metalúrgicos de solidificación de fundiciones líquidas. Este software hace parte de un sistema denominado Sistema de Análisis Térmico Dual, definido como una organización de dispositivos con una función específica, cuyo trabajo en conjunto genera una gran herramienta de ayuda para el análisis de fundiciones en la industria metalúrgica. Dicho sistema lo conforman dos copas de arena con termocuplas en su interior, una lanza de inmersión, una tarjeta de circuito impreso 6BP04-2 y tres módulos 6B11 conversores y acondicionadores encargados de adquirir los datos de temperatura y transferirlos a un computador.

El *SATD* es elaborado bajo el lenguaje de programación gráfica LabVIEW 6i, adquiere datos de temperatura, procesa en forma dual, calcula resultados y presenta las curvas de enfriamiento con sus respectivas derivadas (de temperatura respecto al tiempo) en tiempo real.

Este libro está estructurado en cuatro capítulos. El capítulo uno presenta una fundamentación teórica y matemática detallada del método de análisis térmico moderno. Describiendo la microestructura y clasificación de las fundiciones y el análisis e interpretación de las curvas de enfriamiento y sus derivadas.

Se plantea y se describe el sistema de análisis térmico dual en el capítulo dos, y en el tres se expone detalladamente la unidad conversora.

El capítulo cuatro explica la estructura del código implementado en LabVIEW 6i. y el desarrollo de las secuencias que lo conforman.

Se cuenta con un manual de usuario que enseña el uso y manejo del software, en el capítulo cinco, y finalmente en el capítulo seis se corroboran los resultados de las pruebas efectuadas con el *SATD*.

## 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y MATEMÁTICA DE LAS FUNDICIONES Y EL ANÁLISIS TÉRMICO

Las fundiciones llamadas comúnmente "hierro colado" son aleaciones de hierro, carbono y silicio que generalmente contienen también manganeso, fósforo, azufre, magnesio, aluminio, estaño, vario, etc. Tienen mayor contenido de carbono que los aceros (2 a 4.5%) y adquieren su forma definitiva directamente por colada, no siendo nunca las fundiciones sometidas a procesos de deformación plástica ni en frío ni en caliente. En general, no son dúctiles ni maleables y no pueden forjarse ni laminarse.<sup>1</sup>

Teóricamente, las fundiciones pueden contener de 1,7 a 6,67% de carbono. Sin embargo, en la práctica, como se ha mencionado, su contenido varía de 2 a 4,5%, siendo lo más frecuente que oscile de 2,75 a 3,5%. El contenido de silicio suele oscilar de 0,5 a 3,5% y el de manganeso de 0,4 a 2%. Excepcionalmente, los contenidos en silicio y manganeso llegan algunas veces a 4%, y en ocasiones se fabrican fundiciones especiales hasta de 15% de silicio. Los porcentajes de azufre suelen oscilar de 0,01 a 0,20%, los de fósforo de 0,040 a 0,80% y en algunos casos excepcionales llega a 1,5%. Para conseguir ciertas características especiales, se fabrican fundiciones aleadas que además de los elementos citados, contienen también porcentajes variables de cobre, níquel, cromo, molibdeno, etc.

### 1.1 MICROESTRUCTURA DE LAS FUNDICIONES

Las fundiciones proveen ejemplos de aleaciones estructuralmente sensibles; las propiedades del metal son muy dependientes de su estructura metalográfica y varían respecto a esta.

Los componentes más importantes son:

1.1.1 Grafito. El grafito es una forma elemental del carbono. Es blando, untuoso, de color gris oscuro, con peso específico 2.25, que es aproximadamente 1/3 del que tiene el acero. Se presenta en estado libre en algunas clases de fundiciones, ejerciendo una influencia muy importante en sus propiedades y características. Estas dependen fundamentalmente de la forma del grafito, de su tamaño, cantidad y de la forma en que se encuentra distribuido.

En las fundiciones grises, que son las de mayor aplicación industrial, se presenta en forma de láminas u hojuelas. En las fundiciones maleables, se presenta en forma de nódulos y en otras especiales en forma esferoidal y vermicular.

---

<sup>1</sup> Hay algunas fundiciones que son tenaces y tiene cierta ductilidad. En este grupo se incluyen las fundiciones maleables y otras especiales como las "fundiciones dúctiles" de grafito esferoidal, cuya fabricación se ha iniciado hace muy pocos años.

La presencia de grafito en cantidades importantes baja la dureza, la resistencia y el modulo de elasticidad en comparación con los valores que corresponderían a las mismas microestructuras sin grafito. El grafito, además, reduce casi a cero la ductilidad, tenacidad y plasticidad. En cambio, mejora la resistencia al desgaste y a la corrosión. Actúa como un lubricante en mecanismos y piezas de maquinas y motores. También mejora la maquinabilidad y reduce las contracciones durante la solidificación.

Cuando se presenta en forma de nódulos (fundición maleable) o en forma esferoidal (fundición dúctil), la disminución de la resistencia y de la tenacidad es menor. Por ello estas fundiciones tienen mayores resistencias y alargamiento que las fundiciones grises ordinarias.

1.1.2 Cementita. El carbono en hierros colados puede existir completamente o en parte, en una forma combinada químicamente como  $Fe_3C$  (cementita). La cementita libre o maciza se desarrolla durante la solidificación de hierros blancos o enfriados rápidamente. La cementita es muy dura y quebradiza y confiere esas propiedades a los hierros en los cuales ella es su principal componente. El carbono formará cementita hasta 15 veces su porcentaje en peso. Así, una fundición blanca con 2.5% de carbono contendrá alrededor de 37.5% de cementita y por consiguiente será muy duro y quebradizo. La cementita también existe como parte constituyente de la perlita.

1.1.3 Ferrita. La ferrita puede ser definida como una solución sólida intersticial del carbono en el hierro, con una red cristalina centrada en el cuerpo, y pequeñas cantidades de carbono que la hacen dúctil y de resistencia moderada. En fundiciones, la ferrita contiene el silicio presente en el hierro. El silicio fortalece y endurece la ferrita dándole una dureza de 100 a 140 Bhn, de 20 a 30% de elongación y 50.000 a 70.000 psi de resistencia a la tensión, dependiendo del porcentaje de silicio presente.

Estructuralmente, la ferrita puede existir como ferrita libre o como ferrita en perlita. La ferrita libre predomina en fundiciones maleables y en fundiciones nodulares de máxima ductilidad.

1.1.4 Austenita. puede ser definida como una solución sólida intersticial de carbono, en el sistema de red cúbica centrada en las caras, que se forma durante la solidificación, y con un bajo enfriamiento cambia a perlita o a la mezcla de las dos. La austenita es una porción de la micro estructura a temperatura ambiente, es encontrada solo en fundiciones las cuales son especialmente aleadas con níquel para hacer la austenita estable a temperatura ambiente.

1.1.5 Perlita. Es un micro constituyente bifásico. Está formado por granos alargados de cementita en una matriz ferrítica. Cuando esta estructura laminar es muy fina (las láminas

son muy delgadas) la perlita se ve al microscopio óptico como negra. Sin embargo ambas fases, ferrita y cementita, en condiciones normales de ataque son blancas. El color oscuro o negro lo producen el gran número de límites de grano existentes entre la matriz ferrítica y las láminas de cementita.

## 1.2 CLASIFICACIÓN DE LAS FUNDICIONES

Las aleaciones coladas comercialmente se clasifican como *ferrosas* (tienen como base el Fe) y *no ferrosas* (tienen como base un elemento diferente, como Cu, Al, Zn, Ni, Ti, etc.) así:

### *Ferrosas.*

- a. Aceros.
  1. Aceros al carbono.
  2. Aceros de baja aleación.
  3. Aceros de alta aleación.
- b. Fundiciones.
  1. Fundiciones grises.
    - Fundiciones con grafito laminar.
    - Fundiciones con grafito nodular (maleables).
    - Fundiciones con grafito esferoidal (dúctiles).
    - Fundiciones con grafito vermicular compacto.
  2. Fundiciones blancas.
    - Fundiciones normales.
    - Fundiciones de baja aleación.
    - Fundiciones de alta aleación.

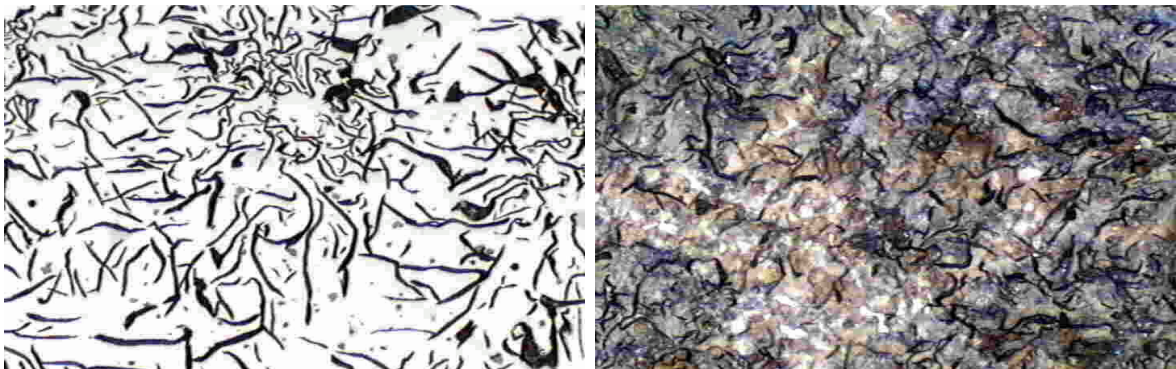
### *No Ferrosas*

- a. Base cobre.
- b. Base Aluminio.
- c. Base Zinc.
- d. Base Magnesio.
- e. Base Níquel.

1.2.1 Fundiciones Grises. La mayoría de las fundiciones grises son aleaciones hipoeutécticas<sup>1</sup> que contienen entre 2,5 y 4% de carbono. El proceso de grafitización se realiza con mayor facilidad si el contenido de carbono es elevado, las temperaturas son altas y si la cantidad de elementos grafitizantes presentes, especialmente el silicio, son adecuados.

El grafito adopta la forma de numerosas laminillas curvadas (figura 1), que son las que proporcionan a la fundición gris su característica fractura grisácea o negruzca.

Figura 1. Fundición gris con estructura totalmente ferrítica (A) y totalmente perlítica (B)



(A)

(B)

Fuente: <http://www.esi2.us.es/IMM2/Pract-html/estructuras de fundiciones.html>

Si la composición y la velocidad de enfriamiento son tales que la cementita se grafitiza presentará entonces una estructura totalmente ferrítica (figura 1 (A)). Por el contrario, si se impide la grafitización de la cementita, la matriz será totalmente perlítica (figura 1 (B)). La fundición gris constituida por la mezcla de grafito y ferrita es la más blanda y la que menor resistencia mecánica presenta; la resistencia a la tracción y la dureza aumentan con la cantidad de carbono combinado que existe, alcanzando su valor máximo en la fundición gris perlítica.

1.2.2 Fundiciones Blancas. Son aquellas en las que todo el carbono se encuentra combinado bajo la forma de cementita. Todas ellas son aleaciones hipoeutécticas y las transformaciones que tienen lugar durante su enfriamiento son análogas a las de la aleación de 2,5 % de carbono.

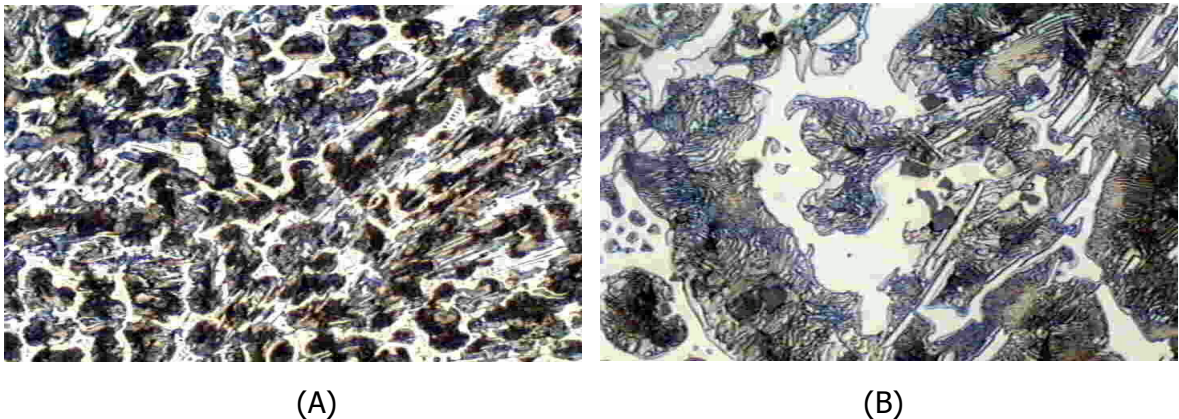
---

<sup>1</sup> La fundición es: Hipoeutéctica cuando el carbono equivalente en la fundición es menor que 4.26, Eutéctica cuando el carbono equivalente es igual a 4.26. o Hipereutéctica cuando el carbono equivalente es mayor que 4.26.

La figura 2 muestra la microestructura típica de las fundiciones blancas, la cual está formada por dendritas de austenita transformada (perlita), en una matriz blanca de cementita. Observando la misma figura con más aumento, se identifica que las áreas oscuras son perlita (figura 2 (B)).

Estas fundiciones se caracterizan por su dureza y resistencia al desgaste, siendo sumamente quebradiza y difícil de mecanizar. Esta fragilidad y falta de maquinabilidad limita la utilización industrial de las fundiciones "totalmente blancas", quedando reducido su empleo a aquellos casos en que no se quiera ductilidad como en las camisas interiores de las hormigoneras, molinos de bolas, algunos tipos de estampas de estirar y en las boquillas de extrusión. También se utiliza en grandes cantidades, como material de partida, para la fabricación de fundición maleable.

Figura 2. Microestructura de una fundición Blanca.



Fuente: [http://www.esi2.us.es/IMM2/Pract-html/estructuras de fundiciones.html](http://www.esi2.us.es/IMM2/Pract-html/estructuras%20de%20fundiciones.html)

### 1.3 ALEACIONES Fe-C PURAS

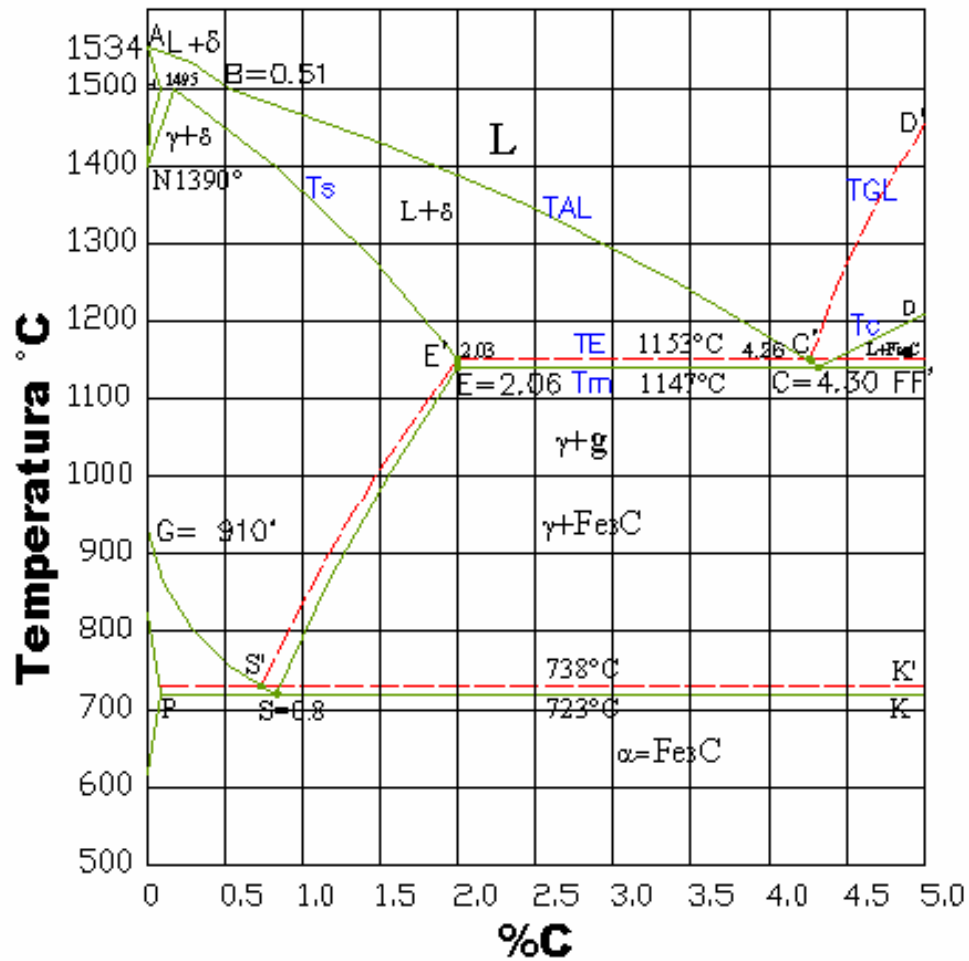
El diagrama de equilibrio Fe-C es la base fundamental para el estudio y comprensión de la solidificación de fundiciones. Este diagrama muestra los rangos de existencia de las fases presentes tales como: Austenita, Ferrita, Grafito y Cementita en función de la temperatura y el contenido de carbono. Ver figura 3

Se denomina "fundición pura" a la aleación de Fe-C con contenidos de carbono superiores a 2.08%.

Durante la solidificación de la fundición hipoeutéctica siempre precipita la austenita y dependiendo de las condiciones de enfriamiento precipita una fase de grafito o cementita de alto carbono. Si solidifica el grafito el diagrama de equilibrio se representa con las líneas punteadas y corresponde a un sistema Fe-Grafito que representa el *equilibrio estable* (solidificación gris). Si solidifica la cementita o carburo de hierro el

diagrama de equilibrio se representa con líneas continuas y corresponde a un sistema Fe-Fe<sub>3</sub>C que representa el equilibrio meta estable (solidificación blanca).

Figura 3. Diagrama de equilibrio para aleaciones Fe-C puras



Fuente: HEINE Richard W. Principles of Metal Casting.

Las coordenadas de los puntos característicos de estos sistemas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1. Coordenadas de los puntos característicos del diagrama Fe – C puro.

| Punto           | E    | E'   | C    | C'   | F    | F'   |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|
| Temperatura °C  | 1148 | 1154 | 1148 | 1154 | 1148 | 1154 |
| Contenido de °C | 2.11 | 2.08 | 4.3  | 4.26 | 6.69 | 100  |

Fuente: HEINE Richard W. Principles of Metal Casting.

Los puntos C y C' representan la temperatura de solidificación y la composición química del eutéctico en el sistema metaestable y estable respectivamente. En el punto C' se unen las líneas BC' y C'D' la línea BC' llamada liquidus para la austenita (TAL), la cual determina la solubilidad máxima del carbono en la fase líquida y se encuentra en equilibrio con la austenita. Para aleaciones Fe-C puras el segmento BC' puede expresarse mediante la siguiente ecuación<sup>1</sup>:

$$\begin{aligned}TAL &= 1569 - 97.3 * ACE \text{ (}^\circ\text{C)} \\TAL &= 2856.2 - 175.2 * ACE \text{ (}^\circ\text{F)}\end{aligned} \quad (\text{Ec. 1})$$

*ACE*: Carbono Equivalente Liquidus para la Austenita. Es la concentración en equilibrio del carbono en las aleaciones Fe-C puras, de contenido de carbono entre 2.5 a 4.26%.  
*TAL*: Temperatura Liquidus para la Austenita

La línea C'D' representa la solubilidad máxima del carbono en el líquido que se encuentra en equilibrio con el grafito, y se representa por<sup>2</sup>:

$$\begin{aligned}TGL &= 700.4 * GCE - 873.7 \text{ (}^\circ\text{F)} \\TGL &= 389.11 * GCE - 503.16 \text{ (}^\circ\text{C)}\end{aligned} \quad (\text{Ec. 2})$$

*GCE*: Carbono Equivalente Liquidus<sup>3</sup> para el Grafito. Es la concentración en equilibrio del carbono en aleaciones Fe-C puras, de contenido de carbono por arriba de 4.26%.  
*TGL*: Temperatura Liquidus para el Grafito.

La línea JE muestra la solubilidad del carbono en la austenita que se encuentra en equilibrio con el líquido y se le denomina línea de sólidos Ts.

Las líneas horizontales E'C'F' y ECF determinan la temperatura de equilibrio de solidificación del eutéctico en los sistemas estable y meta estable, respectivamente, y son conocidos como solidus TE y CET. Los puntos E' y E representan la solubilidad máxima del carbono en la austenita a la temperatura TE y CET, en cambio los puntos F' y F indican el contenido de carbono en el grafito y en la cementita respectivamente. La línea CD muestra la solubilidad del carbono en el liquidus que se encuentra en equilibrio con cementita y es llamada liquidus Tc.

#### 1.4 ALEACIONES Fe-C POLICOMPONENTES

En el caso de fundiciones de hierro comerciales siempre se encuentran presentes otros elementos y el diagrama de equilibrio cambia debido a que estos elementos aceleran la

<sup>1</sup> Heine, R.: The carbon equivalent Fe-C-Si diagram and its application to cast iron, AFS Cast Iron Research Journal, 1971, June, p.49.

<sup>2</sup> Heine, R.: Carbon, Silicon, Carbon Equivalent, Solidification, and Thermal Analysis Relationships in Gray and Ductile Cast Irons. AFS Transactions, p. 462

<sup>3</sup> En algunos textos se denomina liquidus a la temperatura de líquido y solidus a la temperatura de sólido.

solubilidad del carbono en las diferentes fases, por lo tanto los puntos característicos y las líneas de liquidus y solidus se desplazan.

Los parámetros mas importantes en la fabricación de fundiciones son las temperaturas de liquidus (TAL y TGL), y las temperaturas de solidus (TE, CET y Ts), que se exponen a continuación.

1.4.1 Temperatura de liquidus TGL. En las aleaciones Fe-C policomponentes la temperatura de liquidus TGL se expresa mediante la siguiente ecuación<sup>1</sup>:

$$TGL = 389.10 * (C - \sum b_i x_i) - 505.83 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$TGL = 700.38 * (C - \sum b_i x_i) - 878.5 \text{ (}^\circ\text{F)}$$

Donde:

C: Es la solubilidad máxima del carbono en la fase liquida que se encuentra en equilibrio con el grafito en las aleaciones Fe-C policomponentes, es decir, la concentración de liquidus.

b<sub>i</sub>: Es la constante que caracteriza al elemento x<sub>i</sub>

x<sub>i</sub>: Es la concentración (% en peso) del elemento x<sub>i</sub> en la aleación.

En la siguiente tabla se presentan algunos valores para la constante b<sub>i</sub> según los elementos presentes en la fundición:

Tabla 2. Constante b<sub>i</sub> y m<sub>i</sub> de los elementos más importantes en la fundición.

| Elemento x <sub>i</sub> | b <sub>i</sub> | Se usa %  | Elemento x <sub>i</sub> | m <sub>i</sub> | Se usa %  |
|-------------------------|----------------|-----------|-------------------------|----------------|-----------|
| S                       | -0.4           | Hasta 0.4 | Ti                      | -2.08          | Hasta 0.8 |
| P                       | -0.33          | 3.0       | P                       | -0.35          | 0.4       |
| Si                      | -0.31          | 5.5       | Mo                      | -0.3           | 4.0       |
| Al                      | -0.22          | 2         | W                       | -0.12          | 12        |

Fuente: HEINE R. The carbon equivalent Fe-C-Si diagram and its application to cast iron, AFS Cast Iron Research Journal, 1971, June.

Tomando en cuenta solamente el contenido de silicio, en el cual b<sub>i</sub> es igual a -0.31 entonces la ecuación anterior se puede expresar como:

<sup>1</sup> Neuman, F.: The influence of additional elements on the physic-chemical behavior of carbon in saturated molten iron, p.659, (en) Recent Research on Cast Iron. Gordon and Breach, New York

$$TGL = 389.10 * (C + 0.31 * Si) - 505.83 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$TGL = 700.38 * (C - 0.31 * Si) - 878.5 \text{ (}^\circ\text{F)}$$

(Ec. 4)

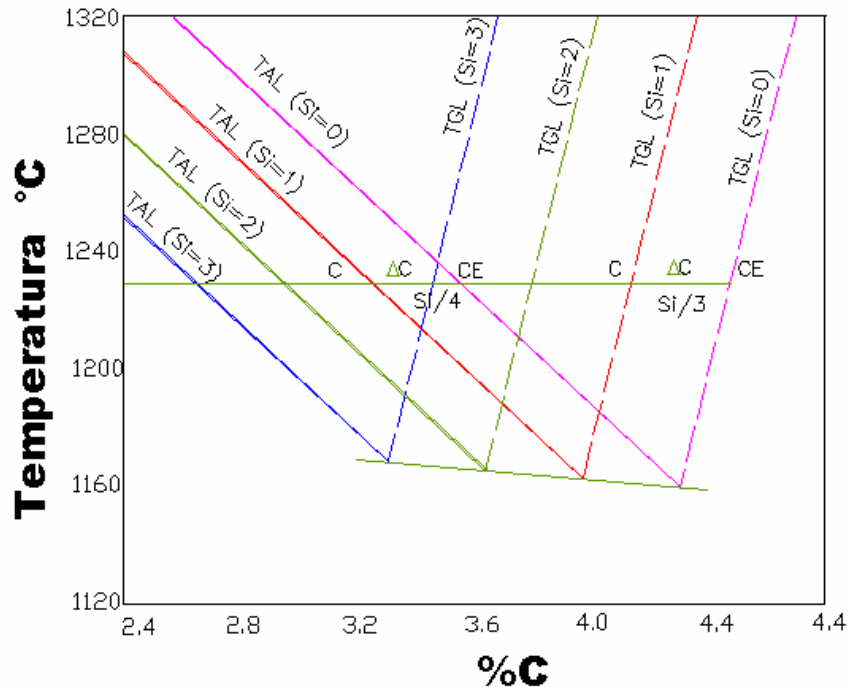
Donde Si es el contenido de silicio en (%) en peso.

En la figura 4 se observa la influencia del silicio sobre TGL, donde a medida que aumenta el contenido de silicio la línea de liquidus TGL se desplaza hacia el lado izquierdo a una temperatura dada.

La magnitud de este desplazamiento es igual a:

$$\Delta C = GCE - C = 0.31 * Si \text{ (Ec. 5)}$$

Figura 4. Sistema de equilibrio ternario hierro-carbono-silicio.



Fuente: HEINE R. The carbon equivalent Fe-C-Si diagram and its application to cast iron, AFS Cast Iron Research Journal, 1971, june.

En las aleaciones Fe-C puras, al carbono en equilibrio le corresponde una temperatura de liquidus, igual a la que se obtiene en las aleaciones Fe-C-Si pero de menor contenido de carbono. Despejando de la anterior ecuación tenemos:

$$GCE = C + 0.31 * Si \text{ (Ec. 6)}$$

Con base en la figura anterior se deduce que en las aleaciones Fe-C-Si con menores contenidos de carbono ( $C = GCE - 0.31 * Si$ ) se obtiene un efecto equivalente, esto es, la misma temperatura que se observa en las aleaciones Fe-C puras con mayor contenido de carbono.

Para el caso general se obtiene:

$$GCE = C - \sum b_i x_i \quad (\text{Ec. 7})$$

En fundiciones ordinarias el Manganeso no sobrepasa al 1% y el Azufre al 0.15% y por lo tanto estos elementos se pueden despreciar en la fórmula anterior sin incurrir en un gran error, de esta forma las ecuaciones finales son:

$$GCE = C + \frac{1}{3} Si + \frac{1}{3} P \quad (\text{Ec. 8})$$

$$TGL = 700.4 * GCE - 873.7 \text{ (}^\circ\text{F)} \quad (\text{Ec. 9})$$

$$TGL = 389.11 * GCE - 503.16 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

1.4.2 Temperatura de Liquidus TAL. Existen diferentes ecuaciones para representar la temperatura de liquidus de la austenita TAL como son:

$$TAL = 3036.2 - 223.2 * ACE \text{ (}^\circ\text{F)} \quad (\text{Ec. 10})$$

$$TAL = 2902 - 184 * ACE \text{ (}^\circ\text{F)} \quad (\text{Ec. 11})$$

$$TAL = 2804 - 165.7 * ACE \text{ (}^\circ\text{F)} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$TAL = 2856.2 - 175.2 * ACE \text{ (}^\circ\text{F)} \quad (\text{Ec. 13})$$

La ecuación 10 fue derivada de fundiciones bajo argón desoxidado a temperaturas inferiores a 2650 °F, (deducida por Alagarsamy).

La ecuación 11 fue derivada de fundiciones bajo una atmósfera oxidante, a temperaturas inferiores a 2650 °F, (deducida por Jacobs).

La ecuación 12 fue derivada de fundiciones bajo argón desoxidado a temperaturas arriba de 2650 °F, (deducida por Strong).

La ecuación 13, deducida por Richard W. Heine, presentada en el documento "Determinig CEL values for malleable Irons, The effect of melting process variables" BCIRA journal 30, No.6, report 1499, Nov 1982. La cual se considera una de las mas precisas. Ver Ec. 14

$$TAL = 1569 - 93.3 * ACE \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (\text{Ec. 14})$$

$$ACE = C + \frac{1}{4} Si + \frac{1}{2} P \quad (\text{Ec. 15})$$

La línea de liquidus TAL en las aleaciones Fe-C-Si, es desplazada por el Si hacia el lado izquierdo a una temperatura dada, cuya magnitud puede expresarse: Ver figura 4

$$\Delta C = ACE - C = \frac{1}{4} Si \quad (\text{Ec. 16})$$

1.4.3 Temperatura de Solidus Ts. Según Richard W. Heine la relación entre la temperatura de solidus Ts y el porcentaje de C presente en la fundición esta dada por:

$$C = -6.59468 - 0.00794 * TAL + 0.01741 * Ts \quad (\text{Ec. 17})$$

1.4.4 Coordenadas Eutécticas TE y CET. Algunos autores<sup>1</sup> han propuesto para el calculo del contenido de carbono en el punto *Eutéctico* (Ce) la ecuación (3), en donde se sustituye la temperatura de equilibrio de solidificación del eutéctico en las aleaciones Fe-C puras, TGL= 1154°C y tomando en cuenta Ce=C, se obtiene:

$$Ce = 4.26 + \sum b_i x_i \quad (\text{Ec. 18})$$

Según estos autores, esta ecuación nos permite calcular el contenido de carbono en el punto eutéctico (Ce), para aleaciones policomponentes, suponiendo que sucede a una temperatura constante igual a la de las aleaciones Fe-C puras. Así para una fundición común tenemos:

$$Ce = 4.26 - 0.31 * Si - 0.33 * P \quad (\text{Ec. 19})$$

En realidad la temperatura de transformación eutéctica (TE) es función del contenido de los diferentes elementos de la aleación. Para demostrarlo, se supone que el punto eutéctico, es el lugar donde se unen las líneas de liquidus, es decir, TAL=TGL=TE, entonces reemplazando (Ec 15) en (Ec. 14) y (Ec. 8) en (Ec. 9) e igualando, tenemos:

$$TAL = 1569 - 97.3 * (C + \frac{Si}{4} + \frac{P}{2}) \quad (\text{Ec. 20})$$

$$TGL = 389.11 * (C + \frac{1}{3} Si + \frac{1}{3} P) - 503.16 \quad (\text{Ec. 21})$$

$$C = Ce = 4.26 - 0.3 * Si - 0.36 * P \quad (\text{Ec. 22})$$

En base a esta expresión se deduce que el silicio y fósforo disminuyen el contenido de carbono en el punto eutéctico. Ahora sustituyendo el Ce de la anterior ecuación en (Ec. 20) o (Ec. 21), se obtiene la temperatura del eutéctico:

<sup>1</sup> Neuman, F.: The influence of additional elements on the physic-chemical behavior of carbon in saturated molten iron, p.659, (en) Recent Research on Cast Iron. Gordon and Breach, New York

$$TE = 1154 + 6.5 * Si - 13.62 * P \quad (\text{Ec. 23})$$

De esta expresión, se deduce que el silicio aumenta y el fósforo disminuye marcadamente la temperatura del eutéctico en el sistema estable (también llamada temperatura de grafito eutéctico) de las aleaciones Fe-C policomponentes.

La temperatura del carburo eutéctico CET o temperatura del eutéctico en el sistema metaestable, puede ser calculada desde el diagrama de equilibrio sobre la base que el silicio no entra dentro de Fe<sub>3</sub>C en la reacción eutéctica δ+Fe<sub>3</sub>C. Se asume que CET ocurre cuando un carbono saturado de 4.26% es alcanzado después de la normalización a 0%Si y a una temperatura equivalente a la TAL extendida para la CET, así:

$$C = \frac{100 - Si}{100} * 4.26 \quad (\text{Ec. 24})$$

$$ACE = C + \frac{Si}{4} \quad (\text{Ec. 25})$$

$$CET = 2102.8 - 36.34 * Si \quad (^\circ\text{F}) \quad (\text{Ec. 26})$$

$$CET = 1150.4 - 20.18 * Si \quad (^\circ\text{C})$$

El profesor George Frigm<sup>1</sup> asume las temperaturas eutécticas como valores constantes: 2109°F (1153.88°C) para todas las solidificaciones de grafito en hojuelas y 2098 °F (1147.77°C) para toda formación de carburo.

1.4.5 Rango de temperaturas ΔTE = TE-CET. En la formación de la estructura de una fundición el rango de temperatura ΔTE juega un papel importante, ya que entre otras cosas depende de este, si la fundición solidifica como gris o blanca. Generalmente, se puede decir que no existen muchos datos del sistema metaestable de las aleaciones Fe-C-Si policomponentes, aunque existen estudios experimentales.

1.4.6 Carbono equivalente eutéctico C<sub>Ee</sub> y grado de saturación eutéctico S<sub>c</sub>. El grado de desviación de la composición química del hierro desde su composición eutéctica se determina mediante las siguientes expresiones:

$$\Delta C = C_e - C \quad (\text{Ec. 27})$$

$$S_c = \frac{C}{C_e} \quad (\text{Ec. 28})$$

Donde C es el contenido de carbono en la fundición y C<sub>e</sub> es el contenido de carbono en el eutéctico. Sustituyendo (Ec. 17) en (Ec. 19) y (Ec. 20) se tiene:

---

<sup>1</sup> George Frigm; "Multi-point Cooling Curve Analysis: Advancement of a Familial foundry tool", Electro-Nite page 6.

$$S_c = \frac{C}{4.26 - 0.3 * Si - 0.36 * P} \quad (\text{Ec. 29})$$

$$\Delta C = 4.26 - 0.3 * Si - 0.36 * P - C \quad (\text{Ec. 30})$$

Donde la magnitud  $CE=4.26-\Delta C$ , se denomina *carbono equivalente eutéctico* CEe.

Finalmente se obtiene:

$$CEe = C + 0.31 * Si + 0.36 * P \quad (\text{Ec. 31})$$

El criterio para definir la *clase de fundición* lo dan los parámetro CEe y  $S_c$ , así:

- ◆ *Fundiciones eutécticas.*  $C=C_e; \Delta C=0; S_c=1; CEe=4.26$

Lo cual significa que el contenido de carbono en la fundición es igual al contenido de carbono en el eutéctico, esta fundición tiene solo una composición química.

- ◆ *Fundiciones hipoeutécticas.*  $C < C_e; \Delta C > 0; S_c < 1; CEe < 4.26$

Cuando el contenido de carbono en la fundición es menor que su contenido en el eutéctico.

- ◆ *Fundiciones hipereutécticas.*  $C > C_e; \Delta C < 0; S_c > 1; CEe > 4.26$

## 1.5 ANÁLISIS TÉRMICO DE LAS FUNDICIONES

El análisis térmico no es un método de análisis químico. En su versión inicial era un ensayo metalúrgico que indicaba rápidamente el valor de la temperatura de líquido (Liq)<sup>1</sup> y el de la temperatura de sólido (Sol). Después, mediante la modificación voluntaria de la solidificación, se deduce la composición química; Carbono Equivalente, %C, %Si, %P... La determinación del carbono equivalente CE, por medio del análisis térmico, está muy extendida entre los fundidores, y con relación a otros métodos de cálculo de la composición química tiene la gran ventaja de su rapidez y economía; la evolución y utilización de esta información corresponde a la primera etapa de desarrollo del análisis térmico. La segunda etapa de desarrollo, surgió por el carácter dinámico del análisis térmico, es decir, los accidentes o cambios de dirección en la curva de enfriamiento están influenciados por el carácter propio de la fundición, o la "manera como ella solidifica". Esta forma o manera de solidificar permite conocer a priori la tendencia de la fundición a dar una estructura determinada, y con esto mejorar la calidad de las piezas antes de colar en los moldes. Así, se puede visualizar la posibilidad de formación de carburos, la tendencia a la precipitación del grafito tipo A (forma y tamaño del grano), u otro tipo de grafito y la eficiencia de la inoculación y esferoidización, etc. A partir de estos parámetros

---

<sup>1</sup> Para unificar la nomenclatura entre la parte teórica y la implementada en el *SATD* se aclara: TAL=Liq., Ts=Sol., TE=TGE, CET=TCE, ACE=CE.

metalúrgicos se puede conocer otros como: La resistencia a la tracción, la resistencia mecánica y la dureza, entre otros. Esta etapa se ha denominado el análisis térmico moderno de las fundiciones.<sup>1</sup>

La técnica del análisis térmico se clasifica en tres grandes grupos basados en los parámetros medidos, cambios de energía, cambios de dimensión y cambios de peso. El análisis térmico basado en los cambios de energía está dividido en tres técnicas diferentes que son:

- Curva de enfriamiento o de calentamiento ( T Vs. t)
- Primera y segunda derivada de la curva de enfriamiento o de calentamiento  $dT/dt$
- Curva del inverso

De las tres se estudia la segunda.

1.5.1 Primera y segunda derivada de la curva de enfriamiento o calentamiento. Uno de los avances de la técnica de análisis térmico es la primera y segunda derivada de la curva de enfriamiento obtenidas por diferenciación de los datos de temperatura respecto al tiempo. Una curva de enfriamiento y sus derivadas se presenta en la figura 5.

La principal ventaja que ofrecen las derivadas en este método, es permitir hallar con mayor precisión los puntos críticos de la curva de enfriamiento. Esta curva se caracteriza por presentar cambios de inflexión que un análisis simple no detecta, estos cambios son de gran interés en el análisis térmico pues corresponden a puntos donde la fundición cambia su velocidad de enfriamiento.

Como se observa en la figura 5 el punto Liq corresponde a un cambio de inflexión en la curva de enfriamiento, que se precisa con una concavidad en la primera derivada y un cruce por cero en la segunda; con esto se identifica con exactitud el punto de interés.

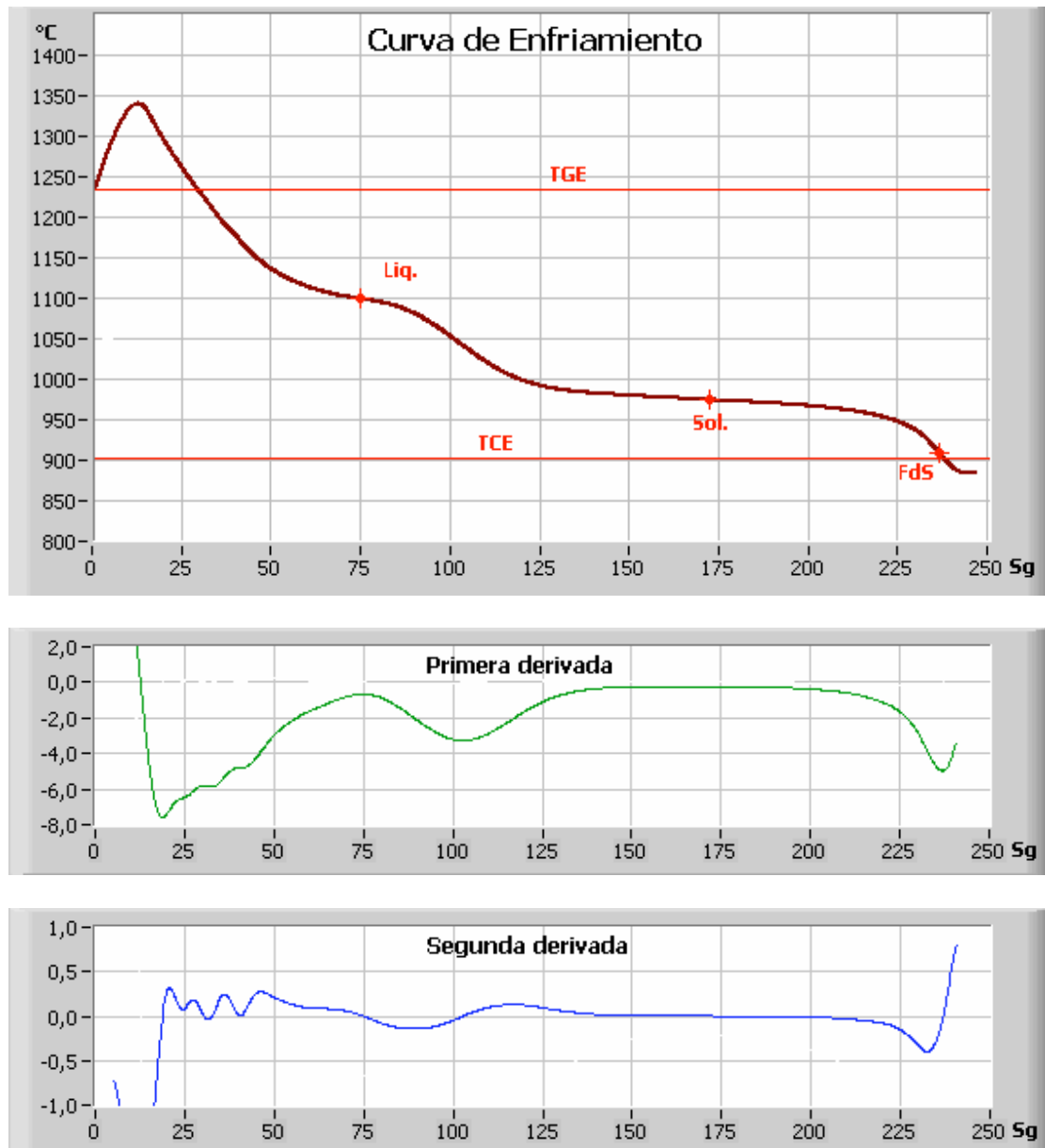
## 1.6 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS CURVAS DE ENFRIAMIENTO

1.6.1 Curva de Enfriamiento en Solidificación Blanca. Para forzar la solidificación a ser blanca se debe verter la muestra de la fundición en una copa recubierta con *telurio*. A partir de esta curva se obtiene información que permite estimar el contenido de carbono, silicio (% en peso), carbono equivalente (CE), y las temperaturas eutécticas de carburo (TCE) y grafito (TGE).

---

<sup>1</sup> ALONSO. Baquero Arnaldo. Moderno Análisis Térmico de las Fundiciones. Carta Metalúrgica. p 27-31.

Figura 5. Curva de enfriamiento y sus derivadas.



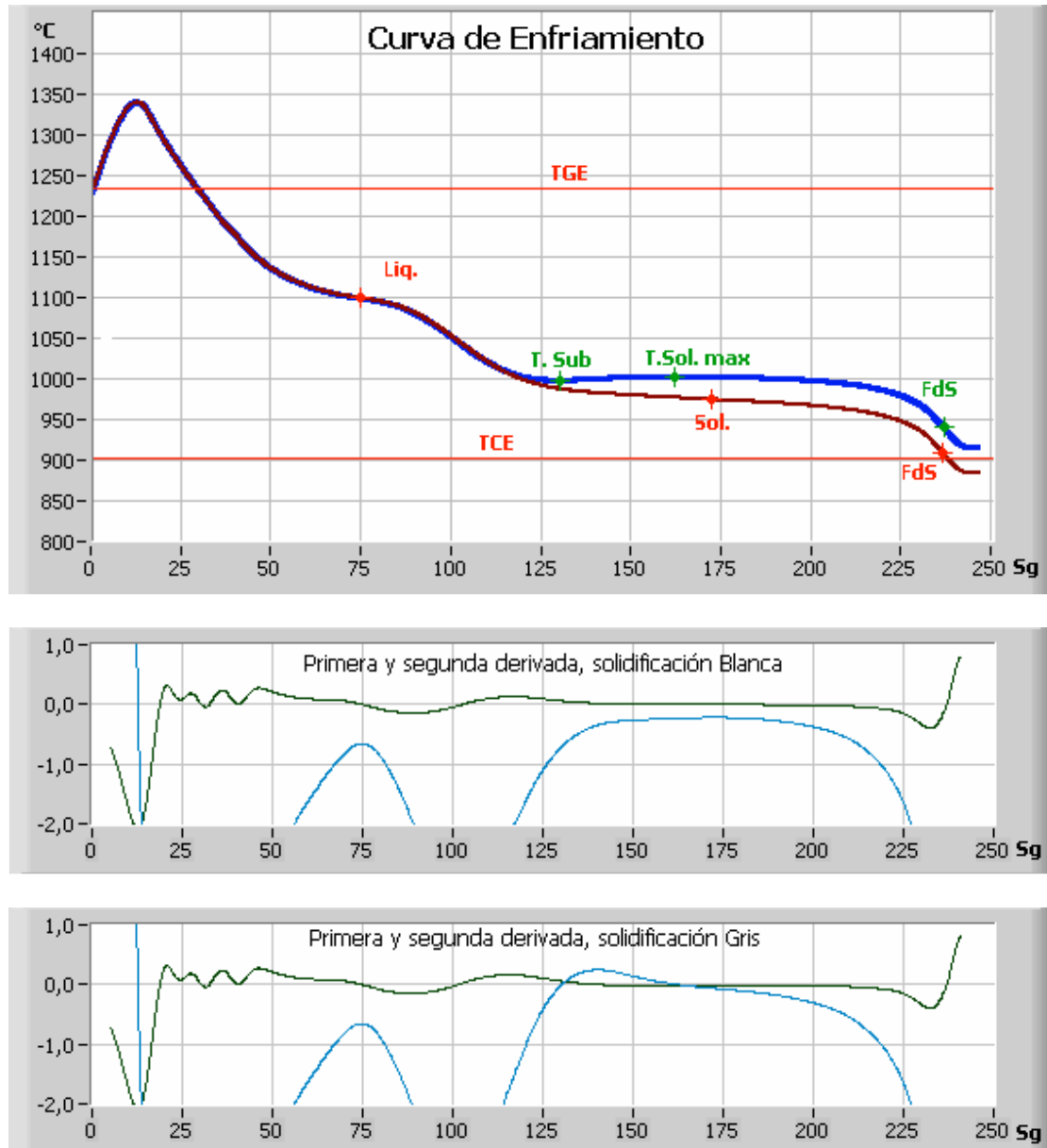
Fuente: Elaborada por los autores.

1.6.2 Curva de Enfriamiento en Solidificación gris. Para obtener solidificación gris se vierte la muestra en una copa con revestimiento a base de alúmina.

Por medio del análisis de datos tomados de la curva de enfriamiento, se determina la recalcancia, el subenfriamiento, fin de la solidificación y el enfriamiento delta.

A partir de cada curva de enfriamiento gris y blanca son calculadas las curvas de primera y segunda derivada. La curva de la primera derivada es la imagen de la solidificación, y su área representa el desprendimiento de calor debido al proceso de cristalización. La segunda derivada es usada para ratificar y ampliar ciertos puntos sobre la curva de enfriamiento que marcan el comienzo o fin de una fase de solidificación. Ver figura 6.

Figura 6. Curvas de enfriamiento de solidificación gris y blanca y sus derivadas.



Fuente: Elaborada por los autores.

En la curva de enfriamiento se aprecian cinco regiones diferentes que son:

- Zona de prelíquido
- Captura de la temperatura de líquido
- Desde la temperatura de líquido hasta la temperatura de sólido
- Captura eutéctica
- Temperatura del fin de la solidificación

Zona de prelíquido. También llamada de altas temperaturas. Generalmente no informa ninguna singularidad. Cronológicamente esta etapa va desde la máxima temperatura indicada hasta la temperatura de líquido (Liq). Aparecen en esta zona puntos (capturas líquidas), que corresponden a máximos en la curva de la primera derivada y en ellos la segunda derivada pasa por cero (ver figura 6). Estos puntos se conocen como anomalías o singularidades que son debidas a reacciones exotérmicas, que según la teoría metalúrgica son reacciones de oxígeno, cristalización o ambas.

Las temperaturas comunes a las cuales ocurren estas anomalías son de 1195 a 1200°C y 1170 a 1180°C.

Captura de la Temperatura del Líquido Liq (Captura de la Austenita). Aquí comienza la germinación de los núcleos de la austenita. La intensidad de esta germinación se relaciona con el número de núcleos formados; a mayor formación de núcleos mayor será la resistencia de la fundición.

La temperatura líquida determina el CE, esta temperatura corresponde a un punto máximo de la curva de velocidad de enfriamiento (primera derivada) donde matemáticamente la curva de la segunda derivada pasa por cero (ver figura 6).<sup>1</sup> El valor de Liq, además ayuda a establecer la temperatura de colada, que en una primera aproximación se toma 100°C por encima de esta temperatura.<sup>2</sup> Sin embargo, este procedimiento no reemplaza las medidas de temperatura que se hacen en el horno o en la cuchara con la lanza de inmersión.

➡ Desde la temperatura de líquido hasta la temperatura de sólido (Crecimiento dendrítico). En esta etapa crecen las dendritas de la austenita, generando calor; por lo tanto, a mayor crecimiento de las dendritas la velocidad de enfriamiento es menor. Esto es importante, debido a que las dendritas de austenita, o mejor su tamaño, ejercen una fuerte influencia en la resistencia de la fundición. Sin embargo, una baja velocidad de enfriamiento puede inducir la precipitación de grafito de subenfriamiento.

---

<sup>1</sup> SPARKMAN, D. Understanding Thermal Analysis of Iron. Foundry Information Systems 1992.

<sup>2</sup> HEICHT, M. et MARGERIE, J. L “Analyse thermique en Fonderie de fonte. En Fonderie – Fonder D.” aujourd'hui. No. 8 oct. 1981, p.41

La primera derivada proporciona en esta región puntos claves. El primer máximo indica el valor de Liq., toda el área comprendida bajo la curva en esta región, es proporcional a la cantidad de sólido formado. El área que se encuentra antes del mínimo de la curva de velocidad de enfriamiento corresponde a la cantidad de austenita primaria precipitada, y el área que está después de este mínimo hasta el segundo máximo corresponde al eutéctico formado.

➡ **Captura eutéctica.** Conocida generalmente como la temperatura de solidus<sup>1</sup> (Sol). Sin embargo, a esta temperatura todavía no precipitan las impurezas de bajo punto de fusión, esto ocurre en la temperatura de fin de solidificación (EoF).

En una copa con telurio durante esta fase, cementita y pequeñas cantidades de austenita son formadas. Sin la presencia de telurio, esta fase forma grafito, ferrita y cementita.

Algunas veces se presentan marcados picos o depresiones en la curva de enfriamiento durante el periodo de captura eutéctica, que aun no pueden ser completamente explicados.

La captura eutéctica en una solidificación gris presenta dos puntos de inflexión importantes, la temperatura de subenfriamiento ( $T_{sub}$ ) y la temperatura de sólido máxima ( $T_{sol-max}$ ).  $T_{sub}$  corresponde al punto mínimo de una concavidad hacia arriba en la curva de enfriamiento, luego la curva asciende hasta capturar  $T_{sol-max}$  (punto máximo de una concavidad hacia abajo); en estos dos puntos la primera derivada pasa por cero. A partir de  $T_{sub}$  y  $T_{max-sol}$  se hallan el grado de subenfriamiento ( $^{\circ}Sub$ ) y la recalcancia (Rec). Ver figura 6.

La recalcancia permite obtener gran cantidad de información a cerca de la inoculación, el subenfriamiento y la presencia de carburos en la fundición. A mayor recalcancia, más inoculación requiere la fundición y mayor es su tendencia al rechupe<sup>2</sup>. Fundiciones bien inoculadas típicamente tendrán una recalcancia de 6 a 10°F (3 a 5°C). El investigador Danés Van Der Perre<sup>3</sup> sugiere que con una recalcancia igual o menor a 3°C se obtiene 100% de grafito tipo A en la fundición.

La susceptibilidad de la fundición a precipitar carburos, es decir, su tendencia al temple, es otra importante característica de las fundiciones. Esto se presenta cuando la fundición tiene un alto grado de subenfriamiento; de esta manera, en lugar de precipitar grafito y perlita, precipitan carburos. La temperatura a la cual se forman los carburos varía según el contenido de silicio en la fundición. Ver (Ec. 26). Y es la misma del sólido (Sol) cuando la fundición solidifica blanca ( $TCE=Sol$ ). Para calcular el grado de subenfriamiento de la fundición, se usa una copa recubierta de telurio que permite conocer la temperatura Sol, a su vez en una copa con recubrimiento de alúmina se determina la temperatura de

---

<sup>1</sup> Solidus es equivalente a temperatura de sólido.

<sup>2</sup> Es la tendencia de la fundición a contraerse y formar poros.

<sup>3</sup> VAN DER PERRE. Eutectic undercooling measurement as a means for quality analysis of lamellar and S. G. iron. Danish Foundry Seminar. Odense, may. 1990.

subenfriamiento,  $T_{sub}$ . Ver figura 6. Con estas temperaturas se obtiene el grado de subenfriamiento de la fundición.

Como la longitud o profundidad del temple depende de muchos factores, inoculación, oxidación, composición química, espesor de la pieza, etc., si se conoce el grado de subenfriamiento se puede controlar el temple.

Se conoce que los carburos que se forman son de dos clases:

Los primeros se presentan cuando la curva de enfriamiento alcanza a tocar o descende por debajo de la temperatura de eutéctico blanco (TCE). Los segundos son los llamados carburos intercrystalinos o inter-celulares que precipitan cuando la temperatura de la reacción eutéctica comienza a descender y el fin del enfriamiento EoF no se ha producido. No es fácil detectar esta situación.

La temperatura eutéctica en fundición blanca, corresponde a un cambio en la velocidad de enfriamiento, (ver figura 11 en el punto Sol), corroborado con un máximo en la primera derivada y un cruce por cero en la segunda.

De las temperaturas de líquido y sólido, pueden estimarse el carbono equivalente, porcentaje de Carbono y porcentaje de Silicio. Las ecuaciones para estos valores son afectadas por las cantidades de fósforo, manganeso, estaño y cromo presentes.

► Temperatura del fin de solidificación EoF. Indica que toda la aleación está completamente sólida; este punto es inferior a la temperatura de sólido (Sol).

A partir de las temperaturas Sol y EoF se halla el enfriamiento delta (ED); generalmente el valor de éste está entre los 20°C a 60°C y es un parámetro importante para la sanidad y resistencia de la fundición.<sup>1</sup>

La curva de la velocidad de enfriamiento asciende en esta etapa; es decir, se produce una absorción de calor de solidificación de la aleación al precipitar las impurezas de bajo punto de fusión. El grado de absorción de calor será mayor a medida que el contenido de impurezas de bajo punto de fusión aumenta. A grosso modo la altura del pico de la primera derivada en esta zona, indica el contenido de fósforo de la fundición. Sería interesante conocer la existencia de la posible relación entre la altura del pico de la curva y el contenido de fósforo y así se podría establecer con antelación, fundición en estado líquido, el posible porcentaje de fósforo en el metal.

La existencia de esta etapa en la curva de enfriamiento es crucial en la sanidad interna, y por ende, en la resistencia de las piezas, porque en el momento en que ella se presenta, prácticamente el metal se ha solidificado y el lugar que queda para precipitar esta impurezas corresponde a los límites de los granos. Al no existir alimentación, se

---

<sup>1</sup> SPARKMAN, Op. Cit., p. 7.

presentan micro-rechupes en estas regiones, lo cual es causa de fundiciones con bajas características mecánicas.

Una característica que el fundidor desea conocer, es la tendencia de la fundición a formar *rechupes*. Si el rechupe es de valor negativo, la fundición se expande y no forma rechupes.

Toda la información presentada aquí está relacionada con cambios relativos en el análisis térmico y no es una predicción absoluta (ya que todo esto se obtuvo por métodos experimentales).

“El análisis térmico provee una herramienta necesaria para conocer las propiedades de la fundición”.

## 2. PLANTEAMIENTO Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ANÁLISIS TÉRMICO DUAL SATD

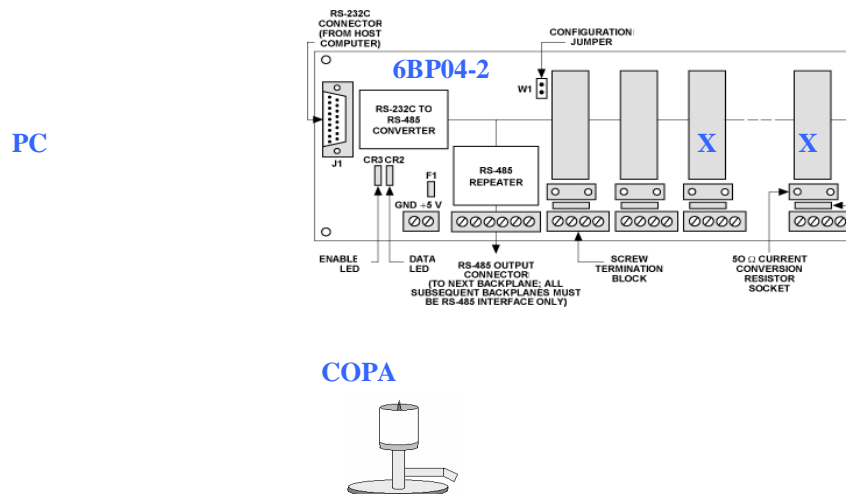
Las fundiciones necesitan métodos adecuados para el control del proceso metalúrgico, para ello se creó un método eficiente basado en el análisis térmico, capaz de:

- Evitar piezas defectuosas (hundimientos externos, rechupes, porosidades, dilatación del molde y sopladuras).
- Conseguir un rendimiento elevado.
- Reducir costos.

El Análisis térmico se revela como un método adecuado para conocer el comportamiento de una fundición durante la solidificación. La mayoría de los metales tienen dos o tres componentes diferentes que hacen que solidifiquen a temperaturas diferentes. Las temperaturas a la que ellos solidifican, y la cantidad de energía que liberan en cada fase del enfriamiento entregan información sobre la química, la inoculación, y estructura de grano del material.

La Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales actualmente cuenta con un sistema de análisis térmico simple llamado *MELTLAB*, compuesto principalmente por: (ver figura 7)

Figura 7. Diagrama a bloques del MELTLAB.



Fuente: Elaborado por los autores

LANZA DE  
INMERSIÓN

Dos termopares, uno ubicado en el centro de una copa de arena y otro incrustado en la punta de una lanza de inmersión.

Un sistema de adquisición de datos (unidad conversora) de dos canales, encargado de digitalizar las señales generadas por los termopares y transferirlas al PC mediante comunicación serial. Este sistema se compone por una tarjeta de circuito impreso y dos módulos conversores y acondicionadores.

- Un computador personal con procesador 486SX a 25 MHz, 4 MB de memoria principal, un disco duro IDE de 85 MB, sistema operativo DOS y un monitor Standard VGA de 15".

Este equipo computarizado es capaz de realizar análisis térmico simple, de sólo una muestra a la vez. Para esto requiere primero tomar una muestra de fundición en una copa recubierta con telurio, para forzar solidificación blanca y obtener una curva de enfriamiento que permite hallar la composición química. Después para conocer los parámetros metalúrgicos es necesario tomar otra muestra de fundición en una copa con recubrimiento de alúmina que forza solidificación gris. Los pasos anteriores requieren un tiempo prolongado de alrededor de 10 minutos que representan mucho en una colada continua, en la cual mantener la fundición a temperaturas adecuadas es difícil por su rápido enfriamiento.

El análisis térmico moderno de las fundiciones, estudia dos muestras de fundición a la vez, una en solidificación blanca y otra en solidificación gris, para obtener en corto tiempo (tres minutos) y simultáneamente la composición química y los parámetros metalúrgicos. Este método es denominado "*análisis de copa dual*" por los expertos metalúrgicos y es muy aceptado por la cantidad de información que entrega y su fiabilidad.

En la búsqueda de un mejoramiento continuo en el análisis de las fundiciones realizadas en la escuela de ingeniería metalúrgica y como un desafío para los autores en pro de la investigación en el campo metalúrgico, basados en principios de reingeniería se planteó desarrollar un software capaz de realizar análisis térmico dual, mediante el reacondicionamiento del hardware existente; es decir ampliar el sistema a tres canales, para lo cual se requiere adicionar otro modulo conversor y reprogramar todo el sistema, reemplazar el computador por otro de mejores prestaciones que soporte los requerimientos del sistema operativo Windows 98 o mejor y el lenguaje de programación LabVIEW 6i.

## 2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE ANÁLISIS TÉRMICO DUAL IMPLEMENTADO, SATD.

El Sistema de Análisis Térmico Dual, *SATD*, es una organización de dispositivos que tiene como función específica generar una herramienta de ayuda para el análisis de fundiciones en la industria metalúrgica.

En general el *SATD* está conformado por: (ver figura 8)

Un conjunto de tres sensores (termopares) adecuados que transducen variaciones de temperatura en tres señales eléctricas. Dos de las temperaturas a medir provienen de una muestra de metal tomada de un horno cubilote en dos copas de arena; la otra surge de la inmersión de una lanza en un crisol de vertido<sup>1</sup>.

Mediante un sistema de adquisición de datos de tres canales diseñado para medir temperaturas, se digitalizan las señales provenientes de los termopares y se transmiten serialmente a un PC. Las señales de temperatura procedentes de los termopares ubicados en las copas, proporcionan un registro gráfico del enfriamiento de la muestra y la señal generada por la termocupla ubicada en la punta de la lanza de inmersión, informa la temperatura promedio de la fundición.

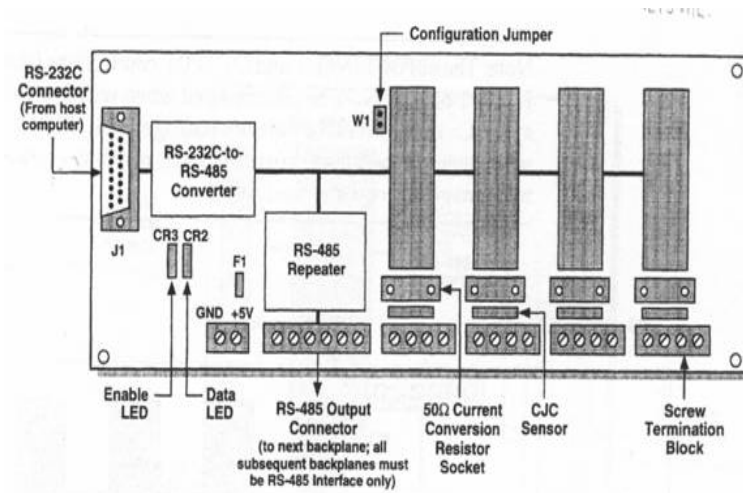
En el PC se obtiene mediante el lenguaje de programación LabVIEW 6.i, dos gráficas de temperatura en función del tiempo, denominados curvas de enfriamiento, y un indicador de la temperatura promedio de la colada proporcionado por la lanza de inmersión.

Dos características importantes adicionales del *SATD* son: Es un sistema que trabaja en tiempo real, es decir, a medida que se van obteniendo datos, se linealizan, se presentan en pantalla, se analizan para identificar si corresponden a puntos críticos o de inflexión y se entregan los resultados correspondientes. Desde el punto de vista del ingeniero metalúrgico, el *SATD* es muy ventajoso, pues se comporta como un sistema realimentado, que procura la calidad de las piezas en fundición, antes de verter en los moldes.

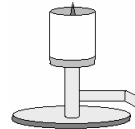
---

<sup>1</sup> Las copas de arena poseen en su interior un termopar tipo K y la lanza de inmersión tiene en la punta un termopar tipo R o S

Figura 8. Esquema general del Sistema de Análisis Térmico Dual



SOLIDIFICACIÓN  
BLANCA



SOLIDIFICACIÓN  
GRIS

LANZA DE  
INMERSIÓN

Fuente: Elaborado por los autores

A partir del análisis de cada curva de enfriamiento y sus derivadas de temperatura respecto al tiempo, se encuentran puntos de inflexión o temperaturas críticas<sup>1</sup>, que hacen parte de fórmulas como variables independientes para determinar parámetros de la composición química y metalúrgicos como son:

- Carbono Equivalente           CE
- Porcentaje de Carbono        %C
- Porcentaje de Silicio         %Si
- Temperaturas eutécticas     TCE y TGE
- Recallescencia                REC
- Grado de subenfriamiento     $\theta_{Sub}$
- Tendencia a rechupes          $\Phi$  etc.

<sup>1</sup> Llamados temperatura de líquido, temperatura de sólido, temperatura de fin de solidificación, temperatura de subenfriamiento etc.)

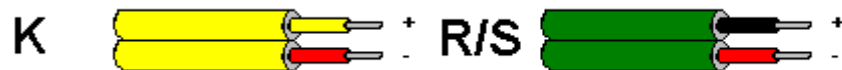
Los dispositivos que componen el sistema dual son:

- Termocuplas
- Crisoles o copas y lanza de inmersión
- Cables compensados, conectores y bases
- Unidad conversora
- ▶ PC

2.1.1 Termocuplas. Se requieren 2 termocuplas tipo K y una tipo R o S, las cuales entregan una señal análoga en mV equivalentes a la temperatura. Ver figura 9.

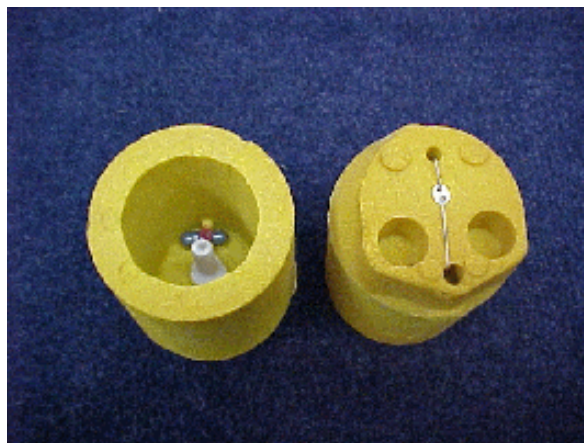
Las termocuplas tipo K van incrustadas en el centro de las copas o crisoles donde se vierten las muestras de fundición (figura 10). Y otra tipo R o S se ubica en la punta de la lanza de inmersión.

Figura 9. Termocuplas usadas en el SATD



Fuente: [www.temperatures.com/sensors.html](http://www.temperatures.com/sensors.html)

Figura 10. Termocupla tipo K incrustada en una copa de arena



Fuente: [www.fis.com](http://www.fis.com)

2.1.2 Copas o crisoles y lanza de inmersión. Los crisoles utilizados son de dos clases:

- ▶ Crisoles recubiertos en su interior con alúmina para obtener la curva de enfriamiento de la muestra de fundición en solidificación gris.
- ▶ Crisoles recubiertos en su interior con telurio para forzar la muestra de fundición a solidificar blanca<sup>1</sup>.

Estas copas se instalan sobre unos soportes, como se observa en la figura 11, y desde ellos se extienden los cables compensados hacia la unidad convertidora.

Figura 11. Copa de arena y soporte donde se instala



Fuente: [www.fis.com](http://www.fis.com)

También el *SATD* está provisto de una lanza de inmersión, con el objeto de conocer la temperatura promedio de la fundición. Esta lanza se constituye básicamente de un termopar tipo R/S incrustado en el extremo de un tubo de cartón, que encaja en una extensión metálica para su fácil manipulación. Ver figura 12.

La temperatura promedio que entrega el sistema usando la lanza, indica la temperatura de la fundición en el horno de cubilote, y así se puede conocer el estado de la mezcla para proceder a colar en los crisoles y moldes.

---

<sup>1</sup> Los crisoles recubiertos con telurio son de color rosado en su interior y los recubiertos con alúmina son blancos.

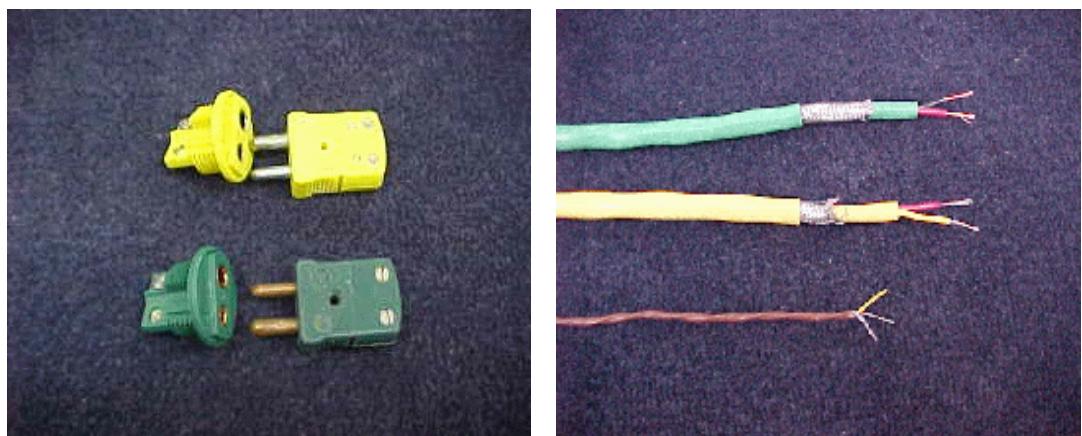
Figura 12. Lanza de Inmersión.



Fuente: Fotografía tomada por los autores

2.1.3 Cables compensados y conectores. Puesto que el hardware de adquisición debe estar retirado del lugar de medición, no es posible llegar con el mismo cable de la termocupla al instrumento; por esto se usan los llamados "cables compensados". Estos exhiben el mismo coeficiente de Seebeck de la termocupla (pero están hechos de otro material de menor valor comercial) y por tanto no generan termocuplas parásitas en los empalmes, además evitan las pérdidas de tensión e introducción de ruido. Ver figura 13.

Figura 13. Cables compensados y conectores.



Fuente: [www.fis.com](http://www.fis.com)

2.1.4 Unidad conversora. Cuando se habla de unidad conversora, se hace referencia al hardware de adquisición propiamente dicho.

Es la encargada de digitalizar las señales eléctricas provenientes de las termocuplas y transmitir los datos digitales al PC.

En su interior se encuentra una tarjeta de adquisición de datos, de referencia 6BP04-2, la cual pertenece a la familia de tarjetas y módulos de conversión de la serie 6B, construida por la empresa Analog Devices.

La tarjeta viene disponible para cuatro canales (solo se usan tres) donde van instalados 3 módulos 6B11 encargados de realizar la conversión análogo – digital. También posee cuatro sensores de temperatura para la compensación de unión fría (CJC) e incorpora una interfase de comunicación con el PC RS-232C, con conector DB25.

La tarjeta 6BP04-2 combinada con los módulos 6B11, proveen un completo sistema de adquisición de datos.

El módulo 6B11 es un dispositivo de acondicionamiento de señal aislado de un único canal; acondiciona y digitaliza las señales entregadas por las termocuplas (además de señales de mV, voltios, y mA) mediante un conversor integrador análogo - digital a 16 bits, gestionado por un microcontrolador; proporcionando una señal digital en diversos formatos.

En un módulo se puede configurar parámetros como: La dirección, los rangos de entrada, la velocidad de transmisión, el formato de datos, etc. Todos estos parámetros son almacenados en una memoria permanente (EEPROM), interna en el módulo. Ver anexo D.

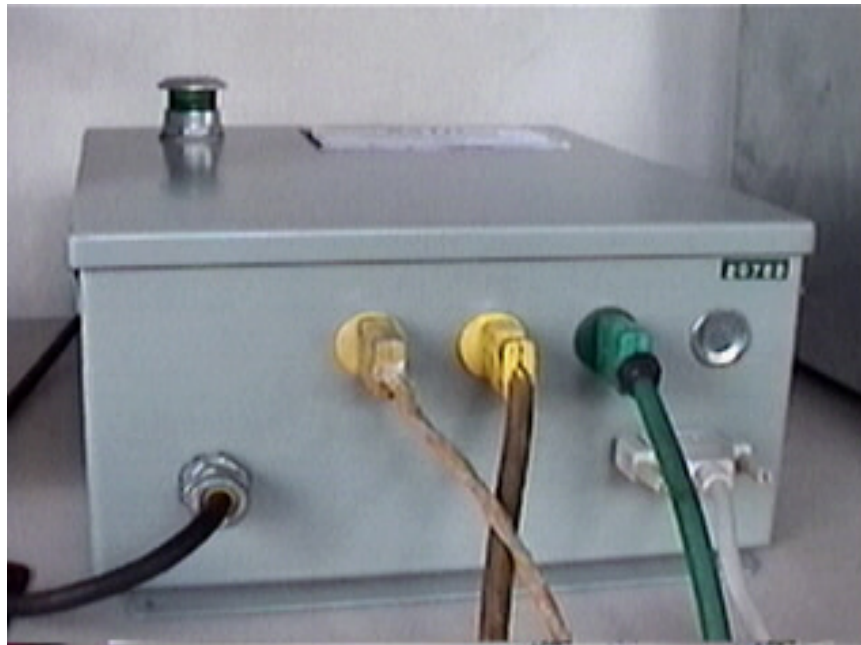
2.1.5 Computador personal. Por último el sistema cuenta con un computador donde se realiza el control y lectura de los datos, el procesamiento numérico, la presentación en pantalla y la entrega de resultados. Todo esto mediante LabVIEW 6i.

Dos características importantes del *SATD* son: Es un sistema que trabaja en tiempo real, es decir, a medida que se van obteniendo datos, se linealizan, se presentan en pantalla, se analizan para identificar si corresponden a puntos críticos o de inflexión y se entregan los resultados correspondientes. Desde el punto de vista del ingeniero metalúrgico, el *SATD* es muy ventajoso, pues se comporta como un sistema realimentado, que procura la calidad de las piezas en fundición, antes de verter en los moldes.

### 3. UNIDAD CONVERSORA

La Unidad conversora es el hardware de adquisición de datos. Está constituido por una caja metálica de 508 mm de ancho por 508 mm de largo y 200 mm de alto; con una tapa puerta en su cara superior; dentro de ella se hallan los componentes electrónicos necesarios para la adquisición de datos, como se muestra en la figura 14.

Figura 14. Unidad Conversora



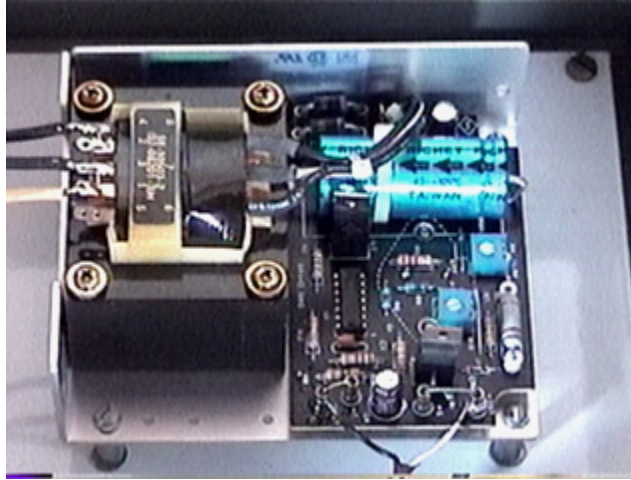
Fuente: Fotografía tomada por los autores

En su interior se encuentra una fuente de alimentación cuya función es disminuir la tensión de la red eléctrica en tensiones aptas para el funcionamiento de los dispositivos electrónicos. Una placa o tarjeta de circuito impreso construida por la empresa Analog Devices de referencia 6BP04-2, y sobre ella tres módulos conversores y acondicionadores de señal de referencia 6B11.

#### 3.1 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

La fuente de alimentación está conformada principalmente de un transformador reductor de voltaje, de 110 (Vac) a 24 (Vac); y una etapa de rectificación que entrega 5 (Vdc). Para mas especificaciones técnicas dirijase al anexo B

Figura 15. Fuente de Alimentación de Potencia.

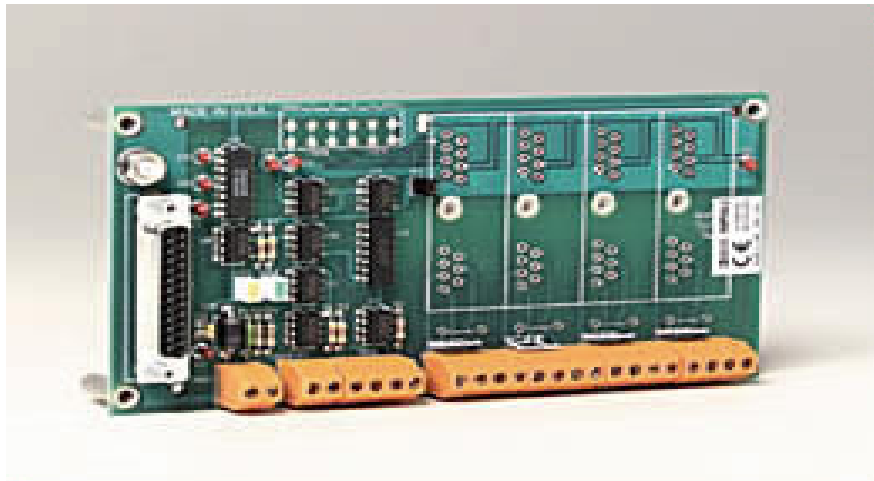


Fuente: Fotografía tomada por los autores

### 3.2 TARJETA DE CIRCUITO IMPRESO 6BP04-2

La tarjeta 6BP04-2, que se presenta en la figura 16, es una tarjeta apta para 4 canales de adquisición de datos (siendo utilizados solo tres de ellos para el *SATD*).

Figura 16. Tarjeta de circuito impreso 6BP04-2

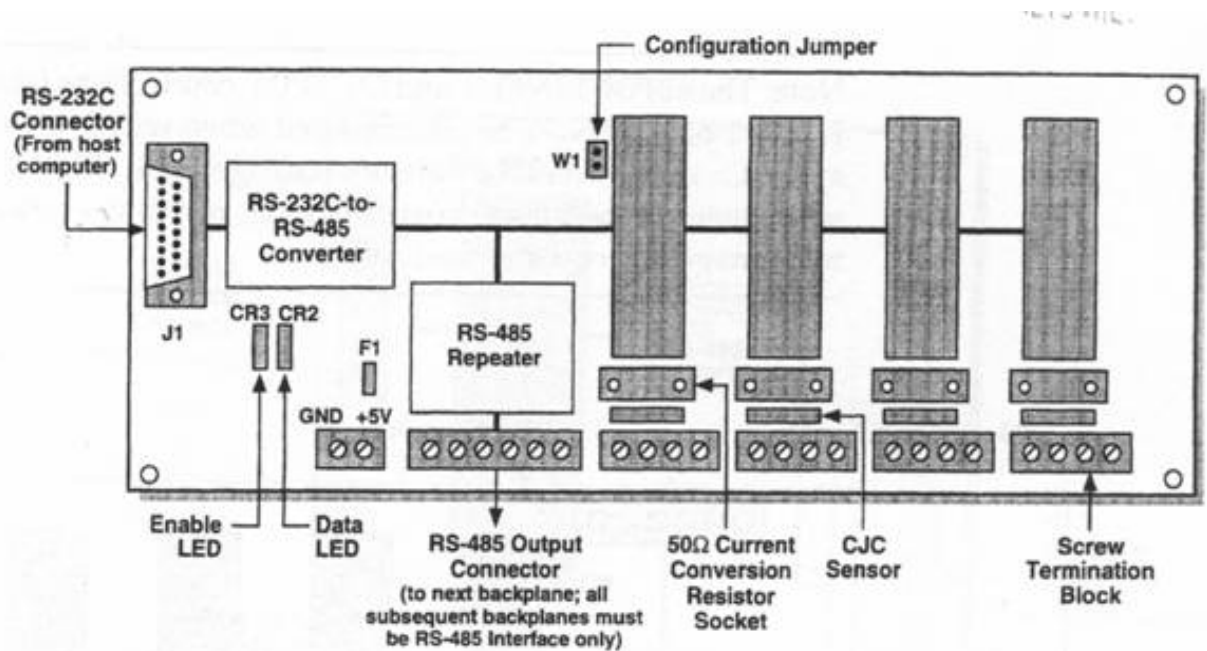


Fuente: [www.analog.com](http://www.analog.com)

La tarjeta está conformada principalmente por los siguientes elementos: (Ver Figura 17)

- Módulos 6B11
- Conector RS-232C
- Conversor RS-232C – a – RS-485
- Conector RS-485
- Repetidor RS-485
- Sensores CJC
- Puente para configuración
- Diodo Shunt
- Fusible
- Indicadores de estado

Figura 17. Esquema de la tarjeta 6BP04-2



Fuente: 6B Series user's manual

3.2.1 Módulos 6B11. Son los componentes electrónicos a resaltar dentro de la tarjeta (ver figura 18). Pertenecen a la familia de módulos de entrada analógica de la serie 6B de Analog Devices.

Es un conversor análogo-digital de 16 bits de resolución. En su interior cuenta con etapas de acondicionamiento de señal, aislamiento galvánico basado en transformador, escalamiento y una interfaz de comunicación digital.

Figura 18. Módulos 6B11



Fuente: Fotografía tomada por los autores

Acepta señales de termocuplas tipo J, K, T, E, R, S, y B, RTDs, señales de milivoltios desde  $\pm 15$  mV hasta  $\pm 50$  mV, señales de voltios desde  $\pm 1$  V hasta  $\pm 5$  V y señales de corriente; las convierte en datos digitales en uno de tres posibles formatos: *Unidades ingenieriles*, tal como  $^{\circ}\text{C}$ , V o mA; *porcentaje de rango de escala máxima (FSR)*, o en *formato hexadecimal complemento a dos*; y por ultimo transfiere los datos a la tarjeta a través de la interfase RS-485.

► Descripción Técnica. Los módulos están diseñados para resistir temperaturas de almacenamiento desde  $-40^{\circ}\text{C}$  hasta  $+85^{\circ}\text{C}$ .

Proveen una exactitud de entrada-salida de  $\pm 0.05\%$  o mejor, para todos los rangos de entrada de milivoltios y voltios.

El voltaje en modo común de entrada a salida es 1500 Vrms continuos y el rechazo en modo común a 50 o 60 Hz es de 160 dB.

La resistencia de entrada es  $100\text{ M}\Omega$ , generando el manejo de corrientes muy pequeñas.

Están diseñados exclusivamente para trabajar con señales de temperatura (señales de baja frecuencia) y por ello presentan un ancho de banda de  $4\text{ Hz}$  y una velocidad máxima de conversión de  $9\text{ muestras/segundo}$ .

Todos los sensores de entrada, circuitería de excitación y corrientes de salida, son protegidas contra una aplicación accidental de  $240\text{ Vrms}$  en la línea de voltaje. Para más información sobre especificaciones técnicas ver el anexo B

➡ Estructura y funcionamiento interno. El módulo 6B11 está conformado por los siguientes subsistemas (Ver figura 19):

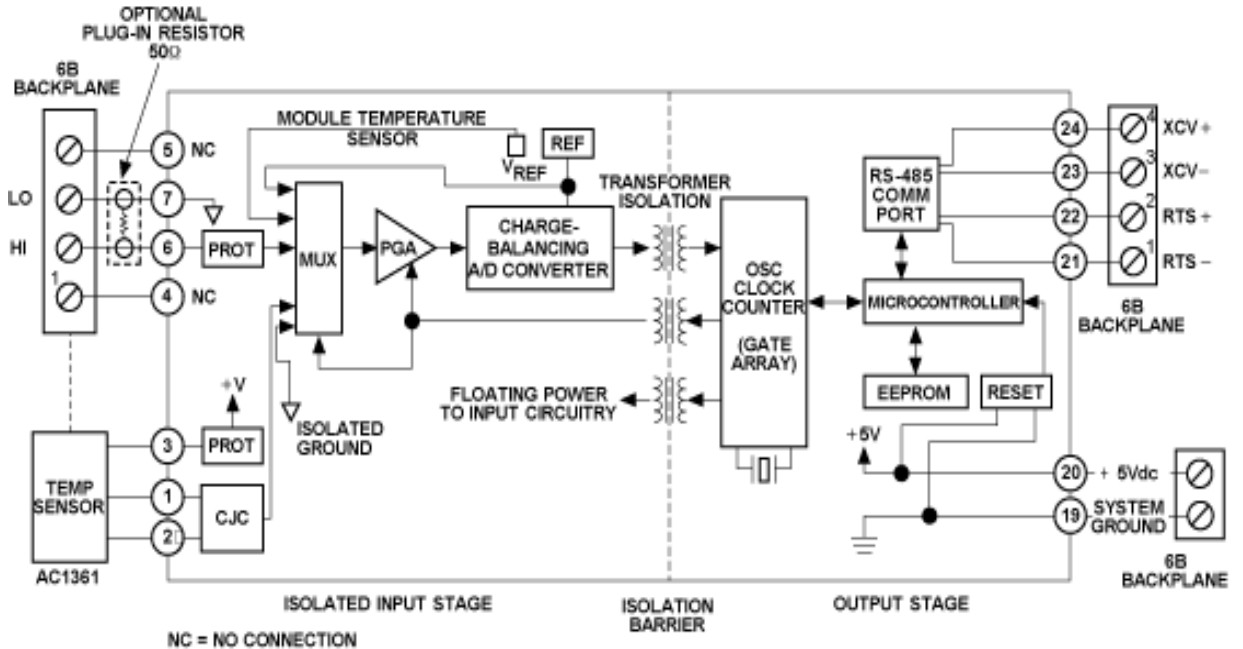
- Un amplificador o escalador programable de señal.
- Un conversor análogo – digital integrador a  $16\text{ bits}$ , de carga balanceada.
- Una etapa de aislamiento de  $1500\text{ Vrms}$  para eliminar lazos a tierra de las señales de entrada y potencia, para proteger contra transitorios, para prevenir problemas con voltajes en modo común (CMV) y para asegurar aislamiento de entrada canal a canal.
- Y un microcontrolador que provee diferentes rangos de configuración, autocalibración, linealización y compensación para posibles fuentes de error internas, como cambios en la temperatura ambiente.

La señal de entrada análoga ( $V_{in}$ ), un voltaje de referencia interno ( $V_{ref}$ ), y un cero interno (tierra) son multiplexados con la señal CJC proveniente de un sensor externo que mide la temperatura de unión fría y un sensor de temperatura local; dentro de un amplificador de ganancia programable (PGA).

Un conversor voltaje – frecuencia de carga balanceada, toma la señal condicionada y la convierte en una salida serial que es pasada a través de un transformador por la barrera de aislamiento.

La señal de frecuencia variable va directamente a un arreglo de compuertas, las cuales proveen conteo y convierten de frecuencia a número binario. Los valores contados son convertidos de notación binaria de punto fijo a punto flotante de precisión simple en el microcontrolador.

Figura 19. Diagrama a bloques del módulo 6B11



Fuente: [www.analog.com](http://www.analog.com)

El microcontrolador 80C52 contiene en memoria el programa completo ejecutable (firmware) y realiza escalamiento, cambio de rangos, calibración, corrección de temperatura interna y linealización. La linealización es necesaria para obtener lecturas de temperatura exactas. El valor de entrada digitalizado apunta a una entrada específica en una tabla, donde el valor de la pendiente de linealización (m) y el intercepto (b) están almacenados. Esos valores son combinados con el valor entrante en un cálculo estándar  $y=mx+b$  para producir el valor linealizado.

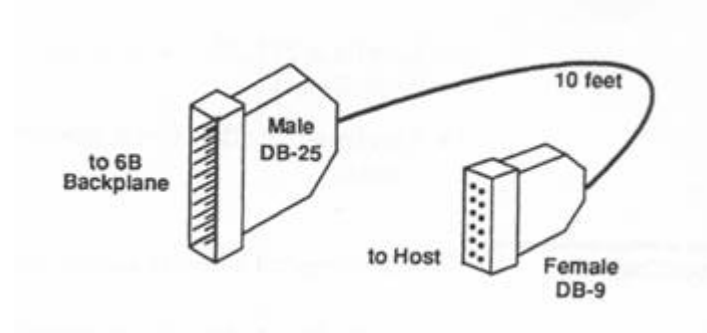
El dato en el microcontrolador es estructurado para la transmisión en la interfaz RS-485 de acuerdo a los parámetros programables almacenados en la EEPROM.

Un bajo voltaje de la fuente de alimentación (inferior a 4.4 V) restablece el módulo a su configuración establecida.

3.2.2 Conector RS-232C (RS-232 CONECTOR). La comunicación entre la tarjeta 6BP04-2 y el PC se realiza mediante la interfaz serial RS-232C; cuyo elemento físico en la placa es el conector RS-232C.

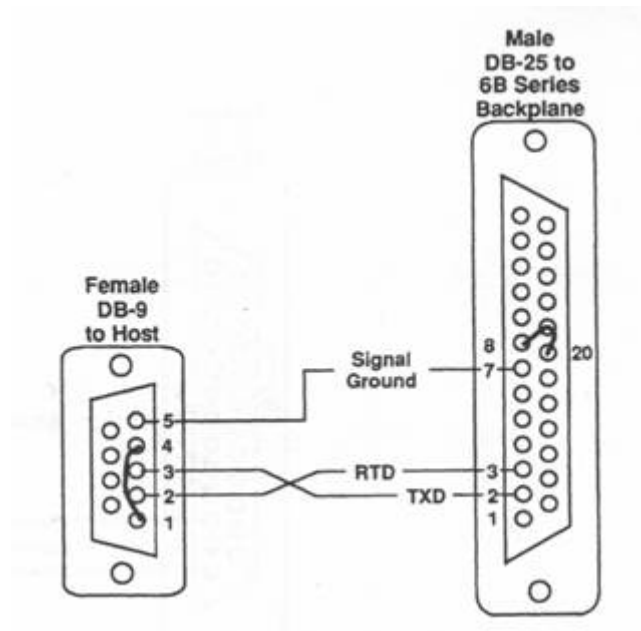
El cable usado en el SATD para la comunicación es un cable macho DB-25 - hembra DB-9, como se muestra en la figura 20.

Figura 20. Cable RS-232C



Su configuración interna (para el caso) consta de 3 alambres<sup>1</sup>, así:

|     |   |       |
|-----|---|-------|
| TX  | ↔ | Pin 2 |
| RX  | ↔ | Pin 3 |
| GND | ↔ | Pin 7 |



Fuente: 6B Series user's manual.

3.2.3 Conversor RS-232C a RS-485. Este dispositivo transforma la señal RS-232C full-duplex (la cual opera sobre caminos transmisión/recepción separados) en una señal RS-485 half - duplex (la cual opera sobre un bus bidireccional); permitiendo a los módulos 6B11 comunicarse con el PC.

<sup>1</sup> Debido a que en el *SATD* no se usa protocolo software ni hardware.

3.2.4 Conector RS-485. El conector RS-485 permite la conexión de una tarjeta 6BP04-2 a otras tarjetas de la serie 6B bajo el estándar RS-485; formando una red ya sea en configuración daisy-chain o en configuración multidrop. Ver anexo B.

RS-485 es un estándar EIA para sistemas de múltiples tarjetas (multidrooped), diseñado para la transmisión de datos seriales sobre grandes distancias. Los receptores RS-485 tienen un rango de entrada en modo común de  $-7\text{ V}$  a  $+12\text{ V}$ ; esto provee buen rechazo al ruido.

3.2.5 Repetidor RS-485. El dispositivo repetidor RS-485 es el encargado de aumentar la distancia transmisor/receptor hasta 4000 pies (1219 m) e incrementar el número de cargas de la red (interconectar entre tarjetas).

3.2.6 Sensores CJC. Un sensor CJC (cold junction compensation) está instalado en cada canal. Cuando los cables de la termocupla se conectan a los terminales atornillables, el sensor CJC mide la temperatura de la unión entre los cables de la termocupla y el terminal atornillable, y aplica un término de corrección a la medida de la termocupla. Ver anexo A.

El sensor opera óptimamente en un rango de temperatura desde  $+5^{\circ}\text{C}$  hasta  $+45^{\circ}\text{C}$ .

3.2.7 Puente para configuración. El puente W1 permite la verificación de la configuración de un modulo 6B11, forzandolo a un estado conocido. Si el puente se conecta y un módulos 6B11 se instala en la ranura mas cercana al puente, el módulo es forzado a una dirección conocida (00H), a 9600 baudios y se deshabilita el estado de chequeo o verificación. De esta manera se puede alterar su configuración: Una nueva dirección, otra velocidad de transmisión y habilitar/deshabilitar la suma de comprobación (checksum). Los otros parámetros de configuración se pueden variar con el puente desconectado. Ver anexo D, "Configuración de los módulos de entrada análoga 6B11"

3.2.8 Diodo Shunt. Provee protección contra polaridad inversa en la placa.

3.2.9 Fusible. Fusible F1 de 5 A, protege la placa de daños causados por corto circuitos o por la falla de uno de los módulos.

3.2.10 Indicadores de estado. Dos LEDs (llamados CR2 y CR3) indican el estado de las líneas de comunicación, así:

➡ LED de datos. EL LED verde (CR2) indica el estado de las líneas de datos transferidos a y desde el PC. Cuando las líneas de datos están en estado desocupado (idling), el LED

verde se enciende. Cuando las líneas de datos están en estado espacio (space) durante la comunicación de datos a o desde el PC, el LED verde se apaga.

➡ LED habilitador. EL LED amarillo (CR3) indica si los repetidores están habilitados y si cualquier módulo 6B11 está enviando datos al PC. Cuando un módulo 6B11 está respondiendo un a un comando dirigido desde el PC, el LED amarillo está encendido. Cuando las líneas están en estado desocupado, el LED amarillo está apagado.

## 4. SOFTWARE DE ANÁLISIS TÉRMICO DUAL, SATD

El programa que controla el acceso de la información desde la unidad conversora hasta el computador para su posterior procesamiento, visualización y almacenamiento, ha sido elaborado en *LabVIEW 6.i*. En este capítulo se expone el programa implementado para la consecución de este instrumento virtual.

### 4.1 CRITERIOS DE DISTINCIÓN DEL SOFTWARE UTILIZADO

El software a elegir se debe caracterizar por: Permitir que el proceso de adquisición de datos a través del puerto serie se efectúe en forma eficaz, a una velocidad adecuada y con las mismas características ofrecidas por la tarjeta de adquisición (6BP-04). Por otra parte el software debe poseer herramientas que faciliten el procesamiento de los datos, su interpretación y el desarrollo de una interfaz gráfica de fácil comprensión y manejo para el usuario, este también debe permitir presentar en "tiempo real" las señales adquiridas. Por todo lo antes descrito, por su fácil uso, comprensión y por la gran cantidad de herramientas que ofrece, el software elegido para la elaboración de este trabajo es LabVIEW 6i.

### 4.2 INTRODUCCIÓN AL TRABAJO CON LABVIEW 6.i

El término LabVIEW es el acrónimo de *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*. Constituye un ambiente gráfico de programación que emplea el lenguaje conocido como G. Para ello, LabVIEW utiliza interfases entre el computador y el sistema que se desea digitalizar, tales como tarjetas de adquisición de datos (TAD) y los puertos paralelo y/o serial del computador, que permiten adquirir los datos correspondientes a las variables de interés que posteriormente serán procesadas, visualizadas y almacenadas por LabVIEW.

LabVIEW 6.i incluye bibliotecas de funciones y herramientas de diseño específicas para el control de instrumentos. Trabaja en ambientes Windows, Macintosh y Sun. Contiene además bibliotecas de funciones y herramientas para adquisición de datos.

Los programas realizados en LabVIEW 6.i son llamados instrumentos virtuales (VIs), debido a que su funcionamiento y operación son similares al de un instrumento real. Un VI (instrumento virtual) se constituye de una interfaz de usuario interactiva, un diagrama de flujo de datos que hace las veces de código fuente, y un icono de conexiones que permite al VI ser llamado por VIs de mayor jerarquía. Dentro de un VI se pueden incluir otros VIs, a manera de subprogramas, conocidos como subVIs.

4.2.1 Adquisición de datos con LabVIEW 6.i. LabVIEW 6.i es un programa adecuado para la adquisición de datos, entre otros motivos, por su total compatibilidad con casi

todas las tarjetas de adquisición de datos, y en particular con las tarjetas de National Instruments. Su interfase gráfica ofrece una gran potencia de visualización de señales y dispone de librerías de procesado para el tratamiento de las señales adquiridas. Para que todo esto sea posible, LabVIEW 6.i ofrece entre otras, librerías de adquisición de datos (para trabajar con el puerto serie y paralelo sin la necesidad de abrir el computador o de comprar TAD específicas para este paquete) que proporciona al usuario una herramienta de trabajo de fácil uso, y que permite disponer de una mayor flexibilidad en cuanto al manejo de las TAD se refiere.

Con LabVIEW 6.i la realización de una interfaz gráfica flexible y vistosa, así como la transferencia de parámetros, se convierten en un proceso sencillo.

#### 4.2.2 Estructura de los instrumentos virtuales.

Panel frontal. La interfaz de interacción con el usuario del VI es llamada el panel frontal. Éste simula el panel de un instrumento físico. El panel frontal puede contener perillas, botones pulsadores, interruptores, gráficos y otro tipo de controles e indicadores. Los datos se introducen en cada uno de los anteriores controles usando el ratón y el teclado del PC y los resultados pueden observarse en la pantalla del computador.

Diagrama a bloques. El VI recibe instrucciones de un diagrama a bloques construido en lenguaje de programación gráfico. Este es una solución gráfica a un problema de programación y además se constituye en el código fuente del VI.

➡ Icono y conector. Los instrumentos virtuales son jerárquicos y modulares. Pueden usarse como programas de alto nivel, o como subprogramas dentro de otros programas. El icono y el conector del VI trabaja como una lista gráfica de parámetros tal que otros Vis puedan pasar datos a un subVI.

4.2.3 Programación modular. LabVIEW 6.i trabaja con el concepto de programación modular, así una aplicación complicada puede dividirse en una serie de subtareas simples. Para cada subtarea se construye un VI y luego se combinan los Vis sobre otro diagrama de bloques para solucionar la tarea más compleja. Como cada subVI puede ejecutarse en forma independiente del resto de la aplicación, la depuración es mucho más fácil.

Como el objetivo en este caso es diseñar un Sistema de Análisis Térmico Dual, que procese, presente y almacene señales de temperatura, este software se adapta en totalmente a las necesidades.

### 4.3 SOFTWARE ELABORADO

El programa para el control de la tarjeta de adquisición, la multiplexación de tres de sus canales, la recepción, procesamiento y presentación de los datos provenientes de ella se desarrolla en el orden presentado en el algoritmo de la figura 21.

4.3.1 Inicialización de variables y configuración del puerto serie. Al ejecutar el software, se inicializan las variables que así lo requieran en los valores adecuados. Luego se procede con el puerto serie como sigue:

Se identifican las características de comunicación serie que ofrece la tarjeta de adquisición (6BP04-2 de Analog Devices) y se definen las mas adecuadas. Ver Anexo D.

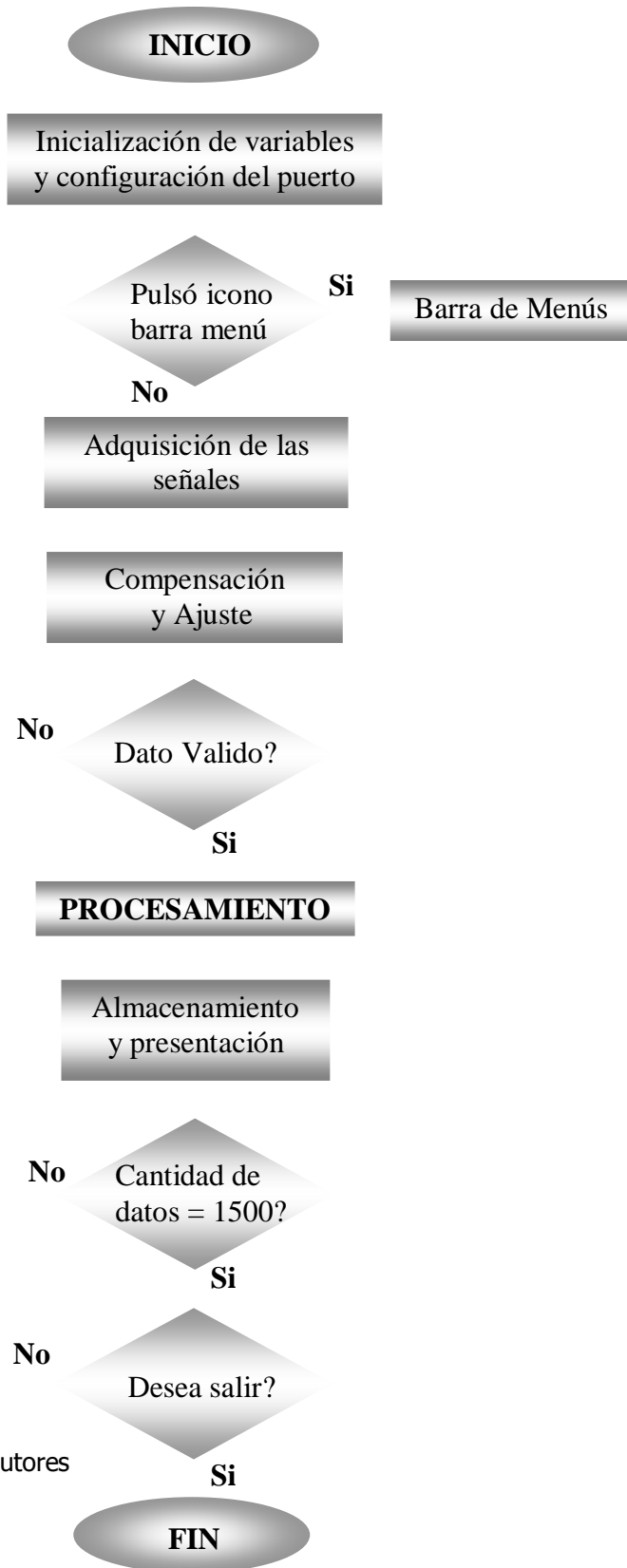
- Comunicación Asíncrona
- Código ASCII
- Un bit de inicio
- Ocho bits de datos
- Un bit de parada
- Sin paridad
- 9600 bps

Definidas las características de la comunicación serial que ofrece la tarjeta de adquisición, se configura el puerto serie del PC en LabVIEW, haciendo uso de icono *Serial Port Init.vi*, alambrando cada una de sus entradas de acuerdo con la información dada a continuación<sup>1</sup>: Ver figura 22

---

<sup>1</sup> Para saber con detalle la descripción de cada uno de los iconos de LabVIEW que relacionan el puerto serie dirijase al anexo C.

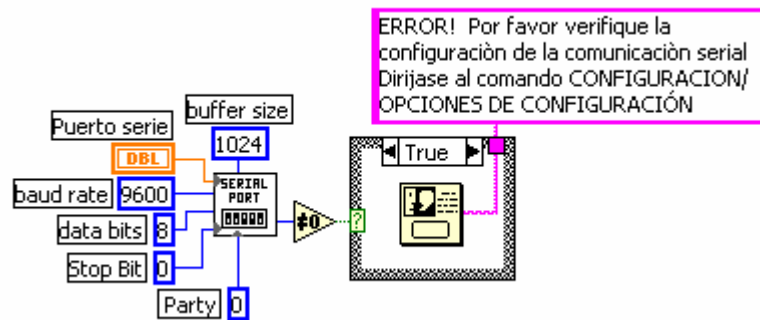
Figura 21. Diagrama a bloques del software implementado.



Fuente: Diseñado por los autores

- ◆ Flow Control: Como la TAD no soporta protocolo de comunicación handshaking esta entrada no es necesario programarla.
- ◆ Buffer Size: Según el diseño propuesto para esta aplicación, los datos adquiridos son de pocos bytes e inmediatamente son leídos del buffer, por esto no se requiere aumentar el tamaño del mismo. Se deja por defecto 1KB como mínimo.
- ◆ Port Number: A esta entrada se alambra un control que permita elegir el puerto serie por el cual se realizará la comunicación.
- ◆ Baud Rate: Se elige una constante de 9600 bps como velocidad de transferencia de datos.
- ◆ Data Bits: Se alambra una constante de 8 equivalente a 8 bits de datos.
- ◆ Stop Bits: A esta entrada se alambra una constante de 0 para manejar 1 bit de parada.
- ◆ Parity: Se introduce una constante de 0, puesto que en este caso no se requiere ningún tipo de paridad.
- ◆ Error Code: Este parámetro es una salida, por lo cual se alambra un indicador que alerte del error que se ha cometido.

Figura 22. Configuración del puerto serie.



Fuente: Código SATD

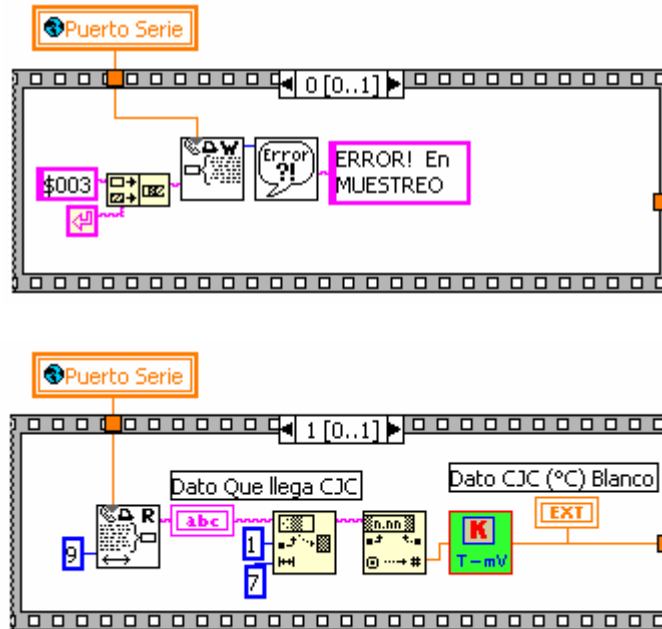
4.3.2 Adquisición de las señales. En esta etapa se muestrean los tres canales de forma secuencial<sup>1</sup>. Primero es enviada la orden de conversión al canal cero, haciendo uso del icono *Serial Port Write*, e inmediatamente se lee su respuesta del buffer de recepción destinado por LabVIEW para esta labor. Se procede de igual forma para los otros dos canales. Ver figura 23.

<sup>1</sup> Se optó por la opción de conversión “muestreo individual”. Ver anexo D, numeral D.2.1



Inmediatamente enviada la orden de muestreo se lee la temperatura de unión fría, la cual es entregada por el modulo en grados centígrados (°C).

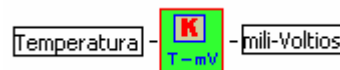
Figura 25. Petición y lectura de la temperatura de unión fría CJC.



Fuente: Código SATD

Debido a la no linealidad de la curva mV. vs Temperatura de las termocuplas (anexo A), para hacer una correcta compensación se requiere convertir los grados centígrados de cada sensor CJC a milivoltios. Para lograrlo, se pasa cada temperatura de unión fría leída por un icono conversor (T-mV). Ver figura 26.

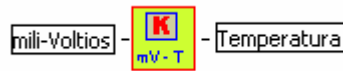
Figura 26. Icono conversor de temperatura a milivoltios.



Fuente: Código SATD

Con la temperatura de unión fría de cada sensor en milivoltios, se procede a sumar esta con la temperatura adquirida de la respectiva termocupla, la cual también está en milivoltios. Este resultado es ahora pasado de milivoltios a grados centígrados, por medio de otro icono conversor (mV-T), ilustrado en la figura 27. De esta forma es realizada correctamente la compensación de unión fría.

Figura 27. Icono conversor de mili-voltios a grados centígrados.



Fuente: Código *SATD*

Dentro de estos dos iconos conversores se realiza el ajuste de las tablas que relacionan la entrada y salida de las termocupas usando una regresión polinomial con mínimos cuadrados. Este ajuste se hace por tramos, tomando 100 parejas de puntos de las tablas y realizando regresión con polinomios de tercer orden. Los 4 coeficientes ( $a_0, a_1, a_2, a_3$ ) que constituyen dichos polinomios son hallados al resolver un sistema de 4 ecuaciones lineales. Aprovechando el extenso grupo de herramientas de *Matlab*, se emplea la herramienta *Polyfit*<sup>1</sup>.

El error que se comete se cuantifica calculando dos parámetros que son:

*El error estándar de la aproximación*

*El coeficiente de determinación.*

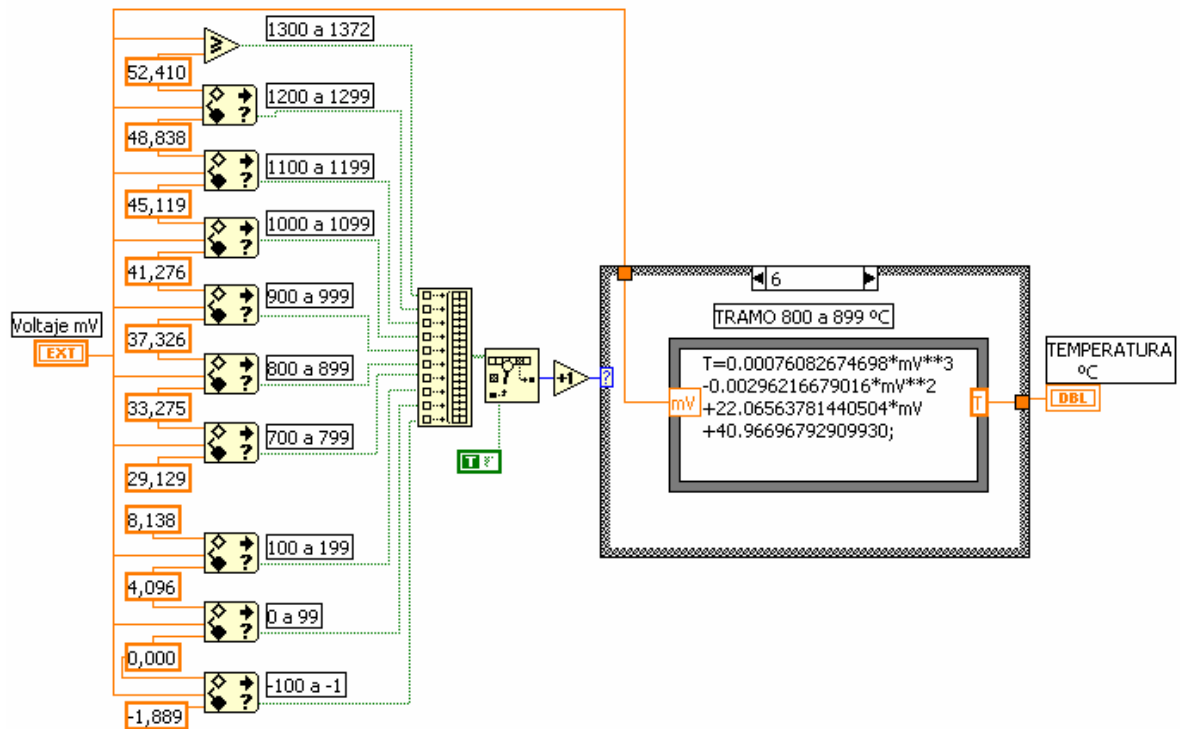
Los *coeficientes de determinación* obtenidos para el ajuste de cada tramo son muy cercanos a uno; indicando que casi toda la incertidumbre original se resuelve mediante el polinomio encontrado, proporcionando una exactitud óptima. Para ver mas información sobre estos parámetros ver el anexo F.

En la figura 28 se presenta el diagrama a bloques del Vi implementado para convertir mV en temperatura para la termocupla tipo K. Como se aprecia en ella, se lee el milivoltaje y se define a que tramo pertenece, luego mediante esta decisión se selecciona el polinomio a aplicar, utilizando la herramienta *case multiple*, dentro de todos los posibles polinomios trabajados con la opción "*formula node*".

---

<sup>1</sup> *Polyfit* encuentra los coeficientes de un polinomio  $P(x)$  de grado  $N$ , para dos vectores de datos; utilizando mínimos cuadrados. Ver anexo F

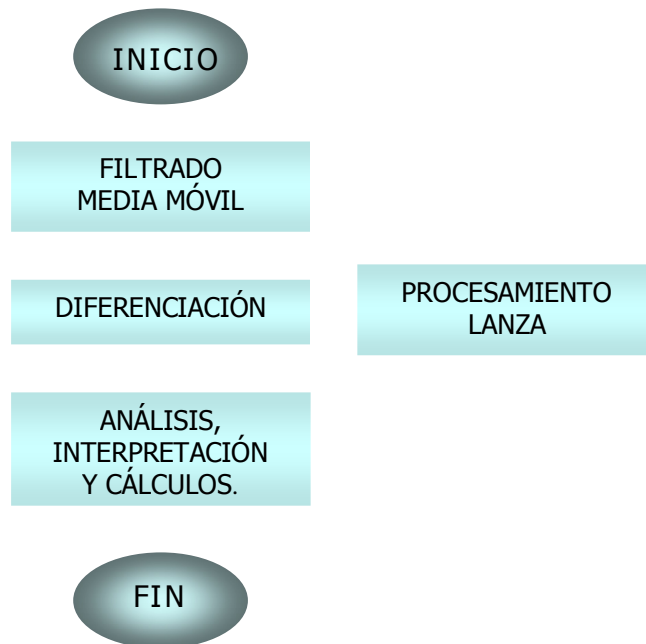
Figura 28. Rutina para ajustar la tabla mV - °C de la termocupla tipo K.



Fuente: Código SATD

4.3.4 Procesamiento. Como se ha mencionado se obtienen los tres datos provenientes de cada canal, y se procesan de forma independiente y paralela. Los datos pertenecientes al canal 0 y 1 (provenientes de la solidificación blanca y gris respectivamente) sufren transformaciones al pasar por una serie de etapas como: Filtrado, diferenciación, análisis, interpretación y cálculos. Ver figura 29. El dato correspondiente al canal 2 o de la lanza de inmersión es procesado de forma diferente.

Figura 29. Etapas de procesamiento de los datos.



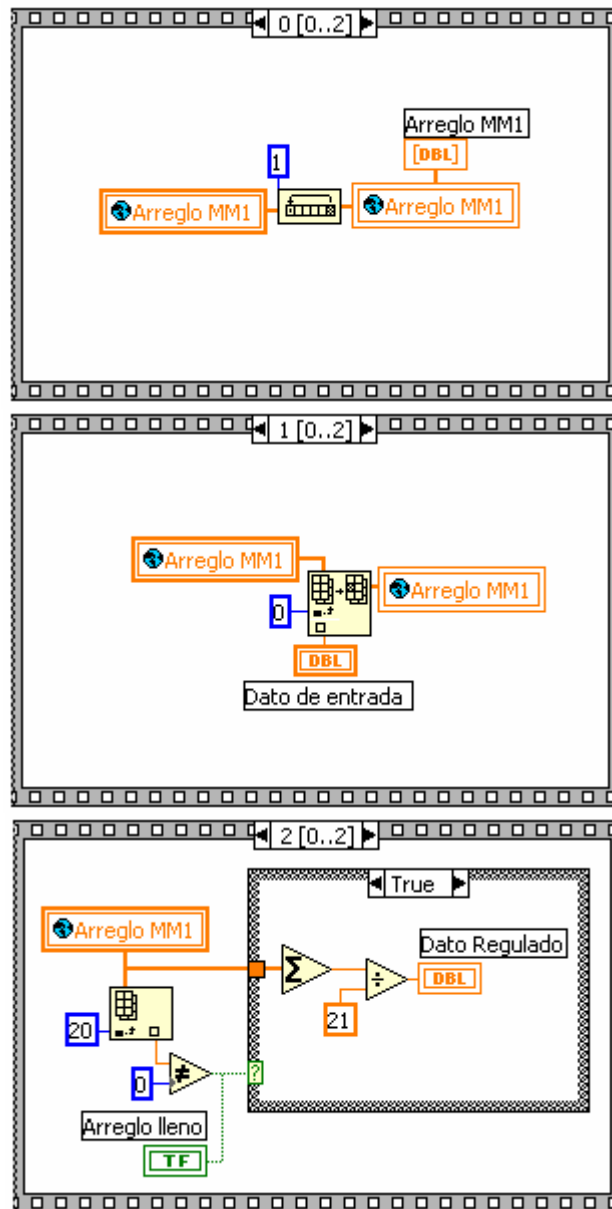
Fuente: Código *SATD*

➡ Filtrado – Media Móvil. En esta etapa se suavizan o alisan los datos haciendo uso de un filtro de promedio móvil de 21 muestras simétricas alrededor del punto de salida. En forma de ecuación esto sería:

$$Y[i] = \frac{1}{21} \sum_{j=i-10}^{j=i+10} X[j] \quad \text{Ec. 32}$$

Como se observa en la figura 30, un arreglo inicial MM1 de 21 ceros rota a la derecha una posición y el dato de entrada se introduce en la primera posición de este, en el siguiente paso identifica si el arreglo está lleno de números diferentes a cero para empezar a promediar los datos; este proceso se repite cada vez que el programa pasa por esta secuencia.

Figura 30. Rutina para la implementación del filtro de media móvil



Fuente: Código SATD

➡ **Diferenciación.** Durante esta etapa se calcula la primera y segunda derivada de los datos de temperatura respecto al tiempo.

LabVIEW cuenta con un VI llamado *Derivative x(t)*, que ejecuta diferenciación discreta de una señal muestreada, haciendo uso de la fórmula de diferencias divididas finitas centrales con dos términos; la cual proporciona un error de truncamiento proporcional al cuadrado del paso (o periodo de muestreo). Ver figura 31

Figura 31. VI Derivative x(t)



$$y_i = \frac{1}{2dt}(x_{i+1} - x_{i-1})$$

Fuente: LabVIEW

El *SATD* mejora la exactitud dada por el anterior VI., para esto implementa el método de diferenciación numérica denominado *diferencias divididas finitas centrales*<sup>1</sup>, que usa cuatro puntos para la primera derivada y cinco puntos para la segunda derivada, alrededor del punto en consideración; generando un error de truncamiento proporcional al paso elevado a la cuarta potencia, reduciendo el error significativamente. Para saber mas acerca de diferenciación por favor dirijase al anexo E.

Las ecuaciones usadas para el cálculo de la primera y segunda derivada son:

$$f'(x_i) = \frac{-f(x_{i+2}) + 8f(x_{i+1}) - 8f(x_{i-1}) + f(x_{i-2})}{12h} \quad \text{Ec. 33}$$

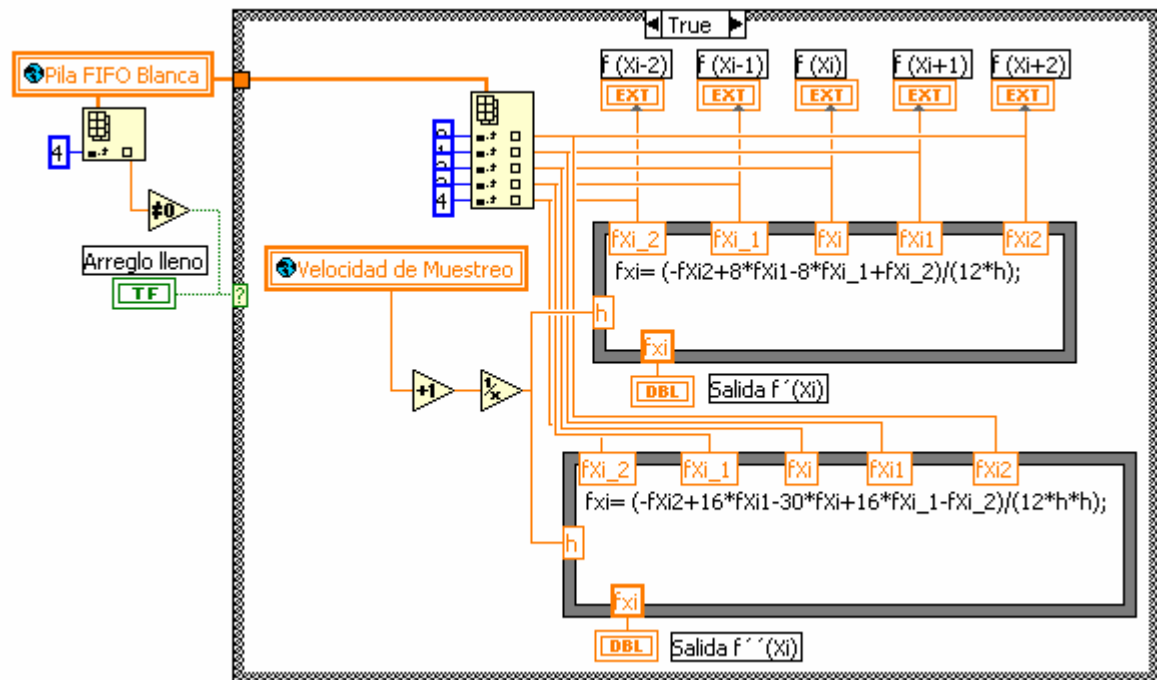
$$f''(x_i) = \frac{-f(x_{i+2}) + 16f(x_{i+1}) - 30f(x_i) + 16f(x_{i-1}) - f(x_{i-2})}{12h^2} \quad \text{Ec. 34}$$

Y la programación implementada muestra en la siguiente figura:

---

<sup>1</sup> STEVEN C. CHAPRA / RAYMON P. CANALE, Metodos Numéricos Para Ingenieros con Aplicaciones en Computadoras Personales. Ver anexo E

Figura 32. Cálculo de la primera y segunda derivada.



Fuente: Código SATD

Se observa que la *fórmula node* es una herramienta muy útil al trabajar con expresiones de muchas variables.

➔ **Análisis, interpretación y cálculos.** En esta subetapa se analiza el dato para verificar si corresponde a un punto crítico o de inflexión y se interpreta para clasificarlo como:

|           |                                      |
|-----------|--------------------------------------|
| Liq.      | Temperatura de líquido               |
| Sol.      | Temperatura de sólido                |
| Tsub.     | Temperatura de subenfriamiento.      |
| Tsol-máx. | Temperatura de sólido máxima         |
| FdS       | Temperatura de fin de solidificación |

Y se calculan los parámetros que de él dependan.

Cada uno de los dos datos, provenientes de los canales 0 y1 "se desplazan" por caminos diferentes regidos por dos algoritmos denominados:

- Preguntas y Cálculos Blancos* ➤ Para el dato proveniente de la solidificación blanca.
- Preguntas y Cálculos Grises* ➤ Para el dato proveniente de la solidificación gris.

Los algoritmos se fundamentan en la captura de puntos críticos de temperatura de forma secuencial y en el cálculo de parámetros químicos o metalúrgicos.

Para el dato proveniente de la solidificación blanca el algoritmo *Preguntas y Cálculos Blancos* se muestra en la figura 33. Este se basa en la captura de cuatro puntos (temperaturas) críticos llamados:

|       |  |
|-------|--|
| Tmáx. | Temperatura máxima en la curva de solidificación blanca. |
| Liq.  | Temperatura de líquido.                                  |
| Sol.  | Temperatura de sólido.                                   |
| FdS.  | Temperatura de fin de solidificación.                    |

Estas temperaturas se hallan en forma secuencial de acuerdo con la obtención de la curva blanca y para esto se usan banderas que dan paso a una captura específica a la vez. A partir de cada una se determinan parámetros así:

|      |  |
|------|--|
| Liq. | Carbono Equivalente y Rechupe.   |
| Sol. | % Carbono, % Silicio, la austenita, eutéctico formado, temperatura de carburo eutéctico (TCE) y la temperatura de grafito eutéctico (TGE). |
| FdS  | Enfriamiento Delta.  |

Para el dato proveniente de la solidificación gris el algoritmo *Preguntas y Cálculos Grises* se presenta en la figura 34. Este se basa en la captura de cinco puntos (temperaturas) críticos llamados:

|           |  |
|-----------|--|
| Tmáx.     | Temperatura máxima en la curva de solidificación gris. |
| Liq.      | Temperatura de líquido.                                |
| Tsub.     | Temperatura de subenfriamiento.                        |
| Tsol-máx. | Temperatura de sólido máxima.                          |
| FdS.      | Temperatura de fin de solidificación.                  |

Estas temperaturas también se hallan en forma secuencial de acuerdo con la obtención de la curva gris, igualmente se usan banderas que dan paso a una captura específica a la vez. A partir de cada una se determinan parámetros así:

|           |  |
|-----------|--|
| Tsub.     | La austenita y el eutéctico formado.           |
| Tsol-máx. | La Recalecencia y el grado de subenfriamiento. |
| FdS.      | El enfriamiento Delta.                         |

Mediante los sub.vi mostrados en la figura 35, se implementa la estructura de los algoritmos antes mencionados.

Figura 33. Algoritmo Preguntas y Cálculos Blancos.

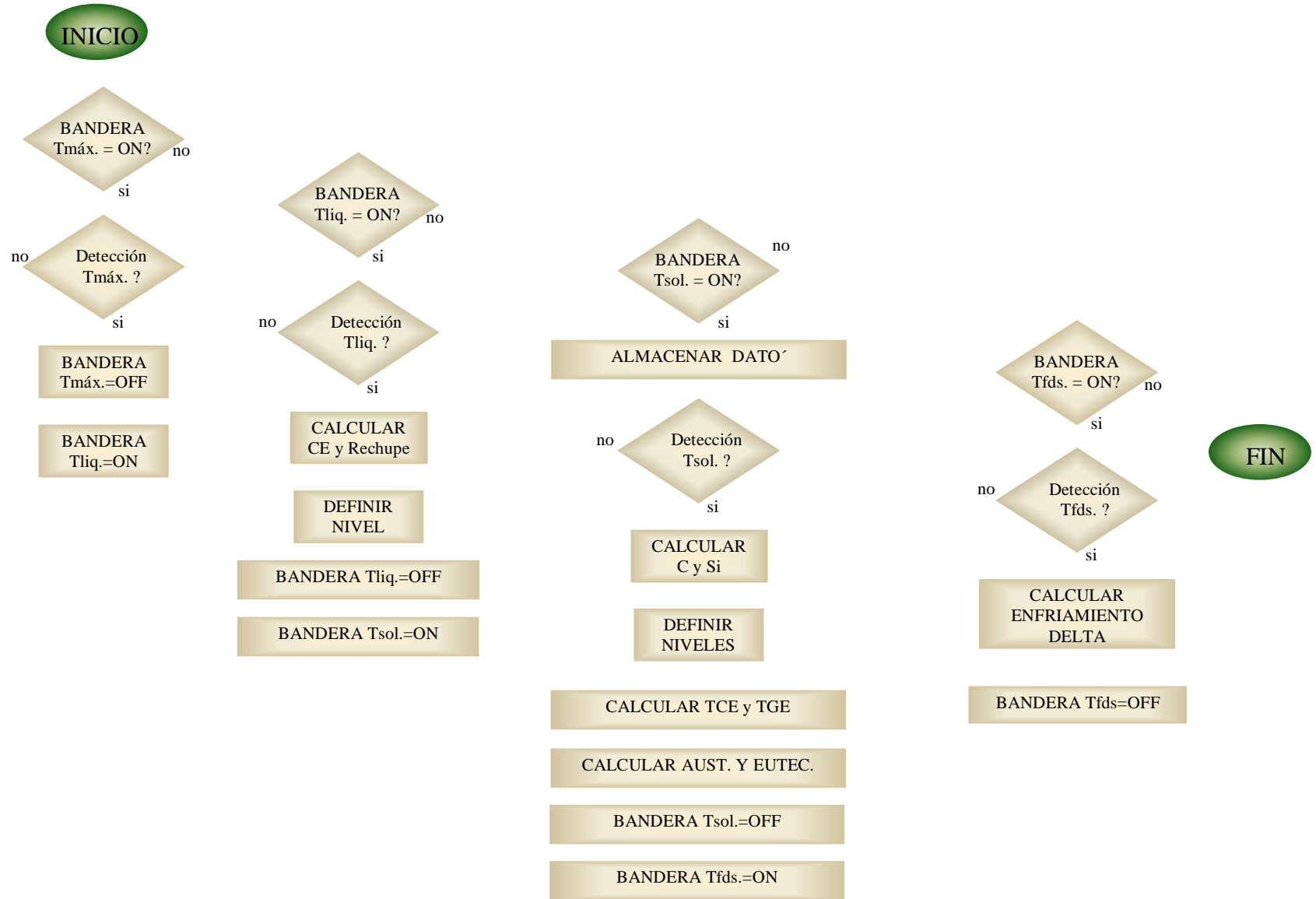


Figura 34. Algoritmo Preguntas y Cálculos Grises.

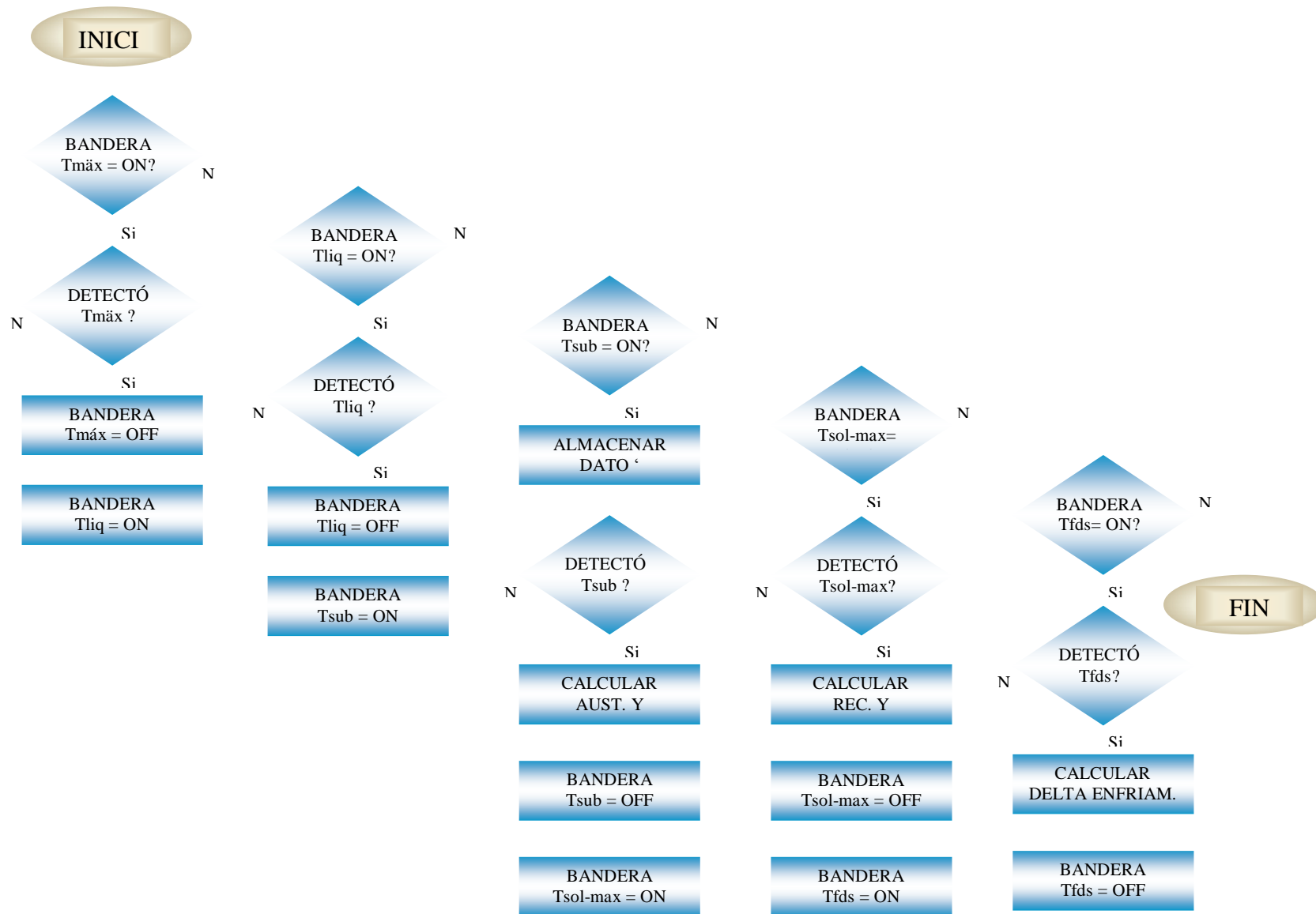


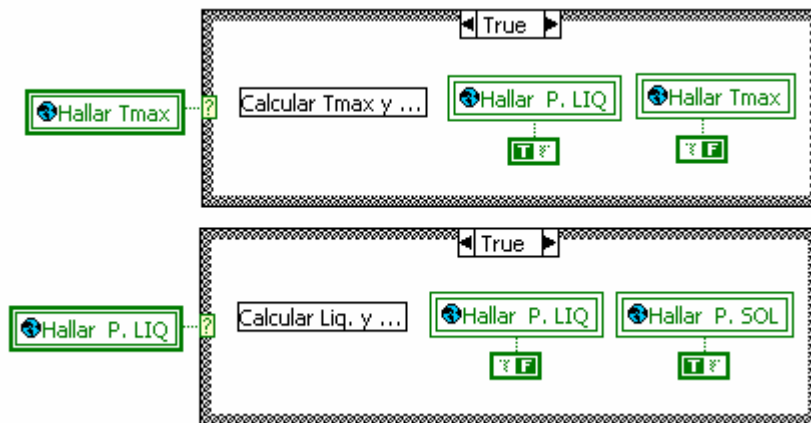
Figura 35. Sub. vi de Preguntas y Cálculos Blancos y Preguntas y Cálculos Grises.



Fuente: Código SATD

Para capturar un punto específico a la vez, mediante LabVIEW, se usan banderas mas condiciones auxiliares que activan un camino del algoritmo y desactivan los demás. Ver figura 36.

Figura 36. Programación en LabVIEW para tomar una ruta que lleva a capturar un punto específico.



Fuente: Código SATD

En el anterior ejemplo se observa dos rutas o caminos a seguir. Estando activa (true) la bandera *Hallar Tmax* se ejecuta la opción verdadera del case superior, realizando el procedimiento correspondiente y por ultimo se desactiva *Hallar Tmax* y se activa *Hallar P. LIQ*, para dar paso a la próxima ruta o a la opción verdadera del case posterior.

La detección o captura de los puntos críticos se realiza de varias formas:

La captura de *Tmáx.* se ejecuta sobre la base teórica de que la primera derivada cruza por cero en dirección negativa, entonces se encuestan los datos<sup>1</sup> hasta encontrar el primero menor o igual a cero y en ese momento el dato es *Tmáx.* El procedimiento seguido en LabVIEW se muestra en la figura 37.

<sup>1</sup> Dato' y dato'' se refieren a los datos obtenidos al derivar por primera y segunda vez los datos adquiridos.

Figura 37. Programación en LabVIEW para capturar Tmáx.



Fuente: Código SATD

La captura de *Liq*, *Sol* y *FdS* se realiza de forma semejante.

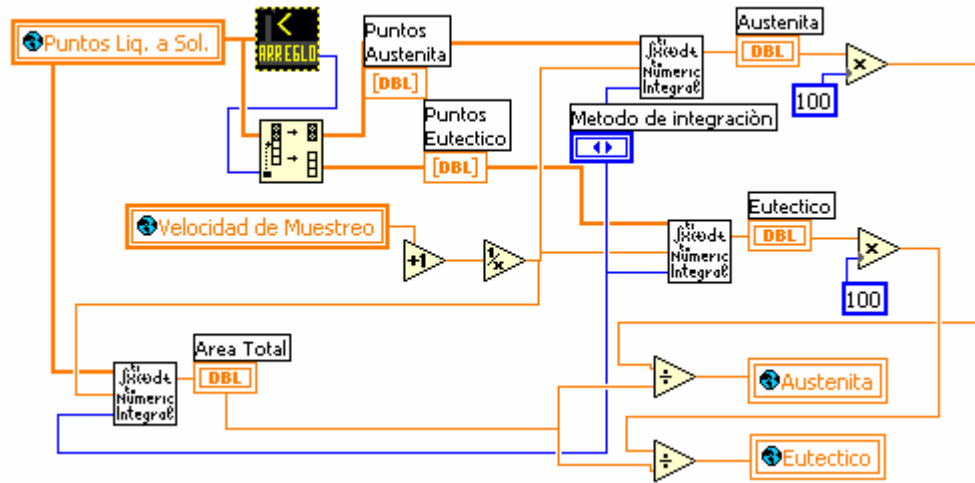
Si hablamos de *Liq*, como antes se ha mencionado (numeral 1.7.2), en la temperatura de líquido el valor de la primera derivada es el máximo de una concavidad que abre hacia abajo y la segunda derivada pasa por cero en dirección negativa.

En el menú configuración existe una variable denominada "*Limite de Captura Líquida*" que ayuda en la captura (ver manual de usuario, numeral 6.5.2). Cuando un dato' es mayor que el límite de Captura indica que se entró en "zona crítica", y se almacenan el dato, el dato' y el dato'' hasta salir de ella. Estando en dicha zona se encuesta por el dato'' hasta detectar el cambio de polaridad de positiva a negativa y en ese instante el dato es igual a *Liq*.

La captura de *Sol* se lleva a cabo de igual forma que la captura *Liq*. Ahora se cuenta en el menú configuración con una variable llamada "*Limite de Captura Sólida*" y el procedimiento de captura es igual.

Entre la detección de *Liq* y la detección de *Sol* se almacenan los datos', con el fin de hallar el área bajo la curva de la primera derivada en ese intervalo para calcular el porcentaje de austenita y eutéctico formado. Para el cálculo de estos parámetros se halla el área bajo la curva de la primera derivada; el área desde el primer máximo hasta el mínimo de la curva corresponde al porcentaje de austenita y el área desde el mínimo hasta el segundo máximo equivale al porcentaje de eutéctico formado. El código implementado se ilustra en la figura 38.

Figura 38. Código implementado para calcular el porcentaje de austenita y eutéctico formado



Fuente: Código SATD

Como se observa en la anterior figura, para el cálculo del área bajo la curva de la primera derivada se emplea el icono *Numeric Integration*, el cual ejecuta la integración numérica de un arreglo de datos usando uno de cuatro métodos: Regla trapezoidal, Regla de Simpsons', regla de Simpsons' 3/8 o regla de Bode. Se trabaja con la regla de Simpsons' pues se considera una buena aproximación del valor exacto de la integral.

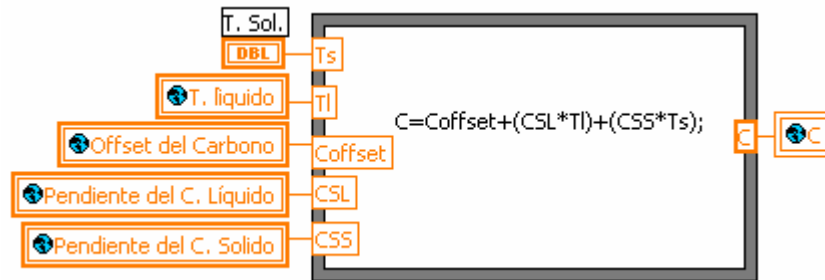
La captura de *FdS* se efectúa basados en el hecho que el valor de la primera derivada corresponde al mínimo valor de una concavidad que abre hacia arriba y la segunda derivada cruza por cero en dirección positiva. La variable en el menú de configuración que ayuda en la captura se denomina "Limite de Captura del fin de Solidificación".

Para detectar *Tsub* y *Tsol-max* se parte del hecho que esos puntos corresponden a un mínimo y un máximo respectivamente de dos concavidades que presenta la curva de enfriamiento para solidificación gris (ver numeral 1.7.2). En *Tsub* la primera derivada pasa por cero en dirección positiva y en *Tsol-max* la primera derivada pasa por cero en dirección negativa. Estos dos hechos se toman como fundamento para encontrar los puntos mediante LabVIEW.

Después de la detección de cada temperatura crítica se procede a calcular los parámetros correspondientes. Para esto se utiliza la herramienta de LabVIEW "*formula node*", la cual ejecuta operaciones matemáticas de forma sencilla.

Por ejemplo, para calcular el %C se requiere de las temperaturas *Liq* y *Sol* mas otras variables parametrizables en el menú configuración. En la figura 39 se observa la ventaja de usar la herramienta "*formula node*" para calcular el carbono.

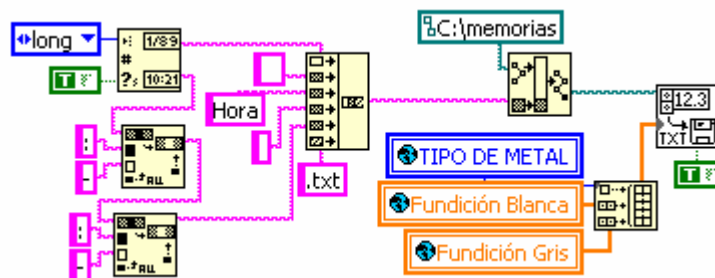
Figura 39. Cálculo del %C haciendo uso de la herramienta "formula node".



Fuente: Código SATD

4.3.5 Almacenamiento y presentación. Cuando inicia la adquisición de los datos que construyen las curvas de enfriamiento, también se almacenan<sup>1</sup>. Luego todos los datos junto con el parámetro *CONFIGURACIÓN* se salvan un único archivo de texto (de 3001 datos) mediante el sub.VI *Write To Spreadsheet File*, Este almacenamiento se realiza con el fin de volver a dibujar (redibujar) la curva de enfriamiento y obtener resultados posteriormente cuando el operario lo requiera. Los archivos tipo texto son organizados en una carpeta llamada memorias y ubicada en C:/, cada archivo se identifica por la hora y fecha de creación. Este procedimiento se realiza en LabVIEW de la siguiente manera. Ver figura 40.

Figura 40. Rutina implementada para salvar los datos



Fuente: Código SATD

La presentación de los resultados se hace por medio de indicadores numéricos y gráficos. Para ello LabVIEW dispone de varios tipos de gráficos accesibles desde el menú *Controls* del panel frontal bajo el item *Graph*, divididos en dos grupos: *Los indicadores Chart* y los *indicadores graph*. Así:

<sup>1</sup> Se almacenan 1500 datos provenientes de la solidificación blanca y 1500 datos provenientes de la solidificación gris, formando un arreglo de 3000 datos.

## Waveform Chart

- Waveform Graph
- XY Graph
- Intensity Chart
- Intensity Graph
- Digital Waveform Graph
- 3D Surface Graph
- 3D Parametric Graph
- 3D Curve Graph
- Ctls

Un indicador *Graph* o indicador gráfico es una representación bidimensional de una o mas gráficas. El *Graph* recibe los datos como un bloque. Un indicador *Chart* o de trazos tambien muestra gráficas, pero este recibe los datos y los muestra punto por punto o array por array<sup>1</sup>

En la pantalla de presentación principal del *SATD* se usa el indicador *Waveform Graph* para representar las curvas de enfriamiento y *Waveform Chart* para las curvas de las derivadas. Ya que el primer indicador tiene la opción de ubicar cursores para señalar puntos críticos.

Como se aprecia en la figura 41, la curva de color amarillo corresponde a la fundición blanca y la de color rojo a la fundición gris. En la parte inferior aparecen las curvas de la primera y segunda derivada de las fundiciones respectivamente; también se ubica la barra de menús donde se ofrecen más herramientas.

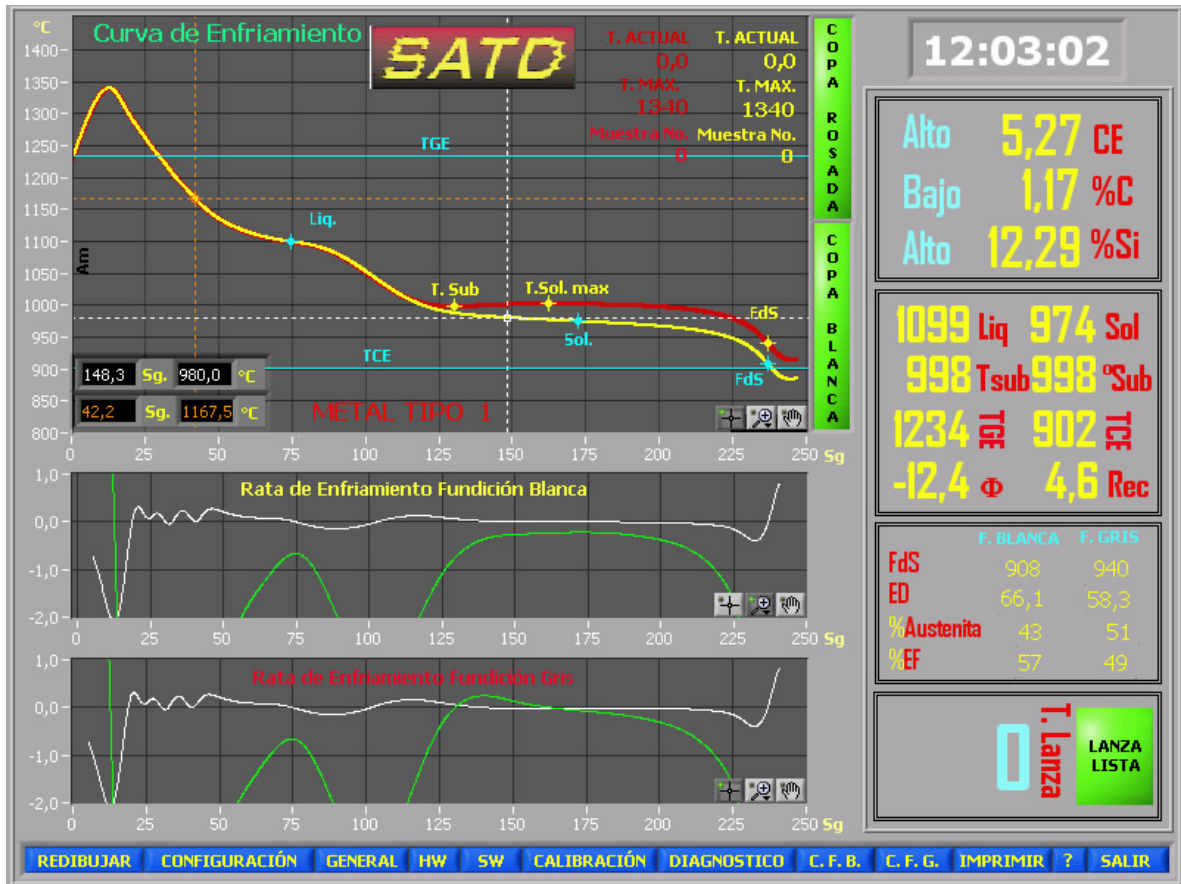
Al costado derecho de la pantalla se encuentran todos los indicadores numéricos que representan los siguientes resultados:

- T. Actual:** Indica la temperatura que registra el sistema muestra a muestra para la fundición gris.
- T. Actual:** Indica la temperatura que registra el sistema muestra a muestra para la fundición blanca.
- T. Máx.:** Presenta la temperatura máxima que alcanza la curva de enfriamiento gris.
- T. Máx.:** Presenta la temperatura máxima que alcanza la curva de enfriamiento blanca.
- Muestra No.:** Indica el número de la muestra actual gris adquirida.
- Muestra No.:** Indica el número de la muestra actual blanca adquirida.

---

<sup>1</sup> Array se refiere a un arreglo o matriz de datos.

Figura 41. Presentación del SATD

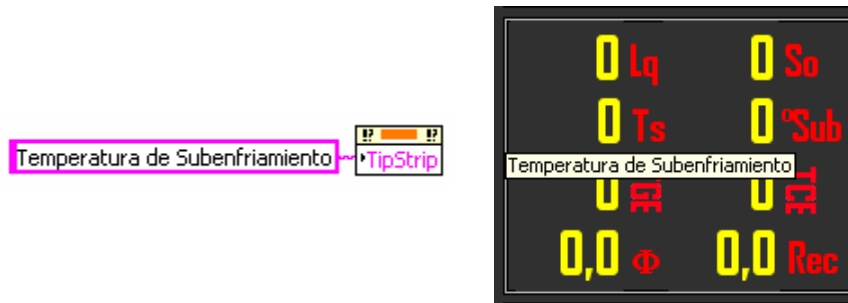


Fuente: Imagen del SATD

- CE:** Carbono Equivalente.
- % C:** Porcentaje de Carbono.
- % Si:** Porcentaje de Silicio.
- Liq.:** Temperatura de Líquido.
- Sol.:** Temperatura de Sólido
- Tsub.:** Temperatura de Subenfriamiento.
- °Sub.:** Grado de Subenfriamiento.
- TGE:** Temperatura de Grafito Eutéctico.
- TCE:** Temperatura de Carburo Eutéctico.
- $\Phi$ :** Tendencia al Rechupe.
- Rec:** Recalescencia.
- FdS:** Fin de Solidificación.
- ED:** Enfriamiento Delta.
- % Austenita:** Cantidad de Abstenida formada en porcentaje.
- % EF:** Cantidad del Eutéctico formado en Porcentaje.
- T. Lanza:** Temperatura promedio de la fundición entregada por la lanza de inmersión.

Adicionalmente en la presentación existe una herramienta interactiva que despliega el nombre completo del indicador en la pantalla de presentación, al posicionar el mouse sobre él, esto se logra haciendo uso de la propiedad de nodo TipStrip. Ver figura 42

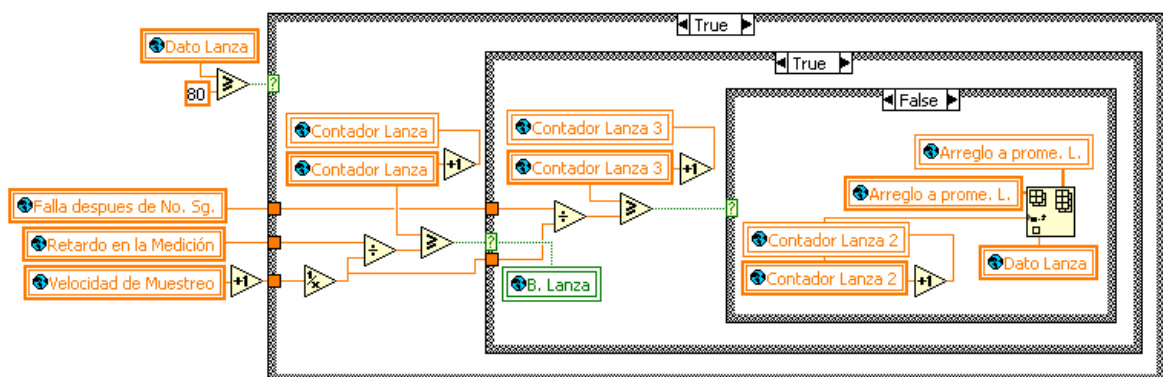
Figura 42. Herramienta TipStrip



Fuente: Imagen SATD

4.3.6 Procesamiento lanza. Los datos procedentes del canal correspondiente a la lanza de inmersión son tratados de forma diferente, estos son tenidos en cuenta transcurrido un tiempo de espera después de inmersa la lanza (tiempo requerido para que se establezca la temperatura); luego estos datos son almacenados en un arreglo cuyo tamaño depende de la cantidad de segundos que se deje inmersa la lanza, El fabricante de esta recomienda que este tiempo no sea superior de ocho segundos, de lo contrario la lanza sufriría daños. El contenido del arreglo es promediado aritméticamente para obtener la temperatura de la colada. Ver figura 43.

Figura 43. Código para el procesamiento de la Lanza



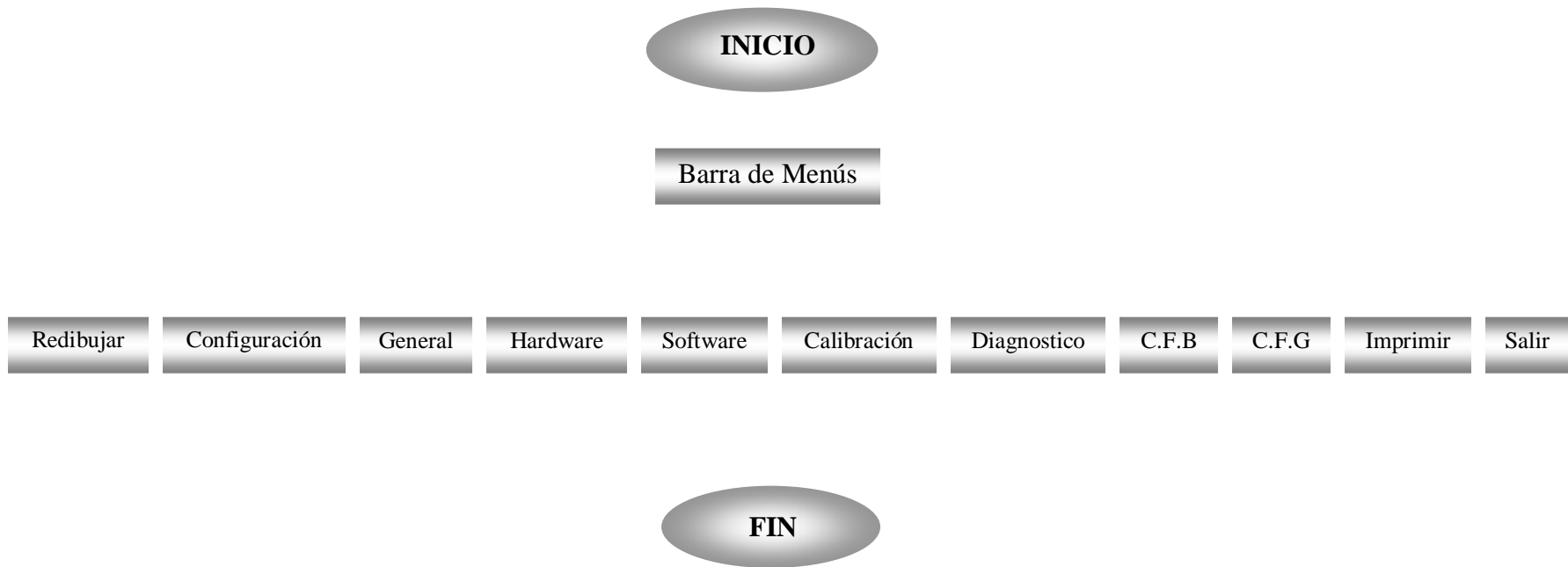
Fuente: Código LabVIEW

4.3.7 Barra de menús. Según el diagrama a bloques de la figura 21, el software tiene un camino alternativo que se ejecuta mientras no se adquieran curvas y cuando el usuario lo

determine, denominado *Barra de menús*. Esta rama a su vez se subdivide en 12 opciones como lo ilustra la figura 44.

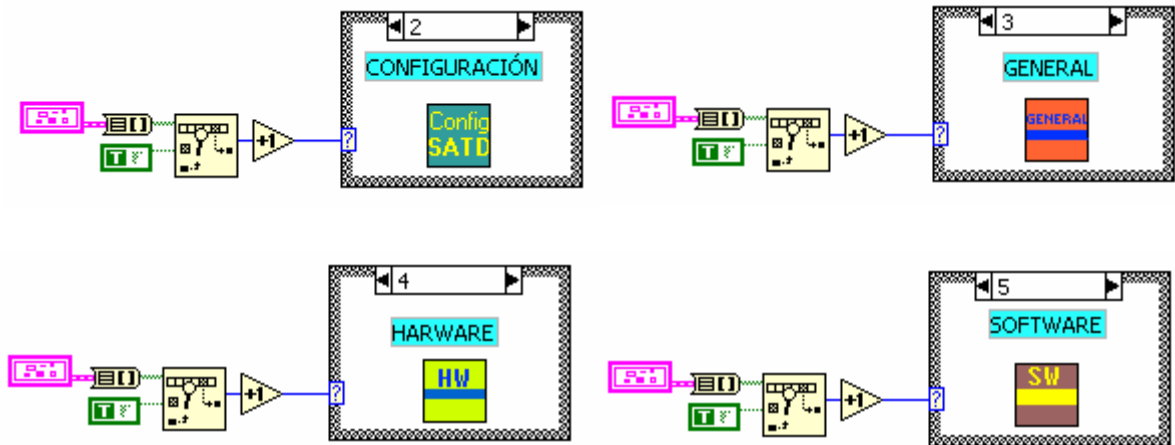
Cuando se presiona uno de los botones de la *Barra de menús* el programa entra en una subrutina o en un sub.VI. La selección del sub.VI se realiza mediante la estructura *case múltiple*, como se observa en la figura 45.

Figura 44. Diagrama a bloques de las opciones adicionales que se presentan en la barra de menús del SATD.



Fuente: Diseñado por los autores

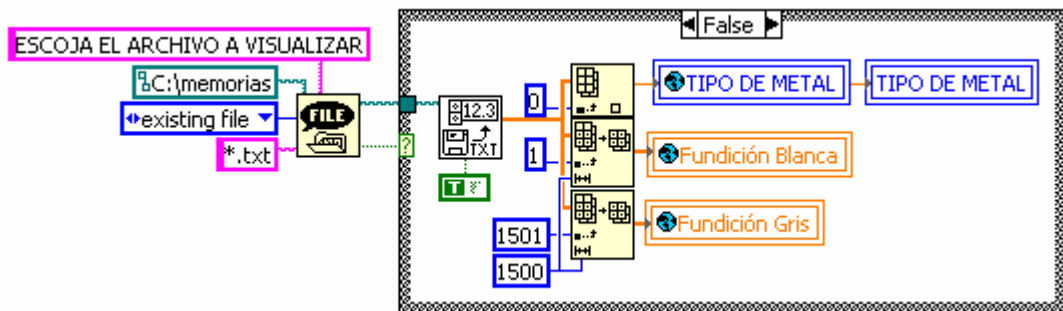
Figura 45. Estructura case multiple usada para elegir el sub.VI a ejecutar



Fuente: Código SATD

➔ Redibujar. Como se menciona en el numeral 4.3.5, los datos son almacenados. Al entrar en la opción *Redibujar* estos datos son nuevamente leídos del archivo tipo texto (mediante el icono *Read From Spreadsheet File*) y clasificados, como lo muestra la figura 46. Antes de leer los datos se pregunta el archivo a visualizar, usando el icono *File Dialog*.

Figura 46. Subrutina para seleccionar un archivo a visualizar.



Fuente: Código SATD

Los datos del archivo seleccionado son pasados nuevamente por la estructura principal del programa, simulando datos reales, para redibujar las curvas y presentar los resultados correspondientes.

➔ Configuración. Este sub.VI permite configurar en el SATD: Los rangos en que deben estar los parámetros químicos a hallar, las constantes químicas involucradas en las

ecuaciones de procesamiento, los límites de captura de las temperaturas críticas y los parámetros de presentación de la pantalla, de acuerdo a las necesidades del ingeniero metalúrgico.

El *SATD* tiene la opción de establecer un valor de los parámetros para cinco casos distintos. Cada caso se distingue bajo la denominación "CONFIGURACIÓN" seguido de un número de 1 a 5. La *Configuración* hace referencia a un ajuste particular de la fundición que se quiere analizar; evitando reconfigurar el sistema cada vez que se use.

Todos los parámetros configurables se almacenan en archivos de texto haciendo uso del sub.vi *Write To Spreadsheet File* y se refrescan mediante el sub.vi *Read From Spreadsheet File* una vez modificados. Ver figura 47.

Como se aprecia en la figura, los datos son extraídos del archivo correspondiente a la *Configuración* y son presentados en pantalla, donde el ingeniero metalúrgico los puede modificar según su necesidad y por último los nuevos datos son almacenados en el mismo archivo.

**General.** Cuando se presiona la opción *General*, se ejecuta un sub.VI, que proporciona una descripción general del sistema, su funcionamiento y características.

**Hardware.** El sub.VI *Hardware* despliega un mensaje donde presenta brevemente información del hardware que utiliza el sistema.

**Software.** De la misma manera se ejecuta el sub.VI *Software* para suministrar una descripción del software del sistema.

➡ **Calibración.** En esta ventana se busca corregir el error por pérdidas de tensión en los cables compensados y conectores. Estas pérdidas ocurren debido a la resistencia (longitud) de los cables de extensión desde la caja convertora hasta las bases donde se ubican las copas para la toma de muestras. Estas pérdidas son mínimas ya que se busca medir un voltaje y no transmitir una corriente.

Si se conecta una "pistola de voltaje"<sup>1</sup> en uno de los soportes, se proporciona al sistema un milivoltaje constante equivalente a una temperatura<sup>2</sup>; así se calcula la temperatura que se descompensa en la trayectoria del cable y en los conectores.

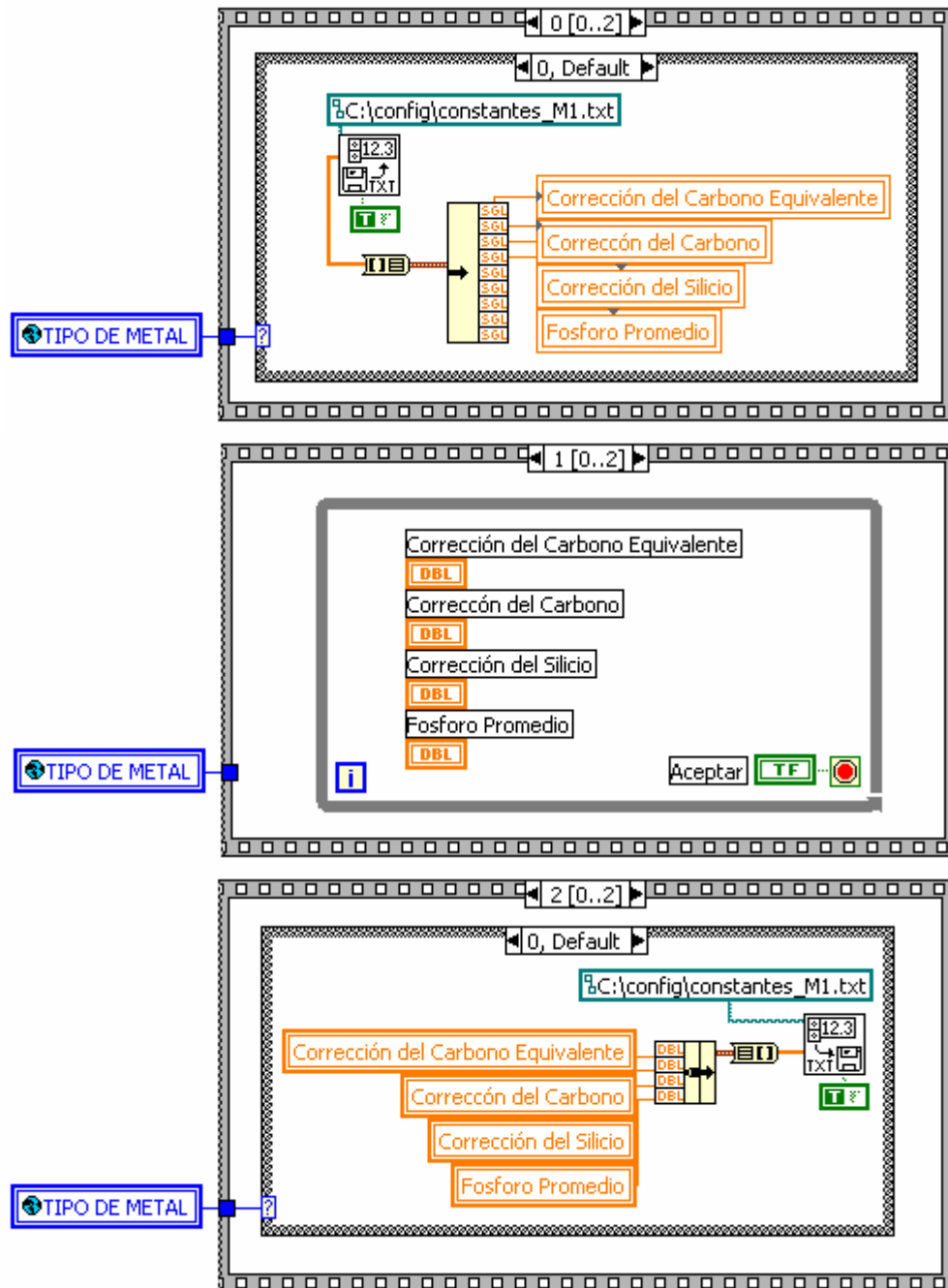
El *SATD* mide estas pérdidas, empleando el sub.VI *calibración*. Lee el milivoltaje proporcionado por la pistola presente en el canal que se está analizando, lo compensa y lo almacena en un arreglo de 80 posiciones, una vez lleno este arreglo es promediado y convertido de milivoltios a grados centígrados, esta temperatura es comparada con la temperatura de calibración

---

<sup>1</sup> Para más especificaciones de la pistola Ver manual de usuario numeral 6.5.6

<sup>2</sup> Esta temperatura estudiada más adelante se denominará "Temperatura de calibración Estándar". Ver Manual de Usuario (capítulo 6)

Figura 47. Almacenamiento, modificación y lectura de los datos de configuración.

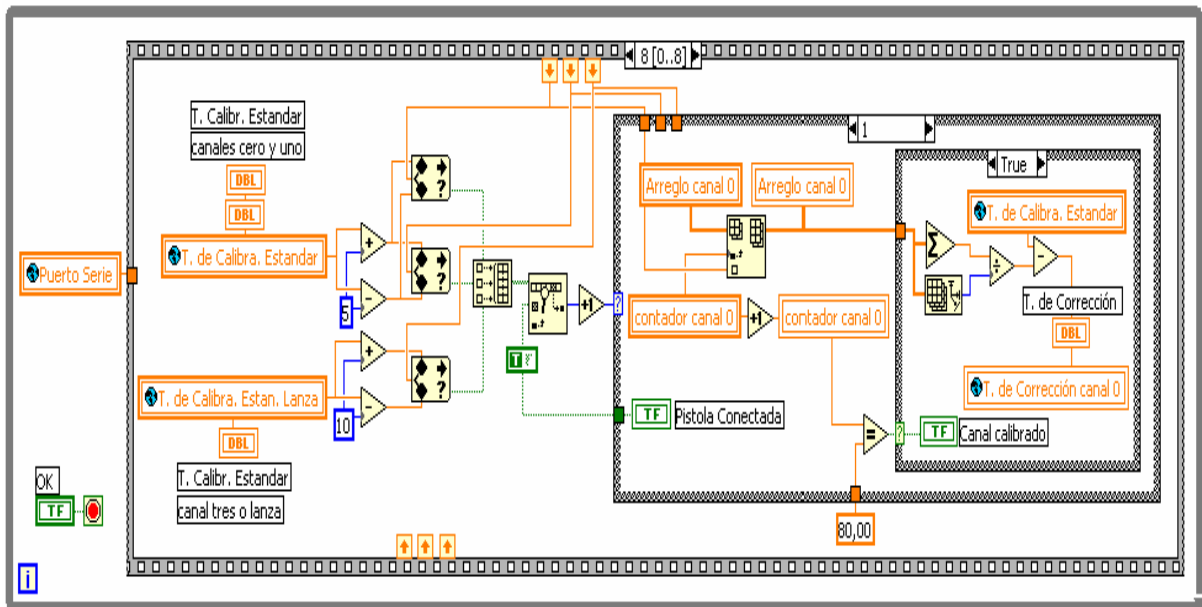


Fuente: Código SATD

estándar<sup>1</sup>, la diferencia entre estas dos es la temperatura de corrección del canal, la cual es usada después para corregir cada una de las adquisiciones que se efectuen en este canal.

El procedimiento antes descrito se realiza para cada uno de los tres canales como se muestra en la figura 48

Figura 48. Calibración de los canales.



Fuente: Código SATD

Diagnostico. Tiene como objetivo informar al usuario del correcto o incorrecto funcionamiento de la unidad conversora, para esto el sistema lee y presenta en pantalla el dato de cada uno de los canales y de los sensores de unión fría (CJC).

Aquí al igual que en la estructura general del programa, es enviada la orden de conversión y lectura de forma independiente y consecutiva para cada canal y sensor como lo muestra la figura 49.

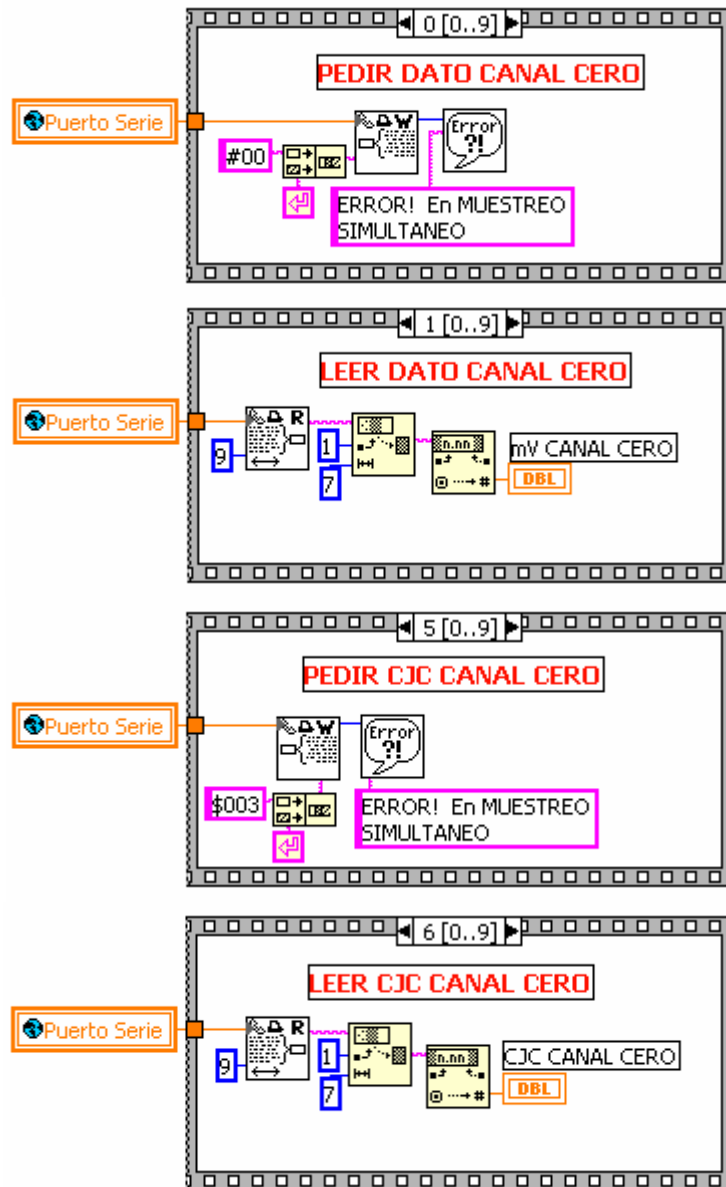
➡ C.F.B (Cursor Fundición Blanca) y C.F.G. (Cursor Fundición Gris). Estas dos opciones son incluidas para facilitar al usuario la identificación e interpretación de los resultados en el panel frontal, estos cursores se desplazan por el contorno de cada una de

<sup>1</sup> La *Temperatura de calibración Estándar* es un parámetro establecido en el menú configuración. Ver numeral 6.5.2

las gráficas respectivamente.

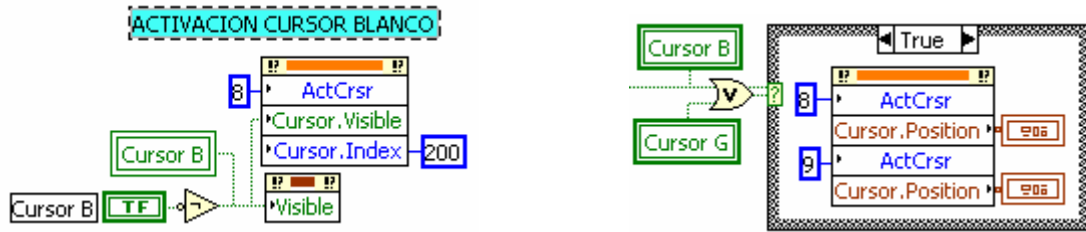
Los cursores son implementados haciendo uso de la herramienta Property Node/Cursor de la gráfica Waveform Graph. Ver figura 50.

Figura 49. Rutina implementado para el sub.VI diagnostico.



Fuente: Código SATD

Figura 50. Implementación de los cursores.



Fuente: Código SATD

Como se observa en la figura, la propiedad de nodo tiene varios ítems para activar o no el cursor, hacerlo visible o invisible, establecer la posición inicial cuando aparece, conocer las coordenadas instantaneas, etc.

➡ Imprimir. Esta opción permite al usuario imprimir el panel frontal del SATD. El icono usado en LabVIEW es *Print Panel* mostrado en el figura 51. Este icono produce la impresión completa del panel frontal.

Figura 51. Icono usado para imprimir el panel frontal del SATD

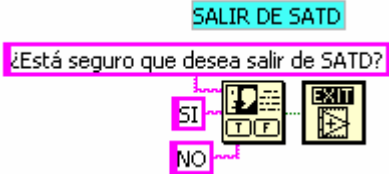


Fuente: Código SATD

Ayuda. Este sub.Vi muestra una ventana que explica al usuario como hacer uso de la ayuda o descripción de cada uno de los elementos presentes en la pantalla principal del SATD.

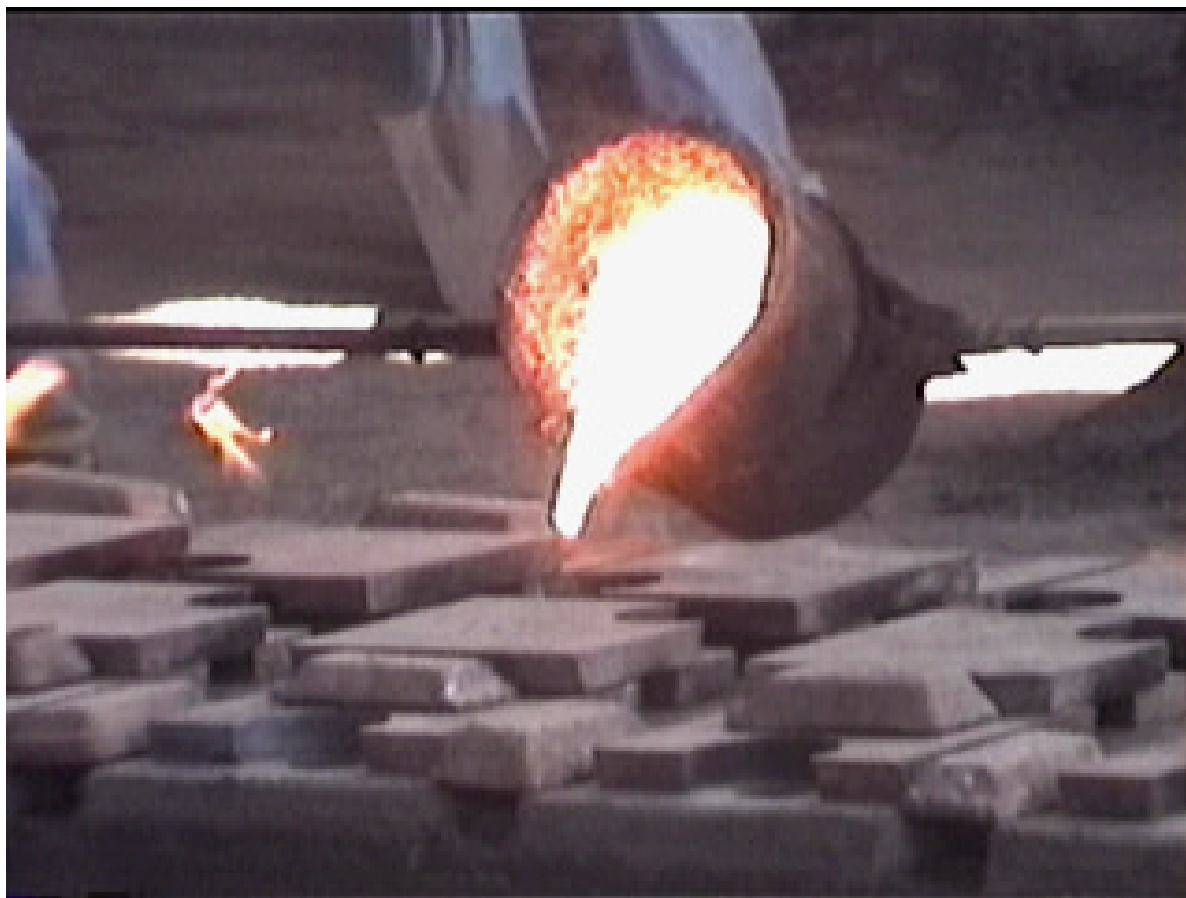
➡ Salir. Al pulsar este comando se ejecuta una rutina despliega un mensaje sobre el panel frontal, en el que pregunta si quiere salir de la aplicación o no. Esto se implementa haciendo uso de los iconos *Two Button Dialog Box* y *Quit LabVIEW* como se indica en la figura 52. El primero despliega un cuadro de dialogo que contiene el mensaje "Esta seguro que desea salir de SATD" y dos botones de respuesta afirmativa o negativa; el otro detiene la ejecución de todos los VIs y termina la sesión actual de LabVIEW.

Figura 52. Rutina implementada para salir del SATD



Fuente: Código *SATD*

MANUAL DE USUARIO  
SISTEMA DE ANÁLISIS TÉRMICO DUAL  
SATD



## 5. MANUAL DE USUARIO SISTEMA DE ANÁLISIS TÉRMICO DUAL SATD

### 5.1 INTRODUCCIÓN

El Software de Análisis Térmico es una herramienta que ayuda a reducir costos, rechazos o repetir trabajos y aumentar la productividad en fundiciones que se traducen en el aumento de la rentabilidad.

El Sistema de Análisis Térmico Básico (SATB) ayuda en la comprobación y corrección de la química básica. Utiliza una copa de arena, con una cantidad pequeña de telurio alrededor de ella y un termopar en el fondo, una muestra del metal fundido del horno es tomada y vertida en la copa. El monitor del computador comienza entonces a exhibir una curva de enfriamiento en tiempo real como la muestra del metal se enfría dentro de la copa. En la captura de la temperatura líquida, se exhibe el CE (equivalente del carbono). En la captura sólida, el monitor exhibe %C (% del carbono en peso) y el %Si (% del silicio en peso). Después se indica si los resultados son altos o bajos comparado con las especificaciones programadas.

El *SATD* va un paso más allá de la versión básica, exhibiendo las características metalúrgicas. Diferente del SATB donde el sistema usa una sola copa, el *SATD* requiere el uso de dos copas, ambas conectadas con la computadora vía el convertidor análogo a digital. Una copa contiene revestimiento de telurio (en su interior) mientras que la otra contiene revestimiento de alúmina<sup>1</sup>. El sistema supervisa y traza las curvas de enfriamiento. Comparando los puntos de captura y otros parámetros de ambas curvas, el *SATD* da la química básica tal como CE, %C y %S de la fundición. Del Silicio el sistema calcula una temperatura de grafito eutéctico teórica y la compara con la curva de recalcancia reportando el grado de subenfriamiento y la recalcancia.

### 5.2 REQUERIMIENTOS DE HARDWARE Y SOFTWARE

5.2.1 Unidad Conversora. Requiere 110/220/240 Vac (60 – 50 Hz) con protección contra sobre carga.

---

<sup>1</sup> El telurio hace que la muestra solidifique como hierro blanco mientras que la copa sin telurio indica enfriamiento normal del metal. Ambas copas deben ser llenadas de la misma muestra del metal fundido. La copa de telurio se llena primero seguida por la copa de alúmina.

5.2.2 Computador. Las características del computador requerido son:

Procesador Pentium III / 1.2 GHz o mejor.

Disco duro de 8 MB en adelante.

128 MB de memoria principal.

Sistema operativo Windows 98 o mejor.

Monitor SVGA.

Impresora de cualquier marca (opcional).

Estabilizador de voltaje para todo el sistema.

5.2.3 Copas, lanza y Soportes. Dos soportes, una lanza de inmersión y la cantidad adecuada de copas y cartuchos de inmersión.

5.2.4 Cables compensados y conectores. Para alejar el sistema del punto de medida es necesario dos cables compensados para termocuplas tipo K y uno para termocupla tipo S/R<sup>1</sup>.

5.2.5 Pistola para calibración. Una pequeña cantidad de la señal a medir es generalmente perdida entre el soporte y la unidad conversora debido a la resistencia en el cable y los conectores. Con la pistola se identifica la señal faltante y se calibra el equipo.

### 5.3 PRECONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

Antes de iniciar el proceso de adquisición se debe seguir los siguientes pasos de inicialización del sistema, en el orden:

El primer paso a seguir es conectar los cables compensados en los enchufes correspondientes. El cable amarillo que trae el soporte rosado debe ser conectado al enchufe mas a la izquierda de la unidad conversora. El cable amarillo que trae el soporte blanco se debe conectar al enchufe central. Y el cable verde que proviene de la lanza debe ser conectado al enchufe mas a la derecha. Así, el color de los cables debe coincidir con el color de los enchufes. La figura 53 muestra las conexiones correctas en la unidad conversora.

Una vez estén listas las conexiones anteriores, se procede a encender la unidad conversora, haciendo uso del interruptor que trae en la tapa puerta superior.

Luego se ejecuta el programa *SATD* del PC. Para esto se busca el icono que da acceso directo a "*SATD*" en el escritorio, y se hace doble click. Aparecerá la pantalla de presentación.

---

<sup>1</sup> El cable compensado es de color amarillo para termocupla K y verde para termocupla S/R. (Según norma ANSI)

Figura 53. Conexiones correctas de los cables compensados en los tomas.



Fuente: Fotografía tomada a la unidad convertora

#### 5.4 OPERACIÓN NORMAL

El panel principal del *SATD* se presenta en la figura 54, y basados en esta imagen se comenta como sigue:

La presentación principal cuenta con tres *indicadores gráficos* ubicados en la parte izquierda de la pantalla. En orden de arriba abajo, se encuentra en el primer indicador las curvas de enfriamiento de solidificación blanca (color amarillo) y de solidificación gris (color rojo); en el indicador del medio se presentan las curvas de la primera y segunda derivada correspondientes a la curva amarilla y en el indicador inferior se presentan las curvas de la primera y segunda derivada de la curva roja. La primera derivada se dibuja en color verde y la segunda derivada<sup>1</sup> en color blanco, en ambos casos.

Al costado derecho de la pantalla se encuentran todos los *indicadores numéricos* que representan los siguientes resultados:

- T. Actual:** Indica la temperatura que registra el sistema muestra a muestra para la fundición gris.
- T. Actual:** Indica la temperatura que registra el sistema muestra a muestra para la fundición blanca.
- T. Máx.:** Presenta la temperatura máxima que alcanza la curva de enfriamiento gris.
- T. Máx.:** Presenta la temperatura máxima que alcanza la curva de enfriamiento blanca.
- Muestra No.:** Indica el número de la muestra actual gris adquirida.
- Muestra No.:** Indica el número de la muestra actual blanca adquirida.
- CE:** Carbono Equivalente.
- % C:** Porcentaje de Carbono.

<sup>1</sup> Derivadas de temperatura respecto al tiempo.

Figura 54. Presentación principal del SATD

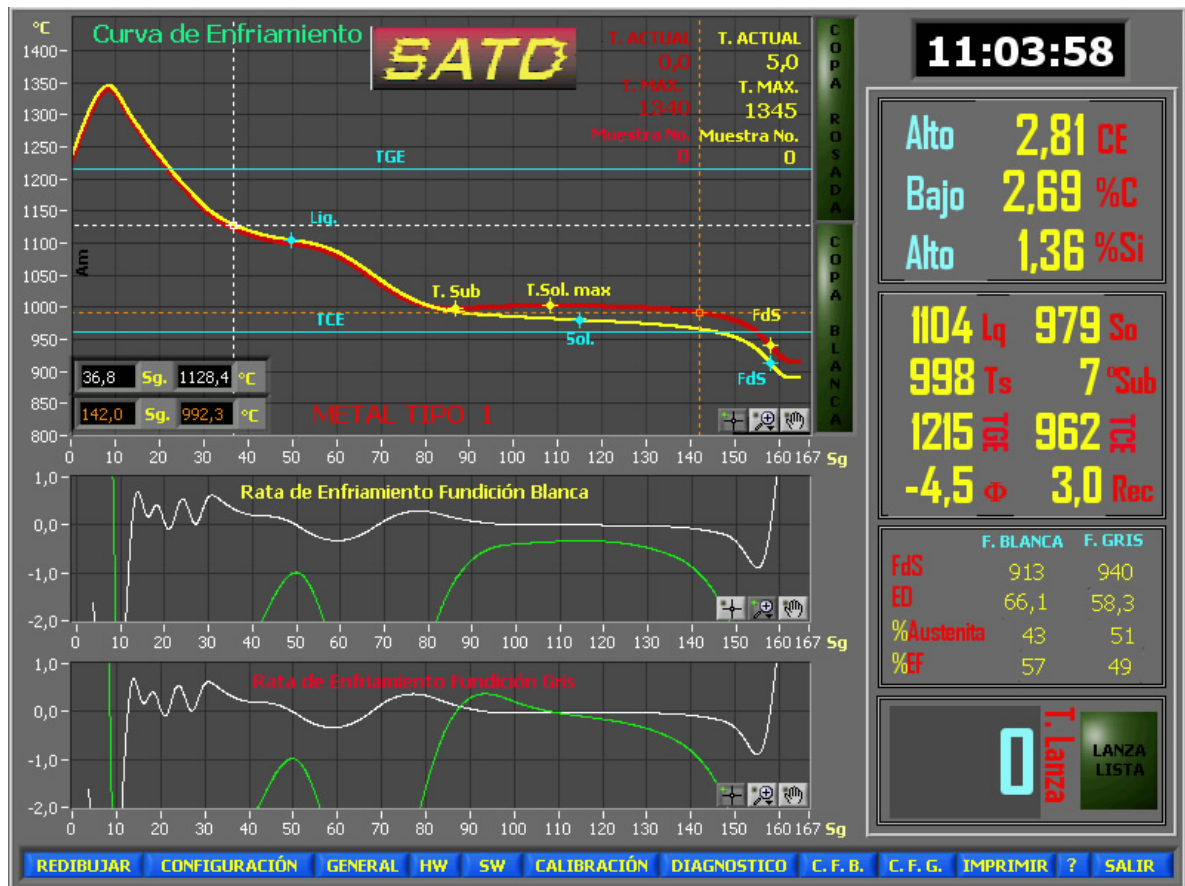


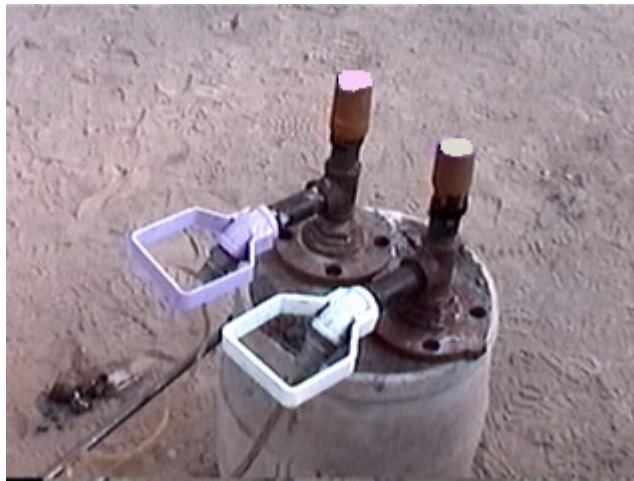
Imagen del SATD

- % Si:** Porcentaje de Silicio.
- Liq.:** Temperatura de Líquido.
- Sol.:** Temperatura de Sólido
- Tsub.:** Temperatura de Subenfriamiento.
- °Sub.:** Grado de Subenfriamiento.
- TGE:** Temperatura de Grafito Eutéctico.
- TCE:** Temperatura de Carburo Eutéctico.
- Φ:** Tendencia al Rechupe.
- Rec:** Recalescencia.
- FdS:** Fin de la Solidificación.
- ED:** Enfriamiento Delta.
- % Austenita:** Cantidad de Austenita en porcentaje.
- % EF:** Cantidad del Eutéctico formado en Porcentaje.
- T. Lanza:** Temperatura promedio de la fundición entregada por la lanza de inmersión.

Al lado derecho de las curvas de enfriamiento existen dos *indicadores luminosos*, que informan constantemente la correcta conexión o contacto de las copas con las bases; de igual manera existe un indicador para la lanza en la parte inferior derecha del panel frontal.

Durante la operación normal el sistema está en disposición de adquirir curvas. Para ello se requiere ubicar las copas en los soportes y el tubo de cartón (cartucho) en la lanza de inmersión. La copa rosada se debe ubicar en el soporte rosado y la copa blanca en el soporte blanco. Como se indica en la figura 55 Cuando se enciendan los correspondientes indicadores luminosos la posición de las copas y el cartucho es correcta y están listos.

Figura 55. Posición correcta de las copas en los soportes



Fuente: Fotografía tomada por los autores

Al empezar a vertir la muestra de fundición en las copas, se debe llenar primero la copa rosada y luego la copa blanca, inmediatamente se empezará a desplegar en pantalla las curvas de enfriamiento, las derivadas, las detecciones y los cálculos.

Cuando se realiza la captura líquida, la temperatura Liq. es presentada y el CE es calculado y desplegado.

Durante la captura sólida, el carbono y el silicio son calculados y desplegados (%C y % Si). A partir del silicio las temperaturas eutécticas de grafito y carburo (TGE y TCE) se hallan, luego se calculan la recalcancia y el grado de subenfriamiento (Rec y °Sub ). El fin de la solidificación es la última de las capturas y proporciona el enfriamiento delta (ED).

## 5.5 BARRA DE MENÚS

En la parte inferior de la pantalla está la *barra de menús*, que ofrece diversas opciones. Cada una es accesible mediante el mouse o haciendo uso de teclas de navegación, como lo muestra la tabla 3.

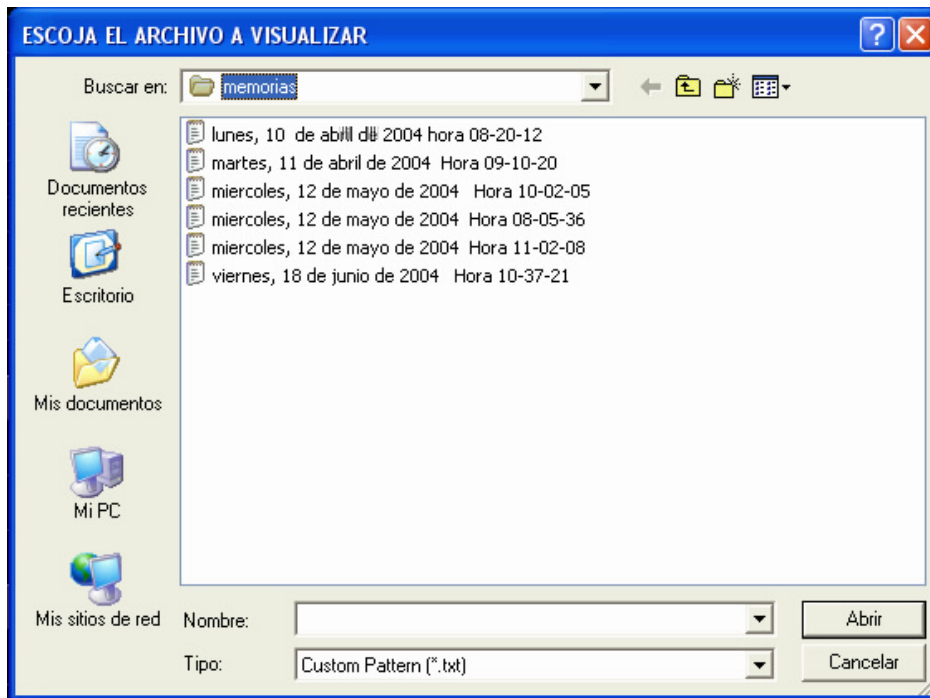
Tabla 3. Teclas de navegación para las opciones del menú.

| MENÚ          | TECLA DE NAVEGACIÓN |
|---------------|---------------------|
| REDIBUJAR     | F1                  |
| CONFIGURACIÓN | F2                  |
| GENERAL       | F3                  |
| HW            | F4                  |
| SW            | F5                  |
| CALIBRACIÓN   | F6                  |
| DIAGNOSTICO   | F7                  |
| C.F.B.        | F8                  |
| C.F.G.        | F9                  |
| IMPRIMIR      | F10                 |
| AYUDA         | F11                 |
| SALIR         | ESC                 |

Fuente: Elaborada por los Autores

5.5.1 Redibujar. Abre una ventana que muestra los nombres de las últimas curvas de enfriamiento adquiridas por fecha y hora. El usuario puede seleccionar la curva que desea volver a ver. Ver figura 56.

Figura 56. Archivos almacenados de adquisiciones previas.



Fuente: Imagen del *SATD*

5.5.2 Configuración. Esta opción tiene como objetivo, permitir al experto metalúrgico variar o modificar las constantes químicas, rangos químicos, límites de captura y presentación entre otros, con el fin de personalizar el software a las necesidades y características de las fundiciones que realiza. Para esto este menú ofrece la oportunidad de guardar cinco configuraciones diferentes que evitan reconfigurar el sistema cuando cambia el tipo de fundición. Ver figura 57.

La siguiente sección toma cada tópico y explica que valor por defecto tiene y como se puede cambiar. Cuando se retorna del menú configuración, los datos previos serán redibujados y reanalizados de acuerdo a los nuevos parámetros de configuración. Esto permite repetidamente ajustar los parámetros hasta que el usuario se satisfaga con los resultados, sin tener que verter muestras después de cada cambio menor.

Figura 57. Menú de configuración.

**SATD CONFIGURACIÓN** 07:03:45

**CONFIGURACIÓN 1**

| TIPO DE CONFIG. | RANGOS QUIMICOS         | CONSTANTES QUIMICAS        | LIMITES DE DETECCIÓN             |
|-----------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| CONFIG. 1       | Tem. Min. Procesar: 800 | Pendiente del P: 3,000     | Límite de Detec. L.: -1,50       |
| CONFIG. 2       | C. E. Minimo: 3,75      | Pendiente del Si: 3,000    | Límite de Detec. S.: -0,50       |
| CONFIG. 3       | C. E. Maximo: 4,25      | Offset del C: -6,59468     | Límite de Detec de Fds.: -3,00   |
| CONFIG. 4       | Carbono Minimo: 3,20    | Pendiente del CL: -0,00794 | Min. Propaga. de Liq./Sol.: 0,00 |
| CONFIG. 5       | Carbono Maximo: 3,50    | Pendiente del CS: 0,01741  | mV Detectar una Copa: 0,00       |
| ENTRADAS        | Silicio Minimo: 1,70    | Offset del CE: 15,16228    | mV Detectar la lanza: -0,50      |
| COPA No. 1      | Silicio Maximo: 2,20    | Pendiente del CE: -0,00938 | Puerto Serie: COM 1              |
| COPA No. 2      |                         |                            |                                  |
| LANZA           |                         |                            |                                  |

**PRESENTACION**

Temp. maxima: 1400  
 Temp. Minima: 600  
 Tiem. Desplegado: 5:00

Para modificar cada menú hacer clic sobre el correspondiente vínculo resaltado en color amarillo.  
 Para salir pulsar ENTER.

Fuente: Imagen del SATD

➡ Entrando al menú configuración. Desde la pantalla principal presione la tecla F2, o posicione el mouse sobre el comando configuración. Una ventana se abrirá y preguntará la contraseña de acceso<sup>1</sup>. Ver figura 58.

<sup>1</sup> Durante la configuración el sistema no es capaz de medir temperatura o leer muestras de las copas, así cualquier cambio al sistema deberá ser hecho entre medidas, o cuando el sistema no este adquiriendo datos..

Figura 58. Contraseña de acceso al menú configuración.



Fuente: Imagen del SATD

Una vez digitada la contraseña, se tendrá acceso a los comandos:

CONFIGURACIONES  
ENTRADAS  
RANGOS QUÍMICOS  
CONSTANTES QUÍMICAS  
LÍMITES DE CAPTURA  
PRESENTACIÓN.

➡ Sumario de comandos.

**ENTRADAS** Este comando permite al usuario cambiar la temperatura de corrección, la temperatura de calibración, el tipo de termocupla (K,S,R) y establecer la configuración de la lanza de inmersión.

Antes de hacer cualquier cambio a los parámetros, se debe elegir el nombre de la configuración que desea realizar. Hay cinco posibles tipos de configuración denominados: CONFIG. 1, CONFIG. 2, CONFIG. 3, CONFIG. 4, y CONFIG. 5.

Luego, se debe proceder a configurar las entradas de las dos copas y la lanza, haciendo doble clic en la entrada deseada o en el comando ENTRADAS.

Cuando la entrada seleccionada es una de las copas se abrirá una ventana, como se observa en la figura 59, donde aparecerán los parámetros configurables:

Figura 59. Menú de configuración COPA No. 1

MENU DE CONFIGURACIÓN COPA No. 1

Temperatura de Corrección 5,00

Temperatura de Calibración Estandar 1205

CONFIGURACIÓN TIPO 1

TERMOCUPLA TIPO K

ACEPTAR

Fuente: Imagen del SATD

*Temperatura de corrección.* Es el ajuste en grados centígrados, hecho al SATD de acuerdo con la temperatura de calibración estándar. Este ajuste se hace para corregir las pérdidas en los cables compensados y los conectores. La corrección es generada automáticamente cuando se usa el menú CALIBRACIÓN, y generalmente no necesita ser cambiada manualmente.

*Temperatura de Calibración Estándar.* es la temperatura que el sistema espera alcanzar cuando la pistola de calibración es conectada en uno de los soportes o en la punta de la lanza. Esta temperatura es establecida por el milivoltaje constante que genera la pistola. (1205°C para la termocupla tipo K y 1454°C para la termocupla tipo S/R)

*Configuración.* Indica el número del tipo de configuración que se está modificando.

*Termocupla tipo K.* Por defecto la termocupla usada en las copas es tipo K.

Cuando se selecciona la entrada LANZA se abrirá una ventana, como se muestra en la figura 60, donde aparecerán otros parámetros además de los anteriores, así:

*Retardo en la Medición.* Es el tiempo que se espera después de que la lanza se sumerge en el crisol. Esto es hecho con el fin de tomar muestras cuando la temperatura se ha estabilizado.

*Falla Después de No Sg.* Esta opción permitirá al usuario entrar el número de segundos durante los cuales se validan las muestras a ser promediadas para obtener la respuesta de la lanza. Este número no debe ser superior a ocho segundos pues es el tiempo máximo que la lanza puede durar inmersa sin sufrir daños.

Figura 60. Menú de configuración LANZA

MENU DE CONFIGURACION LANZA

Temperatura de Corrección 0,00

Temperatura de Calibración Estandar 1454,40

Retardo en la Medición 0

Falla Despues de No. Sg. 0

CONFIGURACIÓN TIPO 1

TIPO DE TERMOCUPLA TERMOCUPLA R

ACEPTAR

Fuente: Imagen del SATD

#### **RANGOS QUIMICOS**

El comando RANGOS QUÍMICOS permite establecer los límites de tolerancia para el CE, %C y %Si; y la mínima temperatura a procesar para el análisis de las copas. Ver figura 61. Si esos rangos son estipulados, entonces un mensaje de color cyan aparecerá en el panel principal del SATD, indicando que el valor químico calculado es alto o bajo. Con esto el operario sabrá si el CE, %C y %Si están en el rango deseado.

Los parámetros que permite modificar el comando RANGOS QUÍMICOS, se describen así:

*Temperatura mínima a Procesar.* Esta opción indica al sistema la temperatura por encima de la cual debe estar la muestra antes de que este pueda ejecutar cualquier análisis.

*CE Mínimo y Máximo.* Permite al usuario establecer el rango en que el CE debe estar. Si el nivel de CE esta fuera de este rango, el sistema avisará al usuario mediante el mensaje alto o bajo.

*C Mínimo y Máximo.* Permite al usuario establecer el rango en que debe estar el Carbono.

*Si Mínimo y Máximo.* Permite al usuario establecer el rango en que debe estar el Silicio.

Figura 61. Rangos Químicos.

| RANGOS QUIMICOS      |      |
|----------------------|------|
| T. Minima a Procesar | 800  |
| C. E. Minimo         | 3,75 |
| C. E. Maximo         | 4,25 |
| Carbono Minimo       | 3,20 |
| Carbono Maximo       | 3,50 |
| Silicio Minimo       | 1,70 |
| Silicio Maximo       | 2,20 |

ACEPTAR

Fuente: Imagen del SATD

#### CONSTANTES QUIMICAS

Aquí, como lo ilustra la figura 62, se encuentran los coeficientes usados en las ecuaciones para calcular el CE, %C y %Si. Estos parámetros no son absolutos; de hecho, hay una disputa considerable sobre los valores correctos para estas ecuaciones; por tanto el experto metalúrgico tiene la libertad de configurar estos parámetros. Ver capítulo 1.

*Pendiente del fósforo.* Este es el divisor del fósforo usado en el cálculo del silicio.

*Pendiente del silicio.* Este es el multiplicador para el cálculo del silicio.

*Offset del Carbono, Pendiente del Carbono Líquido, Pendiente del Carbono Sólido.* Son parte de la ecuación del carbono en términos de las temperaturas de líquido y sólido.

*Offset del Carbono Equivalente, Pendiente del Carbono Equivalente.* Forman parte de la ecuación que explica el CE en términos de la temperatura de líquido.

Nota: Para saber mas detalles sobre estas constantes diríjase al capítulo 1.

Figura 62. Constantes químicas.

| CONSTANTES QUIMICAS               |          |
|-----------------------------------|----------|
| Pendiente del Fosforo             | 3,000    |
| Pendiente del Silicio             | 3,000    |
| Offset del Carbono                | -6,59468 |
| Pendiente del Carbono Liquido     | -0,00794 |
| Pendiente del Carbono Solido      | 0,01741  |
| Offset del Carbono Equivalente    | 15,16228 |
| Pendiente del Carbono Equivalente | -0,00938 |

ACEPTAR

Fuente: Imagen del SATD

#### LIMITES DE CAPTURA

El comando LIMITES DE CAPTURA despliega una ventana como la mostrada en la figura 63 donde es posible modificar los límites dentro de los cuales deben estar los valores de las primeras derivadas para ser consideradas zonas de interés.

Ajustando estos parámetros el experto metalúrgico puede hacer menos o más sensible el SATD al momento de identificar zonas críticas en la curva de enfriamiento.

*Límite de Captura Líquida.* Es el mínimo cambio en grados por segundo que la copa debe leer durante la captura líquida. Si el valor es demasiado pequeño, entonces la

captura líquida será saltada. Si el valor es demasiado grande, entonces detectará probablemente mal el punto sólido. (El valor típico es  $-1.5$ ).

*Límite de Captura Sólida.* Semejante al límite de captura líquida, el límite de captura sólida se aplica de la misma manera en la captura sólida. Generalmente, cuando se tiene rápido enfriamiento, el límite de captura líquida debe ser mas pequeño que el límite sólido. (El valor típico es  $-0.5$ ).

Figura 63. Límites de Captura.

| LIMITES DE CAPTURA                          |       |
|---|-------|
| Límite de Captura Liquida                   | -1,50 |
| Límite de Captura Solida                    | -0,50 |
| Limite de Captura del fin de solidificación | -3,00 |
| Minima Propaga. de Liquido/Solido           | 0,00  |
| mV Para Detectar una Copa                   | 0,00  |
| mV Para Detectar la lanza                   | -0,50 |
| Puerto Serie                                | COM 1 |

ACEPTAR

Fuente: Imagen del SATD

*Límite de Captura de Fin de Solidificación.* Tiene la misma función que las anteriores capturas, pero sirve para la captura de la temperatura de fin de solidificación. (El valor típico es  $-2$ ).

*Mínima propagación Líquido / Sólido.* Esta opción es la mínima cantidad de tiempo que el sistema debe ver antes que este pueda llamar un punto de inflexión como sólido, después de haber capturado el punto líquido.

*mV para Detectar una copa, mV para Detectar la Lanza.* Esta opción permite ajustar el mínimo milivoltaje que debe leer la unidad conversora cuando se instala una copa o lanza en la base respectiva, para que el sistema la detecte, y active los indicadores

luminosos que dan señal de una buena conexión. (El valor típico es 0 mV para las copas y -0.5 mV para la lanza) .

*Puerto Serie.* Esta opción permite al usuario escoger el puerto serie para la comunicación entre la unidad conversora y el PC. Se puede seleccionar COM 0 o COM 1.

#### PRESENTACION

El comando presentación controla la apariencia de los indicadores gráficos (pantallas). Ver figura 64.

Figura 64. Presentación de la pantalla

The image shows a software configuration window titled "PRESENTACIÓN DE LA PANTALLA". It contains the following elements:

- A label "Temp. max. a ser desplegada" next to a numeric input field containing "1400".
- A label "Temp. Min. a ser desplegada" next to a numeric input field containing "800".
- A label "Tiempo Desplegado (min:seg)" next to a dropdown menu showing "2:46".
- A label "Tiempo desplegado (seg)" next to a numeric input field containing "167".
- An "ACEPTAR" button at the bottom center.

Fuente: Imagen del SATD

*Temperatura máxima a ser desplegada, Temperatura mínima a ser desplegada.* Estas temperaturas proporcionan el límite superior e inferior de la escala vertical de la gráfica de las curvas de enfriamiento.

*Tiempo Desplegado.* Este item corresponde al alcance que toma el eje del tiempo en todas las curvas. El SATD ha sido establecido para leer 1500 datos por curva y el hardware es capaz de leer la temperatura hasta nueve veces por segundo. Al variar el tiempo desplegado la frecuencia a la cual es sistema muestra también variará.

5.5.3 General. Esta opción abre una ventana que da información sobre el sistema SATD.

5.5.4 Hw. Este comando muestra, la información del hardware que compone al sistema, desde las termocuplas hasta el PC.

5.5.5 Sw. Esta opción informa como el software es configurado y las opciones presentes.

5.5.6 Calibración. Este comando permite al usuario ajustar la temperatura medida, identificando las pérdidas que ocurren debido a la resistencia puesta por los cables compensados y los conectores. Estas pérdidas (milivoltios) se traducen en una temperatura inferior a la real

Al entrar en el comando CALIBRACIÓN se despliega una ventana, como la mostrada en la figura 65, para determinar de cuantos milivoltios son las pérdidas por canal, se hace uso de una pistola Ver figura 66 . Este dispositivo entrega un milivoltaje constante y bien definido que equivale a la *temperatura de calibración estándar*: 1205°C para los cables correspondientes a las termocuplas tipo K y 1454°C para el cable correspondiente a la lanza o termocupla R/S.

Cuando se ubica la pistola en un soporte, se enciende el indicador visual "Pistola Conectada" (color verde). Después el sistema inicia el proceso de calibración detectando la temperatura leída y calculando el desbalance de temperatura denominada "Temperatura de Corrección" e indicará el fin del proceso encendiendo el indicador visual "canal calibrado" (color rojo). Automáticamente este valor calculado será adicionado a todas las lecturas de temperatura que se realicen; con esto el sistema busca reducir al mínimo el error en las lecturas.

El anterior procedimiento es igual para los tres soportes.

Figura 65. Panel frontal de la herramienta de Calibración



Fuente: Imagen del SATD

Figura 66. Pistola para la Calibración de los cables compensados



Fuente: Fotografía tomada por los autores

5.5.7 Diagnostico. Como su nombre lo indica, diagnostica el buen o mal funcionamiento de la unidad convertora y su comunicación con el PC.

El comando DIAGNOSTICO despliega una ventana como se ilustra en la figura 67, donde se listan los milivoltios leídos de las copas a temperatura ambiente y la temperatura que entregan los sensores de unión fría CJC de cada canal<sup>1</sup>.

Figura 67. Diagnostico



Imagen del SATD

La lectura de milivoltios corresponde a la señal eléctrica generada por las termocuplas. Dependiendo de esta medida se puede diagnosticar el sistema.

- 0.0 Si todas las entradas están mostrando 0.0, probablemente la unidad conversora esté apagada.
- 99 a -10 Si observa este rango en una lectura individual, entonces el resistor estabilizador puede haber sido perdido<sup>2</sup>, o el cable desde el conector en la unidad conversora a la tarjeta 6BP04-2 está desconectado.
- 4 a -1 Este es el rango normal de entrada sin copa en el soporte. La lectura exacta depende del resistor estabilizador y de la inductancia (debida a la longitud) del cable compensado.
- 1 a 1 Este es el rango típico cuando se ubica la copa en el soporte. Si se observa este rango sin la copa en el soporte, es posible que este roto el cable compensado.

<sup>1</sup> Recuerde que la copa rosada corresponde al soporte rosado y a la solidificación blanca (canal 0), la copa blanca corresponde al soporte blanco y a la solidificación gris (canal 1) y la lanza se establece como el canal 2

<sup>2</sup> El resistor estabilizador se ubica en paralelo en la unión del cable compensado con la tarjeta.

- 1 a 3 Si se encuentra este rango sin estar la copa en el soporte, probablemente está suelto el cable de tierra que alimenta el computador o la unidad conversora, o el cable de tierra tiene un voltaje significativo (tierra flotante).
- 10 a 55 Este rango es el típico rango de operación para las fundiciones.

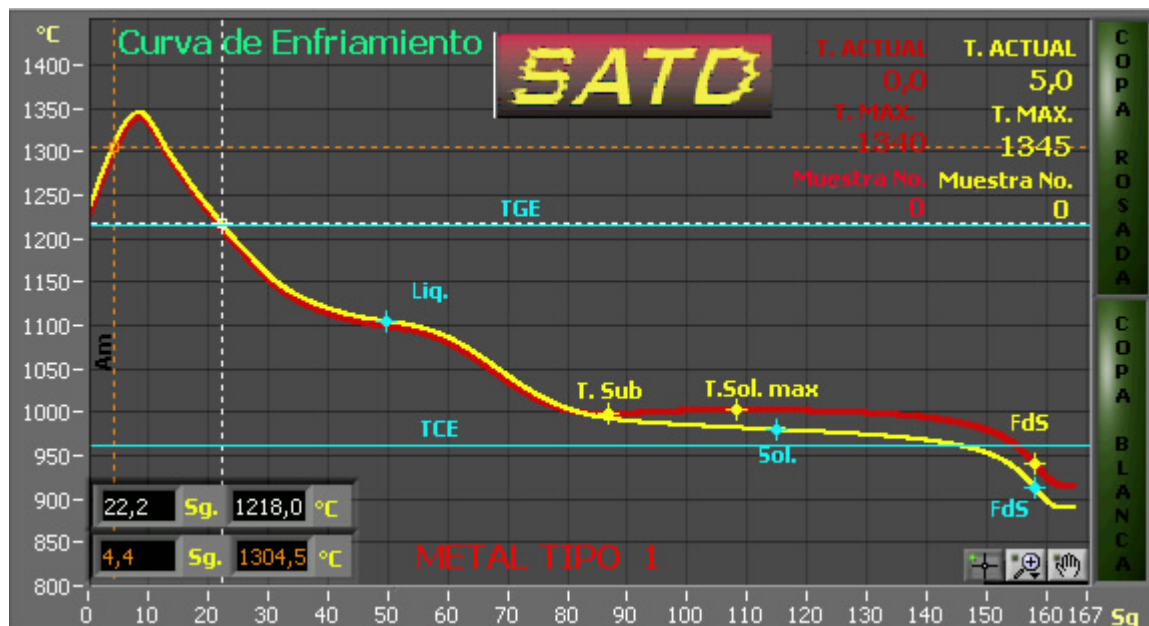
5.5.8 C.F.B. y C.F.G. Traducen: Cursor para la Fundición Blanca y Cursor para la Fundición gris respectivamente. Son empleados para rastrear las curvas de enfriamiento.

Cuando se activan los cursores, aparecerán en la parte inferior izquierda del indicador gráfico que presenta las dos curvas de enfriamiento, dos recuadros que proporcionan las coordenadas instantáneas de los cursores, como lo muestra la figura 68.

El cursor de color blanco se desplaza sobre la curva amarilla, y sus coordenadas están dadas en el indicador de números blancos. De la de igual forma el cursor de color naranja se desplaza sobre la curva roja, y sus coordenadas se presentan en el indicador de números de color naranja.

El indicador gráfico que presenta las curvas de enfriamiento cuenta con una herramienta triple en la parte inferior derecha de él. La primera (en forma de cruz) es el icono usado para desplazar los cursores con el mouse, la del medio corresponde al zoom (lupa), y la tercera es una herramienta de desplazamiento de las curvas. Ver figura 69. La herramienta de zoom a su vez posee 6 opciones para realizar acercamientos o alejamientos, verticales, horizontales o centrales, etc.

Figura 68. Cursores en acción



Fuente: Imagen del SATD

Figura 69. Herramientas de cursor, zoom y desplazamiento



Fuente: Imagen del *SATD*

5.5.9 Imprimir. Al pulsar este comando, el sistema envía la orden de imprimir el panel frontal del *SATD* en su estado actual.

5.5.10 Ayuda. El comando AYUDA proporciona al usuario una descripción detallada de cada uno de los elementos presentes en pantalla. Al presionar esta opción aparecerá una ventana verde, como la mostrada en la figura 70.

En esta ventana se indica como hacer uso de la herramienta de ayuda.

Al presionar las teclas CTRL+H, surgirá un recuadro donde se da la descripción del elemento, que en el momento esté apuntando el mouse.

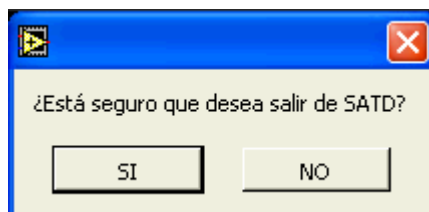
5.5.11 Salir. Este comando permite al usuario abandonar la aplicación (*SATD*). Antes se cuestionará si está seguro de salir mediante el mensaje enseñado en la figura 71.

Figura 70. Ayuda SATD



Fuente: Imagen del *SATD*

Figura 71. Salir del sistema



Fuente: Imagen del *SATD*

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para comprobar el correcto funcionamiento del *SATD* se ejecutaron las siguientes pruebas:

Se realizaron tres ensayos (colada hecha el día 18 de junio de 2004) en los cuales se tomaron tres muestras de solidificación blanca y tres de solidificación gris. En cada uno se hizo análisis dual, vertiendo primero en la copa recubierta con telurio y después en la copa recubierta con alúmina, como se ilustra en la figura 72.

Figura 72. Obtención de las muestra para análisis



Fuente: Fotografía tomada por los autores

De acuerdo a la forma de las copas, las muestras obtenidas son cilindros de 3 cm de diámetro por 5 cm de alto, como se muestra en la figura 73.

Figura 73. Muestras de fundición blanca y gris obtenidas



Fuente: Fotografía tomada por los autores

Estos cilindros fueron cortados transversalmente para obtener otro semejante, pero de 1cm de espesor (monedas), posteriormente se pulieron para efectuar un análisis en el microscopio, con el fin de corroborar el tipo de grafito laminar formado en la fundición gris y la ausencia de grafito libre en la fundición blanca. Ver figura 74.

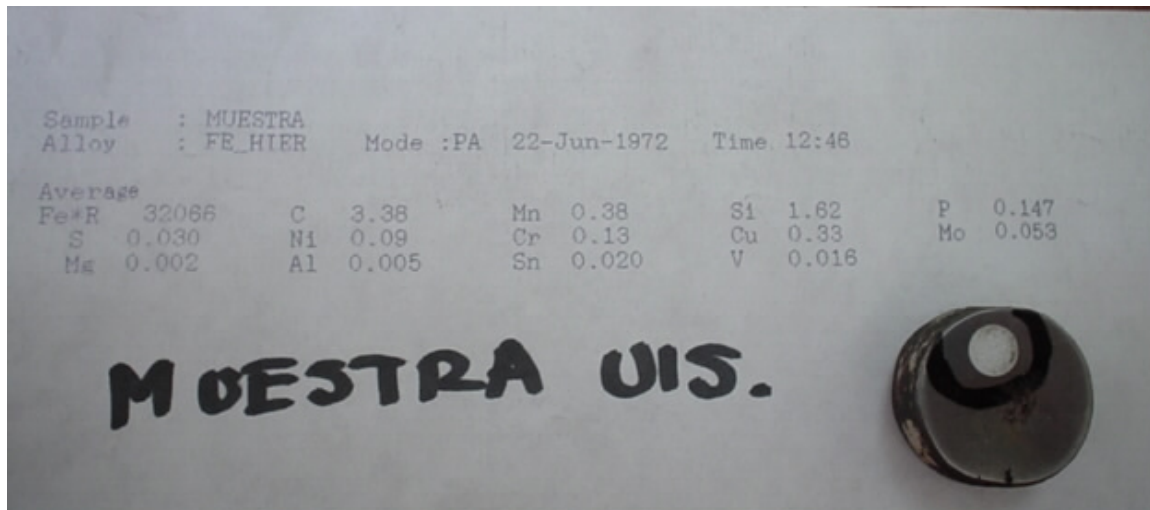
Figura 74. Muestra analizada por espectrometría de chispa (Sicolsa S.A.)



Fuente: Fotografía tomada por los autores

Notificando la ausencia de grafito libre en las muestras blancas, una de ellas fue enviada a la empresa *Siderugica de Colombia, Sicolsa S.A.* ubicada en la ciudad de Manizales; para ser sometida a un análisis de espectrometría de chispa. Los resultados de este análisis enviados por *Sicolsa S. A.* se aprecian en la figura 75 y se ordenan en la tabla 4.

Figura 75. Fotografía tomada a los resultados entregados por el análisis de espectrometría de chispa (Sicolsa S.A.)



Fuente: *Sicolsa S. A.*

Tabla 4. Resultados entregados por el análisis de espectrometría de chispa

| ELEMENTO | %     |
|----------|-------|
| CE       | 3.92  |
| Mg       | 0,002 |
| C        | 3,38  |
| Ni       | 0,09  |
| Al       | 0,005 |
| Mn       | 0,38  |
| Cr       | 0,13  |
| Sn       | 0,02  |
| Si       | 1,62  |
| Cu       | 0,33  |
| V        | 0,016 |
| P        | 0,147 |
| Mo       | 0,053 |

Fuente: *Sicolsa S. A.*

Como se observa los elementos diferentes al C y Si que componen la muestra se encuentran en proporciones mínimas, por tal motivo en el análisis térmico moderno son despreciados ya que no afectan significativamente los resultados mas importantes como CE, %C y %Si.

De igual forma el *SATD* arrojó los siguientes resultados en cada ensayo:

Tabla 5. Resultados obtenidos en los tres ensayos hechos con el *SATD*

| PARÁMETRO                    | 1er Ensayo | 2do Ensayo | 3er Ensayo |
|------------------------------|------------|------------|------------|
| CE                           | 3.93       | 4.05       | 3.91       |
| %C (porcentaje en peso)      | 3.41       | 3.51       | 3.36       |
| %Si (porcentaje en peso)     | 1.56       | 1.60       | 1.61       |
| Liq. (°C)                    | 1197       | 1185       | 1199       |
| Sol. (°C)                    | 1121       | 1121       | 1119       |
| Tsub. (°C)                   | 1137       | 1128       | 1141       |
| °Sub (°C)                    | -18        | -7         | -23        |
| TGE (°C)                     | 1165       | 1164       | 1165       |
| TCE (°C)                     | 1119       | 1121       | 1118       |
| Rec (°C)                     | 5.2        | 4.5        | 4.7        |
| Φ                            | -1.3       | -1.3       | -1.07      |
| FdS (blanca)(°C)             | No existió | No existió | No existió |
| ED (blanca)(°C)              | No existió | No existió | No existió |
| % Austenita (blanca)         | 20         | 31         | 24         |
| % Eutéctico Formado (blanca) | 80         | 69         | 76         |
| FdS (gris)(°C)               | 1099       | 1103       | 1072       |
| ED (gris)(°C)                | 37.9       | 25         | 69         |
| % Austenita (gris)           | 30         | 29         | 36         |
| % Eutéctico Formado (gris)   | 70         | 71         | 64         |
| Temperatura Lanza (°C)       | 1252       | 1260       | 1263       |

Fuente: Elaborado por los autores

Los criterios de comparación tomados para analizar los resultados son el *error verdadero* y el *error relativo porcentual*, así:

$$E_v = \text{Valor verdadero} - \text{Valor aproximado} \quad \text{Ec. 35}$$

$$\varepsilon_v = \frac{\text{Valor verdadero} - \text{Valor aproximado}}{\text{Valor verdadero}} 100\% \quad \text{Ec. 36}$$

Donde el valor verdadero se asigna al resultado entregado por la prueba de espectrometría, el valor aproximado de la ecuación 36 al promedio de los tres resultados dados por los ensayos con el *SATD* y el valor aproximado de la ecuación 35 corresponde al valor obtenido en cada uno de los ensayos.

Al comparar los resultados obtenidos en el SATD con los que entregó la espectrometría de chispa, se observa que el margen de error cometido es mínimo:

*Para el Carbono Equivalente<sup>1</sup> se tiene:*

Error verdadero

$$\text{1er Ensayo} \quad E_v = 3.92 - 3.93 = -0.01$$

$$\text{2do Ensayo} \quad E_v = 3.92 - 4.05 = -0.13$$

$$\text{3er Ensayo} \quad E_v = 3.92 - 3.91 = 0.01$$

Error relativo porcentual

$$\varepsilon_v = \frac{3.92 - 3.963}{3.92} 100\% = 1.10\%$$

*Para el porcentaje de Carbono se tiene:*

Error verdadero

$$\text{1er Ensayo} \quad E_v = 3.38 - 3.41 = -0.03$$

$$\text{2do Ensayo} \quad E_v = 3.38 - 3.51 = -0.13$$

$$\text{3er Ensayo} \quad E_v = 3.38 - 3.36 = 0.02$$

Error relativo porcentual

$$\varepsilon_v = \frac{3.38 - 3.426}{3.38} 100\% = 1.36\%$$

➡ *Para el porcentaje de Silicio se tiene:*

Error verdadero

$$\text{1er Ensayo} \quad E_v = 1.62 - 1.56 = 0.06$$

$$\text{2do Ensayo} \quad E_v = 1.62 - 1.60 = 0.02$$

$$\text{3er Ensayo} \quad E_v = 1.62 - 1.61 = 0.01$$

---

<sup>1</sup> A partir del %C y %Si, el carbono equivalente resultante de la espectrometría es:  $CE=C + Si/3$

Error relativo porcentual

$$\varepsilon_v = \frac{1.62 - 1.59}{1.62} 100\% = 1.85\%$$

Debido a que la composición química de la fundición se halló con un error admisible, se asume que las capturas de las temperaturas críticas, son correctas. Por esto los resultados subsecuentes (parámetros metalúrgicos), que no son calculados en el análisis de espectrometría son acertados, como son: El grado de subenfriamiento, recalcancia, temperaturas eutécticas, etc.

El CE de la fundición analizada informa que la fundición es hipoeutéctica pues es menor a 4.3

El Grado de subenfriamiento ( $^{\circ}\text{Sub}$ ) indica que hubo bajo crecimiento de carburos y por ende la tendencia al temple es fue mínima.

Se obtuvo en la fundición un grafito laminar diferente al tipo A, pues la recalcancia obtenida fue superior a  $3^{\circ}\text{C}$

El enfriamiento delta indica que se obtuvo una fundición con un contenido relativamente alto de impurezas; este hecho es corroborado por la cantidad de fósforo presente, según el análisis de espectrometría.

## CONCLUSIONES

El Software de Análisis Térmico Dual elaborado permite, cuantificar adecuadamente la composición química y los parámetros metalúrgicos de solidificación de las fundiciones líquidas.

El lenguaje de programación LabVIEW indiscutiblemente es una interfase muy adecuada entre el procesamiento que puede efectuar el computador y el usuario.

El *SATD* ofrece la posibilidad de conocer con antelación, fundición en estado líquido, parámetros metalúrgicos que modifican el comportamiento de la aleación en servicio, haciéndolo una herramienta valiosa para el fundidor de piezas de calidad.

El *SATD* es una gran aplicación de las investigaciones metalúrgicas en el campo del análisis térmico para fundiciones y un aporte al desarrollo industrial colombiano.

Se deja un sistema de análisis térmico para el desarrollo de la actividad académica en el laboratorio de fundición, gracias a la colaboración de entidades como la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones y la Siderúrgica Colombiana, Sicolsa S.A., quienes facilitaron el lugar de trabajo para realizar las pruebas y comprobación de las mismas.

El análisis térmico implementado a partir de las curvas de enfriamiento y sus derivadas de temperatura respecto al tiempo es acertado, pues describe y proporciona información detallada de la fundición tratada con una exactitud adecuada.

Los métodos de diferenciación numérica (diferencias divididas finitas centrales) y suavizado (media móvil) aplicados a los datos adquiridos son correctos, puesto que las curvas obtenidas proporcionan con certeza el comportamiento real de la muestra durante su enfriamiento.

Gracias al avance tecnológico de la electrónica, la gran mayoría de fenómenos físicos pueden ser estudiados, analizados y controlados para el beneficio del hombre, mediante equipos y dispositivos que ofrecen optima exactitud y precisión como son los sistemas de adquisición de datos actuales.

## RECOMENDACIONES

Después de la realización del presente trabajo, los autores presentan las siguientes ideas para optimizar el sistema desarrollado.

Además de los parámetros que entrega el *SATD*, existe la posibilidad de ampliar el análisis para obtener resultados relacionados con la nodularidad, inoculación, propiedades mecánicas, etc.

Adicionalmente se puede hacer que el *SATD* sugiera las cantidades de los elementos que deben ser adicionados a la fundición para alcanzar las especificaciones químicas y metalúrgicas previamente programadas.

Debido a la tendencia a desaparecer los puertos serie y el paralelo en la organización de los ordenadores actuales, se recomienda implementar comunicación USB entre la unidad conversora y el PC.

Fabricar el hardware de adquisición de datos para convertir el equipo en un sistema totalmente independiente de la mano de obra extranjera y con ello promover la industria nacional.

Construir un equipo portátil que realice el mismo análisis y entregue iguales resultados en una pantalla de cristal líquido para independizarlo del PC.

## BIBLIOGRAFÍA

- HEINE R. Carbon, Silicon, Carbon Equivalent, Solidification, and Thermal Analysis Relationships in Gray and Ductile Cast Irons. AFS transactions, p. 462
- HEINE Richard W. Principles of Metal Casting.
- HEINE R. The carbon equivalent Fe-C-Si diagram and its application to cast iron, AFS Cast Iron Research Journal, 1971, June, p.49.
- HEINE R. The Fe-C-Si Solidification Diagram for Cast Iron, AFS Transactions vol 94, p. 391, 1986
- ALONSO BAQUERO Arnaldo. Moderno Análisis Térmico de las Fundiciones. Carta Metalúrgica. p 27-31.
- SPARKMAN D. Understanding Thermal Analysis of Iron. Foundry Information Systems 1992.
- VAN DER Perre. Eutectic undercooling measurement as a means for quality analysis of lamellar and S. G. iron. Danish Foundry Seminar. Odense, May. 1990
- MARTINEZ H. y SUAREZ E. Análisis de la curva de enfriamiento directa de las fundiciones (solidificación gris) y su relación con algunos parámetros estructurales. Proyecto de grado para optar el título de ingeniero Metalúrgico. UIS 1997.
- LEEDS & NORTHRUP, FFOS Specifications & Installation Manual # 277934. 1993
- ANALOG DEVICES, 6B Series User's Manual, AC1383. 1997.
- NANMAC Corporation, TEMPERATURE Measurement Handbook. Termocouples, RTDs and Accessories.
- CHAPRA Steven C. Métodos Numéricos para Ingenieros con aplicaciones en computadoras personales. Mc GRAW-Hill, 1998.
- LAZARO Antonio Manuel. LabVIEW 6i Programación básica para el control de instrumentos, PARANINFO 2001.
- WELLS Lisa K. The LabVIEW Student Edition User's Guide, National Instruments Corporation. PRENTICE HALL 1995.
- www.fis.com : Foundry Information Systems  
www.ductileironsociety.com : Ductile Iron Society

|  |   |                      |
|--|---|----------------------|
| <a href="http://www.metlab.com">www.metlab.com</a> | : | Metlab               |
| <a href="http://www.analog.com">www.analog.com</a> | : | Analog Device        |
| <a href="http://www.ni.com">www.ni.com</a>         | : | National Instruments |
| <a href="http://www.nanmac.com">www.nanmac.com</a> | : | Nanmac Corporation   |

## GLOSARIO

**Aleaciones:** Producto homogéneo, de propiedades metálicas, compuesto de dos o más elementos, uno de los cuales, al menos, debe ser un metal.

**Análisis térmico:** Método para determinar transformaciones en un metal o aleación, señalando las temperaturas en que ocurren las capturas térmicas. Estas detenciones se manifiestan mediante cambios de pendiente de las curvas graficadas de enfriamiento y calentamiento.

**Antigrafitizante elemento:** Se llama así al elemento que adicionado a la fundición promueve o estabiliza la formación de la cementita.

**Blanca fundición:** Dícese de las fundiciones que presentan inmediatamente después de la rotura una fractura de color blanca. Llamada impropriamente hierro blanco.

**Colada:** Proceso de verter fundición líquida en moldes para que adopten una forma prediseñada.

**Cubilote horno:** Dícese del equipo usado para fundir metales de forma eficiente y lapida en grandes cantidades.

**Dendrita:** Cristal, célula o grano, con una configuración de tipo arborescente.

**Ductilidad:** Propiedad de las fundiciones que permite laminarla, estirla o deformarla a temperatura ambiente (grafito en forma esferoidal)

**Esferoidal grafito fundición:** Dícese de la fundición cuyo carbono libre tiende a la forma de esferoide. Se obtiene por tratamiento al estado líquido de una fundición potencialmente gris. Llamada impropriamente fundición nodular o dúctil.

**Eutéctica fundición:** Fundición cuyo carbono equivalente es 4.3.

**Fundición:** Aleación de base hierro y carbono, con un contenido de carbono superior al 2%C.

**Grafitizante elemento:** Dícese de aquel elemento que adicionado a la fundición tiene por efecto promover la formación de grafito. (carbono libre)

**Gris fundición:** Se designan con este nombre las fundiciones que presentan, inmediatamente después de la rotura una fractura de color gris. Llamada impropriamente hierro colado.

**Hipereutética fundición:** Dícese de la fundición cuyo carbono equivalente es mayor de 4.3.

**Hipoeutética fundición:** Es aquella fundición cuyo carbono equivalente tiene un valor menor de 4.3.

**Inoculación:** Adición de pequeñas cantidades de silicio a la fundición líquida en el chorro, cuchara o en el molde, u otro material grafitizante, para mejorar sus características mecánicas.

**Laminar grafito:** Dícese de la forma de lamina que adopta el grafito al solidificar el metal.

**Maquinabilidad:** Proceso de transformación de una pieza fundida por medios mecánicos.

**Metalografía:** Estudio de la estructura, composición y propiedades de los metales y de sus aleaciones.

**Nodular grafito:** Es aquella fundición cuyo carbono libre (grafito) se presenta en forma de nódulos. Los nódulos se obtienen por tratamiento térmico. Antiguamente se denominaba fundición maleable.

**Subenfriamiento:** Es el enfriamiento por debajo de la temperatura de equilibrio a la cual la fundición se enfría antes de que ocurra la transformación de fase-equilibrio sin obtener realmente esa transformación.

**Recalescencia:** Es el incremento de la temperatura de la fundición líquida producido por la rápida liberación del calor latente de transformación después de iniciada la nucleación.

**Rechupe tendencia:** Dícese de la tendencia que sufre la fundición a contraerse en el molde.

**Temple:** Endurecimiento de un metal especialmente el que se obtiene profundamente calentándolo y sumergiéndolo de manera brusca en un líquido frío.

**Untuoso:** Graso y pegajoso.

**Vermicular grafito fundición:** Dícese de la fundición cuyo carbono libre tiene la forma de pseudo-laminas con bordes redondeados. Se obtiene por tratamiento al estado líquido de una fundición potencialmente gris.

# ANEXOS

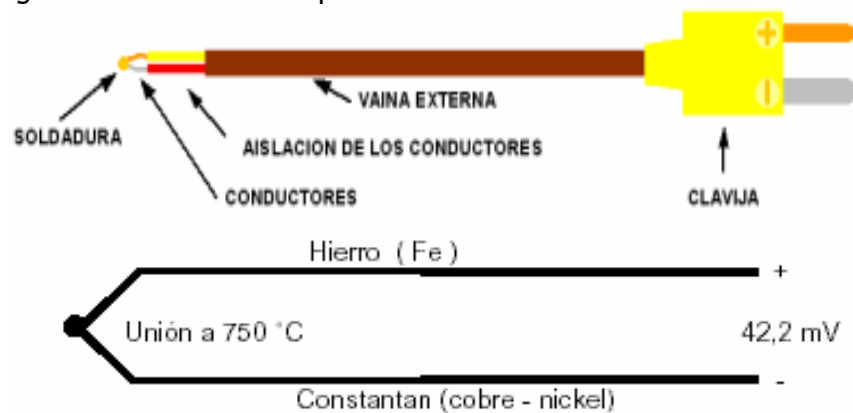


## A. TERMOCUPLAS, CABLES COMPENSADOS Y CONECTORES.

### A.1 TERMOCUPLAS

La termocupla es un sensor de temperatura elaborado con dos alambres de distinto material unidos en un extremo. Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera una fuerza electromotriz (fem) o voltaje del orden de los milivoltios el cual aumenta con la temperatura. (ver Figura 1.)

Figura 1. Diagrama de una Termocupla



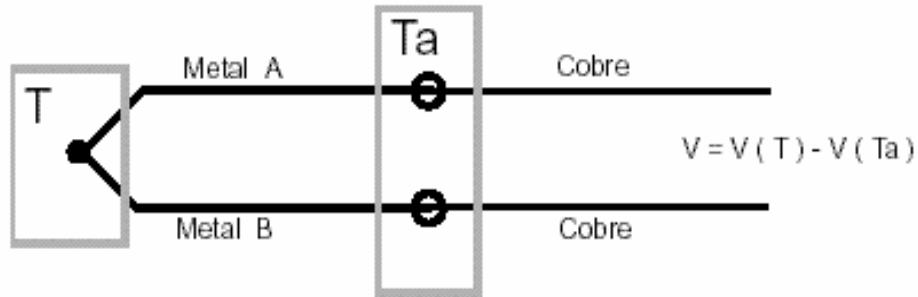
Fuente: [www.arian.com](http://www.arian.com)

Generalmente, la termocupla posee en el extremo abierto una clavija; la fem que se mide en ella depende de la diferencia de temperaturas entre la soldadura y la clavija misma. Como el sentido de la tensión es importante, se distingue a los conductores con los signos positivo y negativo, para no confundirlos (Se puede identificar los signos en la clavija).

A.1.1 Principios Básicos. El fenómeno por el cual, la termocupla entrega una fem, térmicamente dependiente, se conoce como efecto Seebeck. Este es en realidad, la superposición de otros dos: El efecto Thomson y el efecto Peltier.

Para medir la fem o el milivoltaje generado en los extremos de una termocupla se tiene:

Figura 2. Circuito de conexión de una termocupla.



Fuente: [www.arian.com](http://www.arian.com)

Recorriendo el circuito se encuentra el voltaje  $V$ :

$$V = V_{cu,a}(Ta) + V_{a,b}(T) + V_{b,cu}(Ta) \quad (\text{Ec. 33})$$

$$V = [ V_{b,cu}(Ta) + V_{cu,a}(Ta) ] + V_{a,b}(T) \quad (\text{Ec. 34})$$

$$V = V_{b,a}(Ta) + V_{a,b}(T) \quad (\text{Ec. 35})$$

$$V = V_{a,b}(T) - V_{a,b}(Ta) \quad (\text{Ec. 36})$$

En la gran mayoría de las aplicaciones de mediciones técnicas, se evita la circulación de corriente en esta clase de circuitos. De esta forma se evitan ciertos inconvenientes, por ejemplo: No influye la longitud de los conductores (Y en particular, su caída de tensión), y por otro lado el sistema de medición no enfría ni calienta las inmediaciones del punto a medir.

A.1.2 Compensación de unión fría. El principal inconveniente de las termocuplas es su necesidad de compensación. Esto se debe a que en algún punto, habrá que empalmar los cables de la termocupla con un conductor normal de cobre. En ese punto se producirán dos nuevas termocuplas, generando cada una un voltaje proporcional a la temperatura de ambiente ( $T_a$ ) en el punto de empalme. Ver Figura 29.

El voltaje de interés para conocer el valor de la temperatura  $T$  es  $V_{a,b}(T)$ , este se consigue despejándolo de la Ec. 36:

$$V_{a,b}(T) = V + V_{a,b}(Ta) \quad (\text{Ec. 37})$$

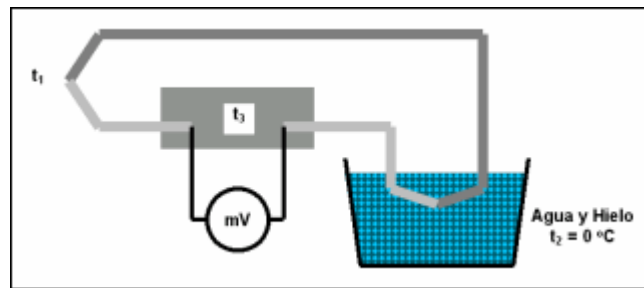
Conociendo  $T_a$  se busca en la tabla de la termocupla el valor de  $V_{a,b}(Ta)$  y se suma a  $V$  medido en el voltímetro, con lo que se obtiene  $V_{a,b}(T)$ . Ahora con este valor se busca en la tabla el valor de  $T$ . Ver tablas de termocuplas.

Antiguamente se solucionaba la compensación de cero, colocando los empalmes en un baño de hielo a cero grados generando cero voltios ( $T_a = 0$  y  $V(Ta) = 0$ ). Ver figura XX.

Actualmente todos los instrumentos modernos miden la temperatura en ese punto (mediante un sensor de temperatura adicional) y la suman para crear la compensación y obtener así la temperatura real. El punto de empalme (llamado "unión o juntura de referencia") está siempre en el conector a la entrada del instrumento, pues ahí está el sensor de temperatura. De modo que es necesario llegar con el cable de la termocupla hasta el mismo instrumento.

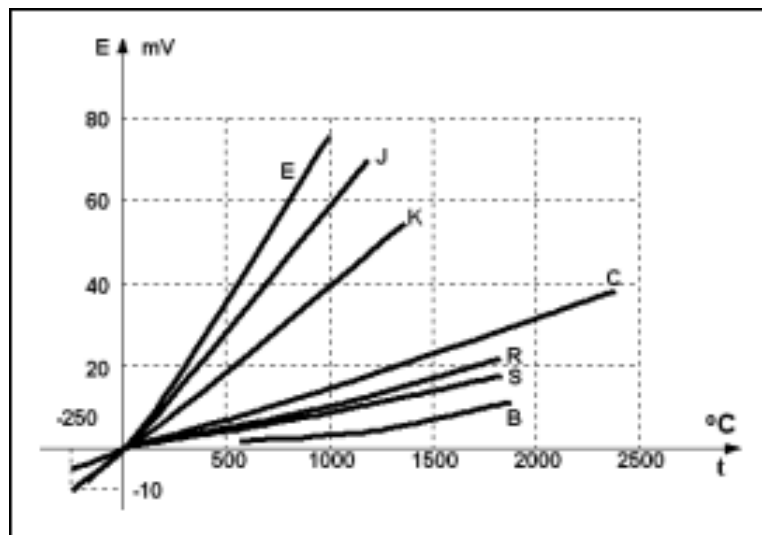
A.1.3 Dependencia entre el voltaje entregado por la termocupla y la temperatura. El siguiente gráfico (Figura 27) nos muestra como evoluciona la fem generada por algunas de las termocuplas típicas en función de la temperatura.

Figura 23. Circuito fijando  $t_2$  a  $0^\circ\text{C}$



Fuente: [www.arian.com](http://www.arian.com)

Figura 27. Dependencia entre el voltaje entregado por la termocupla y la temperatura



Fuente: [www.arian.com](http://www.arian.com)

La dependencia entre el voltaje entregado por la termocupla y la temperatura no es lineal, es deber del instrumento electrónico destinado a mostrar la lectura, efectuar la linealización, es decir tomar el voltaje y conociendo el tipo de termocupla, ver en tablas internas a que temperatura corresponde este voltaje.

Supóngase que se mide la tensión que entrega una termocupla. ¿A qué temperatura corresponde? . Se han planteado tres criterios:

- ✓ Un criterio sería ir a un gráfico como el anterior. Por ejemplo, 60 mV para una termocupla J, representa algo aproximado a 1000 °C. En realidad, es un poco mayor, pero no se puede especificar mucho mejor que 1050 °C... Con cierto grado de incertidumbre.
- ✓ Un segundo criterio sería tener una tabla que, grado por grado, indique la tensión que entrega la termocupla. Dichas tablas, actualmente, son estandarizadas según las normas ANSI con la unión de referencia a 0°C.
- ✓ Un tercer criterio consiste en disponer una expresión en la cual, si se reemplaza valores de tensión, se obtiene el valor de la temperatura.

**A.1.4** Clasificación de las termocuplas mas usuales Existen una infinidad de tipos de termocuplas según los materiales que las conforman. En la tabla 3 aparecen algunas de las mas comunes de acuerdo con las normas ANSI, pero casi el 90% de las termocuplas utilizadas son tipo J o K.

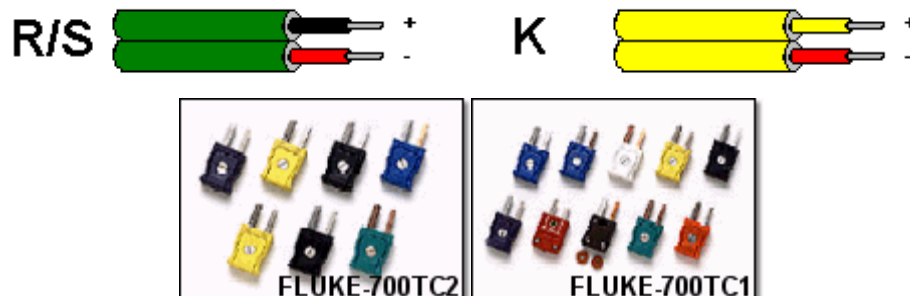
Por ejemplo, las termocuplas tipo K, según la norma ANSI, vienen con vaina marrón, siendo el aislamiento de su conductor positivo de color amarillo, mientras que la de su conductor negativo de color rojo. También se pueden identificar por las clavijas de color amarillo. Ver figura 28.

Tabla 3. Tipos de Termocuplas según normas ANSI

| Tipo | Materiales                      |                                 | Rangos      |                    |
|------|---------------------------------|---------------------------------|-------------|--------------------|
|      | Conductor +                     | Conductor -                     | Temp. °C    | Tensión            |
| B    | Platino + 30% Rodio             | Platino + 6% Rodio              | 600 a 1820  | 1,792 a 13,82 mV   |
| C    | Tungsteno + 5% Rhenio           | Tungsteno + 26% Rhenio          | 0 a 2316    | 0 a 37,079 mV      |
| E    | Niquel-Cromo (Chromel)          | Cobre-Niquel (Constantán)       | -250 a 1000 | -9,719 a 76,37 mV  |
| J    | Hierro                          | Cobre-Niquel (Constantán)       | -210 a 1200 | -8,096 a 69,555 mV |
| K    | Niquel-Cromo (Chromel)          | Niquel Aluminio                 | -200 a 1372 | -5,891 a 54,886 mV |
| L    | Hierro                          | Cobre-Niquel (Constantán)       | -200 a 900  | -8,166 a 53,147 mV |
| N    | Niquel-Cromo-Silicio (Nicrosil) | Niquel-Silicio-Magnesio (Nisil) | -200 a 1300 | -3,990 a 47,514 mV |
| R    | Platino + 13% Rodio             | Platino                         | -20 a 1767  | -0,101 a 21,089 mV |
| S    | Platino + 10% Rodio             | Platino                         | -20 a 1767  | -0,103 a 18,682 mV |
| T    | Cobre                           | Cobre-Niquel (Constantán)       | -250 a 400  | -6,181 a 20,873 mV |
| U    | Cobre                           | Cobre-Niquel                    | -200 a 600  | -5,693 a 34,320 mV |

La lista de los materiales empleados como alambres, puede extenderse indefinidamente. Sin embargo, se han estandarizado unas pocas combinaciones. Para distinguirlas, podemos mencionar sus materiales constituyentes: Una termocupla compuesta de 87% de platino mas 13% de rhodio para su cable positivo y platino en su cable negativo se identifica como "Una termocupla R". Para una termocupla de Cromel-Alumel", se usa la letra "K". Una termocupla compuesta de 90% de platino mas 10% de rhodio para su cable positivo y platino en su cable negativo se identifica como "Una termocupla S".

Figura 28. Aislamiento de las termocuplas y conectores.

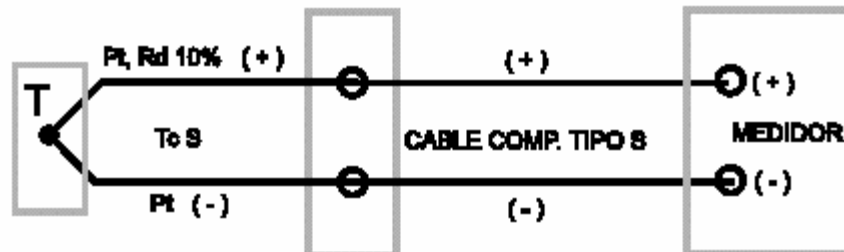


Fuente: [www.arian.com](http://www.arian.com)

## A.2 CABLES COMPENSADOS

Cuando el instrumento está muy retirado del lugar de medición, no siempre es posible llegar con el mismo cable de la termocupla al instrumento. La solución a este problema es usar "cables compensados" para hacer la extensión del cable de la termocupla. Estos exhiben el mismo coeficiente de Seebeck de la termocupla (están hechos de otro material de menor valor) por lo tanto no generan termocuplas parásitas en el empalme. Ver figura 30.

Figura 30. Esquema de compensación usando cables compensados.



Fuente: [www.arian.com](http://www.arian.com)

Los cables compensados tienen una polaridad de conexión (+) y (-) que al conectar con la termocupla se debe respetar. Un error típico, es conectar al revés el cable en la termocupla y en el instrumento, de esta forma se genera un error en la lectura del orden de la temperatura ambiente en el empalme.

En el caso particular de las lanzas usadas en las fundiciones, la termocupla se instala en la punta con un cable compensado forrado en asbesto, que va por dentro de la lanza hasta el lado del mango. Ahí se empalma con otro cable compensado con revestimiento de goma mas flexible que llega hasta la entrada del instrumento.

Es importante que estos dos cables compensados sean adecuados para el tipo de termocupla que se está usando y además estén conectados con la polaridad correcta (+) con (+) y (-) con (-). De otra forma será imposible obtener una medición sin error. Siempre se debe consultar al proveedor o fabricante del cable compensado por los colores que identifican los cables (+) y (-), pues las normas de estos colores varían con el tipo de termocupla y país de procedencia del cable.



## B. REFERENCIAS TÉCNICAS DE LA SERIE 6B

### B.1 Especificaciones técnicas de la Fuente de Alimentación.

| Feature                             | Model 955              | Model 977             | PWR-O1               |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| InputVoltageRange                   | 105Vactol25Vac         | 100Vactol30V ac       | 55Vacto265Vac        |
| Frequency                           | 50Hz to 250 Hz         | 47Hz to 400 Hz        | 47Hz to 63 Hz        |
| Output Voltage                      | 5 V dc                 | 5 V dc                | 5 V dc               |
| Short.Circuit Protection            | Current Umited         | Current Limited       | Current Limited      |
| Overvoltage Protection <sup>1</sup> | +6.2 V dc              | +6.2 V dc             | +6.0 V dc            |
| Output Current                      | 1000 mA                | 5000 mA               | 5000 mA              |
| Voltage Accuracy                    | ±2% maximum            | ±2% maximum           | ±1%, adjustable ±3%  |
| Temperature Coefficient             | ±0.02%/°C              | ±(102%/°C             | ±0.05%/°C            |
| Line Regulation                     | ±0.05%                 | ±0.05%                | ±0.1%                |
| Load Regulation                     | ±0.15%                 | ±0.1%'                | ±0.5%                |
| Ripple & Noise                      | 2 mV mis, maximum      | 100 mV pk-pk          | 50 mV pk-pk maximum  |
| Breakdown Voltage                   | 2500 V ac mis, minimum | 900 V ac mis, minimum | 5300 V dc one-minute |
| Switching Frequency                 | N/A                    | 25 kHz                | 65 kHz               |
| Operating Temperature Range         | -25°C to +71°C         | -25°C to ÷71°C        | 0°C to +70°C         |
| Storage Temperature Range           | -25°C to +85°C         | -25°C to +85°C        | -40°C to +85°C       |
| Berating                            | 40mA/°C above 50°C     | 15 mA/°C above 50°C   | 100 mA/°C above 50°C |
| Cooling                             | Free Air Convection    | Free Air Convection   | Free Air Convection  |

Fuente: 6B series user's manual

## B.2 Especificaciones de los Módulos de entrada analoga 6B11

| Feature   | Specification  |
|---|--|
| Input Ranges<br>6Bf1<br>6B12<br>6B13  | Thermocouple, mV, V, mA<br>mV, V, mA<br>Pt, Ni, Cu RTDs  |
| Output  | RS-485   |
| Accuracy <sup>1</sup><br>6B11 <sup>2</sup> , 6B12<br>6B13                                 | ±0.05% or better<br>±0.03°C (Pt, Ni)   |
| Zero Drift<br>6B11, 6B12<br>6B13 <sup>3</sup>   | ±0.3 j.tV/°C<br>±a005°C/°C   |
| Span Drift<br>6B11<br>6B12<br>6B13 <sup>3</sup>   | ±3 ppm/°C typical, ±25 ppm/°C maximum<br>±10 ppm/°C typical, ±50 ppm/°C maximum<br>±0.005°C/°C |
| Common-Mode Voltage,<br>input-to-output<br>6B11, 6B12, 6B13<br>6B11HV, 6 B12HV 6B13HV     | 1500 V rrns continuous<br>2500 V rms continuous  |
| Common-Mode Rejection<br>at 50 Hz or 60 Hz, 1 kΩ<br>source imbalance<br>6B11,6B13<br>6B12 | 160dB<br>108dB   |
| Normal-Mode Rejection<br>at 50 Hz or 60Hz, 1 kΩ<br>source imbalance<br>6B11, 6B13<br>6B12 | 58 dB<br>56dB  |
| Sensor Excitation Current<br>(6B13 only)<br>100 Ω Pt, 120 Ω Ni<br>10 Ω Cu                 | 0.25 mA<br>2.25mA  |
| Lead Wire Resistance in<br>Each Lead (6B13 only)  | 10 Ω maximum   |

Fuente: 6B series user's manual

### Notes

<sup>1</sup>Accuracy depends on the configured input range. Refer to Tables 5-4 through 5-6 for specific accuracy by input range.

<sup>2</sup>6B11 and 6B11HV modules only. When measuring thermocouple signals, the CJC sensor accuracy should be added to the 6B11 and 6B11HV module accuracy to compute the overall system accuracy.

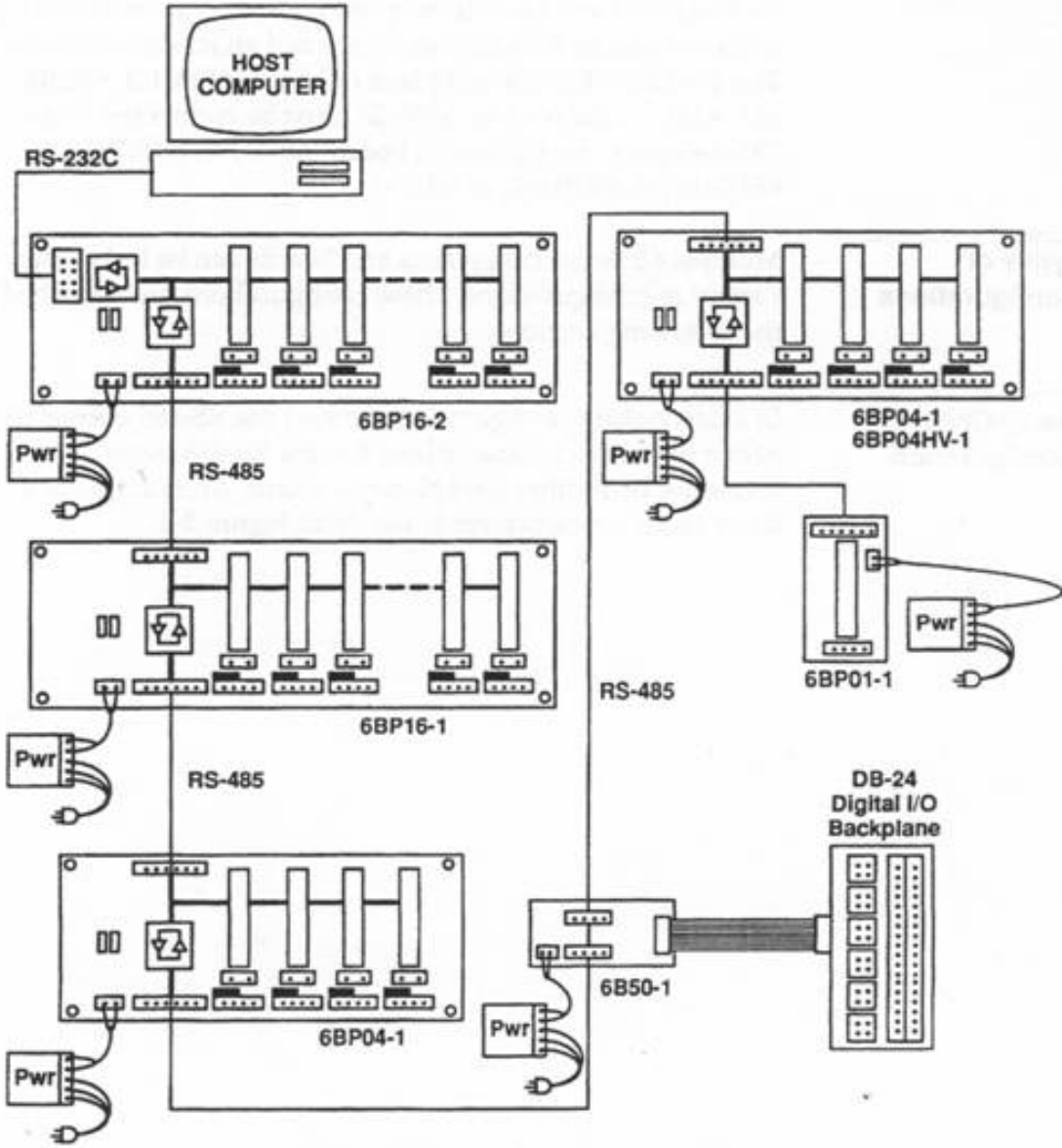
<sup>3</sup>Combined effect of zero drift and span drift.

<sup>4</sup>CJC sensor accuracy refers to the AC1361 sensor mounted on 6B series backplanes.

<sup>5</sup>Voltage rise time and fall time (10% to 90% of rated voltage) must be less than 150 ms.

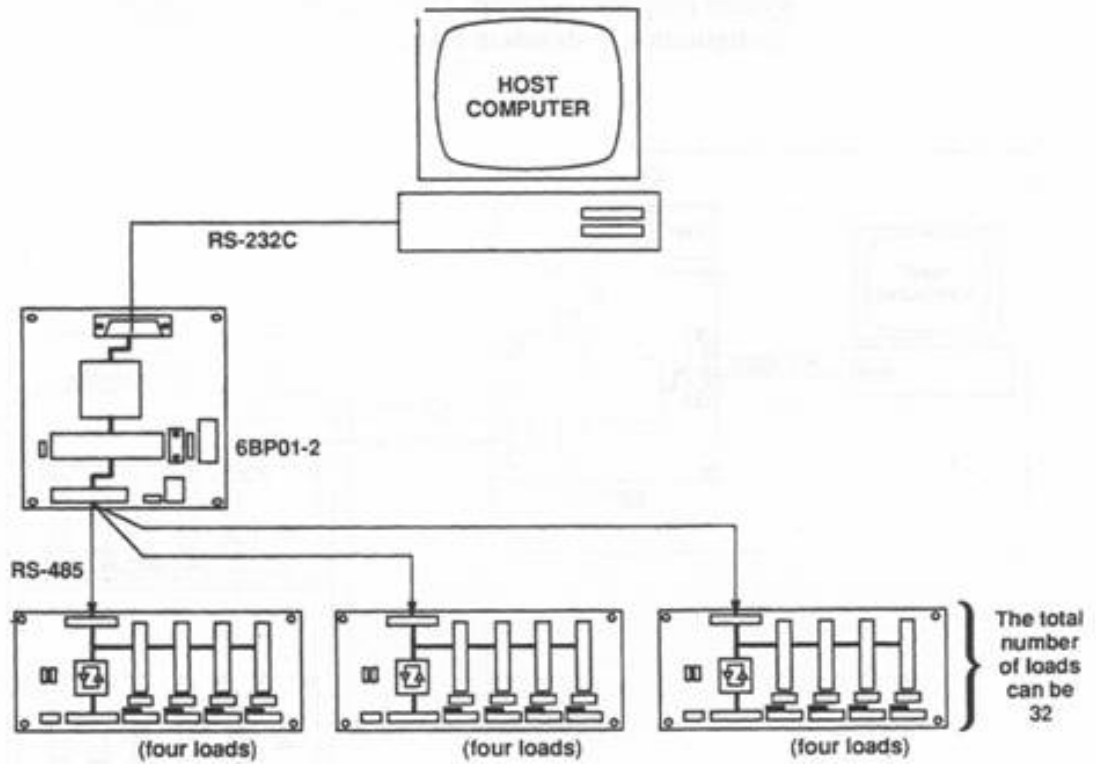
**B.3 CONFIGURACIONES Daisy – Chain Y Multidrop**

**Configuración Daisy – Chain**



Fuente: 6B series user's manual

## Configuración Multidrop



Fuente: 6B series user's manual

### C. EL PUERTO SERIE DEL PC

La comunicación serie es la forma mas comúnmente usada para enviar datos entre computadoras o entre computadoras y periféricos a varios metros de distancia.

Los equipos de comunicaciones serie se pueden dividir en: simplex, half-duplex y full-duplex.

- ◆ Simplex. Una comunicación serie simplex envía información en una sola dirección.
- ◆ Half-duplex. Significa que los datos pueden ser enviados en ambas direcciones entre dos sistemas, pero en una sola dirección al mismo tiempo.
- ◆ Full-duplex. En una transmisión full-duplex cada sistema puede enviar y recibir datos al mismo tiempo.

El puerto serie del PC es un dispositivo asíncrono, en el cual para su protocolo de transmisión de datos, sólo se tiene en cuenta dos estados de la línea, 0 y 1, también llamados bajo y alto. Cuando no se transmite ningún carácter, la línea permanece en alto. Si su estado pasa a bajo, se están transmitiendo datos, se transmiten datos en paquetes de 5 a 8 bits. Durante la transmisión, se envía primero el bit menos significativo, siendo el más significativo el último en enviarse; a continuación se envía un bit de paridad para detectar errores. Finalmente se mandan los bits de parada que indican el fin de la transmisión de un carácter. El protocolo permite utilizar 1 o 2 bits de parada.

El código normalmente usado en esta comunicación es ASCII y las velocidades de transmisión típicas son 1200, 2400, 9600 y 19200 bps.

El puertos serie también se clasifica por el tipo de UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter,) que usa. El UART es un chip que convierte los datos de formato paralelo utilizados por el PC en datos de formato serie para su envío y viceversa.

A continuación se enumeran los diferentes tipos de UARTs existentes :

**UART's sin buffer:** Los UARTs sin buffer fueron diseñados cuando los módem más rápidos transmitían a 1200 bps. No tienen buffer de carácter extra en el UART, por lo que dependen del procesador para borrar cada carácter enviado por el módem antes de que el siguiente carácter sea enviado. Los UARTs sin buffer comprenden las series 8250, 16450 y el original 16550.

**UART's con buffer:** Han sido diseñados como apoyo a los módem rápidos de la actualidad. El UART original con buffer es el 16550A, que puede acumular 16 caracteres en un buffer antes de que el procesador lea el dato. Esto hace que el software del PC tenga una mayor facilidad para comunicarse con el módem, creándose menos errores y una mayor velocidad de transmisión.

### C.1 EL ESTÁNDAR RS-232

El RS 232 o "Recommended Standard" 232 está definido en las especificaciones ANSI (American National Standard Institution) como "la interface entre un equipo Terminal de datos y un equipo de comunicación de datos empleando un intercambio en modo serie de datos binarios" En él se describen las diferentes reglas a seguir para realizar una comunicación serie entre dos dispositivos distantes entre sí.

Normalmente, los dispositivos que intervienen en una comunicación serie son el Equipo Terminal de Datos (ETD), que suele ser un PC, y el Equipo de Comunicación de Datos (ECD), generalmente un módem. A pesar de que el estándar RS 232 empezó utilizándose para la comunicación entre un PC y un módem, la gran implantación de los PCs ha derivado en la ampliación del uso del RS 232, convirtiéndose en el estándar más utilizado en aplicaciones de bajo costo que requiere la interconexión serie entre un ETD y un periférico. Como periféricos serie más usuales se pueden nombrar las impresoras, el ratón, los plotters, los scanners, los digitalizadores, etc.

El estándar ha ido evolucionando a lo largo de los años, durante los cuales ha sufrido diferentes revisiones. La última de estas revisiones ha sido la "E", realizada en julio de 1991. Ahora, el estándar es conocido como el EIA/TIA-232-E, donde EIA es "Electronic Industries Association" y TIA significa "Telecommunications Industry Association".

Las características principales que definen el estándar son:

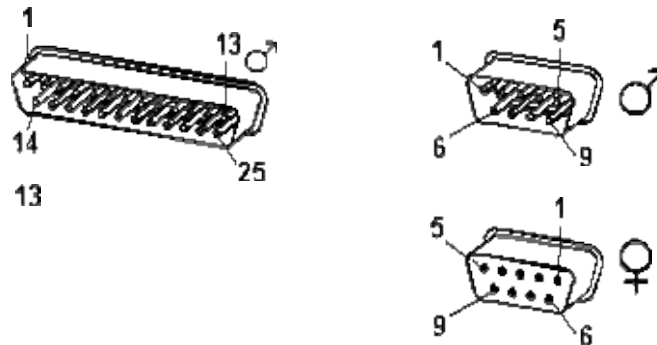
Velocidad máxima de transmisión de datos: 20K Bits por segundo (kbps). También existen aplicaciones que se salen de las especificaciones del estándar que llegan a velocidades de hasta 116 kbps.

➤ Capacidad de carga máxima: 2500 pF. Esto se traduce en una longitud máxima de cable entre el PC y el periférico de 15 a 20 metros. Para distancias mayores se ha de utilizar otro estándar de comunicaciones.

### C.2 EL CONECTOR SERIE.

Existen normalmente dos tipos de conectores el DB25 y el DB9, en el caso del DB25 no todos sus pines son alambrados; el conector de 9 pines es muy utilizado en las comunicaciones seriales basadas en el RS 232, en la tabla C1, se muestra un resumen con la función asociada a cada pin, y en la figura C1 se muestra el esquema físico del conector.

Figura C1. Esquema físico del conector DB9S.



Fuente: 6B series user's manual

Tabla C1. Función asignada a cada pin del conector DB9S

| Numerode Pin |         | Señal   | Descripción             | E/S |
|--------------|---------|---------|-------------------------|-----|
| En DB-25     | En DB-9 |         |                         |     |
| 1            | -       | -       | Masa chasis             | -   |
| 2            | 3       | TD      | Transmit Data line      | S   |
| 3            | 2       | RD      | Receive Data Line       | E   |
| 4            | 7       | RTS     | Request To Send         | S   |
| 5            | 8       | CTS     | Clear To Send           | E   |
| 6            | 6       | DSR     | Data Set Ready          | E   |
| 7            | 5       | GND     | Signal Ground           | -   |
| 8            | 1       | CD/DCD  | Data Carrier Detect     | E   |
| 15           | -       | TxC(*)  | Transmit Clock          | S   |
| 17           | -       | RxC(*)  | Receive Clock           | E   |
| 20           | 4       | DTR     | Data Terminal Ready     | S   |
| 22           | 9       | RI      | Ring Indicator          | E   |
| 24           | -       | RTxC(*) | Transmit/ Receive Clock | S   |

Fuente: 6B series user's manual

A continuación se describen brevemente la función de cada uno de los pines.

- ◆ Data Carrier Detect (DCD): El DCE pone a "1" esta línea para informar al DTE que está recibiendo una señal portadora con información.

- ◆ Data Set Ready (DSR): Es una señal que el DCE pone a "1" para indicar al DTE que está conectado a la línea.
- ◆ Receive Data Line (RD): Las señales que se reciben por la línea RD son en forma de transmisión serie. Cuando la señal DCD está a "0", la línea RD se ha de mantener en el estado Mark.
- ◆ Request To Send (RTS): Esta señal es puesta a "1" por el DTE para indicar que está preparado para transmitir datos. Entonces el DCE ha de prepararse para recibir datos. En comunicación Half Duplex también se inhibe el modo de recepción de datos. Después de una cierta espera, el DCE pone a "1" la línea CTS para informar al DTE de que ya está preparado para recibir datos. Una vez la comunicación ha finalizado y no se transmiten más datos por parte del DTE, RTS pasa de valer "1" a valer "0". Después de un pequeño tiempo de espera, para asegurarse de que han sido recibidos todos los datos transmitidos, el DCE pone a "0" la línea CTS.
- ◆ Transmit Data Line (TD): Las señales se transmiten por esta línea, en modo serie, del DTE al DCE. Cuando no se está transmitiendo ningún tipo de información, la línea ha de mantenerse en su estado Mark. Para que se puedan transferir datos, las líneas DSR, DTR, RTS y CTS han de encontrarse a "1".
- ◆ Clear To Send (CTS): Esta señal es puesta a "1" por el DCE para indicar al DTE que está preparado para recibir datos. CTS es puesta a "1" como respuesta a un estado "1" simultáneo de las líneas RTS, DSR y DTR.
- ◆ Data Terminal Ready (DTR): Esta señal, conjuntamente con DSR, indica que los equipos están operativos. DTR es puesta a "1" por el DTE para indicar al DCE que está preparado para recibir o transmitir datos. DTR ha de estar a "1" antes de que el DCE pueda poner a "1" DSR. Cuando DTR es puesta a "0" por el DTE, el DCE es desconectado del canal de comunicaciones dado que ya ha sido completada la transmisión de la información.
- ◆ Ring Indicador (RI): RI es puesta a "1" por el DCE cuando está recibiendo una llamada. Esta línea ha dejado de ser útil al emplearse el estándar en las aplicaciones de módems
- ◆ Signal Ground (GND): Esta Línea proporciona el común, la referencia de tierra, a todas las líneas antes expuestas. Está eléctricamente separada de la toma de tierra para protección del equipo.

### C.3 UTILIZACIÓN DEL PUERTO SERIE MEDIANTE LabVIEW

LabVIEW proporciona herramientas de gran utilidad para el manejo del puerto serie. Todas las funciones que son necesarias a la hora de realizar una comunicación serie entre el PC y un periférico se encuentran ya programadas en forma de Instrumentos Virtuales. De esta forma, la programación es casi transparente al programador. Los iconos de

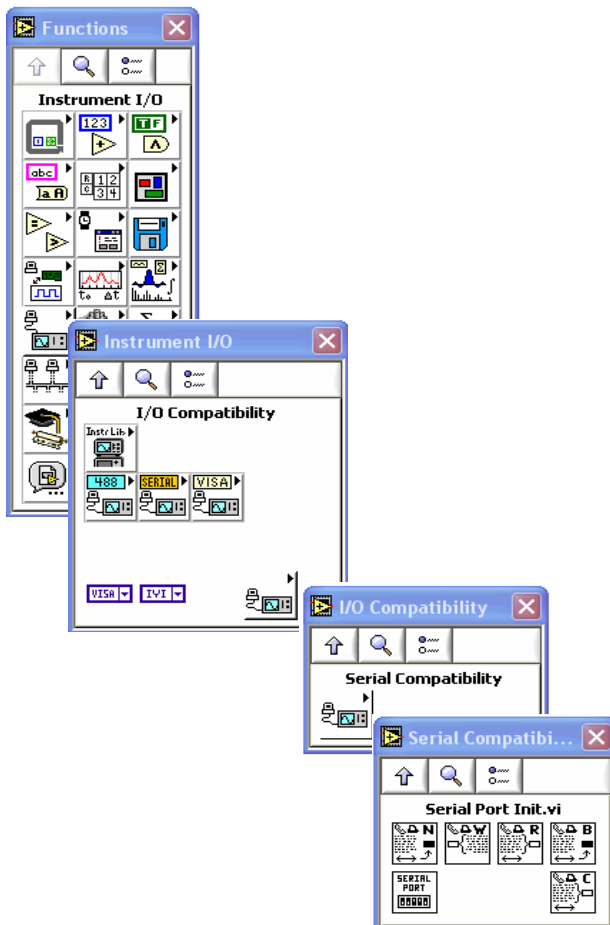
manejo del puerto serie se encuentran en el submenú Serial Compatibility como se indica en la figura C2.

Los pasos a seguir al utilizar el puerto serie son los siguientes:

- ◆ Realizar la configuración del puerto serie, inicializándolo según las características que se deseen para la comunicación. Ya no será necesario volver a configurar el puerto mientras no se varíen las condiciones de la comunicación.
- ◆ Acceder al puerto serie para recibir o enviar datos tantas veces como se desee.

A continuación se describirán los diferentes iconos de que dispone labVIEW para el manejo del puerto serie.

Figura C2. Ubicación de los iconos del puerto serie



Fuente: Imagen de LabVIEW

Antes de poder utilizar el puerto serie para transmitir y/o recibir, es necesario configurarlo. De esta manera se le indica al PC cómo ha de actuar en las comunicaciones, es decir qué puerto serie ha de utilizar, con qué velocidad de transmisión ha de emitir y recibir datos, qué tipo de paridad ha de utilizar, etc... Es importante tener en cuenta que la configuración que se le dé al puerto serie del PC ha de ser exactamente la misma que utilice el dispositivo periférico. Si no es así, PC y periférico no podrán comunicarse con éxito, ya que estarían utilizando especificaciones de transmisión diferentes.

Así pues, antes de realizar alguna operación con el puerto serie, es necesario configurarlo de forma adecuada, teniendo en cuenta las características de comunicación serie del dispositivo.

Protocolos De Comunicación (HANDSHAKING MODES). En una comunicación serie es conveniente realizar un control sobre la transmisión y la recepción de datos a fin de que ésta se lleve a cabo de forma correcta, es decir, que no se pierda información. Uno de los principales problemas que se presentan es la vigilancia de los buffers que destina el puerto serie par la recepción y transmisión de datos. Estos buffers son zonas de memoria reservada que funcionan de la siguiente manera:

- ◆ Por una parte, se guardan los datos que van llegando por el puerto serie desde el periférico. Estos datos se mantienen almacenados hasta que son leídos por el programa que gestiona el puerto serie. Es posible que la continua llegada de información sin que esta sea leída acabe por llenar la capacidad del buffer de recepción. En este caso los nuevos datos que se reciban tras la saturación del buffer son ignorados, es decir, toda esta nueva información se pierde. Para que se pueda volver a recibir datos nuevos, primero se han de leer algunos de los datos almacenados en el buffer, con lo que en éste se dejará espacio libre que podrá ocuparse con la nueva información que se reciba.
- ◆ Por otra parte, en el buffer de emisión se almacenan los datos que se desean enviar al periférico, en espera de que la transmisión sea posible, es decir en espera de que el periférico se encuentre preparado para recibir datos.
- ◆ La gestión de los buffers de entrada y salida es transparente al usuario cuando se trabaja con LabVIEW, es decir, el usuario sólo ha de leer del buffer de entrada los nuevos datos recibidos y escribir en el buffer de salida los datos que desee enviar, despreocupándose de cómo se llenan o vacían estos buffers.

Los protocolos de comunicación ("Handshaking modes") se ocupan de evitar que el buffer de recepción de datos del puerto serie se sature y por consiguiente, se pierda información. Con el uso de estos protocolos, el PC y el periférico se envían información sobre sus respectivos buffers de recepción. La mecánica de funcionamiento de los protocolos es la siguiente:

En el caso de que el buffer del receptor se llegue a saturar con datos recibidos, se envía

una señal al emisor indicándole que ha interrumpido la transferencia de datos ya que, de otro modo, se perdería información. El emisor recibe dicha señal y deja de transmitir, quedándose en espera de que el receptor vuelva a estar disponible para continuar con la comunicación. Una vez el receptor haya leído parte de la información contenida en su buffer, éste volverá a disponer de espacio libre, con lo que se enviará una señal al emisor indicándole que ya puede continuar con la transferencia de datos.

LabVIEW es capaz de utilizar dos tipos diferentes de protocolos de comunicación: "Software handshaking" y "Hardware handshaking" en el caso de que se desee utilizar uno de ellos en la comunicación, el protocolo escogido deberá ser habilitado en el momento de realizarse la configuración del puerto serie. Si ninguno de los dos es habilitado expresamente, por defecto LabVIEW no utilizará ningún protocolo en las transferencias. Esta última opción es aconsejable, por su simplicidad en aplicaciones en las que la cantidad de información a transmitir es pequeña. En estos casos la capacidad del buffer puede ser más que suficiente para que éste nunca llegue a saturarse, siendo innecesaria la utilización de protocolos. Si el volumen de información a transmitir es considerable y/o si el periférico conectado al PC no es muy rápido, el uso de uno de los protocolos de comunicación es lo recomendado.

Algo importante al utilizar uno de los protocolos es: Se debe comprobar que el periférico conectado al PC dispone también de la posibilidad de utilizar dicho protocolo. Si eso es así, se han de configurar los dos puertos serie, el del PC y el del periférico, para que utilicen el mismo protocolo, de manera que puedan comunicarse satisfactoriamente.

A continuación se describen brevemente los dos tipos de protocolos disponibles en LabVIEW.

**Software Handshaking – XON/XOFF.** El protocolo XON/XOFF es un protocolo software para evitar la saturación de los buffers de comunicación serie. Su funcionamiento es el siguiente: cuando el buffer de recepción está a punto de ser saturado, el receptor envía el carácter XOFF (<control-S>, decimal 19) para indicar al emisor que ha de detener la transferencia de datos para que no llegue a perderse información. Una vez el receptor ha leído parte de la información contenida en su buffer de recepción, dispondrá de nuevo de espacio libre para recibir más datos, enviando entonces el carácter XON (<control-Q>, decimal 17) para indicar al emisor que puede reanudar la transmisión.

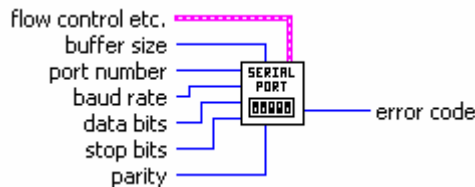
Si se activa el protocolo XON/XOFF, los dispositivos que se están comunicando siempre interpretan los caracteres <control-S> y <control-Q> como los comandos XOFF y XON respectivamente, no como datos. Es por esto que no se ha de utilizar este protocolo al transmitir información binaria, ya que es posible que dichos caracteres se encuentren por casualidad entre los bytes enviados, con lo que se interpretarán erróneamente como los comandos XON y XOFF, alterando el curso de la comunicación, cosa que no es conveniente. En este caso se deberá desactivar el protocolo XON/XOFF, con lo que los caracteres <control-S> y <control-Q> se interpretarán como datos y no actuarán sobre la comunicación, ya que no son considerados comandos de control.

Hardware Handshaking. Es el segundo protocolo que puede utilizarse en las comunicaciones serie con LabVIEW. Al igual que el protocolo software, su finalidad es la de evitar que llegue a saturarse alguno de los buffers de datos utilizados en la comunicación. Ahora bien, en este caso no se controla la transferencia de información mediante el envío de caracteres, sino que se utiliza una serie de señales físicas que interconectan los dos dispositivos a comunicar. Estas señales son: DSR, RTS, CTS, DTR. Dado que son señales que necesitan un soporte físico para ser transmitidas, será necesario construir un cable de comunicaciones adecuado para el uso de este protocolo. Un ejemplo muy usual de esta conexión es la configuración módem nulo.

## C.4 CONFIGURACIÓN DEL PUERTO SERIE

C.4.1 Serial Port Init.vi. El icono que se utiliza para la configuración de puerto serie es el llamado Serial Port Init.vi. Ejecutando este icono se eligen las características de comunicación que se desean para el puerto serie, es decir, el tipo de protocolo a utilizar, la velocidad de transmisión, la paridad, etc... En la figura C3 se muestra este icono y sus conexiones.

Figura C3 Serial port init.vi



Fuente: Imagen de LabVIEW

A continuación se describen las diferentes conexiones del icono, su función y el tipo de dato que se le ha de introducir, en el caso de que se trate de una conexión de entrada, o el tipo de dato que entrega, si se trata de una conexión de salida.

- ◆ Flow control etc... : Esta es una conexión de entrada del tipo "cluster", está constituida por una serie de entradas que han sido agrupadas en un determinado orden, formando un paquete. Los parámetros que se introducen por esta conexión son relativos a los protocolos de comunicación, Hardware Handshaking y Software Handshaking. Si debido a la naturaleza de la aplicación, se considera conveniente prescindir de los protocolos en las transferencias, esta conexión se ha de dejar al aire, no es necesario programarla. Si, por el contrario, se decide utilizar uno de los protocolos, se ha de crear un "cluster" con los valores adecuados y cablearlo a esta conexión.

Se detallan, en orden, las diferentes variables que se han de introducir en Flow control etc..., indicando el tipo de dato y su utilidad, así:

- Input XON/XOFF: Estando en True activa el protocolo XON/XOFF por parte del PC. En este caso, el periférico considerará los caracteres XON/XOFF que el PC le envíe, interrumpiendo la transferencia de datos cuando el PC lo solicite y reanudándola cuando el PC indique que puede recibir más datos.
- Input HW Handshake: Si se encuentra a True, se permite la utilización de la línea Request To Send (RTS). Esta línea física será activada según el funcionamiento del protocolo "Hardware", es decir, cuando el PC quiera indicar al periférico que desea enviarle datos.
- Input alt HW Handshake: En el caso de ser True, se habilita el uso de la línea física correspondiente a Data Terminal Ready (DTR). Si el protocolo "Hardware" activa esta línea, se indica al periférico que el PC está preparado para enviar o recibir datos.
- Output XON/XOFF: Si se pone a True, se permite la utilización del protocolo "Software" por parte del periférico. En este caso, el PC interpretará correctamente los caracteres XON/XOFF que le envíe el periférico en función del estado de su buffer de recepción.
- Output HW Handshake: Cuando se encuentra a True, se permite la utilización de la señal Clear To Send (CTS) por parte del protocolo "Hardware". Esta línea se activa por el periférico para indicarle al PC que está listo para recibir sus datos.
- Output alt HW Handshake: Si es True se habilita el uso de la señal Data Set Ready (DSR) por el protocolo "Hardware". Cuando esta línea se activa, el periférico indica al PC que está preparado para transmitir o recibir datos.
- XOFF Byte: En esta entrada se ha de indicar el byte a utilizar como comando XOFF, es decir, como carácter <control-S>. Por defecto se emplea el byte 13h. Se ha de tener en cuenta que, en caso de utilizar el protocolo XON/XOFF, los bytes que se escojan para los comandos XON y XOFF no deben enviarse entre los datos, ya que serían interpretados como caracteres de control y se actuaría erróneamente sobre el curso de la comunicación.
- XON Byte: Aquí se ha de indicar el byte a utilizar como comando XON, o sea, el byte que se empleará como carácter <control-Q> en caso de utilizar protocolo XON/XOFF. Por defecto se usa el byte 11H.
- Parity error byte: En esta entrada se ha de indicar el byte que hay que utilizar en caso de que se produzca un error de paridad en la transmisión. Si el byte alto de la palabra indicada en esta entrada es diferente de cero, el byte bajo será el carácter que se utilizará para reemplazar cualquier error de paridad que se detecte en la transmisión, siempre y cuando la paridad este activada. Por ejemplo, si en esta entrada se introduce el valor 013FH, y, además, se está trabajando con alguna de las modalidades de paridad, dado que el byte alto del dato introducido es diferente

de cero, cuando se detecte un error de paridad en un byte recibido este byte erróneo será sustituido por el byte 3Fh. De este modo, si se detecta la presencia de un byte de valor 3FH entre los datos recibidos, se podrá saber que ese byte sustituye a un byte recibido que no era correcto, ya que en su transmisión se produjo un error de paridad. Así pues, con la utilización de un byte reservado, en el ejemplo el 3Fh, se podrán detectar los errores de paridad, desechando los bytes que hayan sido transmitidos de forma incorrecta. Por defecto, en esta entrada se introduce un 0000H, lo que significa que no se utiliza ningún byte de error de paridad.

Es importante que en el caso de utilizar un byte de error de paridad se ha de tener en cuenta que la información a recibir no ha de contener dicho byte, ya que entonces se producirían errores de interpretación.

- ◆ **Buffer Size:** En esta conexión se ha de entrar una constante entera. Con esta constante se le indicará al puerto el tamaño que se desea que tenga los buffers de entrada y salida que se utilizarán en la transmisión y recepción de mensajes.

El tamaño de estos buffers es de 1kbyte como mínimo. Es decir, si en Buffer Size se introduce un valor igual o menor a 1024bytes (1kbyte), el puerto serie tomará un tamaño de buffer de 1024 bytes (1kbyte). Ahora bien, es posible que sea necesario utilizar tamaños de buffer mayores para las transmisiones de datos. En ese caso, se ha de introducir en Buffer Size el valor que se crea necesario.

- ◆ **Port Number:** En esta entrada se ha de introducir un valor entero entre 0 y 13. Con este valor se indica al PC cuál de sus puertos serie se desea configurar. Así:

Tabla C2. Código asignado en LabVIEW a cada puerto serie

|        |        |        |         |         |
|--------|--------|--------|---------|---------|
| 0:COM1 | 3:COM4 | 6:COM7 | 10:PRN1 | 13:PRN4 |
| 1:COM2 | 4:COM5 | 7:COM8 | 11:PRN2 |         |
| 2:COM3 | 5:COM6 | 8:COM9 | 12:PRN3 |         |

Fuente: 6B series user's manual

- ◆ **Baud Rate:** El valor que se introduzca en esta entrada se tomará como la velocidad de transferencia de datos, en baudios, con la que se configurará el puerto serie. A esta velocidad se realizarán todas las transferencias, tanto el envío como la recepción de datos. Valores típicos de la velocidad de transferencia son los 1200, 2400, 4800 y los 9600 baudios.
- ◆ **Data Bits:** En esta conexión se ha de indicar el número de bits de los bytes recibidos que se consideran como bits de datos. Es decir, cuantos bits han de ser tomados como bits de datos en cada byte recibido. Los valores que puede tomar esta entrada

van de 5 a 8 bits de datos.

- ◆ Stop Bits: En esta entrada se han de introducir los bits de parada que se desean utilizar en las transferencia. Los valores que puede tomar son: 0 para un bit de parada o 1 para dos bits de parada.
- ◆ Parity: En esta conexión se ha de indicar el tipo de paridad que se desee utilizar en la comunicación. Se introducirá un 0 en el caso de no querer emplear ningún tipo de paridad, un 1 para utilizar paridad impar o un 2 en el caso de querer paridad par.
- ◆ Error Code: Esta es la única conexión de salida que presenta el icono de configuración del puerto serie. Por ella se entregará un -1 en el caso de que la velocidad de transmisión, los bits de datos, los bits de parada, la paridad o el número del puerto serie se encuentren fuera del rango. También pueden tomar el valor -1 si el puerto serie no ha podido ser inicializado correctamente.

C.4.2 Enviar datos por el puerto serie. Una vez el puerto ha sido configurado, se deseará enviar y recibir datos por él. Se ha de escoger el icono adecuado de entre los iconos del puerto serie, se ha cablear de forma correcta y al ser ejecutado, los datos que se hayan programado serán escritos en el buffer de salida del puerto serie. A partir de ese punto, es el propio puerto serie quien establecerá por su cuenta la comunicación con el periférico, enviándole la información cuando éste se encuentre dispuesto para recibirla.

Serial Port Write.vi: Éste es el VI que LabVIEW proporciona para enviar datos por el puerto serie. Figura C4

Figura C4. Serial Port Write.vi



Fuente: Imagen de LabVIEW

A continuación se detalla cada una de sus conexiones, su utilidad y el tipo de dato con el que opera:

- ◆ Port Number: En esta entrada se ha de introducir un valor entero entre 0 y 13, con el cual se indica en cual puerto ha de ser escrito. Ver tabla No XX.
- ◆ String To Write: En esta entrada se debe introducir, en forma de cadena de caracteres los datos que se desean enviar por el puerto serie. Si la información a transmitir es de tipo binario, debe ser convertida a cadena de caracteres para después introducirse por esta entrada.
- ◆ Error Code: Si, al ejecutar el icono de escritura en el puerto, se produce cualquier

tipo de error, por esta salida se extrae un valor diferente de cero. En el caso de que esto ocurra se habrá de revisar si el icono se ha cableado correctamente, es decir, si el puerto serie indicado es el adecuado y si la cadena de caracteres no sobrepasa en extensión el tamaño configurado para el buffer de escritura.

C.4.3 Número de datos en el buffer de entrada. En aplicaciones en las que sea necesario recibir datos por el puerto serie, es muy útil disponer de una herramienta que permita conocer, siempre que se desee, el número de bytes que se han recibido y que todavía no han sido leídos por el programa, es decir, la cantidad de información que se encuentra almacenada en el buffer de entrada del puerto serie en espera de ser leída.

Para realizar esta función, Labview dispone del icono Bytes at Serial Port.vi, que se describe con detalle a continuación.

Bytes At Serial Port.vi: Este VI entrega, para un número de puerto determinado, la cantidad de bytes que tiene almacenados en su buffer de entrada en espera de que sean leídos. Su icono y sus conexiones se muestran en la figura C5

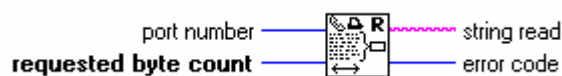
Figura C5. Bytes at Serial Port.vi



Fuente: Imagen de LabVIEW

C.4.4 Recibir datos del puerto serie. Una vez configurado el puerto serie y establecida la conexión, es posible que el periférico haya transferido datos al PC. El puerto serie se encargará de gestionar la comunicación con el periférico si éste desea enviar información. Una vez finalizada la transferencia, los datos recibidos quedan almacenados en el buffer de recepción, en espera de que sean leídos. En el momento que se quiera acceder a la información recibida, es necesario programar un acceso de lectura al puerto. Esto se realiza con el Serial Port Read.vi. Ver figura C6. Se ha de tener en cuenta que, una vez se haya leído cierta información del buffer de recepción, ésta dejará de estar almacenada en él, dejándose espacio en el buffer para nuevos datos que puedan llegar en el futuro.

Figura C6 Serial PortWrite.vi



Fuente: Imagen de LabVIEW

A continuación se describe sus conexiones, indicando sus funciones y el tipos de datos que utilizan.

**Port Number:** En esta entrada se ha de introducir un valor entero entre 0 y 13, con el cual se indica cual puerto se desea consultar . Ver tabla C2.

**Requested Byte Count:** En esta entrada se ha de indicar el número de bytes que se desean leer del puerto serie. Se debe tener en cuenta que este número no ha de ser superior al tamaño del buffer de recepción configurado previamente con el Serial Port Init.vi. Del mismo modo, el número de bytes que se deseen leer no deben exceder al número de bytes almacenados en el buffer de recepción.

**String Read:** Una vez se ha ejecutado el icono, por esta salida se entrega en forma de cadena de caracteres (string), los datos leídos del buffer de recepción.

**Error Code:** Por esta salida se extrae un valor diferente de cero si se ha producido algún tipo de error en la lectura de datos en el puerto.

## D. CONFIGURACIÓN, CONVERSIÓN Y ESTADO DE LOS MÓDULOS DE ENTRADA ANÁLOGA 6B11.

Los módulos conversores y acondicionadores 6B11 son dispositivos programables. Su programación se estructura bajo tres modalidades:

Configuración.  
Conversión.  
Estado.

Cuando se desea programar un módulo 6B11, la serie 6B de Analog Devices proporciona un set de comandos que ayudan en esta tarea.

El set de comandos de la serie 6B, provee instrucciones que permiten configurar, calibrar, retornar el estado de la configuración actual y leer o escribir datos desde o en un módulo de entrada análoga (6B11).

Cada instrucción consta de una cadena de caracteres; cada uno es recibido por un módulo 6B11 desde el PC (comando) o transmitido por el módulo al PC (respuesta). Un carácter es un código ASCII asíncrono, consistente de un bit de inicio, ocho bits de datos y un bit de parada. Solo el subconjunto ASCII imprimible es usado, por tanto, el bit más significativo (MSB) de cada carácter transmitido es siempre cero (e ignorado), y el MSB de cada carácter recibido es ignorado.

### D.1 CONFIGURACIÓN DE LOS MÓDULOS 6B11

Para configurar un módulo 6B11 se requiere estudiar los parámetros de configuración.

**D.1.1 Parámetros De Configuración.** Los comandos de configuración permiten establecer la dirección, el rango de entrada, la tasa de baudios, el formato de los datos, el estado de la suma de comprobación, y/o el tiempo de integración para un módulo de entrada análoga 6B11.

👉 **Dirección.** La dirección para cada módulo de entrada análoga consiste de un número hexadecimal único entre 00 y FF. (cada módulo viene establecido de fábrica con la dirección 00h)

Rango de entrada. Cada módulo puede ser configurado para diferentes rangos de entrada. La tabla C1 lista los rangos de entrada configurables.

Tabla C1. Rangos de entrada

| Módulo | Rangos de entrada  |
|--------|--|
| 6B11   | $\pm 15\text{mV}$<br>$\pm 50\text{mV}$<br>$\pm 100\text{ mV}$<br>$\pm 500\text{mV}$<br>$\pm 1\text{ V}$<br>$\pm 5\text{V}$<br>$\pm 20\text{ mA}$<br>Termocupla tipo J, 0°C a 760°C<br>Termocupla tipo K, 0°C a 1000°C<br>Termocupla tipo T, -100°C a 400°C<br>Termocupla tipo E, 0°C a 1000°C<br>Termocupla tipo R, 500°C a 1750°C<br>Termocupla tipo S, 500°C a 1750°C<br>Termocupla tipo B, 500°C a 1800°C |

Fuente: 6B Series User's Manual, Analog Devices

Rata de Baudios. Indica la velocidad de transferencia de datos entre un módulo y el PC. En otras palabras es la cantidad de bits que se van a transmitir por unidad de tiempo (segundo) en la comunicación serial asíncrona entre el PC y el módulo.

Se puede configurar la rata de baudios de un módulo de entrada análoga como 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600 o 19200 baudios. y se debe tener en cuenta que todos los módulos en la tarjeta deben operar a la misma rata de baudios.

🔹 Formato de datos. Indica la forma en que se interpretan los datos digitales.

Un módulo de entrada análoga puede ser configurado para transmitir datos al PC en uno de los siguientes formato de datos:

- 1) Unidades ingenieríles. El formato de unidades ingenieríles presenta los datos en unidad natural, tal como milivoltios, voltios, miliamperios y grados centígrados.

El formato de unidades ingenieríles consiste de un signo "+" o "-", seguido por cinco dígitos decimales y un punto decimal; cada uno de esos caracteres se transmiten

mediante un bit de arranque, ocho bits de datos, un bit de parada y sin paridad. La resolución (posición del punto decimal) depende del rango de entrada configurado, como sigue:

Rango de entrada de  $\pm 15$  mV y  $\pm 50$  mV – Resolución de 1 $\mu$ V (tres cifras decimales)

Rango de entrada de  $\pm 100$  mV,  $\pm 150$  mV,  $\pm 500$  mV – Resolución de 10 $\mu$ V (dos cifras decimales)

Rango de entrada de  $\pm 1$  V y  $\pm 5$  V – Resolución de 100 $\mu$ V (cuatro cifras decimales)

Rango de entrada de  $\pm 10$  V y  $\pm 50$  V – Resolución de 1mV (tres cifras decimales)

Rango de entrada de  $\pm 20$  mA – Resolución de 1 $\mu$ A (tres cifras decimales)

Rango de entrada termocupla tipo T – Resolución de 0.01 °C (dos cifras decimales)

Rango de entrada termocuplas J, K, E, R, S, y B – Resolución de 0.1 °C (una cifra decimal)

➤ Rango de entrada RTD – Resolución de 0.01 °C (dos cifras decimales)

Por ejemplo, si un módulo de entrada analógica es configurado para un rango de  $\pm 50$  mV y el valor de entrada es  $-3.45$  mV, el valor retornado es  $-03.450$ . O si un módulo es configurado para una termocupla tipo K y el valor de entrada es  $243.5$  °C, el valor retornado es  $+0243.5$ .

- 2) Porcentaje de FSR. El formato de porcentaje de FSR (full - scale range) presenta los datos de la señal de entrada relativa al rango de escala completa de la entrada.

El formato de porcentaje de FSR consiste de un signo "+" o "-", seguido por cinco dígitos decimales y un punto decimal. El punto decimal es fijo y la resolución máxima es 0.01%.

Por ejemplo, si un módulo es configurado para un rango de  $\pm 50$  mV y el valor de entrada es  $+2.0$  mV, el valor retornado es  $+004.00$ , indicando que la entrada fue el 4% del rango de escala total. O si un módulo es configurado para una termocupla tipo K ( $0^{\circ}\text{C}$  a  $1000^{\circ}\text{C}$ ) y el valor de entrada es  $645.3$  °C, el valor retornado es  $+0.64.53$ , indicando que  $645.3$  °C es el 64.53% de  $1000$  °C.

- 3) Hexadecimal complemento a dos. El formato hexadecimal complemento a dos es la representación hexadecimal del dato ASCII. Es compacto y provee comunicación rápida, excelente resolución y fácil conversión al formato entero compatible con el PC.

El formato hexadecimal complemento a dos consiste de una cadena de 4 caracteres hexadecimales, representando un valor binario complemento a dos de 16 bits.

La resolución es el bit menos significativo de los 16 bits. La escala total positiva es representada como un 7FFF (+32767) y la escala total negativa es representada como 8000 (-32768).

Por ejemplo, si un módulo es configurado para un rango de  $\pm 5$  V y el valor de entrada es  $-1.234$  V, el valor retornado es E069, correspondiente al entero con signo  $-8087$ .

Tiempo de Integración. Cada módulo se puede configurar para uno de los siguientes tiempos de integración:

50 ms (operación a 60 Hz) – Usado en Estados Unidos, o en cualquier localidad con potencia a 60 Hz.

60 ms (operación a 50 Hz) – Usado en Europa, o en cualquier localidad con potencia a 50 Hz

No hay distinción en rendimiento entre los tiempos de integración de 50 ms y 60 ms. Si la interferencia de la línea de potencia no es un problema se puede trabajar con cualquier tiempo de integración.

• Suma de comprobación (Checksum). Se puede configurar un módulo para incorporar la generación de una suma de comprobación y verificarla en todos los comandos y respuestas. Una suma de comprobación ayuda a detectar errores en comandos enviados al módulo desde el PC y respuestas enviadas desde el módulo al PC. Esto, sin embargo reduce el rendimiento, porque adiciona dos caracteres al comando y dos caracteres a la respuesta.

La suma de comprobación se expresa en dos caracteres ASCII en formato hexadecimal y es la suma de todos los valores ASCII de todos los caracteres en un comando.

*Nota:* Si se va a configurar la dirección, la rata de baudios o la suma de comprobación es necesario llevar el módulo a la posición mas a la izquierda de la tarjeta 6BP04-2 e instalar el puente de configuración (jumper). Y para configurar los demás parámetros no es necesario posicionar el módulo (se puede dejar en la posición que le corresponde) ni conectar el puente.

D.1.2 Comando y Respuesta de Configuración. El comando para configurar un módulo de entrada analógica 6B11, enviado desde el PC al módulo, es almacenado en la memoria no volátil EEPROM (interna en el módulo).

La sintaxis del comando es:

`% AANNTTCCFF (cr)`

donde: % es el carácter delimitador

AA representa la dirección del módulo en dos caracteres hexadecimales. Los valores que puede tomar AA son desde 00h hasta FFh.

NN representa la nueva dirección hexadecimal del módulo. Los valores que puede tomar NN son desde 00h hasta FFh.

TT representa el código tipo hexadecimal. El código tipo indica el rango de entrada. La tabla C2 lista el código tipo para los módulos de entrada analoga.

Tabla C2. Códigos tipo que indican el rango de entrada.

| Módulo | Código tipo (TT) | Rangos de entrada                 |
|--------|------------------|-----------------------------------|
| 6B11   | 00               | ±15 mV                            |
|        | 01               | ±50mV                             |
|        | 02               | ±100mV                            |
|        | 03               | ±500mV                            |
|        | 04               | ±1V                               |
|        | 05               | ±5V                               |
|        | 06               | ±20 mA                            |
|        | 0E               | Termocupla tipo J, 0°C a 760°C    |
|        | 0F               | Termocupla tipo K, 0°C a 1000°C   |
|        | 10               | Termocupla tipo T, -100°C a 400°C |
|        | 11               | Termocupla tipo E, 0°C a 1000°C   |
|        | 12               | Termocupla tipo R, 500°C a 1750°C |
|        | 13               | Termocupla tipo S, 500°C a 1750°C |
|        | 14               | Termocupla tipo B, 500°C a 1800°C |

Fuente: 6B Series User's Manual, Analog Devices

CC representa el código hexadecimal para definir la rata de baudios. La tabla C3 lista los códigos para las diferentes ratas de baudios.

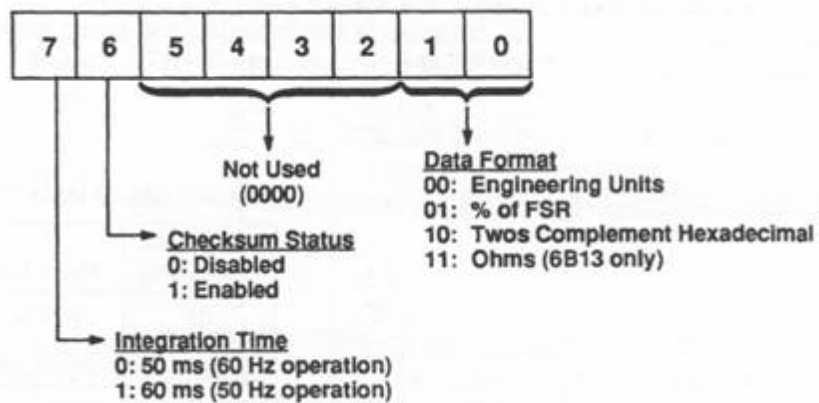
Tabla C3. Códigos de rata de baudios

| Código (CC) | Rata de Baudios |
|-------------|-----------------|
| 01          | 300 baudios     |
| 03          | 1200 baudios    |
| 04          | 2400 baudios    |
| 05          | 4800 baudios    |
| 06          | 9600 baudios    |
| 07          | 19200 baudios   |

Fuente: 6B Series User's Manual, Analog Devices

FF es el equivalente hexadecimal de un registro de 8 bits que representa el formato de datos, el estado de la suma de comprobación, y el tiempo de integración. La estructura del registro es mostrada en la figura C1. Los bits 2 a 5 no son usados y deben ser puestos a cero.

Figura C1. Registro de parámetros de: formato de datos / suma de comprobación / tiempo de integración.



6B Series User's Manual, Analog Devices

(cr) representa el caracter de terminación (carriage return, 0Dh).

La respuesta que el módulo da al PC tiene la siguiente sintaxis:

!AA (cr) si el comando es válido.

?AA (cr) si se ha entrado un parámetro invalido u operación invalida, o si no se ha instalado el

puente de configuración (jumper) antes de cambiar la rata de baudios, habilitar/deshabilitar la suma de comprobación o modificar la dirección del módulo.

! es el caracter delimitador indicador de un comando valido.

? es el carácter delimitador indicador de un error.

AA representa la nueva dirección en 2 caracteres hexadecimales del módulo.

(cr) representa el caracter de terminación (carriage return, 0Dh).

El tiempo en enviar un comando de configuración, en guardar en la EEPROM la configuración deseada y en llegar la respuesta de aprobación es aproximadamente de 213 ms, configurando el módulo a 9600 baudios.

D.1.3 Configuración Usada para El SATD. Para que cada módulo tome la configuración antes dicha se debe enviar desde el PC al módulo, los comandos:

- 1er. Módulo (canal 0 o fundición blanca)

% 0000010600 (cr)

Entonces este primer módulo toma la configuración:

|                       |                        |
|-----------------------|------------------------|
| Dirección             | 00h                    |
| Rango de entrada      | ±50 mV                 |
| Rata de baudios       | 9600 baudios           |
| Tiempo de integración | 50 ms                  |
| Suma de comprobación  | deshabilitada          |
| Formato de datos      | Unidades ingenieriles. |

- 2do. Módulo (canal 1 o fundición gris)

% 0001010600 (cr)

Por tanto el segundo módulo toma la configuración:

|                       |              |
|-----------------------|--------------|
| Dirección             | 01h          |
| Rango de entrada      | ±50 mV       |
| Rata de baudios       | 9600 baudios |
| Tiempo de integración | 50 ms        |

|                      |                       |
|----------------------|-----------------------|
| Suma de comprobación | deshabilitada         |
| Formato de datos     | Unidades ingenieríles |

- 3er. Módulo (canal 2 o lanza de inmersión)

% 0002010600 (cr)

Y el tercer módulo toma la configuración:

|                       |                        |
|-----------------------|------------------------|
| Dirección             | 02h                    |
| Rango de entrada      | ±50 mV                 |
| Rata de baudios       | 9600 baudios           |
| Tiempo de integración | 50 ms                  |
| Suma de comprobación  | deshabilitada          |
| Formato de datos      | Unidades ingenieríles. |

## D.2 CONVERSIÓN DE LOS MÓDULOS DE ENTRADA ANÁLOGA 6B11

Los módulos de entrada análoga 6B11, poseen 2 formas de conversión:

- Muestreo individual
- Muestreo sincronizado.

D.2.1 Muestreo Individual. Este modo de conversión retorna el valor de entrada desde un módulo específico en el formato de datos previamente configurado.

La sintaxis del comando para pedir una muestra a un módulo específico es:

#AA (cr)

donde: # es el caracter delimitador

AA representa la dirección hexadecimal de 2 caracteres del módulo cuyo valor digitalizado se desea conocer.

(cr) representa el caracter de terminación (carriage return, 0Dh).

Una vez llega serialmente el comando al módulo, este lo interpreta y realiza su función de muestreo, cuantización y digitalización y envía la respuesta en el formato acordado así:

>(dato) (cr)

donde: > es el caracter delimitador.

(dato) representa el valor de entrada en el formato de datos configurado.

(cr) representa el caracter de terminación (carriage return, 0Dh).

Por ejemplo, para adquirir un dato de un módulo con dirección 01h se debe enviar el comando:

#01 (cr)

y se recibirá la respuesta:

>+47.963 (cr)

Indicando que en ese instante del tiempo el valor de entrada en el módulo 01h es +47.963 mV. (El formato de datos es unidades ingenieriles)

El tiempo en enviar un comando de muestreo, en hacer la conversión y en llegar la respuesta es aproximadamente de 13 ms, configurando el módulo a 9600 baudios, en unidades ingenieriles y deshabilitada la suma de comprobación (checksum).

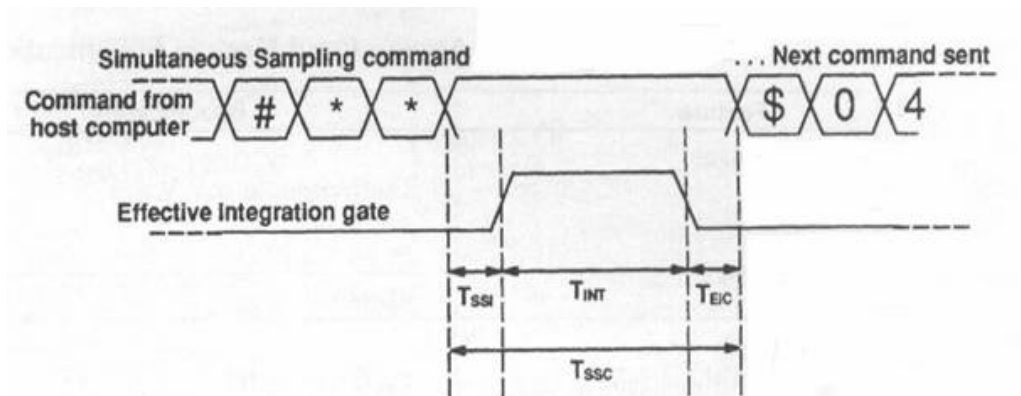
D.2.2 Muestreo Sincronizado. El muestreo sincronizado es otra forma de pedir los datos a los módulos 6B11.

El firmware de los módulos de entrada analógica 6B11 permite muestrear datos desde todos los 6B11s *simultáneamente*.

De esta forma muestrean todos los módulos al tiempo y cada módulo almacena su dato en un registro separado, dentro de su microcontrolador y se puede acceder al dato con un comando separado.

El 6B11 requiere un máximo de 70 ms para ejecutar la conversión y normalizar el dato, no se debe ejecutar ningún comando adicional durante este tiempo. Este periodo de tiempo incluye el retardo entre la recepción del comando de muestreo sincronizado y el comienzo (onset) del periodo de integración, el periodo de integración en sí mismo y el tiempo requerido para operaciones de linealización y/o escalamiento. Un diagrama de temporización es mostrado en la figura C2 y en la tabla C4.

Figura C2. Diagrama de tiempos para el muestreo sincronizado.



Fuente: 6B Series User's Manual, Analog Devices

La sintaxis del comando para trabajar con muestreo sincronizado es:

#\*\*

donde: # es el caracter delimitador.

\*\* indica el comando de muestreo sincronizado

Tabla C4. Descripción de los parámetros de temporización para el muestreo sincronizado.

| Parametros de temporización | Descripción   | Mínimo | Típico  | Máximo          |
|-----------------------------|---|--------|---|-----------------|
| $T_{SSI}$                   | Fin del commando de muestreo simultaneo a inicio del periodo de integración | ---    | 0.2 ms  | 9 ms            |
| $T_{INT}$                   | Periodo de integración  | ---    | 50 ms/<br>60ms<br>(dependiendo de la configuración) | 51 ms/<br>61 ms |
| $T_{EIC}$                   | Fin del periodo de integración a inicio de la comunicación                  | 10 ms  | ---   | ---             |
| $T_{SSC}$                   | Fin del comando de muestreo simultaneo a inicio del próximo comando         | 70 ms  | ---   | ---             |

Fuente: 6B Series User's Manual, Analog Devices

Con este tipo de muestreo no se requiere retorno de carro (cr) ni caracteres de suma de comprobación (checksum).

El 6B11 no responde al comando de muestreo sincronizado, se debe ejecutar el comando de lectura sincronizada después de que se ejecute el comando de muestreo sincronizado para retornar el dato.

El comando de lectura sincronizada retorna el valor almacenado por un determinado 6B11 durante el último comando de muestreo sincronizado.

La sintaxis para el comando de lectura sincronizada es:

\$AA4 (cr)

donde: \$ es el caracter delimitador

AA representa la dirección hexadecimal de 2 caracteres de el módulo de entrada análoga cuyo valor se desea retornar.

4 indica el comando de lectura sincronizada.

(cr) representa el caracter de terminación (carriage return, 0Dh).

La sintaxis de la respuesta obtenida es:

!AA (estado) (dato) (cr) si el comando es válido.

?AA (cr) si se ha introducido un parámetro u operación invalida, si el módulo no ha recibido el comando de muestreo sincronizado por vez primera, o si la conversión no es aún completada.

donde: ! es el caracter delimitador.

? es el caracter delimitador indicador de error.

AA representa la dirección hexadecimal de 2 caracteres del módulo.

(estado) representa un carácter (1 o 0) indicando si el dato muestreado por el módulo durante el último comando de muestreo sincronizado fue retornado previamente. Si (estado) = 1, el dato desde el último comando de muestreo sincronizado está siendo retornado por primera vez. Si (estado) = 0, el módulo retornó el dato desde el último comando de muestreo sincronizado como mínimo una vez antes.

(dato) representa el valor almacenado por un módulo específico durante el último comando de muestreo sincronizado. El módulo retorna el valor en el formato de datos configurado.

(cr) representa el carácter de terminación (carriage return, 0Dh).

Veamos un ejemplo para ejecutar muestreo sincronizado y a su vez retornar 3 datos:

Comando: #\*\* muestreo sincronizado.

Comando: \$004 (cr) pedir retorno de dato 00h.

Respuesta: !001+48.347 (cr) indica que el dato correspondiente al módulo 00h, se pide por vez primera y su valor es +48.347.

Comando: \$014 (cr) pedir retorno de dato 01h.

Respuesta: !011+39.369 (cr) indica que el dato correspondiente al módulo 01h, se pide por vez primera y su valor es +39.369.

Comando: \$024 (cr) pedir retorno de dato 02h.

Respuesta: !020+15.555 (cr) indica que el dato correspondiente al módulo 02h, no es la primera vez que se pide y su valor es +15.555.

### D.3 ESTADO DE LOS MÓDULOS DE ENTRADA ANÁLOGA 6B11

Además de los comandos ya vistos, existen otros 2 cuyo objetivo es conocer el estado de los módulos, ellos son:



Comando de estado de la configuración.



Comando de estado de CJC.

**D.3.1** Comando Estado de la Configuración. Este comando permite leer la configuración de un módulo de entrada análoga específico.

La sintaxis del comando es:

\$AA2 (cr)

donde: \$ es el caracter delimitador.

AA representa la dirección hexadecimal de 2 caracteres del módulo cuya configuración se quiere conocer.

2 indica el comando de estado de configuración.

(cr) representa el caracter de terminación (carriage return, 0Dh).

La sintaxis de la respuesta que se obtiene es:

!AATTCCFF(cr)

donde: ! es el caracter delimitador.

AA representa la dirección hexadecimal de 2 caracteres del modulo.

TT representa el código tipo para conocer el rango de entrada. Ver tabla C2.

CC representa el código de la rata de baudios. Ver tabla C3.

FF es el equivalente hexadecimal del registro de 8 bits que representa atributos adicionales del módulo, tales como el formato de datos, el tiempo de integración y el estado de la suma de comprobación. Ver figura C1.

(cr) representa el caracter de terminación (carriage return, 0Dh).

Por ejemplo, para conocer el estado de configuración del módulo 02h se debe enviar el comando:

\$022 (cr)

Y se obtiene la respuesta:

!02050600 (cr)

indicando que el módulo con dirección 02h está configurado para un rango de entrada de  $\pm 5$  V, a 9600 baudios, tiempo de integración de 50 ms, formato de datos unidades ingenieriles e inactiva la suma de comprobación.

El tiempo en enviar el comando y esperar la respuesta del estado de la configuración es aproximadamente de 14 ms, configurando el módulo a 9600 baudios, en unidades ingenieriles y deshabilitada la suma de comprobación (checksum).

D.3.2 Comando Estado de CJC. Permite leer el valor del sensor CJC (compensación de unión fría) para un módulo 6B11 especificado. El valor es retornado en grados centígrados.

La sintaxis del comando viene a ser:

\$AA3 (cr)

donde: \$ es el caracter delimitador.

AA representa la dirección hexadecimal de 2 caracteres del modulo cuyo sensor CJC se desea leer.

3 indica el comando estado de CJC.

(cr) representa el caracter de terminación (carriage return, 0Dh).

Y la sintaxis de la respuesta obtenida es:

>(dato) (cr) si el comando es valido.

?AA (cr) si se introduce un parámetro u operación invalidos.

donde: > es el caracter delimitador indicador de comando valido.

? es el caracter delimitador indicador de error.

(dato) representa el valor del sensor CJC en grados centígrados. El formato consiste de un signo "+" o "-", seguido por 5 dígitos decimales y un punto decimal. El punto decimal es fijo, la resolución es de 0.1°C.

AA representa la dirección hexadecimal de 2 caracteres del módulo.

(cr) representa el caracter de terminación (carriage return, 0Dh).

Como un ejemplo para conocer el valor del sensor CJC del módulo 01h, tenemos el comando:

\$013 (cr)

una posible respuesta es:

> +0024.9 (cr)

Entonces el valor del sensor CJC para el módulo con dirección 01h es 24.9°C.

El tiempo en enviar el comando y esperar la respuesta del estado del sensor CJC es aproximadamente de 212 ms, configurando el módulo a 9600 baudios, en unidades ingenieriles y deshabilitada la suma de comprobación (checksum).

Los tiempos de comando / respuesta para todas las instrucciones se resume en la tabla C5

Tabla C5. Tiempo para un comando/respuesta, con checksum deshabilitado

|               |               |                  | Time for One Command/ Response (ms) |     |      |      |      |      |       |
|---------------|---------------|------------------|-------------------------------------|-----|------|------|------|------|-------|
|               |               |                  | Baud Rate                           |     |      |      |      |      |       |
| Command       | Output Format | Total Characters | 300                                 | 600 | 1200 | 2400 | 4800 | 9600 | 19200 |
| Data          | Eng. Units    | 13               | 374                                 | 188 | 94   | 48   | 24   | 13   | 7     |
| Data          | Twos Comp.    | 10               | 294                                 | 148 | 74   | 38   | 19   | 10   | 6     |
| Data          | %of FS        | 13               | 374                                 | 188 | 94   | 48   | 24   | 13   | 7     |
| Configuration | n/a           | 16               | 627                                 | 413 | 307  | 253  | 227  | 213  | 207   |
| Calibration   | n/a           | 9                | 440                                 | 320 | 260  | 230  | 215  | 208  | 204   |
| Status        | n/a           | 15               | 428                                 | 214 | 108  | 54   | 28   | 14   | 8     |
| CJC Data      | Eng. Units    | 14               | 573                                 | 387 | 293  | 247  | 223  | 212  | 206   |

Fuente: 6B Series User's Manual, Analog Devices

Y la frecuencia con que se puede enviar cada instrucción a los módulos 6B11 se resume en la tabla C6.

Tabla C6. Rata de escaneo de canales, con checksum deshabilitado

|               |               |                  | Scan Rate - Channels per Second |     |      |      |      |      |       |
|---------------|---------------|------------------|---------------------------------|-----|------|------|------|------|-------|
|               |               |                  | Baud Rate                       |     |      |      |      |      |       |
| Command       | Output Format | Total Characters | 300                             | 600 | 1200 | 2400 | 4800 | 9600 | 19200 |
| Data          | Eng. Units    | 13               | 3                               | 5   | 11   | 21   | 41   | 79   | 146   |
| Data          | Twos Comp.    | 10               | 3                               | 7   | 13   | 27   | 52   | 98   | 179   |
| Data          | %of FS        | 13               | 3                               | 5   | 11   | 21   | 41   | 79   | 146   |
| Configuration | N/a           | 16               | 2                               | 2   | 3    | 4    | 4    | 5    | 5     |
| Calibration   | N/a           | 9                | 2                               | 3   | 4    | 4    | 5    | 5    | 5     |
| Status        | N/a           | 15               | 2                               | 5   | 9    | 18   | 36   | 70   | 130   |
| CJC Data      | Eng. Units    | 14               | 2                               | 3   | 3    | 4    | 4    | 5    | 5     |

Fuente: 6B Series User's Manual, Analog Devices

## E. DIFERENCIACIÓN NUMÉRICA

La serie de Taylor da una formulación para predecir el valor de una función en  $x_{i+1}$  en términos de la función y sus derivadas en una vecindad al punto  $x_i$ .

El primer término de la serie de Taylor es:

$$f(x_{i+1}) \approx f(x_i) \quad \text{Ec. E1}$$

Esta igualdad conocida como *aproximación de orden cero* indica que el valor de  $f$  en el nuevo punto es el mismo que el valor en el punto anterior. La ecuación A1 da una estimación perfecta si la función que se va a aproximar es una constante.

La aproximación a primer orden se obtiene sumando otro término al anterior para obtener:

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + f'(x_i)(x_{i+1} - x_i) \quad \text{Ec. E2}$$

El término adicional de primer orden consiste de la pendiente  $f'(x_i)$  multiplicada por la distancia entre  $x_i$  y  $x_{i+1}$ . Por lo tanto, la expresión ahora representa una línea recta y es capaz de predecir un incremento o un decremento de la función entre  $x_i$  y  $x_{i+1}$ .

Aunque la ecuación A2 puede predecir un cambio, solo es exacta para una línea recta. Por lo tanto, se le agrega a la serie un término de segundo orden para obtener algo sobre la curvatura de la función si es que la tiene:

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + f'(x_i)(x_{i+1} - x_i) + \frac{f''(x_i)}{2!}(x_{i+1} - x_i)^2 \quad \text{Ec. E3}$$

De manera similar, se pueden agregar términos adicionales para desarrollar la expansión completa de la serie de Taylor:

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + f'(x_i)(x_{i+1} - x_i) + \frac{f''(x_i)}{2!}(x_{i+1} - x_i)^2 + \frac{f'''(x_i)}{3!}(x_{i+1} - x_i)^3 + \dots \\ + \frac{f^{(n)}(x_i)}{n!}(x_{i+1} - x_i)^n + R_n \quad \text{Ec. E4}$$

Se incluye un término residual para considerar todos los términos desde  $n+1$  hasta el infinito:

$$R_n = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} (x_{i+1} - x_i)^{n+1} \quad \text{Ec. E5}$$

Donde el subíndice n indica que el residuo es de la aproximación a n-ésimo orden y  $\xi$  es un valor cualquiera de x que se encuentra entre  $x_i$  y  $x_{i+1}$ .

Frecuentemente es conveniente simplificar la serie de Taylor definido un paso  $h = x_{i+1} - x_i$ . En general, la expansión en serie de Taylor de n-ésimo orden es exacta para un polinomio de n-ésimo orden. Para otras funciones continuas diferenciables, como las exponenciales o senoidales, no se obtiene una estimación exacta mediante un número finito de términos.

El valor práctico de la serie de Taylor estriba, en la mayor parte de los casos, en el uso de un número finito de términos que darán una aproximación lo suficientemente cercana a la solución verdadera para propósitos prácticos. La decisión sobre cuántos términos se requieren para obtener una "aproximación razonable" se basa en el término residual de la expansión.

Truncando la serie después del término con primera derivada, se obtiene:

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + f'(x_i)(x_{i+1} - x_i) + R_1 \quad \text{Ec. E6}$$

La ecuación A6 se puede resolver para:

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i} - \frac{R_1}{x_{i+1} - x_i} \quad \text{Ec. E7}$$

La primera parte de la ecuación A7 corresponde a la formula típica para calcular la primera derivada, sin embargo, con el esquema de la serie de Taylor se ha obtenido una estimación del error de truncamiento asociado con esa aproximación de la derivada. Usando las ecuaciones A4 y A5 se obtiene:

$$\frac{R_1}{x_{i+1} - x_i} = \frac{f''(\xi)}{2!} (x_{i+1} - x_i) \quad \text{Ec. E8}$$

Por lo tanto, la estimación de la derivada tiene un error de truncamiento de orden  $x_{i+1} - x_i$ . En otras palabras, el error en la aproximación usando derivadas debe ser proporcional al tamaño del paso. Así, si este se divide a la mitad, entonces se espera que el error de la derivada se reduzca a la mitad.

A la ecuación A7 se le conoce con un nombre especial en el análisis numérico, se le llama *diferencias divididas finitas*. Se puede representar generalmente como:

$$f'(x_i) = \frac{\Delta f_i}{h} + \frac{f''(\varepsilon)}{2!} h \quad \text{Ec. E9}$$

E9

donde a  $\Delta f_i$  se le conoce como la *primera diferencia hacia delante* y a  $h$  se le llama *tamaño del paso*. Se le llama diferencia hacia delante ya que usa los datos  $i+1$  e  $i$  para estimar la derivada. Al término completo  $(\Delta f_i / h)$  se le conoce como *primera diferencia dividida finita*.

Esta diferencia dividida hacia adelante no es sino una de tantas que se pueden desarrollar mediante la serie de Taylor para la aproximación de derivadas numéricas. Por ejemplo, las aproximaciones a primeras derivadas, utilizando las diferencias hacia atrás o las diferencias centrales se pueden desarrollar de una manera similar a la de la ecuación A9. Las primeras usan a  $x_{i-1}$  mientras que las segundas usan información igualmente espaciada alrededor del punto donde está estimada la derivada.

La serie de Taylor se puede expandir hacia atrás para calcular un valor anterior sobre el valor actual, dada por:

$$f(x_{i-1}) = f(x_i) - f'(x_i)h + \frac{f''(x_i)}{2!} h^2 - \dots \quad \text{Ec. E10}$$

Truncando la ecuación después de la primera derivada y ordenando los términos se obtiene:

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1}))}{h} = \frac{\nabla f_i}{h} \quad \text{Ec. E11}$$

donde el error es proporcional a  $h$  y  $\nabla f_i$  indica la *primera diferencia dividida hacia atrás*.

Otra forma de aproximar la primera derivada es restar la ecuación A10 de la A4:

$$f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}) = 2f'(x_i)h + \frac{f'''(x_i)}{3} h^3 + \dots \quad \text{Ec. E12}$$

que se puede resolver para

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{2h} - \frac{f'''(x_i)}{6} h^2 + \dots \quad \text{Ec. E13}$$

La ecuación A13 es una representación de las *diferencias centrales* (o centradas) de la *primera derivada*. Nótese que el error de truncamiento es del orden de  $h^2$  en contraste con las diferencias divididas hacia adelante y hacia atrás, las cuales fueron del orden  $h$ . Por lo tanto el análisis de la serie de Taylor ha llevado a la información práctica de que la

diferencia central es la representación mas exacta de la derivada. Por ejemplo, si se parte el tamaño del paso a la mitad usando diferencias hacia atrás o hacia delante, el error se reducirá aproximadamente a la mitad, mientras que para diferencias centrales, el error se reduce a la cuarta parte.

Junto a la primera derivada, la expansión de la serie de Taylor se puede usar para la estimación numérica de las derivadas de orden superior. Para hacerlo, se escribe una expansión en serie de Taylor hacia adelante para  $f(x_{i+2})$  en términos de  $f(x_i)$  de la siguiente forma:

$$f(x_{i+2}) = f(x_i) + f'(x_i)(2h) + \frac{f''(x_i)}{2}(2h)^2 + \dots \quad \text{Ec. E14}$$

La ecuación A4 se puede multiplicar por 2 y restarse de la ecuación A14 para obtener:

$$f(x_{i+2}) - 2f(x_{i+1}) = -f(x_i) + f''(x_i)h^2 + \dots \quad \text{Ec. E15}$$

que se puede resolver para:

$$f''(x_i) = \frac{f(x_{i+2}) - 2f(x_{i+1}) + f(x_i)}{h^2} \quad \text{Ec. E16}$$

A esta relación se le llama *diferencias divididas finitas hacia adelante de segundo orden*. Se pueden usar procedimientos similares para obtener las versiones hacia atrás y centrales.

Las aproximaciones a tercer orden de las diferencias divididas hacia adelante, hacia atrás y centrales también pueden obtenerse como se muestra a continuación.

Fórmulas de diferencias divididas finitas hacia atrás.

Primera Derivada

Error proporcional a

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1}))}{h} \quad h$$

$$f'(x_i) = \frac{3f(x_i) - 4f(x_{i-1}) + f(x_{i-2}))}{2h} \quad h^2$$

Segunda derivada

$$f''(x_i) = \frac{f(x_i) - 2f(x_{i-1}) + f(x_{i-2}))}{h^2} \quad h$$

$$f''(x_i) = \frac{2f(x_i) - 5f(x_{i-1}) + 4f(x_{i-2}) - f(x_{i-3})}{h^2} \quad h^2$$

**Fórmulas de diferencias divididas finitas hacia adelante.**  
Primera Derivada

Error proporcional a

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{h} \quad h$$

$$f'(x_i) = \frac{-f(x_{i+2}) + 4f(x_{i+1}) - 3f(x_i)}{2h} \quad h^2$$

Segunda Derivada

$$f''(x_i) = \frac{f(x_{i+2}) - 2f(x_{i+1}) + f(x_i)}{h^2} \quad h$$

$$f''(x_i) = \frac{-f(x_{i+3}) - 4f(x_{i+2}) - 5f(x_{i+1}) + f(x_i)}{h^2} \quad h^2$$

**Fórmulas de diferencias divididas finitas centrales.**  
Primera Derivada

Error proporcional a

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1})}{2h} \quad h^2$$

$$f'(x_i) = \frac{-f(x_{i+2}) + 8f(x_{i+1}) - 8f(x_{i-1}) + f(x_{i-2})}{12h} \quad h^4$$

Segunda Derivada

$$f''(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - 2f(x_i) + f(x_{i-1}))}{h^2} \quad h^2$$

$$f''(x_i) = \frac{-f(x_{i+2}) + 16f(x_{i+1}) - 30f(x_i) + 16f(x_{i-1}) - f(x_{i-2}))}{12h^2} \quad h^4$$

## F. REGRESIÓN POLINOMIAL CON MÍNIMOS CUADRADOS

El procedimiento de mínimos cuadrados se puede extender fácilmente y ajustar datos a un polinomio de m-ésimo grado:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m$$

En este caso, la suma de los cuadrados de los residuos es:

$$S_r = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - \dots - a_mx_i^m)^2 \quad \text{Ec. F1}$$

Para determinar los valores de las constantes  $a_0, a_1, \dots, a_m$  se deriva la ecuación B1 con respecto a cada uno de los coeficientes:

$$\frac{dS_r}{da_0} = -2 \sum (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - \dots - a_mx_i^m)$$

$$\frac{dS_r}{da_1} = -2 \sum x_i (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - \dots - a_mx_i^m)$$

$$\frac{dS_r}{da_2} = -2 \sum x_i^2 (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - \dots - a_mx_i^m)$$

$$\frac{dS_r}{da_m} = -2 \sum x_i^m (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - \dots - a_mx_i^m)$$

Estas ecuaciones se pueden igualar a cero y reordenar de tal forma que se obtenga el siguiente conjunto de ecuaciones normales:

$$\begin{aligned} a_0n + a_1 \sum x_i + a_2 \sum x_i^2 + \dots + a_m \sum x_i^m &= \sum y_i \\ a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 + a_2 \sum x_i^3 + \dots + a_m \sum x_i^{m+1} &= \sum x_i y_i \\ a_0 \sum x_i^2 + a_1 \sum x_i^3 + a_2 \sum x_i^4 + \dots + a_m \sum x_i^{m+2} &= \sum x_i^2 y_i \\ \vdots & \\ a_0 \sum x_i^m + a_1 \sum x_i^{m+1} + a_2 \sum x_i^{m+2} + \dots + a_m \sum x_i^{2m} &= \sum x_i^m y_i \end{aligned} \quad \text{Ec. F2}$$

en donde todas las sumatorias van desde  $i=1$  hasta  $n$ . Nótese que las  $m+1$  ecuaciones anteriores son lineales y tienen  $m+1$  incógnitas:  $a_0, a_1, \dots, a_m$ . Los coeficientes de las

incógnitas se pueden calcular de los datos dados. Por lo tanto, el problema de determinar polinomios de  $m$  grado con mínimos cuadrados es equivalente a resolver un sistema de  $m+1$  ecuaciones lineales simultáneas.

El error en la regresión polinomial se puede cuantificar mediante el *error estándar de la aproximación*:

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{S_r}{n - (m + 1)}} \quad \text{Ec. F3}$$

donde  $m$  es el orden del polinomio.

Además del error estándar, se puede calcular también *el coeficiente de correlación*:

$$r^2 = \frac{S_v - S_r}{S_v} \quad \text{Ec. F4}$$

ya que

$$S_v = \sum_{i=1}^n \left( y_i - \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right) \quad \text{Ec. F5}$$

Para un ajuste perfecto,  $S_r = 0$  y  $r^2 = 1$ .